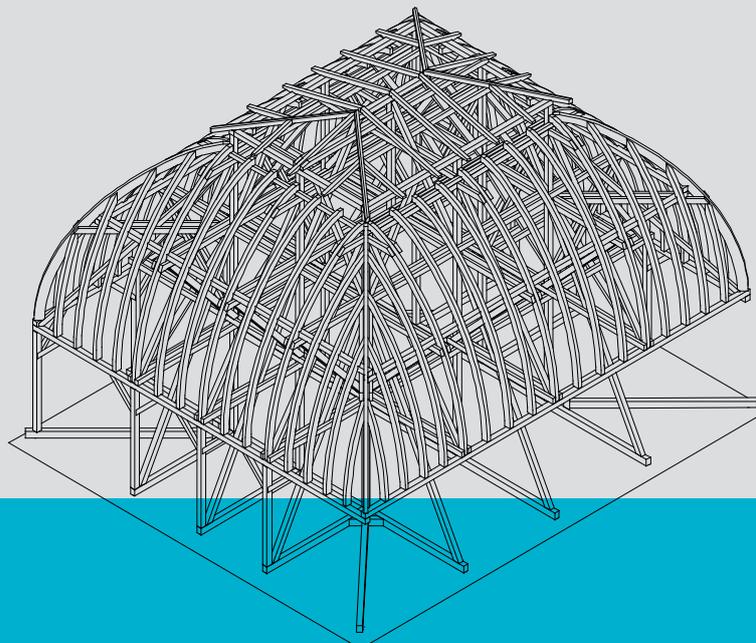


Bestandserfassung und -analyse hölzerner Dachkonstruktionen am Beispiel der Hauptkuppel der „Alten Technik“ der TU-Graz



M-4-05/2017



Johannes Peter HARRAUER
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Johannes Peter Harrauer, BSc.

Bestandserfassung und –analyse hölzerner Dachkonstruktionen am Beispiel der Hauptkuppel der „Alten Technik“ der TU-Graz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Raimund Sieder
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Juni 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

„Bauen im Bestand“ entwickelte sich in den letzten Jahren aufgrund begrenzter räumlicher und finanzieller Ressourcen zu einer eigenen Branche im Bauwesen und erweiterte das Aufgabenspektrum des Bauingenieurs um ein durchaus forderndes und interessantes Tätigkeitsfeld. Insbesondere ungenutzte Dachräume in dicht verbauten, innerstädtischen Gebieten eröffnen durch deren Ausbaubarkeit ungeahnte Möglichkeiten zur Wohn- und Nutzflächenerweiterung im urbanen Raum. Das Erschließen dieser Dachräume hat dabei mit Bedacht auf die Bestimmungen des Denkmalschutzes und den Grundsätzen des Bestandschutzes zu erfolgen. In den einleitenden Kapiteln dieser Masterarbeit werden diesbezüglich wichtige Festlegungen zum Umgang mit dem Baubestand zusammengetragen und eine Methodik zur Erhebung und Zustandsbeurteilung älterer, hölzerner Dachtragwerke vorgestellt. Dabei wird auch die Bedeutung einer regelmäßigen Wartung, Inspektion und Instandsetzung betont, da nur durch diese Maßnahmen die Dauerhaftigkeit und der Schutz der Konstruktion sichergestellt werden kann. In den Hauptkapiteln wird der Fokus auf das hölzerne Hauptkuppeldachtragwerk des Hauptgebäudes der Technischen Universität Graz gelegt. Zunächst werden vorhandene Archivunterlagen ausgehoben und ein zeitgeschichtlicher Überblick über die Baugeschichte des Hauptgebäudes der Technischen Universität Graz erstellt. Danach wird das Hauptkuppeltragwerk der „Alten Technik“ einer intensiven Bestandserfassung unterzogen. Neben der Evaluierung des Bauzustandes der Konstruktion wird auch eine Bestandsdokumentation in Form von Naturmaßplänen und Anschlussdetailzeichnungen angefertigt. Diese Dokumentation umfasst dabei alle relevanten Abmessungen der Kuppel, die Dimensionen aller zur Tragstruktur gehörenden Holzbauteile sowie eine Analyse der verbauten Holzqualität. Komplettiert wird diese Bestandserfassung durch eine Schadensanalyse, die auf Basis mehrerer Erkundungsdurchgänge und in-situ Messungen im Tragwerk durchgeführt wird. Aufgefundene Schädigungen und Detailausprägungen des Dachtragwerkes werden fotografisch dokumentiert und anhand eines eingeführten Achsensystems im Tragwerk verortet. Abschließend wird das Kuppeltragwerk einer baustatischen Analyse unterzogen, um das Tragverhalten, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit zu ermitteln. Die angestellten Berechnungen werden auf Basis des aktuell gültigen Eurocodes durchgeführt und erlauben somit eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Konstruktion nach dem heutigen Stand der Technik.

Abstract

“Adapting existing buildings”, has become increasingly popular in the last few years due to limited spatial and financial resources and has established itself as a separate business within the building industry. There are numerous possibilities to create new usable space for housing. One example is the adaption of unused attic spaces in densely built-up intra-urban areas. In this case provisions for the preservation and protection of Monuments need to be considered. The introductory chapters in this thesis collect those principles of conservation and introduce a method for recording and assessing the condition of existing, traditional wooden roof structures. Methods to improve the longevity of roof structure systems, such as regular maintenance, inspection and routine repair work are highlighted in these chapters. The main section of the thesis focuses on the principal wooden roof dome of the headquarters of the Graz University of Technology. First, a collection of archived documents regarding the building’s history are shown to give a brief chronological overview. Furthermore, an intensive investigation of the dome roof structure of the so called “Alte Technik” will be presented. In addition to the evaluation of the roof’s structural condition, a comprehensive set of plans is part of this thesis. This set consists of as-completed drawings and detailed construction plans. The relevant dimensions of the main supporting structure, including cross-section dimension of construction members, are shown in these construction drawings. To determine the timber quality of the supporting components, they will be visually inspected and graded. To complete the analysis, an investigation of structural failure and local damage, using simple visual examination methods, drilling resistance instruments and wood moisture measurements was done. All discovered damages are photo-documented and assigned according to a predefined axis grid. Finally the roof structure is calculated using structural analysis software. In order to achieve a statement regarding the structural reliability, the members were designed according to the current valid Eurocode.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1 EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION.....	1
1-2 ZIELSETZUNG	2
1-3 INHALTSÜBERSICHT	3
KAPITEL 2 DENKMALSCHUTZ.....	5
2-1 WICHTIGKEIT DES DENKMALSCHUTZES	5
2-2 BASISDOKUMENTE DES DENKMALSCHUTZES	6
2-3 GRUNDBEGRIFFE DES DENKMALSCHUTZES	7
2-4 GRAZER ALTSTADT ERHALTUNGSGESETZ	11
2-5 DENKMALSCHUTZ VS. ZEITGEMÄSSE NUTZUNG	14
KAPITEL 3 ZUSTANDSBEURTEILUNG UND INSTANDSETZUNG	15
3-1 METHODIK.....	15
3-2 STUFE I – ZIELANALYSE	16
3-2.1 Nutzen der Zielanalyse	16
3-2.2 Komplexität „Bauen im Bestand“	17
3-3 STUFE II – BESTANDSERFASSUNG	18
3-3.1 Projektbeteiligte.....	18
3-3.2 Hauptaufgaben der Bestandserfassung	19
3-3.3 Vorgehensweise bei einer Bestandserfassung	20
3-3.4 Aufmaß und Dokumentation	21
3-4 STUFE III – SCHADENSANALYSE	24
3-4.1 Nutzen der Schadensanalyse	24
3-4.2 Klassifizierung der Schadensarten.....	25
3-4.3 Von der Schadenserfassung zur Schadensanalyse.....	26
3-4.4 Funktionsweise der Holzfeuchtemessung	28
3-4.5 Funktionsweise der Bohrwiderstandsmessung	31
3-5 STUFE IV – BAUZUSTANDSANALYSE	34
3-5.1 Datengrundlage und Abschnittsfestlegung für die Zustandsbeurteilung.....	35
3-5.2 Einführung eines Notenschlüssels	36
3-5.3 Beurteilungsschema.....	38
3-5.4 Erläuterungen zum Beurteilungsschema	39
3-6 STUFE V – PLANUNG BAULICHER MASSNAHMEN.....	42
3-6.1 Grundsätze für den Umgang mit historischen Tragwerken.....	43
3-7 STUFE VI – AUSFÜHRUNG	44
3-7.1 Anerkannte Regeln der Technik.....	44

3-7.2	Instandsetzungsmethoden	45
3-7.3	Prüfung der Ausführung	47
3-8	STUFE VII – INSTANDHALTUNG	48
3-8.1	Vorraussetzungen für die Instandhaltung	48
3-8.2	Ausmaß der Inspektion	48
3-8.3	Inspektionsintervalle	49
3-8.4	Ausmaß der Wartungstätigkeit	49
3-8.5	Zweck der Inspektion und Wartung.....	49
KAPITEL 4 GESCHICHTE DER „ALTEN TECHNIK“		51
4-1	UNIVERSITÄTEN IN ÖSTERREICH.....	51
4-2	LANGER WEG ZUM NEUBAU: VOM LESLIEHOF ZUR „ALTEN TECHNIK“.	54
4-3	DIE BAUGESCHICHTE DER „ALTEN TECHNIK“	61
4-4	UNTER DER HAUPTKUPPEL: VESTIBÜL, HAUPTSTIEGE UND FESTSAAL.	65
KAPITEL 5 BESTANDSERFASSUNG DER HAUPTKUPPEL		67
5-1	EINLEITUNG: DACHLANDSCHAFT „ALTE TECHNIK“	67
5-2	I – ZIELSETZUNG	73
5-2.1	Konkretisierung der Aufgabenstellung und Nutzungsziele	73
5-2.2	Festlegung des Detaillierungsgrades bei der Bestandsaufnahme.....	73
5-3	II – BESTANDSERFASSUNG.....	74
5-3.1	Allgemeine Eckdaten.....	74
5-3.2	Bauhistorie der Hauptkuppel	75
5-3.3	Materialien.....	82
5-3.4	Tragsystem der Hauptkuppel	99
5-3.5	Zimmermannsmässige Anschlüsse	111
5-3.6	Durchgeführte Messungen in der Hauptkuppel	135
5-4	III – SCHADENSANALYSE.....	146
5-4.1	Schaden E0-(A-1): vollständig zerstörtes Bundtramaufleger	147
5-4.2	Bereich E0-(D-2): Initialsetzung der Eisenaufhängung.....	148
5-4.3	Schaden E0-(B-3): abgeklungener Insektenbefall an Hilfskonstruktion	148
5-4.4	Schaden E1-(B-5): defekte Traufenrinne.....	149
5-4.5	Bereich E1-(A-1): Altholzverwendung.....	150
5-4.6	Bereich E1-(A-3): Diagonalverstrebung.....	150
5-4.7	Schaden E4-(B-4): Schadhafte Blecheindeckung des Laternendaches.....	151
5-4.8	Sonstige festgestellte Bereiche	151
5-4.9	Schadenskartierung.....	153
5-5	IV – BAUZUSTANDSANALYSE	155
5-6	V - PLANUNG DER BAULICHEN MASSNAHMEN.....	157

5-7	VI - AUSFÜHRUNG	157
5-8	VII - INSTANDHALTUNG	157
KAPITEL 6 STATISCHE MODELLBILDUNG DER HAUPTKUPPEL		159
6-1	ZIEL DER MODELLBILDUNG	159
6-2	BASIS DES BERECHNUNGSMODELLS	160
6-2.1	Festlegung der Systemgeometrie und Querschnittabmessungen.....	160
6-2.2	Festlegung der Art der Modellbildung	161
6-2.3	Festlegung des Koordinatensystems.....	162
6-2.4	Festlegung zur Modellbildung zimmermannsmässiger Verbindungen	163
6-2.5	Festlegung zur Modellbildung von Anschlusskonzentritäten	163
6-2.6	Festlegung zur Modellbildung von Tragwerksauflagern.....	166
6-2.7	Festlegung der Lastannahmen und Einwirkungskombinationen	167
6-2.8	Festlegung der mechanischen Materialeigenschaften	167
6-3	LASTEN UND EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN	169
6-3.1	Eigengewicht und ständige Lasten	169
6-3.2	Nutzlasten	170
6-3.3	Schneelasten	170
6-3.4	Windlasten.....	172
6-3.5	Lastfallkombinationen.....	177
6-4	STEIFIGKEITEN DER ANSCHLUSSDETAILS	179
6-4.1	Anschlusssteifigkeit von „Versatzverbindungen“	181
6-4.2	Anschlusssteifigkeit von „einfachen geraden Zapfenverbindungen“	184
6-4.3	Anschlusssteifigkeit von „schrägen, abgestirnten Zapfenverbindungen“	185
6-4.4	Anschlusssteifigkeit von „Voll-, Mittel- und Halbkammverbindungen“	187
6-4.5	Anschlusssteifigkeit von „Kreuzkammverbindungen“.....	190
6-4.6	Anschlusssteifigkeit und Tragfähigkeit von „Hängeisenverbindungen“	191
6-4.7	Ergebnisse der Anschlusssteifigkeitsermittlungen	194
6-5	MODELLBILDUNG	198
6-5.1	Allgemeine Anmerkungen zur Modellbildung.....	198
6-5.2	Übersicht der Berechnungsmodelle.....	199
6-5.3	Besonderheiten bei der Modellierung der Stabendgelenke und Anschlüsse	200
6-5.4	Berechnungsergebnisse	203
KAPITEL 7 RESÜMEE UND AUSBLICK.....		209

ANHANG

Anhang A	VERZEICHNISSE.....	A-1 bis A-11
Anhang B	BESTANDSPLÄNE NACH NATURMASS	siehe Planliste
Anhang C	DETAILBLÄTTER DER VERBINDUNGEN	siehe Planliste
Anhang D	ANSCHLUSSSTEIFIGKEITEN	D-1 bis D-23
Anhang E	WINDLASTBERECHNUNG	E-1 bis E-11
Anhang F	STABTRAGWERKSBERECHNUNG	F-1 bis F-55

KAPITEL 1 EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION

„Es wird eng im Reich der Mitte“

„Die Presse“ am 07.01.2017

„Deutsche Städte platzen aus allen Nähten“

„Welt“ am 06.12.2016

„America’s urban future“

„The New York Times“ am 16.04.2014

„Latin America struggles to cope with record urban growth“

„The Guardian“ am 11.09.2012

Diese ausgewählten Schlagzeilen einiger, in den letzten Jahren veröffentlichten Zeitungsartikel lassen eine Problematik erkennen, die offenbar Städte auf dem gesamten Globus betrifft - *Platzmangel*. Die „Speckgürtel“ der Großstädte werden immer weiter ausgedehnt und dort, wo noch freier innerstädtischer Bauplatz vorhanden ist, ragen meist bereits nach kurzer Zeit die ersten Baukräne in den Himmel. Der Bedarf an Wohn-, Büro-, und Arbeitsraum in den Städten wird in den kommenden Jahren weiterhin zunehmen, darüber sind sich die in den Zeitungsartikeln zitierten Experten einig. Mancherorts sind noch Kapazitäten vorhanden, um mit groß angelegten Stadtteilneubauprojekten (z. B.: Hamburger HafenCity) dem steigenden Bedarf an „Raum“ gerecht werden zu können. Andere Großstädte wiederum konzentrieren sich auf die Erweiterung vorhandener, urbaner Bausubstanz, um in Stadtverdichtungsprojekten neue Nutzflächen schaffen zu können. Vorhandene Bausubstanz findet man auch in Österreich zur Genüge. Aus den von MEISEL (vgl. [39]) angestellten Recherchearbeiten im Rahmen seiner Dissertation geht hervor, dass in Österreich rund 2.050.000 Gebäude existieren. Etwa ein Fünftel dieser Bauwerke wurde vor Ende des 1. Weltkrieges errichtet und ist demnach bereits mehr als 100 Jahre alt. Viele diese Gebäude sind inzwischen, aufgrund ihrer Geschichtsträchtigkeit, historischen Bedeutung und architektonischen Bauform durch den Denkmalschutz als besonders schützenswert eingestuft. Diese, aber auch andere, nicht unter Denkmalschutz stehenden Gebäude haben es verdient, für die nächsten Generationen erhalten und einer Nutzung zugeführt zu werden. Dabei geht es insbesondere darum, die Bausubstanz im Original zu belassen, diese möglichst vor Zerstörung und Veränderung zu schützen und neu hinzugefügte Konstruktionen und Reparaturen als solche erkennbar auszuführen. Dies wird unter anderem auch in der Charta von Burra [62], der Charta von Venedig [61] sowie zahlreichen gesetzlichen Bestimmungen zum Denkmalschutz gefordert. Neben diesen denkmalschutzrechtlichen Argumenten sprechen auch noch weitere ökonomische, ökologische als auch architektonische Aspekte für die Erhaltung älterer Bausubstanz (vgl. [39]). So kann beispielsweise der sorgsame Umgang mit der vorhandenen Bausubstanz sowie eine regelmäßige Wartung und Instandhaltung derselbigen wesentlich zur nachhaltigen Ressourcennutzung beitragen. Insbesondere historische Konstruktionen, die bereits mehrere hundert Jahre überdauern, sind Zeugnisse vergangener Epochen und repräsentieren den Ideenreichtum, den Geist und die Gesinnung der zu dieser Zeit lebenden Menschen. Oftmals trifft man, insbesondere bei historischen, mittelalterlichen Dachtragwerken auf bereits vergessene Zimmermannskunst, die in ihrer gestalterisch-konstruktiven Form nicht mehr reproduzierbar ist. Diesen

unnachahmlichen Charakter gilt es zu erhalten und auch in der heutigen Zeit, beispielsweise als architektonisches Gestaltungselement für einen geplanten Dachgeschoßausbau zu nutzen. Wird eine Um- oder Neunutzung vorgesehen, gilt es, die Forderungen des Denkmalschutzes mit den erforderlichen baulichen Maßnahmen im Baubestand zu vereinbaren. Dieser Planungs- und Ausführungsprozess bei einem Umbauprojekt erfordert detaillierte Kenntnisse zur vorliegenden Bauwerksstruktur sowie ein umfangreiches Wissen über die Bautechnik und Baustofftechnologie vergangener Zeit. „Bauen im Bestand“ unterscheidet sich grundsätzlich vom Neubau. Nach HOLZER (vgl. [11]) ist es zwingend erforderlich, das vorliegende Tragwerk im Hinblick auf konstruktive Ausprägungen, Beschaffenheit und Schäden im Vorfeld zu untersuchen, bevor mit den Planungsmaßnahmen begonnen werden kann.

Der Erbau historischer Dachtragwerke basierte bis ins 19. Jahrhundert auf Erfahrung, dem Traditionsbewusstsein und der Handwerkskunst des Zimmermannes. Ohne vorangehende baustatische Berechnungen wurden erstaunliche hölzerne Konstruktionen errichtet, um mit ihnen Kathedralen, Kirchen, Hallen, aber auch kleinere Wohnhäuser und Zweckbauten zu überdachen. Durch das Vertrauen in die Tragfähigkeiten des Baustoffes Holz und der ausgeklügelten konstruktiven Durchbildung der Tragwerke schufen Bauingenieure und Zimmerer erstaunliche Konstruktionen, die Jahrhunderte überdauerten und bis heute an Wertschätzung keineswegs verloren haben. Wird versucht, das Lastabtragungsprinzip und die Tragfähigkeit dieser, meist räumlich ausgebauten hölzernen Tragsysteme anhand eines computergestützten Berechnungsmodells realitätsnahe abzubilden, ist es trotz der heute vorhandenen Rechenleistung nicht immer möglich, richtige Ergebnisse zu erzielen. Dies spricht für die damalige Komplexität der Baukunst und macht die Bearbeitung dieser Konstruktionen für den planenden Ingenieur zur besonderen Herausforderung. Das „Arbeiten“ mit diesen historischen Konstruktionen ist nach Meinung des Verfassers dieser Masterarbeit besonders reizvoll, zwingen diese den Bauingenieur doch, die heute üblichen Berechnungs- und Konstruktionsmethoden mit dem traditionellen, über Generationen entstandenen Zimmermannshandwerk zusammenzuführen.

1-2 ZIELSETZUNG

Steigende Studierendenzahlen sowie Anforderungen, welche heutige Lehrmethoden an die Hochschulgebäude stellen, machen auch vor der Technischen Universität Graz nicht halt. Daher finden gegenwärtig umfangreiche Um- und Ausbaurbeiten im Hauptgebäude der Technischen Universität Graz, der sogenannten „Alten Technik“ statt, um im Herbst dieses Jahres rund 1000m² neu geschaffene, als Büro und Studiofläche nutzbare Dachbodenflächen an die Bediensteten und Studierenden der Architekturfakultät zu übergeben. Diesem Dachgeschoßausbau vorgängig war eine Bestandserfassung und -analyse der bestehenden Dachkonstruktion in den Regeltrakten der Dachlandschaft des Universitätsgebäudes. Eine derartige Bestandserhebung soll im Rahmen dieser Masterarbeit nun auch für die zentral über dem nördlichen Eingangsbereich befindliche hölzerne Hauptkuppelkonstruktion durchgeführt werden. Dabei sollen alle maßgebenden Abmessungen der Kuppel, die Dimensionen aller zur Kuppelkonstruktion gehörenden Holzbauteile sowie das Tragsystem mitsamt den Knotendetails erfasst und anhand von Bestandsaufmaßplänen dargestellt werden. Darauf aufbauend wird eine Stabwerksberechnung des Bestandstragwerkes durchgeführt, um die Tragfähigkeit der Hauptkuppelkonstruktion nach dem heute gültigen Normenstand zu ermitteln. Zudem werden geeignete Methoden angewendet, um schadhafte Bereiche der Konstruktion zu erheben und zu dokumentieren. Diese Schadensanalyse wird durch eine Schadensursachenermittlung und eine verortete Fotodokumentation komplettiert, die für eine spätere Erstellung eines Gutachtens verwendet werden kann. Zusätzlich zu diesen in-situ durchzuführenden Erhebungen im Tragwerk werden vorhandene, den Kuppelbau betreffende Unterlagen im Archiv der Technischen Universität Graz ausgehoben. Aus den vorhandenen Archivunterlagen wie Bestandsplänen, Abrechnungsbüchern, Schriftverkehr, usw. soll die Baugeschichte der „Alten Technik“ mit dem Fokus auf die Errichtung der Hauptkuppel und der umliegenden Dachlandschaft ergründet werden.

Begleitet wird diese Bestandserfassung und -analyse des Kuppeldachtragwerkes von zwei theoretischen Kapiteln zu den Themenschwerpunkten „Denkmalschutz“ und „Methodik in der Zustandsbeurteilung und Instandsetzung alter Holzkonstruktionen“.

1-3 INHALTSÜBERSICHT

Diese Masterarbeit ist in sieben Hauptkapitel gegliedert und wird durch sechs weitere Kapitel im Anhang komplettiert. Es wird empfohlen, die angeführten Kapitelquerverweise zu diesen Anhängen zu nutzen, sodass die Inhalte der einzelnen Textpassagen einfacher verstanden und besser nachvollzogen werden können.

Dieses **1. Kapitel** dient der Einführung in das Thema und definiert die grundlegenden Ziele der vorliegenden Masterarbeit.

Im **2. Kapitel** werden die grundlegenden Bestimmungen und Basisdokumente des Denkmalschutzes angeführt sowie die wesentlichen Fachtermini und Begriffsdefinitionen erläutert. Dem Hauptthema der Arbeit geschuldet, wird auch auf die Inhalte des Grazer Altstadt Erhaltungsgesetzes (GAEG) und auf die Wichtigkeit der Denkmalpflege hingewiesen.

Das **3. Kapitel** dient der Vorstellung einer möglichen Methodik zur Zustandsbeurteilung und Instandsetzung alter Dachkonstruktionen aus Holz. Dieses Kapitel wurde in Anlehnung an die Dissertation von Andreas MEISEL [39] gestaltet und zeigt anhand eines, in sieben Stufen gegliederten Projektablaufes eine empfohlene Vorgehensweise bei der Abwicklung von Umbau- und Instandsetzungsprojekten im Baubestand. In den zugehörigen Unterkapiteln werden zahlreiche Tipps und Empfehlungen für die Bau- und Planungspraxis abgegeben. Dieses Kapitel dient als Grundlage für die im Hauptabschnitt dieser Masterarbeit angestellten Untersuchungen an der Hauptkuppel der „Alten Technik“.

Sozusagen als Einstieg in den Hauptteil der Masterarbeit werden im **4. Kapitel** die Bau- und Gründungsgeschichte der Technischen Universität Graz und dessen Hauptgebäude dargestellt. Das Kapitel reiht die wichtigsten Zeitgeschehnisse chronologisch aneinander, um interessante Informationen zur Entstehungsgeschichte des Hauptgebäudes, sozusagen vom Planungsbeginn bis zur Baufertigstellung, anzuführen. Dieses Kapitel wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Archiv der Technischen Universität Graz erstellt. An dieser Stelle sei besonders dem Leiter des Archivs, Mag.phil. Dr.phil Bernhard Reismann gedankt, ohne dessen Hilfe dieses Kapitel nicht in diesem Umfang hätte gestaltet werden können.

Das **5. Kapitel** ist dem Kernthema der Masterarbeit gewidmet. Hier wird die in Kapitel 2 vorgestellte Methodik auf die Bestandserfassung des Hauptkuppeltragwerkes der „Alten Technik“ angewendet und die Untersuchungsergebnisse entsprechend der einzelnen Projektstufen aufbereitet. Das Kapitel beinhaltet zahlreiche Fotoaufnahmen und Messergebnisse, die im Rahmen dieser Masterarbeit direkt vor Ort aufgenommen wurden. Das Kapitel wird durch die in den Anhängen B und C beiliegenden Planunterlagen komplettiert. Diese Planunterlagen sind allesamt nach dem Naturmaß erstellt. Die abschließend durchgeführte Schadens- und Bauzustandsanalyse kann als Gutachten verstanden werden, das die Beschaffenheit der vorgefundenen Konstruktion bewertet.

Im **6. Kapitel** wird das Hauptkuppeltragwerk einer baustatischen Analyse unterzogen. Die Berechnung wird an einem Stabtragwerksmodell durchgeführt und auf Basis der aktuell geltenden Normenbestimmungen des Eurocodes vorgenommen. Neben der normenkonformen Lastaufstellung wird auch auf die Bedeutsamkeit hinsichtlich der Modellierung von Anschlussnachgiebigkeiten und deren Einfluss auf die Schnittgrößen hingewiesen. Die Berechnungsergebnisse werden in diesem Kapitel derart aufbereitet, dass sowohl eine Aussage über das Tragverhalten als auch über die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion getroffen werden kann.

Das abschließende **7. Kapitel** fasst die Ergebnisse der Masterarbeit kurz zusammen und wagt einen kurzen Ausblick in die Zukunft des Hauptkuppeldachtragwerkes der „Alten Technik“.

KAPITEL 2 DENKMALSCHUTZ

2-1 WICHTIGKEIT DES DENKMALSCHUTZES

Derzeit laufen riesige innerstädtische Stadtentwicklungsprogramme, wie beispielsweise der Neubau eines gesamten Stadtteils, der sogenannten „Hamburger HafenCity“. Als eines der größten Städtebauprojekte Europas zeugt es davon, dass dem enormen Bevölkerungszuwachs in großen Ballungszentren kaum mehr nachgekommen werden kann. Im Falle dieses Hamburger Großprojektes steht der frei bebaubare Platz zur Verfügung, doch das ist in diesem Ausmaß eher die Ausnahme. Vielmehr sind freie Bauplätze in Großstädten bereits „Mangelware“ und stellen eine rare und deshalb kostbare räumliche und finanzielle Ressource dar. Ein Großteil der zukünftigen Bau- und Planungsaufgaben wird sich also dem vorhandenen, „überlieferten“ Baubestand widmen müssen, um diesen entsprechend dem steigenden Verlangen der Menschen nach „*Wohnen in der Stadt*“ und „*Arbeiten in der Stadt*“ zu adaptieren. Tatsächlich ist bereits schon heute ein Trend hin zum „*Bauen im Bestand*“ erkennbar und etabliert sich mehr und mehr als eigene Branche im Bauwesen. Nach MEISEL [39] beträgt der Anteil derartiger Baumaßnahmen im Bestand bereits 60% des gesamten Bauvolumens. Dabei unterscheidet sich das Bauen im Bestand ganz wesentlich von Neubauten, ist man dabei doch mit gänzlich anderen Randbedingungen, die die vorhandenen Bauwerksstrukturen mit sich bringen, konfrontiert. Doch nicht nur die vorhandene Bausubstanz an sich stellt planende Ingenieure und Architekten vor interessante Aufgaben. Unweigerlich werden sie sich neben ihrer planerischen Tätigkeit auch mit dem weitreichenden Thema des Denkmalschutzes auseinandersetzen müssen. Gemäß § 3 Abs. 4 des Denkmalschutzgesetzes [69] verpflichtet sich das Bundesdenkmalamt bis spätestens 30. Juni eines jedes Kalenderjahres eine Liste zu veröffentlichen, die jene unbeweglichen Denkmäler auflistet, die auf Grund eines rechtskräftigen Bescheids oder per Verordnung unter Denkmalschutz stehen (vgl. [93]). Die Liste ist nach Bundesländern, innerhalb der Bundesländer nach Gemeinden, innerhalb der Gemeinden nach Adressen und zwar jeweils alphabetisch bzw. nach Katastralgemeindenummern geordnet. Der Umfang der Schutzmaßnahmen wird in dieser tabellarischen Übersicht nicht angeführt und kann nur dem jeweiligen Bescheid entnommen werden.

Tab. 2.1: *Unbewegliche Denkmäler in Österreich mit dem Stichtag 01.01.2017 [93]*

Burgenland	Kärnten	Niederösterreich	Oberösterreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Wien
2.058 Objekte	2.781 Objekte	10.438 Objekte	5.775 Objekte	2.174 Objekte	4.893 Objekte	4.812 Objekte	1.577 Objekte	3.258 Objekte

Aus dieser Liste geht hervor, dass mit Jahresende 2016 exakt 37.766 Objekte in Österreich unter Denkmalschutz gestellt sind. Die Stadt Graz ist in dieser Statistik mit 872 unter Schutz gestellten Baudenkmalern vertreten.

Angesichts dieser Zahlen stellt sich nun mit Recht die Frage, welche für den Bau relevanten Gesetze, Verordnungen und Bestimmungen mit dem Denkmalschutz verbunden sind. Ebenso ist es für den Bauingenieur in diesem Zusammenhang besonders wichtig, mit diesen oftmals historisch-kulturell entstandenen Denkmälern und den damit verbundene Werten sorgsam umzugehen. Er sollte die wichtigsten Grundbegriffe des Denkmalschutzes kennen und diese auch in seine Überlegungen einfließen lassen. Leider haftet dem Denkmalschutz auch der Ruf an, er stelle eine Schikane für den Bauherrn als auch für den planenden Architekten und Ingenieur dar. Hier setzt das nachfolgende, bewusst kurz gehalten Kapitel an und soll dem Leser als Anstoß dienen, sich der Wichtigkeit des Erhalts historischer Bausubstanz bewusst zu werden. Er soll erkennen, dass durch den Denkmalschutz nicht nur materielle Güter in Form von Bauobjekten, Monumenten udgl. erhalten werden, sondern vielmehr auch eine bedeutsames Stück unserer kulturellen Identität vor Zerstörung verschont bleibt.

2-2 BASISDOKUMENTE DES DENKMALSCHUTZES

Die Altstadt von Graz gilt nicht zuletzt dank seiner weitestgehend historisch erhaltenen Dachlandschaft seit Dezember 1999 als Weltkulturerbe. Die UNESCO Welterbekonvention gilt nach wie vor als das erfolgreichste Abkommen, das auf internationaler Ebene zum Schutz des kulturellen und natürlichen Erbes abgeschlossen wurde. Gerade deshalb ist es von besonderer Bedeutung, die gesetzlichen Bestimmungen des Denkmalschutzes zu kennen und diese auch zu berücksichtigen. An dieser Stelle wird bewusst auf eine vertiefte Ausführung des sehr weitreichenden Themas des Denkmalschutzes verzichtet. Einschlägige Beiträge zum Denkmalschutz selbst, aber auch über die Grundsatzdiskussion zu Erhaltung und Schutz des Baubestandes finden sich beispielsweise in [30; 25] und können dem interessierten Leser, der sich diesbezüglich näher informieren möchte, empfohlen werden. Nachfolgend sollen die wesentlichen Grundsätze und Gesetzesbestimmungen, dem Beispiel des Beitrages von SCHICKHOFER in [32] folgend, angeführt werden.

Eine wesentliche und international anerkannte Richtlinie in der Denkmalpflege wurde 1964 mit der Charta von Venedig [61] geschaffen. Dieses Übereinkommen gilt als eines der wichtigsten Dokumente des modernen Denkmalschutzes des 20. Jahrhunderts, beinhaltet es doch zentrale Werte für den Umgang mit Denkmälern. Die Charta fordert, den **historischen Wert** eines Denkmals, gemessen an dessen kulturell-historischen Stellenwert für die wirtschaftlichen, politischen und sozialen Entwicklungen innerhalb einer Epoche, mit dem **Gebrauchswert** des Denkmals zu vereinbaren. Das heißt, Baudenkmäler sollen, obgleich ihrer Schutzwürdigkeit möglichst einer Verwendung, beispielsweise für Wohnzwecke, zugeführt werden. Der historische Wert eines Denkmals ist insofern definiert, dass „*die originale Bausubstanz nicht durch den Ersatz subsumiert werden kann*“ (vgl. [91]) und geht damit weit über den rein kunsthistorischen und architekturstilistischen Wert hinaus.

Natürlich gibt es zahlreiche, über die grundlegenden Werte der Charta von Venedig hinausgehende, gesetzliche Bestimmungen, Verordnungen und Normen. In Bezug auf die Steiermark und den Großraum Graz sollen an dieser Stelle einige der wichtigsten Dokumente, ohne im Detail auf deren Inhalt einzugehen, angeführt werden¹:

Gesetze/Verordnungen:

- Denkmalschutzgesetz (DMSG - Bundesgesetz) [69]
- Steiermärkische Bauordnung (Stmk. BauG - Landesgesetz) [64]
- Ortsbildgesetz (Landesgesetz) [63]
- Grazer Altstadterhaltungsgesetz (GAEG - Landesgesetz) [65]

Hinsichtlich der wichtigsten Gesetzestextpassagen wird an dieser Stelle auf die Ausführungen von SCHICKHOFER in [32] verwiesen.

Normen:

- DIN 31051: 2012 - Grundlagen der Instandhaltung [88]
- ÖNORM EN 13306: 2010 - Begriffe der Instandhaltung [90]
- ÖNORM A 6250-2:2015 - Teil 2: Bestands- & Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten [72]
- SIA 462: 1994 (ausgelaufen) - Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke [74]
- SIA 469: 1997 - Erhaltung von Bauwerken [76]
- SIA 269: 2011 - Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken [87]
- Merkblatt SIA 2017: 2000 - Erhaltungswert von Bauwerken [91]

¹ Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll nur einige, nach Meinung des Verfassers dieser Masterarbeit bedeutsamen Gesetze, Verordnungen und Normen anführen.

2-3 GRUNDBEGRIFFE DES DENKMALSCHUTZES

Immer wieder wird man im Zusammenhang mit Denkmalschutz mit Fachtermini konfrontiert sein, deren Definition je nach Literatur anders gehandhabt wird. Der nachfolgende Glossar soll eine kurze Übersicht über einige der häufig auftauchenden, leicht zu verwechselnden Begrifflichkeiten geben und deren Auslegung bestmöglich formulieren:

„Kulturgut“

gemäß Haager Konvention - 1954 [70] im Originaltext:

For the purposes of the present Convention, the term 'cultural property' shall cover, irrespective of origin or ownership:

- (a) movable or immovable property of great importance to the cultural heritage of every people, such as monuments of architecture, art or history, whether religious or secular; archaeological sites; groups of buildings which, as a whole, are of historical or artistic interest; works of art; manuscripts, books and other objects of artistic, historical or archaeological interest; as well as scientific collections and important collections of books or archives or of reproductions of the property defined above;*
- (b) buildings whose main and effective purpose is to preserve or exhibit the movable cultural property defined in sub-paragraph (a) such as museums, large libraries and depositories of archives, and refuges intended to shelter, in the event of armed conflict, the movable cultural property defined in sub-paragraph (a);*
- (c) centers containing a large amount of cultural property as defined in sub-paragraphs (a) and (b), to be known as 'centers containing monuments'.*

In der freien Übersetzung nach [32] können als „Kulturgut“ im Sinne dieser Konvention, ohne Rücksicht auf Herkunft oder Eigentumsverhältnis also folgende Güter angesehen werden:

- (a) Bewegliches oder unbewegliches Gut, das für das kulturelle Erbe aller Völker von großer Bedeutung ist, wie z. B. Bau-, Kunst- oder geschichtliche Denkmäler religiöser oder weltlicher Art, archäologische Stätten, Gebäudegruppen, die als Ganzes von historischem oder künstlerischem Interesse sind, Kunstwerke, Manuskripte, Bücher und andere Gegenstände von künstlerischem, historischem oder archäologischem Interesse sowie wissenschaftliche Sammlungen und bedeutende Sammlungen von Büchern, Archivalien oder Reproduktionen des oben bezeichneten Kulturguts;*
- (b) Baulichkeiten, die in der Hauptsache und tatsächlich der Erhaltung oder Ausstellung des unter a) bezeichneten beweglichen Gutes dienen, wie z. B. Museen, größere Bibliotheken, Archive sowie Bergungsorte, in denen im Falle bewaffneter Konflikte das unter a) bezeichnete bewegliche Kulturgut in Sicherheit gebracht werden soll;*
- (c) Orte, die in beträchtlichem Umfang Kulturgut im Sinne der Unterabsätze a) und b) aufweisen und als Denkmalorte bezeichnet sind. Jede Schädigung von Kulturgut, gleichgültig welchem Volke es gehört, bedeutet eine Schädigung des kulturellen Erbes der ganzen Menschheit, weil jedes Volk seinen Beitrag zur Kultur der Welt leistet.*

„Denkmal“

gemäß Alois Riegl [30]:

Unter Denkmal im ältesten und ursprünglichen Sinne versteht man ein Werk von Menschenhand, errichtet zu dem bestimmten Zweck, um einzelne menschliche Taten oder Geschicke (oder Komplexe mehrerer solcher) im Bewusstsein der nachlebenden Generationen stets gegenwärtig und lebendig zu erhalten.

gemäß Charta von Venedig [61]:

Der Denkmalsbegriff umfasst sowohl das einzelne Denkmal als auch das städtische oder ländliche Ensemble (Denkmalsbereich), das von einer ihm eigentümlichen Kultur, einer bezeichnenden Entwicklung oder einem historischen Ereignis Zeugnis ablegt. Er bezieht sich nicht nur auf große künstlerische Schöpfungen, sondern auch auf bescheidene Werke, die im Lauf der Zeit eine kulturelle Bedeutung bekommen haben.

gemäß DMSG [69]:

Von Menschen geschaffene unbewegliche und bewegliche Gegenstände von geschichtlicher, künstlerischer oder sonstiger kultureller Bedeutung, wenn ihre Erhaltung dieser Bedeutung wegen im öffentlichen Interesse gelegen ist.

„Denkmalpflege“

gemäß Charta von Burra [62]:

Denkmalpflege meint alle Prozesse der Fürsorge für ein Objekt mit dem Ziel, seinen Denkmalwert zu bewahren. Sie beinhaltet den Unterhalt und, je nach Umständen, die Konservierung, Restaurierung, Rekonstruktion und Anpassung und wird üblicherweise eine Kombination von mehr als einem dieser Verfahren darstellen.

gemäß Christan Raabe [18]:

Unter Denkmalpflege versteht man alle Bemühungen nicht hoheitlicher Art die Pflege und den Schutz des Denkmals betreffend. Dazu gehören die behördlichen Unterstützungen ebenso wie das auf den Denkmalerhalt zielende Engagement aller Beteiligten in Bezug auf Vorsorge, Beratung, Planung, Bau und Nutzung.

„Instandhaltung“

gemäß Christan Raabe [18]:

Die Instandhaltung umfasst die Pflege und die Wartung eines Objektes zur Vermeidung von Schäden durch Verwahrlosung, Brand oder Diebstahl. Mit der Instandsetzung sind alle periodisch nötigen Reparaturen, Ergänzungen, Sicherungen und Auswechslungen gemeint, die sich aber auf das Notwendige beschränken sollten.

gemäß ÖNORM EN 13306:2010 [90]:

Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.

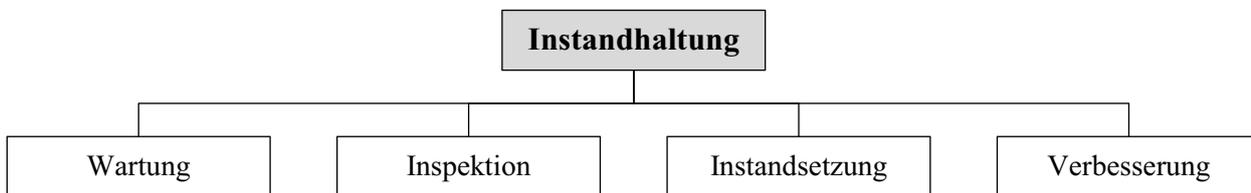


Abb. 2.1: Vier Grundmaßnahmen der Instandhaltung [43]

Wartung: Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaues des vorhandenen Abnutzungsvorganges

Inspektion: Maßnahmen zur Feststellung des Ist-Zustandes der Betrachtungseinheit

Instandsetzung: Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand

Verbesserung: Maßnahmen zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit

„Konservierung“

gemäß Charta von Burra [62]:

Konservierung meint die Erhaltung der Substanz in ihrem bestehenden Zustand und das Verzögern des weiteren Verfalls. [...] Sie ist dann angemessen, wenn der Zustand der Substanz eine eigene Aussagekraft hat und daher Denkmalwert besitzt, oder wenn nicht genügend Informationen vorhanden sind, um andere denkmalpflegerische Verfahren anzuwenden.

gemäß Christan Raabe [18]:

Konservierung nennt man die Erhaltung des vorgefundenen Zustandes eines Objektes, dessen materielle Sicherung sowie die Vermeidung des weiteren Substanzverlustes durch eine Verhinderung von Verfallsprozessen.

„Restauration“

gemäß Charta von Burra [62]:

Restauration meint die Rückführung der bestehenden Substanz eines Objektes in einen bekannten, früheren Zustand durch das Entfernen von Anlagerungen oder durch erneute Zusammenfügung der Komponenten ohne die Einführung neuen Materials. [...] Sie ist nur dann angemessen, wenn es genügend Informationen über einen früheren Zustand der Substanz gibt, und wenn eine Rückführung der Substanz in diesen Zustand den Denkmalwert eines Objektes ablesbar macht

gemäß Charta von Venedig [61]:

[...] Restauration der Denkmäler bilden eine Disziplin, welche sich aller Wissenschaften und Techniken bedient, die zur Erforschung und Erhaltung des kulturellen Erbes beitragen können. [...] Sie ist eine Maßnahme, die Ausnahmecharakter behalten sollte. Ihr Ziel ist es, die ästhetischen und historischen Werte des Denkmals zu bewahren und zu erschließen. Sie gründet sich auf die Respektierung des überlieferten Bestandes und auf authentische Dokumente. [...]

gemäß SIA 469:1997 [76]:

Unter Restauration versteht man das Instandsetzen [...] und das Wiederherstellen der Sicherheit und der Gebrauchstauglichkeit für eine festgelegte Dauer eines Bauwerks von bedeutendem kulturellem Wert unter Bewahrung der vorhandenen Bausubstanz.

„Rekonstruktion“

gemäß Charta von Burra [62]:

Rekonstruktion meint die möglichst genaue Rückführung eines Objektes in einen bekannten Zustand und wird gekennzeichnet durch die Einführung von Materialien (alten oder neuen) in die Substanz. [...] Sie ist nur dann angemessen, wenn ein Objekt durch Beschädigung oder Veränderung unvollständig geworden ist, und wenn sie notwendig für sein Überleben ist, oder wenn sie den Denkmalwert des Objektes als Ganzes ablesbar macht. [...] Sie beschränkt sich auf die Vervollständigung eines reduzierten Ganzen und sollte nicht die Mehrheit der Substanz ausmachen. [...] Die Rekonstruktion sollte bei näherer Betrachtung als neu identifizierbar sein.

gemäß Christan Raabe [18]:

Mit der Rekonstruktion ist die Nachbildung eines ursprünglichen Zustandes nach dem Vorbild alter Pläne, Fotos, Gemälde und Spolien gemeint. In der denkmalpflegerischen Diskussion wird die Rekonstruktion eher negativ konnotiert oder zumindest kontrovers diskutiert. Jede Rekonstruktion ist ein Neubau.

„Revitalisierung“

gemäß Gerhard Schickhofer [32]:

Revitalisierung umfasst die Maßnahmen zur Wiederherstellung einer Funktion (Instandsetzung) [...] Gewöhnlich ist man - zur Erfüllung einer zeitgemäßen Nutzung - auch bestrebt, die vorhandene Bausubstanz im Zuge der Arbeiten zu verbessern.

„Renovierung“

gemäß Christan Raabe [18]:

Die Renovierung benennt umfassende und tiefgreifende Maßnahmen, die mit einer umfangreichen Zerstörung der Substanz verbunden sind. Gründe können das Bauordnungsrecht sein oder Nutzeranforderungen. Es handelt sich in der Regel um eine Verfälschung und Entwertung des Denkmals.

2-4 GRAZER ALTSTADT ERHALTUNGSGESETZ

Zumal in dieser Masterarbeit überwiegend die Hauptkuppel des Hauptgebäudes der Technischen Universität Graz bearbeitet wird und sich dieses Gebäude in der sogenannten Schutzzone III (grün) befindet, sollen in diesem Kapitel auch die Inhalte des Grazer Altstadt Erhaltungsgesetz [65] auszugsweise angesprochen werden. Der örtliche Anwendungsbereich des GAEG erstreckt sich auf jene Stadtteile von Graz, die in ihrer landschaftlichen und baulichen Charakteristik das Stadtbild prägen und daher in ihrem Erscheinungsbild, ihrer Baustruktur und Bausubstanz sowie in ihrer vielfältigen urbanen Funktion zu erhalten sind. Das Gesetz wurde 1980 in einem langen Abstimmungsprozess vollständig überarbeitet und trat in seiner bis heute gültigen Fassung mit 1. Dezember 2008 in Kraft. In diesem neuen Altstadterhaltungsgesetz wird explizit festgehalten, dass es einen Beitrag zur Erhaltung der Grazer Altstadt als UNESCO-Welterbestätte leisten soll (vgl. [99]). Vorweg soll eine wesentliche Kernbestimmung des GAEG erläutert werden - die Unterteilung des Stadtgebietes in sogenannte **Schutz-zonen**.

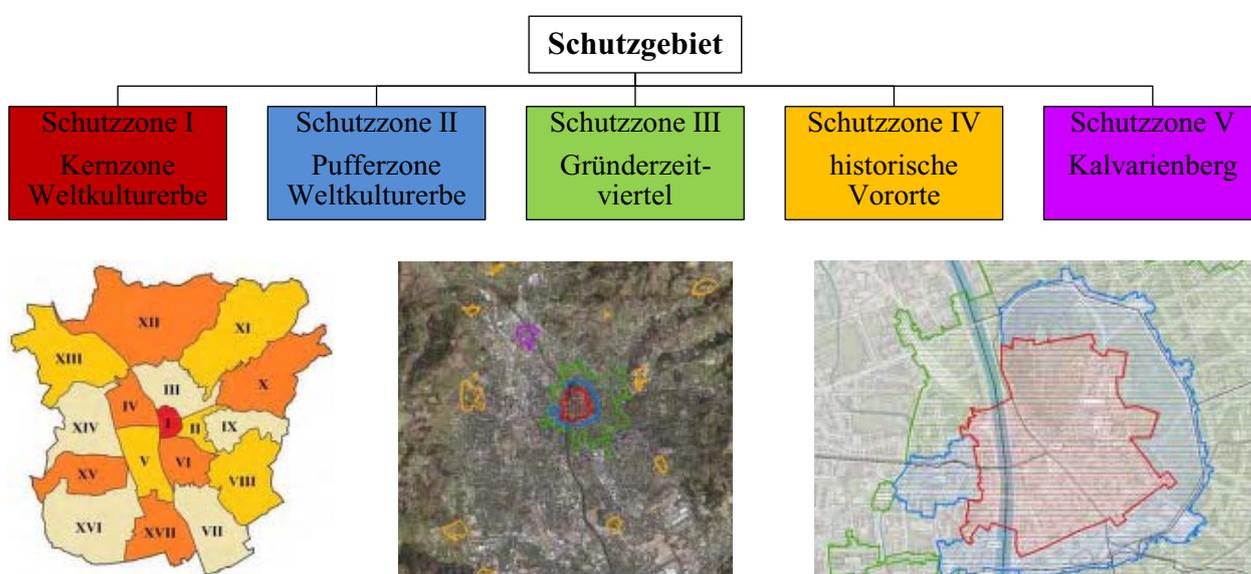


Abb. 2.2: Unterteilung des Grazer Stadtgebietes in Schutz-zonen [100]
links: Grazer Stadtbezirke [95]; Mitte: Schutz-zonenübersicht; rechts: Kern- und Pufferzone [100]

Die Lage und der Umfang der einzelnen Schutz-zonen gemäß GAEG² sind im Folgenden kurz beschrieben, damit der Graz-affine Leser einen besseren Bezug herstellen kann (vgl. [97]).

Schutz-zone I

Die im Gesetz festgelegte Schutz-zone I ist nahezu gleichbedeutend mit jener von der UNESCO in den Status des Weltkulturerbes erhobenen *historischen Altstadt Graz* und umfasst als Kernzone sozusagen den gesamten 1. Stadtbezirk „Innere Stadt“. Sie umfasst im Wesentlichen die historisch gewachsene Altstadt am Fuß des Schlossberges (vgl. [22]). Den Mittelpunkt der „Kernzone“ bilden der dreiecksförmige, etwa um 1160 angelegte Hauptplatz mit dem Grazer Rathaus und die von diesem Platz aus strahlenförmig angeordneten Gassen (Herrengasse, Sporgasse, Schmidgasse,...). Als besonders bedeutsame und auch als Touristenattraktion bekannte bauliche Objekte und Monumente können etwa die Gesamtheit der Schlossberganlage, die Domkirche, das Mausoleum oder die Grazer Burg genannt werden.

² Achtung! Diese Schutz-zonen gemäß GAEG dürfen nicht mit den UNESCO Weltkulturerbe-Schutz-zonen verwechselt werden, wenngleich die Grenzen oftmals sehr ähnlich verlaufen.

Schutzzone II

Diese Schutzzone bildet den Pufferraum zwischen Kernzone und Gründerzeitzone und wird ringförmig, von der um den Schlossberg laufenden Glacisstraße, begrenzt. Diese Zone beinhaltet beispielsweise das Areal des Grazer Stadtparks, den Kaiser Josef Platz mitsamt der Grazer Oper und den Jakominiplatz. Auch die am rechten Murufer liegenden Bereiche wie der Mariahilferplatz oder der südlich davon gelegene Südtirolerplatz sind Teile dieser Schutzzone.

Schutzzone III

Diese auch als Gründerzeitviertel bezeichnete Schutzzone umfasst im Wesentlichen die Stadtbezirke II. „St. Leonhard“, III. „Geidorf“, IV. „Jakomini“ und erstreckt sich auch über Teile des Stadtbezirkes V. „Gries“. Städtebaulich interessant sind vor allem die zahlreich in diesen Bezirken anzutreffenden Biedermeier- und die namensgebenden Gründerzeithäuser. Auch große Kirchen- und Profanbauten wie etwa die Herz-Jesu Kirche oder das Universitätsgelände der Karl-Franzens-Universität, bis hin zum neuen Botanischen Garten beim nahegelegenen Hilmteich sind Teil dieser Schutzzone.

Schutzzone IV

Diese 13 kleineren um das Stadtgebiet angeordneten, sozusagen im Stadtgürtel verteilten Schutzzeiten, werden unter dem gemeinsamen Titel „historische Vororte“ im GAEG angeführt. Die Nummerierung der Schutzzeiten folgt dem Beispiel „IV/1 - St. Veit“, „IV/2 - St. Gotthard“, „IV/3 - Gösting“ usw. Als besonders bekanntes Objekt innerhalb einer dieser Einzelschutzzeiten kann zum Beispiel das im gleichnamigen Stadtteil befindliche Schloss Eggenberg genannt werden.

Schutzzone V

Die kleinste Schutzzone nach dem GAEG räumt dem Gebiet rund um den Grazer Kalvarienberg mit der dort befindlichen Kalvarienberg-Kirche eine besondere Schutzstellung ein.

Gemäß § 9 des GAEG bedürfen neben Neubauten, Zubauten und Umbauten auch sämtliche Nutzungsänderungen von Gebäuden, die als Wohn- und Geschäftsbauten in diesen Schutzzeiten errichtet wurden einer Bewilligung. Generell legt das Gesetz fest (auch mit dem Verweis auf das steiermärkische Baugesetz [64]), dass im Schutzgebiet, also in einer der 5 Schutzzeiten, befindliche Neu-, Zu-, und Umbauten, die einen Einfluss auf das charakteristische Erscheinungsbild des betreffenden Stadtteils haben können, immer einem Bewilligungsverfahren zu unterziehen sind. Selbiges gilt nach § 5 Abs. 3 auch für den Abbruch schutzwürdiger Bauwerke oder Teile davon. Darüber hinausgehend heißt es in Abs. 1 des GAEG [65]:

Im Schutzgebiet haben die Eigentümerinnen/Eigentümer schutzwürdige Bauwerke in ihrem äußeren Erscheinungsbild nach Maßgabe der Schutzwürdigkeit ganz oder teilweise zu erhalten. Dies schließt Veränderungen im Sinne des § 7 nicht aus.

Die Schutzwürdigkeit eines Bauwerks an sich wird in § 4 definiert:

Schutzwürdige Bauwerke sind jene Gebäude und sonstige bauliche Anlagen, die in ihrer baulichen Charakteristik für das Stadtbild von Bedeutung sind. Zu ihrem äußeren Erscheinungsbild gehören alle gestaltwirksamen Merkmale des Bauwerkes, z. B.: [...]

Um die in § 5 geforderte Erhaltungspflicht auch begründbar einfordern zu können, ist es von besonderer Bedeutung, Kenntnis über den vorliegenden Ist-Zustand der Bausubstanz zu haben. Im Rahmen des Forschungsprojekt D(N)achhaltigkeit Graz [22] wurde diesbezüglich bereits ein wichtiger Schritt gesetzt und rund ein Viertel aller schutzwürdigen Objekte innerhalb der Kern- und Pufferzone, konkret 35 historische Dachtragwerke einer eingehenden Bestandsaufnahme und Schadensanalyse unterzogen und entsprechend dokumentiert. Um die dauerhafte Erhaltung des UNESCO Weltkulturerbes auch künftig garantieren zu können, wäre eine lückenlose Erfassung als auch eine organisierte Inspektion und Wartung aller Dächer der Grazer Innenstadt wünschenswert. Denn nur damit kann nachhaltig sichergestellt werden, dass rechtzeitig konservierende, denkmalschutzgerechte Maßnahmen bei drohenden Schäden gesetzt werden können.

Ähnliche gesetzliche Formulierungen zur Erhaltung der Ästhetik einer aus mehreren schützenswürdigen Bauwerken bestehenden Einheit finden sich auch im steiermärkischen Gesetz zur Erhaltung des Ortsbildes [63]. So heißt es dort im I. Abschnitt § 43 Abs. 7:

Das Bauwerk muss derart geplant und ausgeführt werden, dass es in seiner gestalterischen Bedeutung dem Straßen-, Orts- und Landschaftsbild gerecht wird. Hierbei ist auf Denkmäler und hervorragende Naturgebilde Rücksicht zu nehmen.

Außerdem wird in diesem Gesetz auch die Verantwortung über die Erhaltung der Bausubstanz auf den Eigentümer übertragen, wodurch dieser dafür zu sorgen hat, dass „die baulichen Anlagen in einem der Baubewilligung, der Baufreistellungserklärung und den baurechtlichen Vorschriften entsprechenden Zustand“ erhalten bleibt. Generell fallen beim Studium beider Gesetzestexte immer wieder Ähnlichkeiten auf.

Der Landesgesetzgeber behält sich weiters in § 2 Abs. 3 des GAEG vor, nach erfolgter Absprache mit der Stadtregierung Graz und Einholung eines Gutachtens, weitere Stadtteile in ein bereits bestehendes Schutzgebiet bei gegebenem Anlass miteinzubeziehen. Je nach Größe und Umfang derartiger Gebiete können auch neue Schutzzonen, die fortlaufend mit Zone 6, 7 usw. zu nummerieren sind, ausgerufen werden. Werden Korrekturen an Umfang und Größe des Schutzgebietes durchgeführt, beispielsweise um beide Seiten von Straßen- und Gassenverläufen, die oftmals als Grenzen für die einzelnen Schutzzonen dienen, an jeweils ein Schutzgebiet zu knüpfen, so ist auch in diesem Fall ein verpflichtendes Gutachten vor den Änderungen einzuholen. Selbiges gilt auch für die Aufnahme einzelner schützenswerter Objekte in ein Schutzgebiet. Für die Exekution des GAEG wurde durch die Landesregierung eine Altstadt-Sachverständigenkommission (ASVK) eingerichtet. Diese wird beispielsweise bei Verdacht, dass ein Eigentümer eines geschützten Objektes seinen per Gesetz obliegenden Erhaltungs- und Sorgfaltspflichten nicht nachkommt, in Form einer Anzeige bei der Baubehörde tätig. Ebenso ist diese ASVK dazu aufgefordert als beratendes Organ für die Landesregierung zu fungieren. So ist sie beispielsweise bei Neuerstellung oder Änderung des Flächenwidmungsplanes und der Bebauungspläne, die ein Schutzgebiet oder einzelne Teile davon betreffen, dazu berechtigt, diese zu prüfen und eine Stellungnahme abzugeben. Die Bestellung und Zusammensetzung der ASVK ist in § 13 geregelt.

Hinsichtlich der Ausführungen des 4. Abschnitts des Landesgesetzes wird direkt auf den Gesetzestext im GAEG verwiesen. Dieser letzte Gesetzesteil regelt mitunter die Ausschüttung und Verwaltung von Geldmitteln aus dem eingerichteten „Grazer Altstadterhaltungsfonds“ sowie dessen Förderbestimmungen.

2-5 DENKMALSCHUTZ VS. ZEITGEMÄSSE NUTZUNG

Im Hinblick auf die zuvor angesprochene, immer knapper werdende Ressource „Raum“ können derzeit ungenützte, freie Dachböden soweit adaptiert werden, als dass diese beispielsweise für Wohnzecke verwendbar werden. Ein im Sommer 2015 ins Leben gerufenes, groß angelegtes Forschungsprojekt (vgl. [46]) in Wien versucht beispielsweise in einer ersten Phase die historischen Dachstühle der Wiener Innenstadt (rund 1500!) in einem „Dachkataster“ entsprechend dem Baualter, der Konstruktionsart und dem Ausbauzustand zu erfassen. Dabei wird der Fokus insbesondere auf Profanbauten gelegt, die bereits seit Jahren einem immensen Nutzungsdruck ausgesetzt sind. Als Ergebnis dieser ersten Projektphase soll eine Übersicht über die Anzahl und Verteilung der unterschiedlichen Dachstuhltypen entstehen und deren Erhaltungswürdigkeit kategorisiert werden. Der Wiener Dachkataster soll sozusagen die Basis für den zukünftigen Umgang mit diesem bauhistorisch-kulturellen Erbe in einer der am stärksten wachsenden Großstädte Europas legen. Dieses groß angelegte Projekt der Stadt Wien folgt dabei einem bewerteten Prinzip der Städtebauentwicklung im urbanen Bereich. Wie beispielsweise RAABE in [18] ausführt ist die *„Grundlage jeder Planung einer Bau- oder Erhaltungsmaßnahme im Denkmalkontext die Bestandsdokumentation“*. Nur mit ihr ist es möglich, *„Angaben zu Material und Konstruktion und ggf. auch Hinweise früherer Bauschäden, bauphysikalische oder statische Probleme“* zu erfassen und diese in der nachgestellten Stadtentwicklungsplanung zu berücksichtigen.

Das sichtlich vorhandene Potential der Wohnraumschaffung in bestehenden Dachräumen, aber auch der effizientere Umgang mit Energie steht leider oftmals mit den derzeitigen Denkmalschutzbestimmungen im Widerspruch. Heutige Standards hinsichtlich der thermischen Optimierung von Bauwerken, erzielbar durch den Einsatz moderner Baustofftechnologien, können nicht immer in gewohnter Weise auf ältere Tragstrukturen angewendet werden, ohne diese, beispielsweise durch „Ersticken“ mit Dampfdichtheitsbahnen zu schädigen oder gar zu zerstören. Um den Heizwärmebedarf dennoch zu reduzieren, werden beispielsweise außen angebrachte Aufsparrendämmsysteme eingesetzt, deren Verwendung aber nicht immer mit dem denkmalgesetzlichen Grundsatz der *„Erhaltung des äußeren Erscheinungsbildes“* vereinbar ist. Selbiges gilt auch für das riesige Potential der Energiegewinnung durch Solarthermie oder Fotovoltaik, deren Flächenpanelle unweigerlich auf sonnenexponierten Dachflächen montiert werden müssen. An dieser Stelle sei außerdem auf die Bedeutung der Kommunikation und Zusammenarbeit mit den Denkmalschutzbehörden, die unabdinglich bereits im Vorfeld der konkreten Projektierung gestartet werden sollte, hingewiesen. Nur so können spätere, oftmals bis vor Gericht geführte Diskussionen über die Festlegung des notwendigen Untersuchungs-, Planungs- und Baukostenumfanges rechtzeitig abgeklärt werden. Nicht selten tauchen nämlich, nicht zuletzt der materiellen Eigenheit des Bestandsgebäudes geschuldet, unerwartete „Überraschungen“ während des Umbaubetriebes auf. Zentrale Kriterien für die denkmalgerechte Planung von Baumaßnahmen sind neben dem Erhalt der historisch wertvollen Bausubstanz auch die Angemessenheit der auszuführenden Maßnahmen. Eine Konstruktionsplanung entgegen den von der vorhandenen Bausubstanz vorgegebenen Randbedingungen ist nicht nur aus denkmalpflegerischer Sicht grundfalsch, sondern führen im Extremfall auch zu katastrophalen Bauschäden und der Vernichtung des eigentlich schützenswerten Objektes. An dieser Stelle soll auch noch ein wichtiges Grundprinzip hinsichtlich des Substanzschutzes vorgestellt werden - die **Reversibilität** (vgl. [18]). Einfacher ausgedrückt bedeutet dies, alle baulichen Maßnahmen so zu planen und auszuführen, sodass diese wieder rückgängig gemacht werden können, also der Ursprungszustand wiederhergestellt werden kann. Als Musterbeispiel, das NICHT dem Prinzip der Reversibilität folgt, kann beispielsweise die Ausführung einer verdübelten Aufbetonplatte auf eine vorhandene Dippelbaumdecke genannt werden.

Von Planern und Ingenieuren, die am „großen Kuchen - Bauen im Bestand - mitnaschen“ wollen, wird also nicht nur ein sehr weitreichendes Verständnis für moderne und historische Bautechnologien abverlangt, sondern auch das Fingerspitzengefühl, diese „zwei Welten“ mit Bedacht auf die Aspekte des Denkmalschutzes zu vereinen. Dieser Spagat kann nicht immer geschafft werden, wie sich leider allzu oft an Schäden ausgebauter, darunter auch historisch wertvoller Dachkonstruktionen zeigt. Aber auch architektonische Fauxpas, die sich nicht in ästhetischer Weise in ihr bauliches, historisch gewachsenes Umfeld einfügen, lassen die Schwierigkeiten im Umgang mit Bestandsbauten erkennen.

KAPITEL 3 ZUSTANDSBEURTEILUNG UND INSTANDSETZUNG

3-1 METHODIK

In den nachfolgenden Kapiteln soll eine mögliche Methodik zur Zustandsbeurteilung und Instandsetzung älterer hölzerner Tragstrukturen vorgestellt werden. Dabei wird das Instandsetzungsprojekt in einzelne Entwicklungsschritte gegliedert (siehe Abb. 3.1), die aufeinander aufbauend zu einem erfolgreichen Projektabschluss führen sollen. In den zugehörigen Unterkapiteln werden die Aufgabenstellungen zu den jeweiligen Projektphasen detailliert abgehandelt.

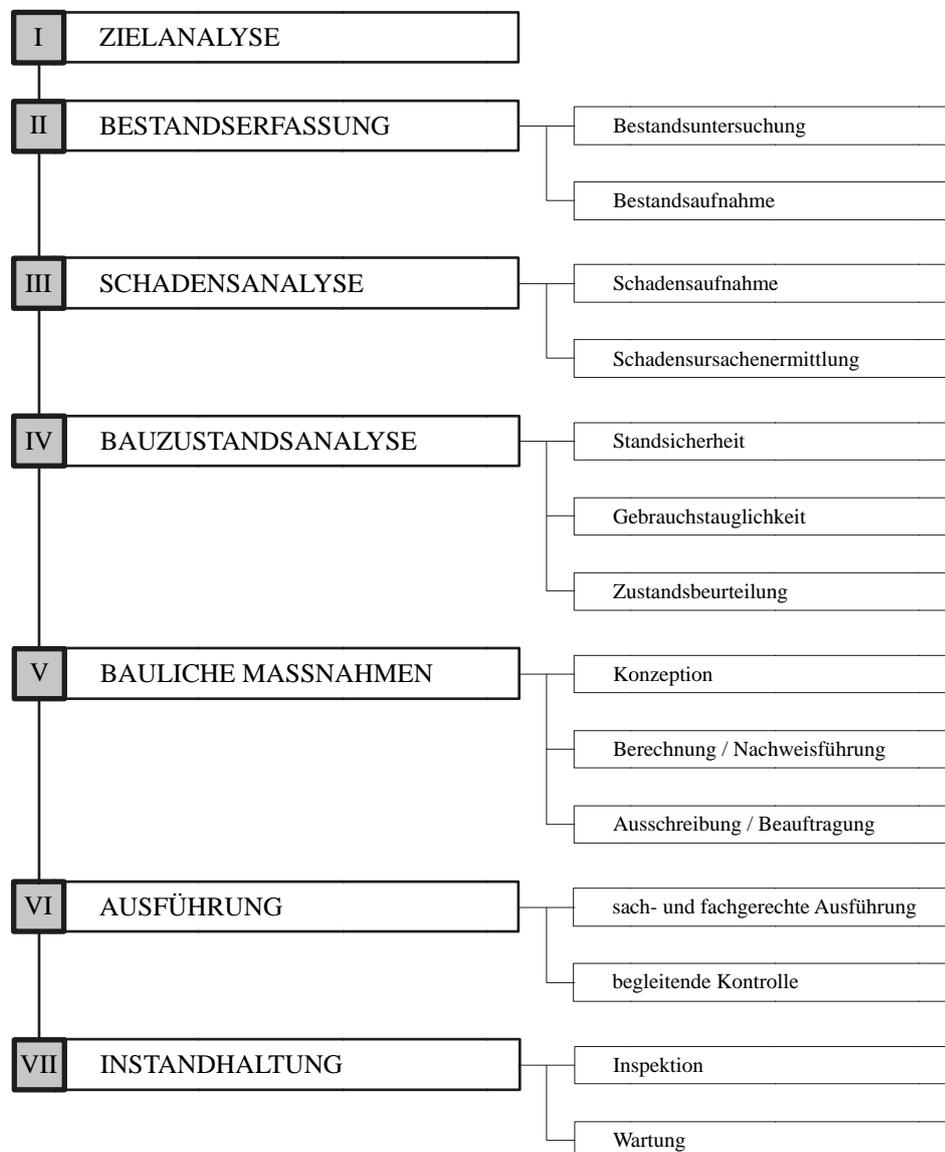


Abb. 3.1: Ablaufstrukturbaum bei Instandsetzungs- und Sanierungsprojekten [39]

3-2 STUFE I – ZIELANALYSE

3-2.1 NUTZEN DER ZIELANALYSE

Allen voran ist es unabdingbar eine Zielanalyse frei nach dem Motto: „*Was soll mit/aus dem vorhandenen Tragwerk geschehen?*“ anzustellen. Bei dieser Festlegung der Projektziele sollten möglichst alle später am Sanierungs-, Instandsetzungs- oder Umbauprojekt beteiligten Fachkräfte und besonders der Bauherr in die Vorbesprechungen eingebunden und auch gehört werden. Denn erst aus den, aus diesem Entscheidungsprozess heraus entwickelten Zielen kann der Umfang und die Präzision der Bestandserfassung (Stufe II) und der Zustandsdokumentation (Stufe III, Stufe IV) festgelegt und geplant werden. Zumal in dieser ersten Stufe nur in den wenigsten Fällen ausreichende Erkenntnisse über den Zustand der Bausubstanz vorliegen - beispielsweise ist die Zugänglichkeit des Tragwerks derart eingeschränkt, dass diese erst durch entsprechende Maßnahmen hergestellt werden muss - kann es auch vorkommen, dass die zu Projektbeginn definierte Ziele revidiert werden müssen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn im Rahmen der Bestandserfassung und Schadensanalyse Umstände vorgefunden werden, die alternative Wege erzwingen (vgl. [1]).

Die Zielanalyse dient vor allem der Klärung der Aufgabenstellung und damit der Bestimmung des gewünschten „Soll-Zustandes“, der aus dem vorliegenden „Ist-Zustand“ generiert werden soll. Bei der Definition des Soll-Zustandes spielt das vorgesehene Nutzungsziel insofern eine entscheidende Rolle, als dass es meist auch mit massiven Eingriffen in die bestehende Tragstruktur verbunden ist (vgl. [35]). Soll beispielweise in einem Dachgeschoß eines Bauwerks, dessen Dachkonstruktion als doppelt stehender Stuhl ausgeführt wurde, ein stützenfreier Veranstaltungsraum entstehen, so wird dabei unweigerlich eine Veränderung des Originaltragsystems gefordert sein. Solche massiven Eingriffe sind natürlich nicht die Regel, zumal diese zwar technisch durchaus machbar wären, allerdings aufgrund von Denkmalschutzbestimmungen niemals mit diesen vereinbar ausführbar sind. Ebenso ist bei derartigen Umnutzungsvorhaben darauf zu achten, dass diese immer neue Belastungssituationen induzieren, denen auch die darunterliegenden Tragstrukturen (Stichwort: letzte Geschoßdecke, Mauerwerkaufleger,...) ausgesetzt und deshalb gegebenenfalls auch entsprechend aufzurüsten sind.

Nicht oder falsch definierte Ziele rächen sich zumeist bereits in der darauffolgenden Stufe - der Bestandserfassung. Ist der Detaillierungsgrad zu gering angesetzt, erlauben die gewonnenen Erkenntnisse keine ausgewogene Planung der Maßnahmen. Ist er hingegen zu hoch angesetzt, ist dies häufig mit unnötigen Kosten- und Terminverzögerungen und den damit einhergehenden Streitigkeiten zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer verbunden. Selbiges gilt für unbedingt vorab einzuholende Informationen und Erlaubnisse über den Behördenweg. Immer wieder kommt es vor, dass Instandsetzungs- und Sanierungsbauvorhaben stillgelegt werden, weil die erforderlichen Zulassungen und Bescheide nicht entsprechend eingeholt wurden.



Abb. 3.2: Wesentliche Inhalte einer Zielanalyse

3-2.2 KOMPLEXITÄT „BAUEN IM BESTAND“

In Anlehnung an LISSNER/RUG [13], die den Umgang mit historischen Konstruktionen als *volkswirtschaftliche bedeutsame* und *fachlich anspruchsvolle Aufgabe* beschreiben, soll nachfolgende Grafik auf die Komplexität hinsichtlich der Planungsaufgabe „Bauen im Bestand“ hinweisen. Besonders schwierig ist es in dieser Hinsicht für den planenden Ingenieur oder Architekten nämlich, den Spagat zwischen den gestellten Nutzungsbedingungen des Bauherrn und den, von den gesetzlichen Regelungen und Normen definierten Bauvorschriften zu schaffen. Der Bauherr darf, wie auch bei einem Neubauprojekt, ein mangelfreies Ergebnis erwarten, dass den anerkannten Regeln der Technik entspricht. Dementsprechend steht der Planer vor der Aufgabe, die heute gültigen Bauweisen und Konstruktionsmethoden, welche sich nicht oder nur in eingeschränkter Art und Weise auf historisch vorhandene Bausubstanzen anwenden lassen, auf den Bestand anzuwenden. Umso wichtiger ist also die Kenntnis über die angetroffene historische Konstruktionsweise und den zugehörigen Eigenschaften. Eine, dem eigentlichen Planungsprozess vorrangigere Zielanalyse bietet hierfür ein geeignetes Hilfsmittel. Insbesondere beim „Bauen im Bestand“ definiert eine umfangreiche Zielanalyse nämlich nicht nur „künftige“ Ziele, sondern thematisiert auch jene Aufwände, die für die Erreichung dieser Ziele im Vorfeld entsprechend durchzuführen sind.

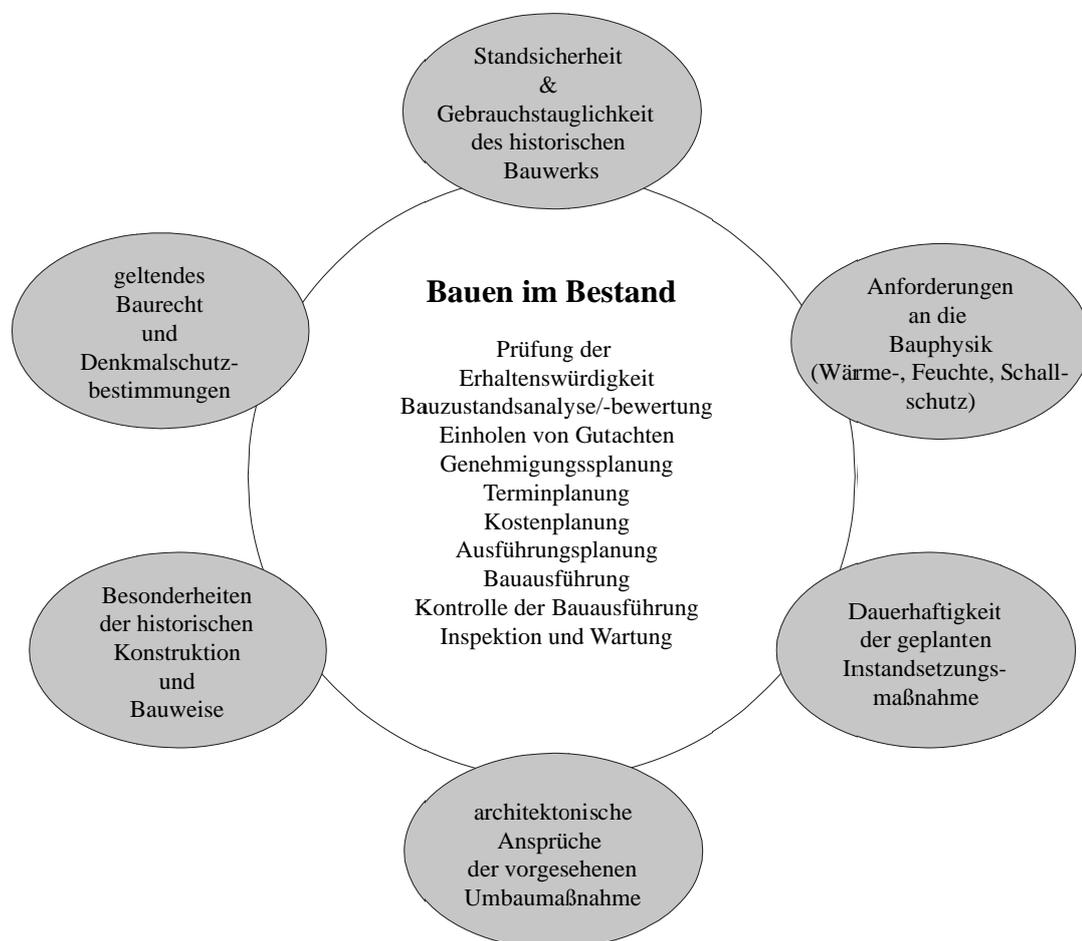


Abb. 3.3: Komplexität beim Bauen im Bestand [13]

3-3 STUFE II – BESTANDSERFASSUNG

3-3.1 PROJEKTBETEILIGTE

Wie man an der abschließenden Abbildung des vorangegangenen Kapitels erkennt (siehe Abb. 3.3), stellt Bauen im Bestand eine ganzheitliche Disziplin im Bauwesen dar, sodass der planende Ingenieur mit einer Vielzahl unterschiedlichster Gewerke und fachkundiger Personen zu tun haben wird. Insbesondere bei Sanierungs- und Ertüchtigungsprojekten bauhistorischer Denkmäler treffen Vertreter unterschiedlichster Bereiche zusammen, mit denen man als „klassischer Bauingenieur“ eher weniger oft in Berührung kommen wird. Um diesbezüglich ein paar Beispiele anzuführen, trifft man auf Spezialisten der Bauarchäologie, Kunsthistoriker, Experten der amtlichen Denkmalpflege, Restauratoren und Architekten mit Spezialisierung auf Architekturgeschichte. Doch auch seitens der Auftraggeberseite ist der begleitende Ingenieur, insbesondere bei sakralen Baudenkmalern, meist mit Vertretern der Kirche oder bei öffentlichen Baudenkmalern mit Referenten des Staates (z. B.: Bundesdenkmalamt) gemeinsam in einem Projektteam. Zumeist ist die eigentliche Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahme der denkmalgeschützten Bausubstanz von einem parallel laufenden Prozess - der historischen Bauforschung - begleitet, der versucht, die Bau- und Ausstattungsgeschichte des Denkmals zu erheben und zu dokumentieren. Zu allen genannten Experten tritt der Bauingenieur als Tragwerksplaner, dessen primäre Aufgabe es zumeist ist, den Bestand in Hinblick auf die Tragsicherheit zu untersuchen und eine qualitative und quantitative Aussage zum Zustand der vorgefundenen Tragstruktur zu treffen (vgl. [11]).

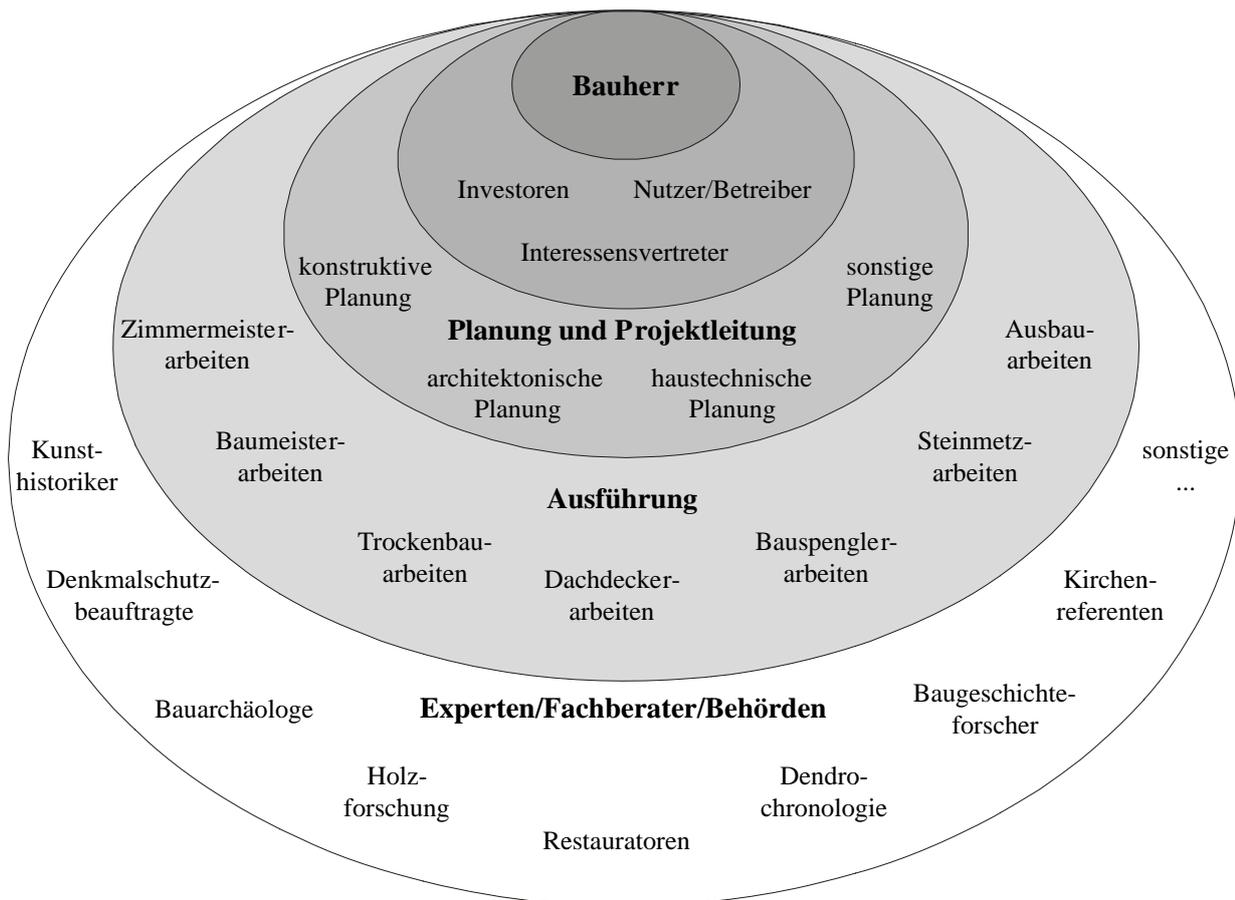


Abb. 3.4: Projektbeteiligte bei Instandsetzungsaufgaben

3-3.2 HAUPTAUFGABEN DER BESTANDSERFASSUNG

Die Aufgabe, ein historisches hölzernes Tragwerk im Hinblick auf seine Standsicherheit zu analysieren, besteht vor allem in einer umfassenden Untersuchung der Funktionsfähigkeit aller Bauelemente der Gesamttragstruktur. Nur wenn der Ist-Zustand der vorliegenden Bausubstanz genau genug festgestellt wurde, können daraus weiterführende Planungen zu den Ertüchtigungs- Sanierungs- und/oder Instandsetzungsmaßnahmen angestellt werden (vgl. [13]). Aus diesen unabdingbaren Notwendigkeiten können zwei Kernaufgaben der Bestandserfassung formuliert werden:

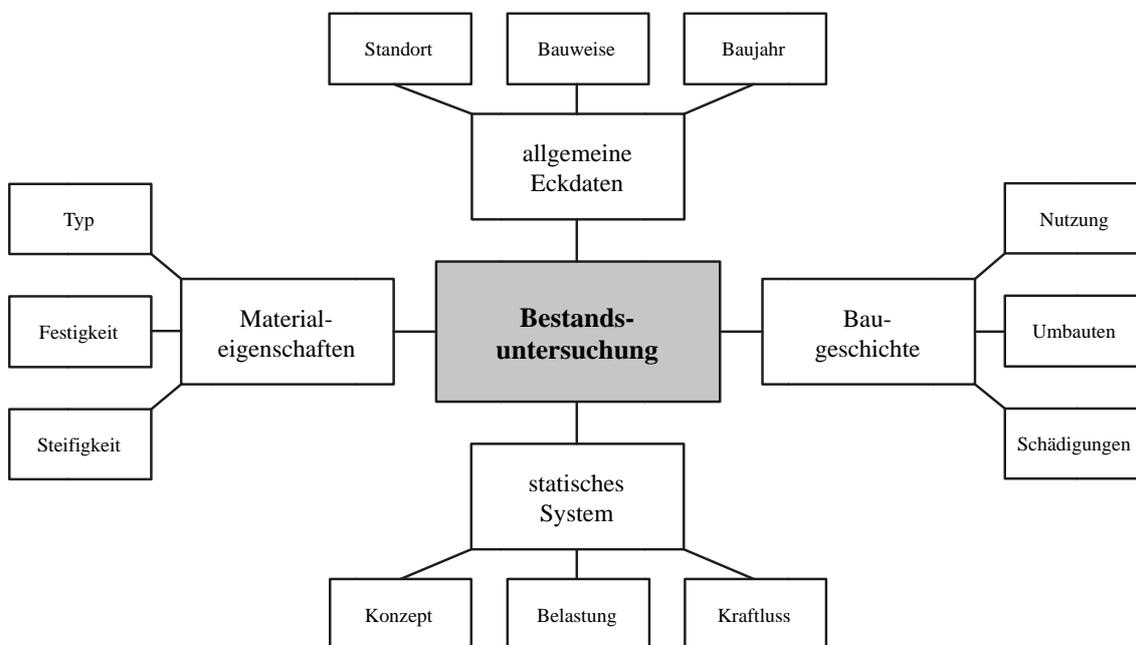


Abb. 3.5: Erste Kernaufgabe der Bestandserfassung: Die Bestandsuntersuchung

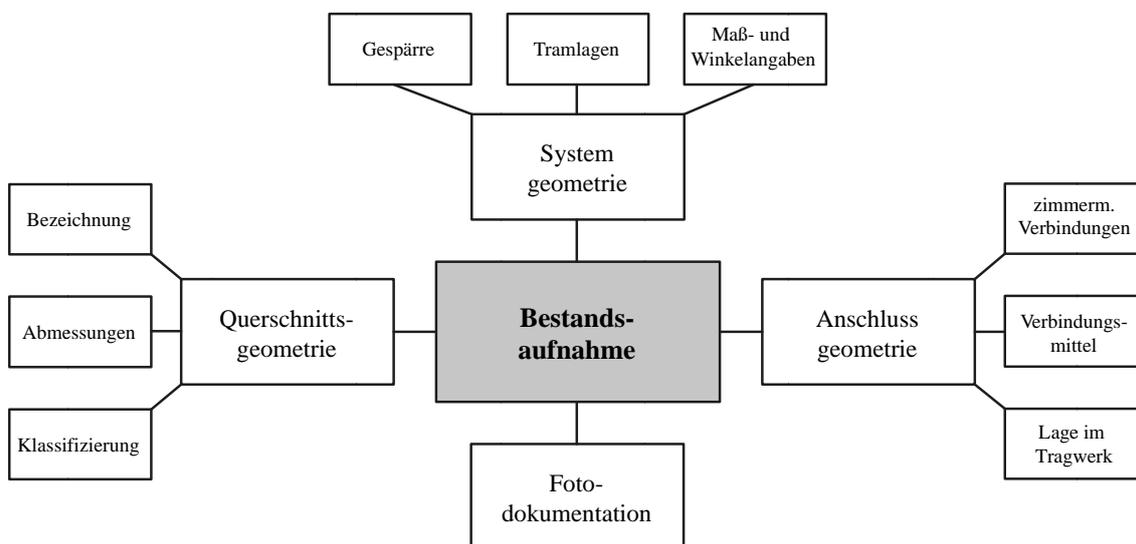


Abb. 3.6: Zweite Kernaufgabe der Bestandserfassung: Die Bestandsaufnahme

Am Ende der konsequent durchgeführten **Bestandsuntersuchung** hat der Ingenieur also ausreichend Kenntnis über die vorgefundene Tragstruktur und die verwendeten Materialien erlangt und ist damit in der Lage, das konzeptionierte Tragsystem und den Kraftfluss zu erkennen und diesen zu beschreiben. Aus den gewonnenen, meist skizzenhaften Aufzeichnungen der vollumfänglich durchgeführten **Bestandsaufnahme** können in einem nachgeschalteten Arbeitsprozess erste Bestandsplanunterlagen und Aufmaßpläne generiert werden, die die Basis für die nachfolgend angestellten Überlegungen darstellen.

3-3.3 VORGEHENSWEISE BEI EINER BESTANDSERFASSUNG

Üblicherweise startet jede Bestandserfassung mit einer überblicksmäßigen Erstbegehung des Tragwerks. Ist ein Beschaue des Bestandes mangels Zugänglichkeit nicht oder nur erschwert möglich, so sind Maßnahmen zu veranlassen, diesen Umstand zu verbessern. Beispielsweise können der provisorische Einbau von Wartungs- und Bedienstegen, die Bereitstellung von Aufstiegshilfen wie Leitern, Hubsteigern udgl. in Auftrag gegeben werden. Bei dieser Erstbegehung erfolgt die Bestandserfassung überwiegend visuell, wobei die Aufmerksamkeit insbesondere auf übermäßige Verformungen, markante Bereiche im Dachtragwerk, sowie auf die Schwingungsanfälligkeit der letzten Geschoßdecke gelegt werden sollte (vgl. [41]). Allein durch diese Vorgehensweise kann sich der Ingenieur einen Überblick über das vorhandene Tragsystem verschaffen und abschätzen, ob die womöglich aufgefundenen, offensichtlichen Schäden und Fehlstellungen die globale Tragsicherheit des Systems gefährden. Liegen Schädigungen vor, welche die Tragsicherheit des Systems derart beeinträchtigen, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass von der Tragstruktur eine Gefahr für Menschen ausgeht, so liegt definitionsgemäß „Gefahr in Verzug“ vor. In diesem Fall sind umgehend Sofortmaßnahmen einzuleiten (Evakuierung, Sicherungsmaßnahmen, Deckenunterstellungen,...) und deren Wirksamkeit zu kontrollieren! Erst wenn die Tragsicherheit soweit wiederhergestellt wurde, dass keine akute Gefahr mehr von der Tragstruktur ausgeht, kann mit einer eingehenden, genauen Bestandsuntersuchung begonnen werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt, in Anlehnung an MEISEL [38], wie eine Bestandserfassung in der Praxis ablaufen sollte:

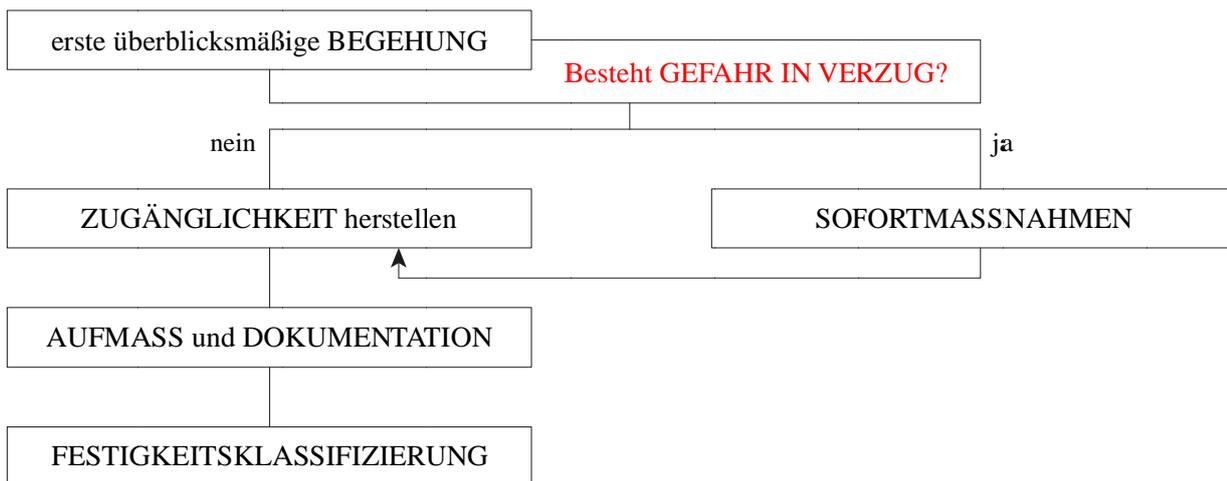


Abb. 3.7: Empfohlenes Ablaufschema bei der Bestandserfassung [38]

3-3.4 AUFMASS UND DOKUMENTATION

Eine möglichst detaillierte Erfassung des Tragwerkbestandes ist zentraler Bestandteil einer jeden Bestandsdokumentation, stellt sie doch die wohl wichtigste Grundlage für nachfolgende Überlegungen zur statischen Analyse und Umbau- und Sanierungsplanung dar. Nur in äußerst seltenen Fällen sind vollständige, verlässliche Plansätze zu den historischen Bauobjekten vorhanden und falls doch, sollten diese Unterlagen stets mit dem Naturmaß kontrolliert werden. In Abhängigkeit zur Bedeutsamkeit des Bauwerks als schützenswertes Objekt, aber auch aus Überlegungen bezüglich der erforderlichen Darstellungsgenauigkeit der Pläne unterscheidet RAABE (vgl. [18]) vier Stufen der Aufmaßdarstellungsgenauigkeit:

Genauigkeitsstufe 1 - schematisches Aufmaß

Die Darstellung beschränkt sich auf eine skizzenhafte Darstellung, die zwar die Struktur und das Grundprinzip des Tragsystems erkennen lässt, allerdings keine weiteren Details beinhaltet.

Genauigkeitsstufe 2 - annähernd wirklichkeitsgetreues Aufmaß

Der konstruktive Aufbau ist gut ablesbar und die System- und Querschnittsgeometrie ist weitestgehend in den Plandarstellungen ersichtlich. Ausgeprägte, deutlich sichtbare Verformungen werden ebenfalls planerisch dargestellt und gekennzeichnet. Dabei werden alle relevanten Bereiche und Gespärre des Tragwerks als Grundriss und Längenschnitt dargestellt. Bei regelmäßigen, sich wiederholenden Einheiten sollten die Aufmaße an mehreren Stellen im Tragsystem stichprobenartig kontrolliert werden.

Genauigkeitsstufe 3 - detailliertes wirklichkeitsgetreues Aufmaß mit Detailergänzungen

Als Steigerung zur Genauigkeitsstufe 2 werden für derartige Aufmaße auch alle wesentlichen Details erfasst, die Rückschlüsse auf frühere Bauphasen und Umbauten zulassen. So werden beispielsweise auch markante Baufugen, Materialwechsel, vermauerte Öffnungen udgl. erfasst und als Planzulagen der Dokumentation beigelegt.

Genauigkeitsstufe 4 - verformungsgetreues Aufmaß

Diese Darstellungsform wird aufgrund ihres enormen Aufwands quasi nur für sehr bedeutsame Denkmäler oder zu Forschungszwecken in der Bauarchäologie angewandt. Dabei wird die Tragstruktur vollständig mitsamt den eingestellten Verformungen erfasst und auch die allerfeinsten Details erhoben, wie zum Beispiel das exakte Aufmaß von Tiefe und Verlauf von Schwindrissen.

empfohlene Genauigkeitsstufe für Holztragwerke

Für die Herangehensweise hinsichtlich der Darstellungsgenauigkeit für ingenieurmäßige Zwecke wird von HOLZER [11] ein „Mittelweg“ empfohlen, der auch im Rahmen dieser Masterarbeit (siehe Kapitel 5-3.4.1) angestrebt werden soll. „*In Wirklichkeit - so HOLZER - liegen die Ansprüche, denen ein für die statische Beurteilung eines historischen Holztragwerks brauchbares Aufmaß genügen muss, zwischen diesen Extrempositionen*“. Ein für den planenden Ingenieur hinreichend genaues Aufmaß sollte somit folgende Punkte beinhalten:

- vollständige zeichnerische Dokumentation der Struktur inklusive aller Tragelemente und deren Querschnittsgeometrie
- Informationen über Typ und Geometrie der vorhandene Anschluss- und Knotenausbildungen. Dabei sollen auch verborgene, auf den ersten Blick nicht einsehbare Anschlussmerkmale mit geeigneten Mitteln erhoben und bestmöglich dargestellt werden. (z. B.: Ermittlung einer geschlossen Zapfenverbindungsgeometrie mittels Bohrwiderstandsmessung oder durch „Stochern“)
- Genauigkeitsanspruch für Globalgeometrieabmessung: $\pm 5,0$ cm
- Genauigkeitsanspruch für Querschnittsgeometrieabmessung: $\pm 0,5$ cm
- Richtigkeit von gemessenen Distanzen mit Zweitmessungen verifizieren. (z. B.: Diagonalmaße nehmen)
- Vorhandene, mit freiem Auge sichtbare große Verformungen. „Normale“ Durchbiegungen und Verformungen können dabei als belanglos angesehen werden.

Für das Aufmaß stehen heute viele technische Hilfsmittel zur Verfügung. Der Einsatz von Theodoliten mit reflektorloser Entfernungsmessung oder gar High-Tech-Geräte wie 3D-Laserscanner können die Aufmaßarbeiten zwar erleichtern, allerdings ein Aufmaß von Hand niemals vollständig ersetzen. Obgleich der Vorteile moderner Hilfsmittel, die im Falle eines Laserscans sogar eine naturgetreue Abbild in Form einer Punktwolke liefern können, muss stets berücksichtigt werden, dass aus dieser „Flut von Informationen“, die wirklich entscheidenden Merkmale in einem nachgeschalteten Arbeitsprozess entsprechend extrahiert werden müssen. Aus eigenen Erfahrungen des Verfassers dieser Masterarbeit sollen abschließend einige Empfehlungen zum organisierten Ablauf bei der Erstellung von Aufmaßen genannt werden.

- **Aufmaß selbst durchführen!** Dies ist der wahrscheinlich wichtigste der nachstehenden Tipps. Nur wer selbst die Bestandserfassung bzw. das Aufmaß vornimmt, erhält ein Gefühl für die Tragstruktur und kann, insbesondere bei komplexen Konstruktionen, diese verstehen.
- **Viel Zeit nehmen!** Ein aussagekräftiges Aufmaß vor Ort zu erstellen bedarf viel Zeit und Übung und kann nur in den seltensten Fällen mit nur einer Tragwerksbesichtigung als abgeschlossen angesehen werden. Oftmals erkennt man erst bei der Umsetzung der skizzenhaften Aufmaßblätter in Reinzeichnungen unstimme oder fehlende Maßangaben oder Konstruktionselemente.
- **Jedes Aufmaß beginnt mit einem Gang durch das gesamte Tragwerk!** Hierfür wird keinerlei Werkzeug benötigt. Vielmehr soll dabei ein Gefühl für die Tragstruktur entwickelt werden. Aus den gewonnenen Eindrücken heraus werden dann erste „Wie gehe ich an das Aufmaß heran“ - Überlegungen angestellt.
- **Markante Bezugsachsen festlegen!** Noch bevor der erste „Aufmaßstrich“ zu Papier gebracht wird, sollten vorab Bezugsachsen festgelegt und diese in allen Aufmaßblättern konsequent weiterverfolgt werden. Dies erleichtert die spätere Orientierung und bietet gleichzeitig eine ausgezeichnete Grundlage für die Nummerierung und Bezeichnung der Gespärreebenen. In den Grundrissdarstellungen sollte stets ein Nordpfeil dargestellt werden.
- **Nicht mit Papier geizen!** Überladene Aufmaßblätter, in denen versucht wird, selbst das kleinste Detail auf einem einzigen Blatt Papier unterzubringen, sind, um es hart auszudrücken, wertlos. Aus eigener Erfahrung kann behauptet werden, dass man dazu neigt, auffällige Knotendetails gleich direkt in die Gesamtübersicht eines Gespärres, in einer viel zu kleinen Darstellung „hinzukritzeln“, um später nicht mehr zu wissen, wie dieses Detail denn nun tatsächlich ausgesehen hat. Hierfür sollten besser Anmerkungen in den Systemskizzen, zum Beispiel in Form einer fortlaufenden Nummer (Det 1, Det 2, Det 3, ...), auf separat angelegte Detailblätter verweisen. Außerdem darf nicht vergessen werden, genügend Platz für Bezeichnungen und Maßangaben in der Aufmaßskizze freizuhalten.
- **Freihändig zeichnen!** Durch die Verwendung von Lineal oder Dreieck ist man dazu verleitet, dass geringfügig unschlüssig aufgenommene Maße oder Schiefstellungen „zurechtgerückt“ werden. Das Aufmaß ist eine Skizze! Die Reinzeichnung erfolgt in einem nachgeschalteten Arbeitsschritt. Natürlich ist das freihändige Zeichnen aus dem Handgelenk nicht jedermanns Sache und bedarf einiger Übung. Außerdem sei an dieser Stelle noch auf die Nutzung einer geeigneten Schreibunterlage (Klemmbrett) und auf die Verwendung von zart kariertem Papier hingewiesen, um beispielsweise parallel laufende Linien einfacher zeichnen zu können. Außerdem unterstützt das Karierungsmuster dabei, die Verhältnistreue der Skizze zu bewahren.
- **Geschlossene Dreiecke allseitig aufmessen!** Naturgemäß finden sich in Dachtragwerken dreiecksförmige Tragstrukturen, deren Seitenlängen möglichst genau erfasst werden sollten (z. B.: mittels Distometer). Aus diesen Angaben kann man dann recht einfach über die geometrischen Winkelfunktionen auf die Neigungen der Konstruktionsteile rückrechnen. Das Messen von Neigungswinkeln direkt im Tragwerk ist sehr ungenau und sollte höchstens als Zusatzinformation notiert werden.
- **Für ausreichende Beleuchtung sorgen!** Dies mag an dieser Stelle zwar banal klingen, aber nicht selten kommt es vor, dass es in geschlossenen historischen Dachräumen stockdunkel ist und keinerlei Beleuchtungsmöglichkeiten wie Dachfenster oder eine eingebaute Wartungsbeleuchtung vorhanden sind. Starke Bauscheinwerfer (Strombedarf), LED-Handscheinwerfer und Stirnlampen bieten für dieses Problem eine gute Abhilfe. Im äußersten Notfall können auch Dachziegel verschoben werden,

sodass Tageslicht durch die Dachhaut dringen kann. Nach Abschluss der Aufmaßarbeiten müssen diese Ziegel unbedingt in ihre Ursprungslage zurückversetzt werden!

- **Fotodokumentation nachvollziehbar anlegen!** Unkoordinierte Nahaufnahmen ohne Gesamtansicht und Fotos, die keinen Größenbezug erlauben, sind wertlos. Ein einfacher Zollstock kann so manches Foto in ein perfektes Hilfsmittel für die spätere zeichnerische Darstellung von Knotendetails verwandeln. Bevor Detailaufnahmen von zimmermannsmäßigen Verbindungsmitteln aufgenommen werden, sollte der Gesamtknoten mit kurzer Brennweite abgeleuchtet werden, um durch den so entstanden größeren Bildausschnitt die Lage der Verbindung im Gesamtgefüge abzubilden und zuordenbar zu machen. Quasi alle Kamerasysteme verfügen über Einstellmöglichkeiten hinsichtlich der Ordnerablage und der Dateinamensvergabe für die aufgenommenen Bilder. Diese Funktionen eignen sich besonders dann, wenn mehrere Tragwerksabschnitte aufgenommen werden sollen.
- **Technische Hilfsmittel mit Bedacht einsetzen!** Ein 3D-Laserscan des Tragwerkes mag, insofern die finanziellen Mittel hierfür verfügbar sind, zwar verlockend klingen, doch wird dieser niemals alle Feinheiten, die womöglich bei einer „handnahen“ manuellen Bestandsaufnahme erfasst werden könnten, vollständig abbilden. Grundsätzlich sollten diese High-Tech-Möglichkeiten nur in Kombination mit dem bewährten Aufmaß per Hand eingesetzt werden.

Ohne an dieser Stelle auf allfällige Spezialgeräte eingehen zu wollen, soll abschließend die Grundausrüstung für das händische Aufmaß aufgelistet werden:

- zum Selbstschutz (persönliche Schutzausrüstung =PSA)³
 - festes Schuhwerk (durchtrittsichere Sohle und Stahlkappe empfehlenswert)
 - Helm
 - Arbeitshandschuhe
 - Mund- und Staubschutzmaske
 - ggf. Sicherheitsgurt
- zum Messen:
 - einfacher Rollmeter mit mindestens 5 Metern (besser 10 Meter) Länge
 - langes Maßband und/oder elektronisches Distanzmessgeräte, z. B.: Distometer
 - Zollstock (Referenz in Fotos, Risstiefen) und Schiebelehre (Jahrringbreite)
 - Schnur (horizontale Verformungen)
 - Lot (vertikale Verformungen, Winkelrichtigkeit, Schiefstellungen)
 - Steighilfen (z. B.: Leiter) zum Aufmessen höhergelegener Bauteile
- zum Dokumentieren
 - Schreibutensilien mitsamt Schreibunterlage (Klemmbrett)
 - Kreide (zum Markieren von Bauteilen im Tragwerk - Fotos)
 - digitale Spiegelreflexkamera mit externem Blitzgerät und ggf. Stativ. Für aussagekräftige Innenaufnahmen, die einen möglichst großen Bereich des Tragwerks zeigen, seien an dieser Stelle auch sogenannte Fisheye-Objektive oder starke Weitwinkelobjektive (Brennweiten < 10 mm) empfohlen. Ansonsten eignen sich „lichtstarke“ Zoomobjektive für die Fotodokumentation sehr gut.

³ Aus Sicherheitsgründen (z. B.: Absturzgefahr aus großer Höhe) sollten Bestandsaufnahmen generell niemals alleine durchgeführt werden. Dies erleichtert auch den Workflow, zumal beispielsweise eine Person Aufmaße vornimmt, während die andere Person diese mitprotokolliert. Ist ein gemeinsames Arbeiten nicht möglich (z. B.: aus Personal-, Zeit-, Kostenmangel, ...) so sind mindestens der Beginn und die vorgesehene Endzeit des Aufmaßes einer weiteren Person mitzuteilen, die im Falle eines Unfalls oder einer unterbleibenden Rückmeldung entsprechende Hilfemaßnahmen einleiten kann.

3-4 STUFE III – SCHADENSANALYSE

Mit der Beendigung der Bestandserfassung konnten die wesentlichen Informationen über die vorhandene Bausubstanz zusammengetragen und daraus erste Bestandspläne entwickelt werden. Durch das eingeführte Achsen- und Gespärrebezeichnungssystem sind über diese Pläne alle im Tragwerk vorhandene Stellen sehr gut beschreib- und vor Ort lokalisierbar. Diese gewonnenen Erkenntnisse und geschaffenen Unterlagen bieten nun beste Voraussetzungen für die Inangriffnahme der dritten Stufe - die **Schadensanalyse**.

3-4.1 NUTZEN DER SCHADENSANALYSE

Ziel der Schadensanalyse ist es, vorhandene Schäden am Tragwerk, an Einzelbauteilen und an Verbindungen aufzunehmen, diese nach Art und Umfang einzuschätzen und deren Ursachen zu ergründen. Dabei erfordert die Schadensanalyse vom beauftragten Ingenieur fachkundiges Wissen und Erfahrung über die unterschiedlichsten Schadensbilder, um deren Auswirkung auf die Standsicherheit und Funktionsfähigkeit der betroffenen Bauteile, Verbindungen, sowie des gesamten Tragwerks interpretieren und abschätzen zu können. Nach MÖNCK [15] besteht die Hauptaufgabe der Schadensanalyse darin, ...

...das Erscheinungsbild (Art) des Schadens zu beschreiben.

...das Schadensausmaß und die Auswirkungen festzustellen.

...die Verursacher von Bauschäden zu ermitteln.

...aus der Schadenshäufigkeit Schlussfolgerung für die weitere Planung und Ausführung abzuleiten.

...die Schwachstellen einer Konstruktion zu erkennen.

...objektive Daten aus Beobachtungen, Messungen, Prüfungen, usw. zu gewinnen und auszuwerten.

Wie LISSNER/RUG in [13] ausführen, ergeben sich vor allem aus der Verschiedenartigkeit der anzutreffenden Schäden Probleme in Bezug auf deren Ursachenermittlung und deren Interpretation. In vielen Fällen ist die Beziehung „*Ursache + Wirkung = Schaden*“ nicht eindeutig feststellbar, da ein Großteil der vorgefundenen Schäden das Ergebnis komplexer Entwicklungsvorgänge sind.

3-4.2 KLASSIFIZIERUNG DER SCHADENSARTEN

In Anlehnung an MÖNCK (vgl. [15]) können Schäden beispielsweise anhand ihres **Erscheinungsbildes** klassifiziert werden:

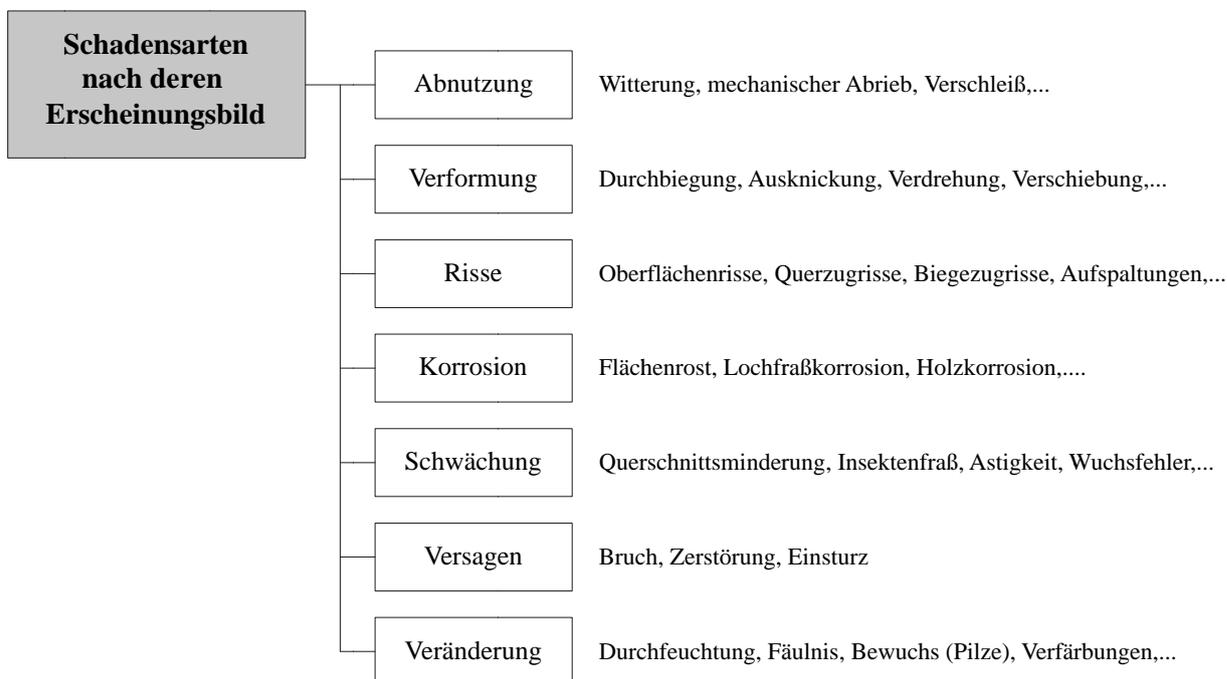


Abb. 3.8: Schadensklassifizierung nach dem Erscheinungsbild [15]

ORTNER (vgl. [41]) und LISSNER/RUG (vgl. [13]) wählen diesbezüglich einen etwas anderen Zugang und klassifiziert auftretende Schäden nach deren mögliche **Ursachen** bzw. **Einflussfaktoren**:

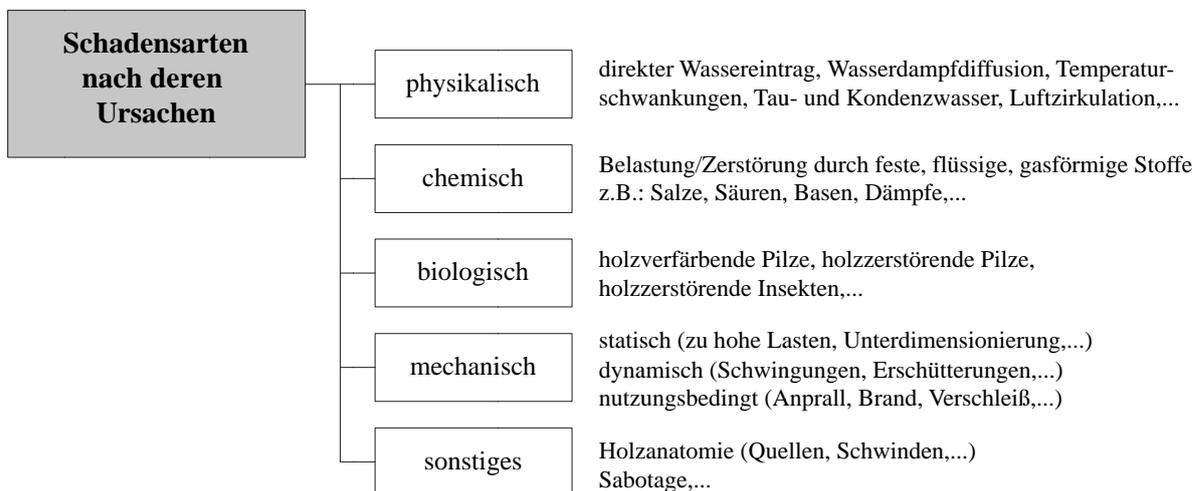


Abb. 3.9: Schadensklassifizierung nach der Ursache [41], [13]

Wie bereits erwähnt, resultieren Schäden zumeist aus einer Kombination der genannten Einflüsse, weshalb der mit der Schadensanalyse beauftragte Ingenieur ein gewisses Maß an „kriminalistischem Gespür“ zur Aufdeckung der Schadensursachen mitbringen sollte. Im Hinblick auf die Schadensanalyse in hölzernen Dachkonstruktionen können Schäden erfahrungsgemäß hauptsächlich an folgenden Bereichen im Tragwerk festgestellt werden:

- Verschneidungen von Dachflächen (Grat, Ichse, First,...)
- Durchdringungen und Anschlussbereiche (Kamindurchführung, Dachfenster, Dachausstiege,...)

- Materialwechsel (Mauerbank, Bundtramauflagernischen, Stahl-Holz-Anschlüsse (Kondensat),...)

An eben diesen genannten Bereichen dringt gerne anfallendes Niederschlagswasser oder Kondensationswasser in das Dachtragwerk - die Hauptursache aller genannten Schadensmechanismen.

Auf eine tiefergehende Beschreibung der einzelnen genannten Schadensmechanismen und Schadensursachen wird in weiterer Folge verzichtet, zumal sich dieser komplexen Thematik im Detail anzunehmen, einer eigenen wissenschaftlichen Arbeit bedürfen würde. Diesbezüglich sei auf die Ausführungen der bereits genannten Autoren, als auch auf die Werke von BARON [34], ERLER [5], GRAF [55] und MEISEL [38; 39] verwiesen.

3-4.3 VON DER SCHADENSERFASSUNG ZUR SCHADENSANALYSE

Bevor vorgefundene Schäden analysiert werden können müssen diese selbstverständlich erst entdeckt werden. Am Ende des vorangegangenen Kapitels wurden bereits einige neuralgische Bereiche innerhalb eines Tragwerkes angesprochen, in denen erfahrungsgemäß Schädigungen an der Konstruktion auftreten. Ein Leitspruch für die Auffindung von Schäden in Dachtragwerken könnte beispielsweise lauten:

„Schäden und Problemstellen in hölzernen, historischen Dachtragwerken sind in der Regel dort zu finden, wo der mit der Schadenserfassung beauftragte Ingenieur nicht gerne hin will/kommt.“

Damit sind, um es deutlicher auszudrücken, jene Bereiche gemeint, die schlecht- oder unzugänglich, schlecht beleuchtet, feucht, muffig und stark verschmutzt sind. Werden derartige Bereiche in einem Tragwerk untersucht, kann man damit rechnen, dort Schädigungen in mehr oder weniger größerem Ausmaß an Bauteilen vorzufinden. Das wichtigste Untersuchungsinstrument zur Auffindung von Schäden ist dabei die optisch, visuelle Begutachtung aller Teilstrukturen des Tragwerks. Beginnend von den genannten Verdachtsstellen sollten systematisch nach und nach möglichst alle Anschlussdetails, Verbindungen und Bauteile mit prüfendem Blick akribisch abgesucht werden. Dabei sollte der Grundsatz der „**handnahen Untersuchung**“ gelten. Dies gilt insbesondere für vermeintlich unzugängliche Stellen (Stichwort: Aufstiegsleiter, Brechstange,...). Vorgefundene Schädigungen werden in den mitgeführten, auf die Skizzenform reduzierten Planunterlagen notiert und gekennzeichnet. Begleitet wird diese visuelle Schadenserfassung von einem einfachen Hammer, der durch leichtes Anklopfen der Bauteile auf akustischem Weg Schädigungen sozusagen „hörbar“ macht. Dabei empfiehlt es sich, besonders auffällige Schadstellen fotografisch zu dokumentieren und diese durch eine entsprechende Nummerierung oder Namensvergabe im Dachtragwerk zu verorten. Wie schon im Kapitel 3-3.4 soll auch an dieser Stelle eine kurze Checkliste angegeben werden, die sozusagen die „Mindestausrüstung“ für eine erfolgreiche Schadenserfassung darstellt:

- zum Erkunden und Feststellen der Schäden:
 - Aufmerksamkeit und einen Blick für Details
 - Persönliche Schutzausrüstung (PSA) (siehe auch Kapitel 3-3.4)
 - Hammer
 - Brechstange (z. B.: um schadhafte Verschläge der Primärbauteile entfernen zu können)
 - Handbesen zur Reinigung der Bauteile von Verunreinigungen
 - Lupe
 - Endoskop (ideales Werkzeug für nicht zugängliche Bereiche)
- zum Dokumentieren der Schäden:
 - vorbereitete Planskizzen für die Eintragung der vorgefundene Schäden
 - Beleuchtungsmittel (Handscheinwerfer, Stirnlampe, etc.)
 - digitale Spiegelreflexkamera mit lichtstarkem Objektiv
 - Gefäße und Zange/Pinzette für Probeentnahme (Pilze, Insekten,...)
- sonstige Spezialgeräte
 - Bohrwiderstandsmessgerät
 - Holzfeuchtemessgerät
 - Kernbohrer für Probeentnahme
 - Geräte zur Laufzeit/Ultraschalluntersuchung

Zwei dieser genannten Spezialgeräte - das Holzfeuchtemessgerät und das Bohrwiderstandsmessgerät - werden im praxisorientierten Hauptkapitel (siehe Kapitel 4) zum Einsatz gebracht. Daher sollen im Anschluss an dieses Kapitel deren Funktionsweise und Anwendbarkeit genauer erläutert werden.

Selbstverständlich sollte beim Anfinden eines Schadens sogleich versucht werden, mögliche Ursachen zu erheben. Generell gilt: **Einen Schaden ohne Ursache gibt es nicht!** - daher muss neben dem eigentlichen Schaden auch der Verursacher ausgemacht werden. Es ist nicht zwingend erforderlich, dass der Ursprung des Schädigungsprozesses in unmittelbarer Nähe zum Schadensbild liegt. Beispielsweise muss eine durchfeuchtete Mauerbank nicht zwingend mit aufsteigender Mauerwerksfeuchtigkeit oder Leckagen im Traufenbereich in Zusammenhang stehen. Womöglich gelangt Niederschlagswasser, das an einer höher gelegenen Leckage unter die Dachdeckung dringt und an einer sehr steil anstehenden Dachhaut entlang fließt, zur besagten Mauerbank und führt an eben dieser zu einer dauerhaften Durchfeuchtung. Insbesondere bei Insektenbefall der Konstruktion dürfen auch am Dachboden, abgestellte Lagergüter oder durch Frischholz eingebrachte Insekten als Ursache nicht ausgeschlossen werden (vgl. [11]). Bei der Ermittlung der Schadensursache und ihrer Bewertung darf ebenfalls nicht außer Acht gelassen werden, dass in vielen Fällen nicht das Alter der Bausubstanz Grund für eine Schädigung ist, sondern eher auf fachwidrige Umbauten und ungenügende Wartung und Pflege zurückzuführen ist (vgl. [13]).

Die in der Schadenserfassung dokumentierten Schädigungen und Ursachen werden, je nach Art und Umfang der Schäden, einer weitergehenden Analyse, beispielsweise anhand gewonnener Proben im Labor zugeführt. Aber auch eine Konsultierung von Experten, beispielsweise bei pilz- und insekteninduzierten Schäden sollte insbesondere dann in Betracht gezogen werden, wenn das Schadensausmaß bereits sehr stark fortgeschritten, die Ursachen für den Befall allerdings nicht direkt ergründbar sind.

Am Ende jeder Schadenanalyse steht ein ausführlicher, durch verortete Fotos dokumentierter Bericht über die Schädigungsart, den Schädigungsumfang und die begründbar ausgemachten Schädigungsursachen. Begleitet wird dieser technische Bericht von einer sogenannten Schadenskartierung, welche die Lage der Schädigungen plangrafisch erkennen lässt. Diese Darstellungsform bietet eine hervorragende Möglichkeit alle relevanten Ergebnisse ausreichend detailliert darzustellen und zuordnenbar zu machen. Eine entsprechende farbliche Kennzeichnung, die auf den ersten Blick das Ausmaß und den Grad der Schädigung erkennen lässt, wird beispielsweise in [1] vorgestellt. In dieser Literaturquelle wird allerdings von der Verwendung von „Ampelfarben“, die dem Leser gegebenenfalls als erstes in den Sinn kommen würden, abgeraten. Dies wird damit begründet, dass im Falle einer schwarz-weiß-Kopie die Aussagekraft der Ampelkennzeichnung weitestgehend verloren geht. So erscheint beispielsweise grün dunkler als gelb und je nach Kopierqualität sogar dunkler als rot. Der Autor rät diesbezüglich zu Dreifarben-Kombinationen die selbst auf Kopien immer noch als hell - mittel - dunkel ausgemacht werden können. Dieser Farbkombinatorik sei abschließend noch hinzugefügt, dass auch die Einführung von einfachen Symbolen, die in einer zugehörigen Legende erklärt werden, die Übersichtlichkeit derartiger Schadenskartierungen enorm steigern kann.



Abb. 3.10: Beispiel einer möglichen Schadenskartierung einer Fachwerkfassade [1]

3-4.4 FUNKTIONSWEISE DER HOLZFEUCHTEMESSUNG

Die vorhandene Holzfeuchte nimmt wesentlichen Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des verzimmerten Holzes. Daher ist es unerlässlich diese an ausgewählten Stellen im Tragwerk stichprobenweise zu bestimmen. Zudem ist die Holzfeuchte auch der maßgebende Faktor für das Quell- und Schwindverhalten des Holzes und damit für Zwangskräfte, Klaffungen und Schwindverformungen, insbesondere in Anschlussknoten von großer Bedeutung. Sollten neue Konstruktionsteile für eine allfällige Verstärkung von bestehenden Tragwerksteilen verwendet werden, so ist aus oben genannten Gründen unbedingt darauf zu achten, dass diese neu eingebauten Teile eine annähernd gleiche Holzfeuchte aufweisen. Neben diesen, aus baustatischer Sicht relevanten Gründen, kann die vorhandene Holzfeuchte innerhalb eines Tragwerks auch Rückschluss auf dessen Beständigkeit gegen Pilz- oder insektiziden Schädlingsbefall liefern. Viele dieser pflanzlichen und tierischen Schädlinge sind bei Unterschreiten einer Mindestholzfeuchtigkeit mehr oder weniger inaktiv und somit keine Gefahr für die Konstruktion.

Die Bestimmung der Holzfeuchte kann recht einfach auf direktem Weg (Probenahme und Trocknung) oder auf indirektem Weg (in-situ Messung, beispielsweise nach dem Prinzip der Leitfähigkeits- und Widerstandsmessung) bestimmt werden. Die Holzfeuchte beschreibt das Masseverhältnis des im Holz enthaltenen Wassers zur Masse des absolut trockenen Holzes und ist allgemein gegeben zu (vgl. [44]):

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.1)$$

mit:

- uprozentualer Holzfeuchtegehalt
- m_uMasse des feuchten Holzes
- m_0Masse des darrtrockenen Holzes ($u=0$)

Nach dieser Definition kann das Masseverhältnis auch Werte $> 100\%$ erreichen. Beispielsweise beträgt der Holzfeuchtegehalt von frisch geschlägertem Fichten- oder Tannenholz etwa 150% . Üblicherweise „pendelt“ sich die Holzfeuchte in unbeheizten, jedoch trockenen Dachräumen im Laufe der Zeit bei etwa $15 \pm 3\%$ ein und entspricht damit etwa jener Ausgleichsfeuchte, die sich auch bei offenen, überdeckten Bauten einstellen würde. Damit liegt sie unter der kritischen Holzfeuchte von etwa 20% , bei der das Holz besonders gefährdet für Pilz- oder Insektenbefall ist.⁴ Besonders deutlich sichtbar werden Änderungen der Holzfeuchte unterhalb des sogenannten „Fasersättigungspunktes“ ($u \approx 30\%$) durch Quell- und Schwindvorgänge des Holzes. Ohne näher auf diese Volumenänderungen der Zellen innerhalb der Holzstruktur einzugehen, sei an dieser Stelle doch erwähnt, dass das Schwinden in radialer und in tangentialer Richtung für die Analyse von älteren Holztragwerken durchaus von Bedeutung sein kann. Das Quell- und Schwindverhalten in Längsrichtung kann meist aufgrund seiner deutlich weniger intensiven Ausprägung vernachlässigt werden. HOLZER [11] führt diesbezüglich ein recht anschauliches Beispiel für Fichtenholz an:

Eine Erhöhung der Holzfeuchte von der Ausgleichsfeuchte bis auf die Fasersättigung führt [...] zu einem radialen Quellen um ca. 2% und zu einem tangentialen Quellen um ca. 4%

Die Holzfeuchte steht im Wechselspiel mit dem die Konstruktion umgebenden Klima. Beispielsweise hat lufttrockenes Holz, je nach Umgebungsluftfeuchtigkeit ca. $12 - 15\%$ relative Holzfeuchte (vgl. [1]). Die Temperatur sowie die relative Luftfeuchte der Umgebung innerhalb des Dachraumes sind also entscheidend dafür, wie sich die sogenannte Ausgleichsfeuchte im Holzbauteil einstellen wird. Werden Holzfeuchten gemessen, die deutlich über der zu erwartenden Ausgleichsholzfeuchte liegen, so ist dies ein todsicheres Zeichen dafür, dass die Konstruktionshölzer einer weiteren Feuchtequelle ausgesetzt sind. Als Ursache kann hier typischerweise eine schadhafte Dacheindeckung oder Rinnenkonstruktionen genannt werden. Aber auch „versteckte“ Wasserquellen, die man zunächst vielleicht nicht vermutet,

⁴ Achtung: nicht alle Pilz- und Insektenarten sind unter 20% inaktiv. Somit kann auch „trockeneres“ Holz durch derartige Holzschädiger und -zerstörer befallen werden.

können zu enormen Schäden an Holzkonstruktionen führen. Als Beispiel kann hierfür aus dem darunterliegenden Mauerwerk aufsteigende Feuchtigkeit (z. B.: resultierend aus einem Wasserrohrbruch im Geschoß unterhalb der Holzkonstruktion) genannt werden. Aber auch kondensierender Wasserdampf aus Nassräumen, der sich den Weg durch schadhafte Dampfsperren bahnt, kann durch seinen Niederschlag auf die Holzbauteile zu einem problematischen Anstieg der Holzfeuchte führen (vgl. [7; 26]).

Da ein Ausbau von Tragwerksteilen zur Direktbestimmung der Holzfeuchte mittels gravimetrischen Messverfahren (Feucht- und Darrprobenwägung) nicht nur aufwendig, sondern meist auch nicht möglich ist, kommen hauptsächlich indirekte Messmethoden zum Einsatz. Das gängigste Verfahren zur indirekten Bestimmung der Holzfeuchte beruht auf dem Prinzip des ohmschen Widerstandes. Die „elektrische Leitfähigkeit“ des Holzes wird nämlich maßgeblich von der Holzfeuchte beeinflusst. So ist der elektrische Widerstand von Holz mit geringer Feuchte deutlich höher als jener bei höherem Feuchtegehalt. Diese Tatsache machen sich die meisten am Markt verfügbaren Handmessgeräte zu Nutze und liefern Messergebnisse in einem Messbereich zwischen 5 bis 100% Holzfeuchte. Die Messgenauigkeit bis etwa 22% HF liegt bei gut kalibrierten Geräten bei $\pm 0,5\%$. Die Genauigkeit nimmt bis zum Fasersättigungspunkt ($\approx 30\%$ HF) dabei merkbar ab und beträgt etwa ± 1 bis $2,5\%$. Oberhalb des Fasersättigungsbereichs steht die vorhandene Holzfeuchte nicht mehr in direktem Zusammenhang mit dem elektrischen Widerstand und kann somit mit dieser Messmethode nicht mehr zuverlässig bestimmt werden (vgl. [44]). Die Messgenauigkeit im Bereich unterhalb von 22% HF reicht allerdings in den meisten baupraktisch relevanten Fällen aus, da über diesem Wert liegende, gemessene Holzfeuchten ohnehin auf Fehler in der Konstruktion hindeuten und sozusagen die „Alarmglocken klingeln lassen“ sollten. Für Messungen in älteren Bausubstanzen haben sich nach eigener Erfahrung besonders jene Messgeräte bewährt, die über eine sogenannte Einschlagelektrode verfügen. Hierfür werden zwei Messnadeln, die über einen gemeinsamen Kopf verbunden sind, mehrere Zentimeter in das Holz eingeschlagen. Je nach Penetrationstiefe der Nadelspitze kann die Holzfeuchte bis zu einer Tiefe von rund 4 cm bestimmt werden. Schnellmessgeräte, die auf dem Prinzip der kapazitiven Vergleichsmessung beruhen, wie man sie beispielsweise von der Oberflächenfeuchtebestimmung aus dem Mauerwerks- oder Betonbau kennt, sind für zuverlässige Holzfeuchtemessungen nur bedingt geeignet, da damit nur Oberflächenfeuchtigkeit gemessen werden kann. Eine hohe Oberflächenfeuchtigkeit lässt allerdings keinen Rückschluss auf die tatsächlich vorhandenen Holzfeuchteverhältnisse im Inneren des Bauteils zu, da diese auch beispielsweise aus einem nur sehr kurzzeitigen Feuchtezutritt (z. B.: Spritzwasser nach einem Starkregenereignis) herrühren könnte. Ob sich die oberflächige Feuchtigkeit auch in tiefere Holzschichten fortsetzt, kann damit nur mit eben diesen Schlagelektroden ermittelt werden. Da der elektrische Widerstand auch von der Bauteiltemperatur, von der Holzart, vom Faserverlauf und von Störungen in der Holzstruktur (Risse, Äste,...) beeinflusst wird, muss dies bei der Messung unbedingt berücksichtigt werden. Den zwei erstgenannten Faktoren wird mit der entsprechenden Einstellung am Messgerät Sorge getragen. Als Messstelle ist ein geeigneter, das heißt, riss- und astfreier Bereich am Bauteil zu wählen und das Eintreiben der Schlagelektrode muss im rechten Winkel zum Faserverlauf erfolgen.

Am Ende dieses Kapitels sollten noch einige Hinweise gegebene werden, die für eine aussagekräftige Erhebung der vorliegenden Holzfeuchte in einem Tragwerk beachtet werden sollten.

- **Nur regelmäßig gewartete und kalibrierte Messgeräte verwenden!** Nur so kann gewährleistet werden, dass die Messergebnisse auch die real vorliegende Holzfeuchte widerspiegeln.
- **Referenzmessungen durchführen!** Messwerte, die signifikant vom „Durchschnittswert“ abweichen, müssen nicht sofort auf eine stark erhöhte Holzfeuchte des betroffenen Bauteils hinweisen. Besser sollte dieser Bauteil an einer nahegelegenen zweiten Stelle (einer dritten) einer weiteren Messung unterzogen werden, um den erstgemessenen Wert tatsächlich bestätigen zu können.
- **Messstellen sowohl in den Planunterlagen als auch im Bauwerk kennzeichnen!** Dies erleichtert die spätere Dokumentation und Wiederauffindung der Messstellen ungemein. Im Idealfall können die erhobenen Messwerte an ausgewählten Stellen auch mit aufgenommenen Fotos „bewiesen“ werden. Vorab sollten schon Pläne der Gespärre oder Grundrisstramlagen zumindest skizzenhaft vorliegen, da diese eine Protokollierung vor Ort wesentlich erleichtern.

- **Holzfeuchtemessungen zu zweit durchführen!** Dies ermöglicht einen wesentlich schnelleren Workflow. Person 1 führt die Messung durch, Person 2 protokolliert und fotografiert.
- **Messstellen vorab festlegen!** Eine unkoordinierte Durchführung von Feuchtemessungen ist nicht nur unübersichtlich, sondern liefert auch in den meisten Fällen keine aussagekräftigen Ergebnisse! Nur leicht zugängliche Stellen zu überprüfen, wäre für den ausführenden Ingenieur zwar bequem, doch aus eigener Erfahrung kann festgestellt werden, dass erhöhte Holzfeuchten meist in jenen Dachbereichen auftreten, die am „schwierigsten“ zugänglich sind.
- **„Visuelle“ und „handnahe“ Holzfeuchteermittlung!** Es schadet nicht, vor dem gerätegestützten Holzfeuchtemessdurchlauf mit der Konstruktion auf „Tuchföhlung“ zu gehen. Dies klingt zwar banal, aber vor allem dem ungeübten Geräteanwender raubt das Messgerät einen Großteil seiner Aufmerksamkeit, wodurch dieser womöglich „offensichtlich durchfeuchtete Stellen“ schlichtweg übersieht. So können auf sehr einfachem Weg, ohne jegliche technische Hilfsmittel, größere Durchfeuchtungen festgestellt werden. So aufgefundene Bereiche sollten natürlich mit den Feuchtemessgeräten genauer untersucht werden.
- **Holzfeuchtemessungen wiederholen!** Leider fehlt für diese Grundregel oft die Zeit (oder das Geld). Dennoch sind Holzfeuchtemessungen stets als Momentaufnahme zu verstehen. Eigentlich kann eine seriöse Holzfeuchteprognose erst nach zwei bis drei Messerhebungen verschiedener Tage abgegeben werden.
- **Holzartenkenntnis aneignen!** Die Kenntnis der verzimmerten Holzart ist von maßgeblicher Bedeutung. Quasi alle am Markt verfügbaren Messgeräte verlangen eine Auswahl des „Holzartprogrammes“, um die Widerstandsmessung auf die vorliegende Holzart zu kalibrieren. Aus eigenen Versuchen kann bestätigt werden, dass eine falsche Geräteeingabe hinsichtlich der Holzart (z. B.: Fichte anstelle von Eiche) zu extrem verfälschten Messergebnissen mit bis zu $\pm 8\%$ führen kann.

3-4.5 FUNKTIONSWEISE DER BOHRWIDERSTANDSMESSUNG

Die Bohrwiderstandsmessung, im Fachjargon auch als *Resistographie* bezeichnet, ist ein zerstörungsarmes Messverfahren, das sich sowohl für die Untersuchung von verbautem Konstruktionsholz als auch für die Anwendung auf den lebenden Baum eignet. Das Grundprinzip beruht auf einer linearen Korrelation der Dichte des angebohrten Holzes zum mechanischen Eindringwiderstand des rotierenden Bohrnadelkopfes des Gerätes. Die Methode wurde in den späten 1980er Jahren von Frank Rinn entwickelt, hat sich seither zu einer weltweit anerkannten Messtechnik für die Beurteilung des inneren Zustand von Bäumen und Hölzern entwickelt und kommt damit sowohl in der Forst- und Bautechnik, aber auch in der Dendrochronologie⁵ zum Einsatz (vgl. [1; 7; 104; 11]).

Bohrwiderstandsmessgeräte treiben eine schnell rotierende Bohrnadel mit aufgeweiteter Bohrspitze in das Holz. Üblicherweise beträgt der Schaftdurchmesser der Bohrnadel 1,5 mm und ist mit einer schneidenden Bohrkrone mit ca. 3,0 mm besetzt. Je nach Geräteausführung kommen Bohrnadeln mit bis zu 2000 mm Länge zum Einsatz, die eine maximale Bohrtiefe von 1700 mm erlauben. Für baupraktische Anwendungen kommen meist Geräte zur Anwendung, die einen Bohrweg von 300 mm bis 800 mm ermöglichen. Durch den doppelten Bohrkronendurchmesser im Vergleich zum Nadelchaft wird die Schaftmantelreibung beim Einbohren deutlich reduziert und der überwiegende Teil des Einbohrwiderstandes fällt primär direkt am Bohrkopf an. Der Bohrvorgang erfolgt unter konstantem Vorschub. Während des Einbohrvorgangs wird die Leistungsaufnahme des Motors (bei elektronisch gesteuerten Geräten) oder der Federspannungswiderstand der Bohrnadelführung (bei rein mechanischen Geräten) aufgezeichnet, um daraus auf die „Härte“ des schichtweise (jahringweise) durchörterten Holzes zu schließen. Elektronische Messgeräte speichern diese so ermittelten Bohrwiderstands-Weg-Diagramme und können mit einer zugehörigen Software ausgelesen und ausgedruckt werden. Andere, meist mechanisch arbeitende Resistographen, schreiben dieses Diagramm in Echtzeit auf einem zuvor eingelegten Wachspapierstreifen mit. Härtere Holzanteile wie etwa Spätholz setzen der eindringenden Bohrnadel einen größeren Widerstand entgegen als weiche Anteile. Da die Aufzeichnung des Bohrwiderstandes in Form von Motorleistung oder Federweg parallel zum Bohrvorschubweg erfolgt, liefert das Gerät ein Bohrwiderstandsdiagramm in Abhängigkeit zum Bohrweg. Anhand dieses Bohrdiagramms können neben größeren Fehlstellen wie Risse, Klaffungen oder Insektenfraßgänge, die sich als rapider Abfall des Bohrwiderstandes auf die Nulllinie abzeichnen, auch weichere, womöglich durch Pilzbefall geschädigte Bereiche, lokalisiert werden. Gesundes Holz erkennt man in diesen Messdiagrammen daran, dass die aufgezeichnete Widerstandskurve dem natürlichen Jahringwachstum und der damit einhergehenden Früh (weich)- und Spätholzbildung (hart) folgend, in geregelter Abfolge auf und ab schwankt.

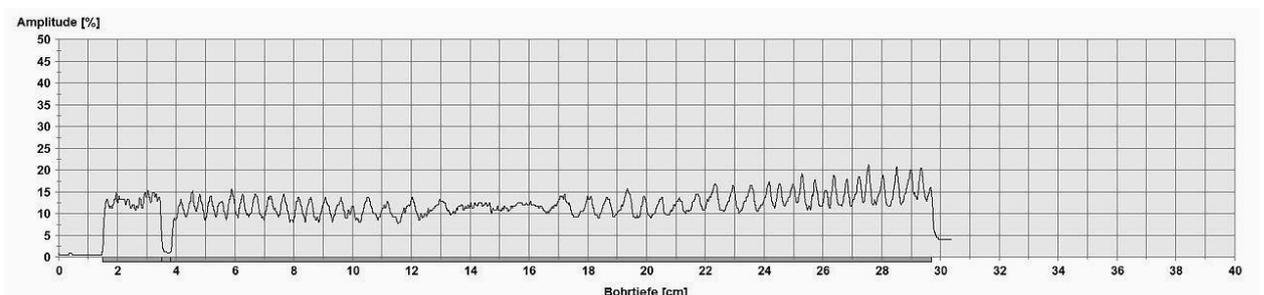


Abb. 3.11: Musterresistographie eines gesunden Holzquerschnittes [104]

⁵ Die Dendrochronologie kann als die „Lehre vom Baumalter“ übersetzt werden und findet unter anderem in der Baugeschichteforschung und Bauarchäologie seine Anwendung. Die Dendrochronologie nutzt die Jahringarchitektur eines Baumes oder Holzbauteiles, um Rückschlüsse auf Alter, Wachstum, Abstammung, Umwelteinflüsse, etc. zu generieren. Dem interessierten Leser kann für weitere Informationen zu dieser durchaus spannenden Wissenschaft das Werk von SCHWEINGRUBER Fritz Hans: *Der Jahring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. empfohlen werden.

In Abb. 3.11 ist beispielhaft eine Musterresistographie eines gesunden Holzes dargestellt. Die gleichmäßig auf und ab laufende Bohrwiderstandskurve folgt dabei dem natürlichen Jahrringwachstum. Etwa in Querschnittsmitte erkennt man einen nahezu gleichbleibenden konstanten Bohrwiderstand, der sich typischerweise bei Erreichen des Kernquerschnitts mit den sehr eng liegenden Jahrringen einstellt.

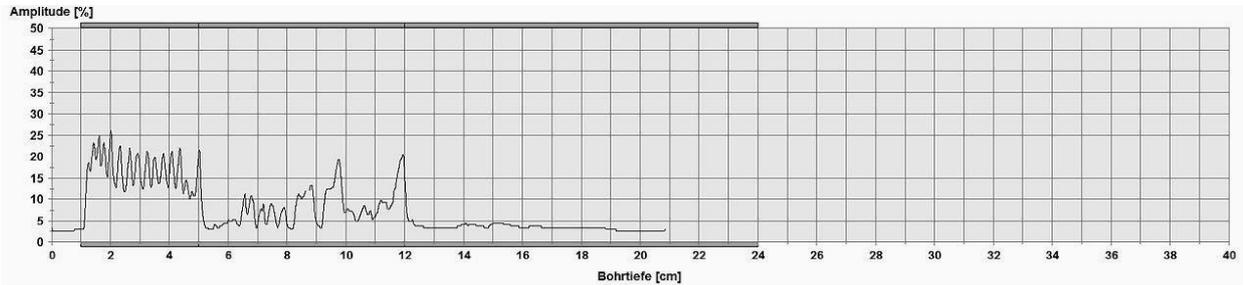


Abb. 3.12: Musterresistographie eines geschädigten Holzquerschnittes [104]

Dem Bohrwiderstandsdiagramm des gesunden Holzes sei mit Abb. 3.12 ein weiteres Musterbeispiel für eine geschädigtes bis völlig zerstörtes und damit widerstandsloses Holz gegenübergestellt. In dieser Messaufzeichnung ist ersichtlich, dass bis zu einer Penetrationstiefe von ca. 50 mm gesundes Splintholz durchörtert wurde. Danach, etwa bis zu einer Tiefe von 120 mm weicht die Gestalt der Widerstandskurve bereits deutlich von jener des gesunden Bereiches ab. Ab 120 mm leistet das Holz praktisch keinen Bohrwiderstand mehr. In beiden dargestellten Musterfällen wurden ein lebender Baum mit ca. 300 mm bzw. 250 mm Durchmesser angebohrt. Insbesondere beim Messbild des geschädigten Baumes erkennt man, dass ein von außen völlig intakt wirkender Querschnitt in seinem Inneren massivste Schädigungen aufweisen kann.

Die Interpretation der Messstreifen ist nicht immer so einfach wie in diesen gezeigten Musterbeispielen. Die Auswertung erfordert ein doch sehr umfangreiches Wissen über die Holz Anatomie, über das Holzwachstum und über die Unterschiede zwischen den einzelnen Holzarten, das ein ungeübter Geräteanwender nicht immer vollends mitbringen wird und dieser infolge nur eine sehr subjektive Einschätzung abliefern können wird. Mit etwas praktischer Erfahrung lernt man aber recht schnell, die Messergebnisse so zu interpretieren, um Fehlstellen wie Schwundrisse, welche nicht unbedingt einen bedrohlichen Schaden darstellen, von massivem Substanzverlust, beispielsweise durch einen Pilzbefall, zu unterscheiden.

Nachfolgend sollen einige durchaus wichtige Hinweise angegeben werden, die bei der Interpretation von Bohrwiderstandsmessergebnissen beachtet werden sollten:

- Grundsätzlich kennzeichnen Spitzen Bereiche mit höherer Holzdicke und abfallende Bereiche weiches Holz mit geringerer Dichte. Ein Totalabfall auf die Nulllinie mit unmittelbar nachfolgendem Wiederanstieg des Widerstandes ist ein Indiz auf eine lokale Fehlstelle. Verbleibt die Messkurve allerdings über längere Zeit auf oder nahe der Nulllinie, so ist entweder der Querschnitt vollständig durchbohrt (wenn beispielsweise die Querschnittsbreite des Bauteils aufgrund seiner verdeckten Lage nicht bekannt ist) oder aber es handelt sich um eine weitestgehend zerstörte Holzsubstanz, die der Bohrnadel keinen nennenswerten Widerstand leistet.
- Dem ungeübten Anwender ist eine Interpretation der Messkurve nur möglich, wenn die Holzart (Jahrring Anatomie), die Bohrrichtung gemessen zu den Jahrringen und die Lage der Bohrung bekannt sind. Wie beispielsweise ANSORGE in [1] ausführt, können nämlich Bohrwiderstandsmesskurven tangential angebohrter Bauteile aus Eichenholz kaum von jenen Diagrammen unterschieden werden, die sich aus dem radialen Anbohren von Fichtenholz ergeben.
- Bäume, die in unseren Wäldern wachsen und deutliche Jahrringe ausbilden, weisen im Querschnittsinneren meist größere Jahrringbreiten auf als in den borkennahen Bereichen. Doch auch dies darf nicht als allgemein gültig angesehen werden! Wenngleich bei den meisten Nadelhölzern breite Jahrringe eher vom Frühholz dominieren und damit schnell gewachsenes Nadelholz weicher ist als langsamer, meist in höheren Lagen gewachsenes Nadelholz, so gilt dies für Eichen, die breite Jahrringe eher im festen Spätholz ausbilden genau umgekehrt. Eichenholz, das schnell wächst, ist

demnach wesentlich fester und weist breitere Jahrringe auf als langsam gewachsenes, weiches Eichenholz.

- Jede Bohrwiderstandsmessung unterliegt allerlei Fehlerquellen, auf die der Anwender nur bedingt Einfluss nehmen kann. Als Beispiel können Inhomogenitäten wie Astansätze oder nicht orthogonal durchbohrte Jahrringe genannt werden. Außerdem folgt die sehr dünne Bohrnadel nicht immer dem geraden, direkten Bohrweg, sondern kann beispielsweise durch Äste oder durch einen angebohrten Schwindriss abgelenkt werden. Vor allem angebohrte Schwindrisse führen häufig zu Fehlinterpretation, da die dünne, biegsame Bohrnadel dem schräg verlaufenden Schwindriss einfach folgt, der Bohrwiderstand entsprechend auf Null abfällt und somit dem Anwender suggeriert, es liegt ein schwerer Schaden im Bauteilinneren vor.
- Achtung! Eine Ableitung von mechanischen Holzfestigkeiten aus den Messergebnissen ist nicht möglich. Die Bohrwiderstandsmessungsdiagramme zeigen nicht die „Festigkeit“ des Holzes, sondern den Widerstand, der auf die Bohrnadel wirkt, an!

Die bereits aus dem Kapitel 3-4.4 bekannten Praxistipps hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Vornahme von Holzfeuchtemessungen können praktisch direkt auf die Auslegung von Bohrwiderstandsmessungen übertragen werden. Dennoch sollen hier, im konkreten Bezug auf die Resistographie noch einige Anregungen festgehalten werden:

- **Zerstörungssarm ≠ Zerstörungsfrei!** Bei der Resistographie handelt es sich nicht um eine zerstörungsfreie Messmethode. Zwar sind die von der Bohrnadel hinterlassenen Spuren denkbar klein, stellen aber doch eine zumindest optische Schädigung, insbesondere in sensiblen, historisch bedeutsamen Bereichen eines Bauwerks dar.
- **„Blinden“ Bohrungen nicht vertrauen!** Das Anbohren von verdeckten oder nicht zugänglichen Bauteilen ist mit einem geeigneten Resistographen mit entsprechend langer Bohrnadel zwar möglich, allerdings ist eine visuelle Begutachtung des entsprechenden Bauteils für eine zuverlässige Aussage über die Beschaffenheit eines Konstruktionsgliedes unerlässlich! Als Beispiele für „blinde“ Bohrungen können das Anbohren von Deckenbalken durch die Bodenaufbauschüttung hindurch oder das Anbohren von trockenbauverkleideten Riegelwänden genannt werden.
- **Vorsicht beim Geräteumgang!** Wer bereits einmal die Bohrnadel eines Resistographen gewechselt hat, wird diesem Hinweis sicherlich beipflichten! Die sehr dünne Bohrnadel ist zwar äußerst flexibel, neigt aber dennoch, insbesondere bei langen Bohrwegen, gerne dazu abzubrechen, wenn das Gerät nicht entsprechend parallel zur Einbohrrichtung gehalten wird. Trifft die Bohrspitze übrigens auf Mauerwerk, so kann sich der Geräteanwender gleich zum hoffentlich mitgeführten Bohrnadelwechselwerkzeug begeben. - die Bohrnadel für die Holzanwendung ist nämlich sicherlich zerstört.
- **Handwerkzeug vor Spezialwerkzeug!** Ähnlich wie bei der handnahen Überprüfung von vermeintlich durchfeuchteten Bauteilen kann man mittels Abklopfen der Tragwerksglieder mit einem Hammer mit etwas Erfahrung auf sehr einfachem Weg auch Fehlstellen im Inneren des Bauteils erkennen. Eben diese Tragwerksteile sollten danach mit dem technischen Hilfsmittel Resistograph genauer untersucht werden. Wahllos Träume mit dem Bohrwiderstandsmessgerät anzubohren, ohne die vorab durchgeführte Hammerschlagprüfung, ist nicht nur zeitaufwändig, sondern auch nutzlos.
- **Zimmermannsverbindungen direkt aufmessen!** Obwohl zahlreiche Autoren in ihren literarischen Werken und Veröffentlichungen die Bohrwiderstandsmessung als ideales Werkzeug zur Erhebung von zimmermannsmäßigen Anschlussgeometrien anpreisen, sollte dennoch nicht vergessen werden, dass es auch einfachere Wege gibt, derartige Erkundungen anzustellen. Um beispielsweise eine Zapfenlochtiefe feststellen zu können, braucht man nicht sofort ein Bohrwiderstandsmessgerät! Die Standardverbindungen sind praktisch immer in identer Weise in weiteren Bereichen des Tragwerkes zur Anwendung gekommen und zeigen dort vielleicht Klaffungen oder Fehlstellungen, die eine Direktmaßnahme erlauben. Auch einfache Werkzeuge können beispielsweise zum „Erstochern“ der Zapfenlochtiefe verwendet werden. Der Einsatz einer Bohrwiderstandsmessung für die Erkundung der Anschlussgeometrie sollte nach Meinung des Verfassers dieser Masterarbeit nur als letzte mögliche Option in Betracht gezogen werden.

3-5 STUFE IV – BAUZUSTANDSANALYSE

In der Bauzustandsanalyse, die auf den gewonnen Erkenntnissen der vorangegangenen „Erkundungsstufen“ aufbaut, soll nun die Tragstruktur mitsamt ihren vorliegenden Schäden bewertet werden. Es ist zweckmäßig diese Bewertung zweistufig vorzunehmen. In einem ersten Schritt sollte mit möglichst geringem Aufwand auf Basis einer ersten, überblicksmäßigen Bestands- und Schadenserfassung eine **„Erstzustandsbeurteilung“** vorgenommen werden. Dies sollte möglichst zeitnah, also unmittelbar nach der ersten Begehung erfolgen, um tragsicherheitsbedrohende Schäden möglichst rasch aufzuzeigen und um im Extremfall sogar *„Gefahr in Verzug“* auszurufen. Im Wesentlichen geht es in diesem ersten Schritt darum, eine Aussage treffen zu können, ob die die Stand- und Funktionssicherheit des Bauwerkes gegeben ist (vgl. [13]). Ist dies nicht der Fall, so sind schnellstmögliche Sofortmaßnahmen zu planen und umzusetzen, sodass in einem zweiten Schritt eine **„Detailzustandsbeurteilung“** durchgeführt werden kann. Diese soll dann vollumfassend alle aufkommenden bautechnischen und -rechtlichen Fragestellungen zum Zustand, im Hinblick auf Holz-, Wärme-, Feuchte, Brand- und Schallschutz beantworten und die Gebrauchstauglichkeit des Tragwerkes beurteilen. Jedem Sanierungs-, Umbau-, Reparatur-, oder Instandsetzungsprojekt muss eine Beurteilung des Baubestandes vorrausgehen, da nur so zielführende Maßnahmen in Hinblick auf den Schutz des Baubestandes (Denkmalschutz) und entsprechende, anzuwendende Bauverfahren und Methoden festgelegt werden können. Leider kommt es insbesondere bei der Adaptierung ungenutzter Dachräume allzu oft vor, dass sowohl der verantwortliche Architekt als auch der Bauherr glauben, eine Bauzustandsanalyse aus Kostengründen einsparen zu müssen. Ebenso häufig rächt sich dieser Irrglaube allerdings in späteren Projektphasen in Form von Mehrkosten, „unvorhersehbaren“ Problemen und Schwierigkeiten. Nur eine eingehende Bauzustandsanalyse erlaubt es, die richtigen Maßnahmen zu setzen und deren Kostenumfang vorab richtig zu bestimmen. Leider beauftragen nur die allerwenigsten Eigentümer historischer Bauwerke, nicht zuletzt wegen den natürlich anfallenden Kosten, eine eingehende Zustandsbeurteilung des Tragwerkes, um daraus einen entsprechenden Wartungs- und Inspektionsplan auch ohne geplante Bau- oder Veränderungsmaßnahmen entwickeln zu können. Meistens bedarf dieses „Tätigwerden“ des Eigentümers einen konkreten Anlassfall (z. B.: eingetretenes Versagen, Umbauabsichten, etc.). Insbesondere bei eingetreten Schäden kommt diese Erkenntnis leider viel zu spät und eine eingehende Zustandsbeurteilung fördert oft katastrophale Bauzustände zu Tage, die sowohl für die eigentlich schützenswerte Konstruktion als auch für die „Geldbörse“ des Eigentümers nichts Gutes bedeuten.

In diesem Kapitel soll nun sozusagen der „Schrecken“ vor einer Zustandsbeurteilung genommen und ein von MEISEL im Rahmen seiner Dissertation (vgl. [39]) entwickeltes Beurteilungsverfahren vorgestellt werden. Die nachfolgende Methodik wurde von MEISEL in Anlehnung an die, bei Brückentragwerken bereits erfolgreich zum Einsatz kommende RVS (vgl. [71]) und dem Forschungsbericht von BLASS/FRESE (vgl. [3]) entwickelt und bietet eine schnelle und übersichtliche Möglichkeit, den Zustand anhand eines additiven Punktesystems zu bewerten. Das Bewertungsschema tastet das zu beurteilende Tragwerk mit Bedacht auf die wichtigsten Aspekte für den Tragwerkszustand ab und weist diesen kategorisch „Schädigungspunkte“ zu, deren Aufsummierung am Ende eine Beurteilung nach dem Schulnotensystem ermöglicht. Dieses Beurteilungssystem eignet sich aufgrund seines einfachen Aufbaus besonders gut für eine erste Zustandsbeurteilung und bietet dem fachkundigen Gutachter die Möglichkeit, eine übersichtliche, nachvollziehbare Dokumentation zu erstellen und Prioritäten für die nachfolgenden Instandsetzungsmaßnahmen zu setzen. Nicht zuletzt wegen der vielfältigen Tragwerkskonzeptionierungen historischer Holztragwerke und den unterschiedlichsten Schadensbildern kann für eine Zustandsbeurteilung natürlich niemals ein „Standardbeurteilungsprogramm“ entwickelt werden. Auch das nachfolgend vorgestellte Konzept muss dahingehend individuell auf das Schadens- und Zustandsbild des Dachtragwerkes abgestimmt werden, bietet aber hierfür eine ausgezeichnete, einfach adaptierbare Basis.

3-5.1 DATENGRUNDLAGE UND ABSCHNITTSFESTLEGUNG FÜR DIE ZUSTANDSBEURTEILUNG

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse über das Tragwerk aus Stufe II und Stufe III kann der Zustand des Tragwerkes mit dem nachfolgend vorgestellten Punktschema bewertet und beurteilt werden. Vor allem bei großen, vielseitigen Dachlandschaften empfiehlt es sich, Abschnitte festzulegen und diese jeweils einer eigenen Zustandsbeurteilung zuzuführen. Bei der Festlegung der einzelnen Abschnitte ist dabei auf statisch-konstruktive Ähnlichkeiten als auch auf die Größe der einzelnen Teilbereiche zu achten. Im Bedarfsfall können so festgelegte Beurteilungsabschnitte auch in kleinere Unterabschnitte mit spezifischen Tragwerksausprägungen eingeteilt werden. Dem Hauptkapitel dieser Masterarbeit vorweggenommen könnte eine derartige Einteilung der Dachlandschaft der „Alten Technik“ beispielsweise so aussehen:

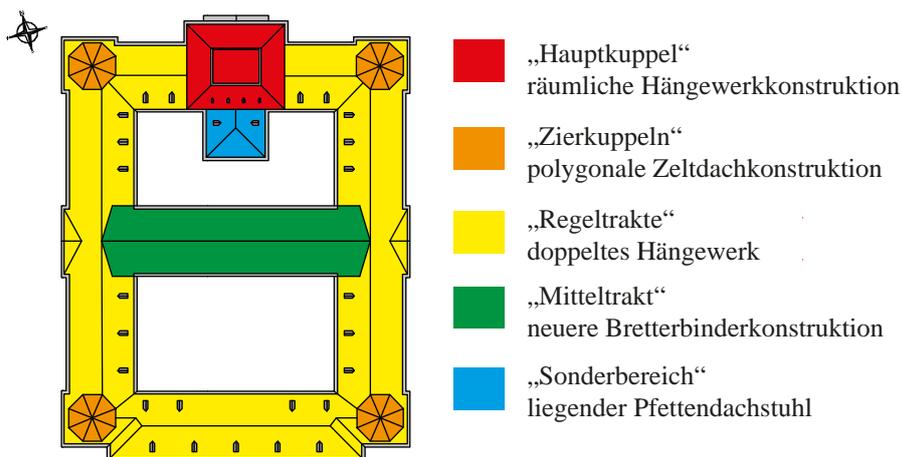


Abb. 3.13: Mögliche Variante zur Festlegung der Beurteilungsabschnitte am Beispiel der „Alten Technik“ der Technischen Universität Graz

MÖNCK (vgl. [15]) empfiehlt in diesem Zusammenhang auch die Festlegung von sogenannten *Bauzustandsstufen (BZS)*, um damit den Verschleißanteil der jeweiligen Abschnitte auszudrücken und Prioritäten hinsichtlich der Dringlichkeit der zu treffenden Maßnahmen festzulegen. Bei dieser Einteilung soll auch der aktuelle Nutzungsstatus des jeweiligen Bauwerksabschnittes miteinfließen. Das heißt, bei Vorliegen ähnlicher Bauzustandsstufen in unterschiedlichen Abschnitten erhalten jene Bereiche im Hinblick auf bauliche Ertüchtigungsmaßnahmen den Vorzug, deren Nutzungsausfall schwerwiegender fallen würde.

Dem gutachtenden Ingenieur muss bewusst sein, dass er mit seiner Zustandsbeurteilung ein Zeugnis für die Tragstruktur ausstellt. Dies sollte natürlich nach bestem Wissen erfolgen, zumal seine Attestierung die Grundlage für die weitere angestrebte Vorgehensweise hinsichtlich der Instandsetzungsmaßnahmen darstellen wird. Jeder vorgefundene Zustand im Tragwerk muss erklärbar sein. Das heißt, das Ziel der Diagnose muss eine einwandfreie Feststellung aller Schwachstellen sein. Es ist nicht zwingend erforderlich, dass die Schadensursache direkt im unmittelbaren Bereich des vorliegenden Schadens oder Tragfähigkeitsproblems zu finden ist. Nicht selten resultieren Schäden an Dachtragwerken auch aus Änderungen der Unterkonstruktionen (z. B.: Setzungen infolge eines Umbaus im darunterliegenden Geschoß). Eine ganzheitliche Zustandsbeurteilung eines Dachtragwerkes berücksichtigt demnach auch Daten und Informationen aus dem direkten baulichen Umfeld der zu diagnostizierenden Konstruktion. Die Bauzustandsbeurteilung sollte also keinesfalls „auf die leichte Schulter“ genommen werden, erfordert sie doch ein breites Spektrum an Fachwissen, bestenfalls langjährige Erfahrung mit dem Umgang älterer Bausubstanz (vgl. [33]).

3-5.2 EINFÜHRUNG EINES NOTENSCHLÜSSELS

In Anlehnung an die bereits angesprochene RVS, die die regelmäßige Zustandsbeurteilung von Brückentragwerken regelt, legt MEISEL (vgl. [39]) auch für die Beurteilung von hölzernen Konstruktionen ein leicht verständliches „Schulnotensystem“ zu Grunde. Dabei wird die Benotung des Tragwerkszustandes hinsichtlich folgender Kriterien vorgenommen:

- Schadensfolgeklasse⁶
- Tragsicherheit
- in-situ vorgenommene Probelastungen

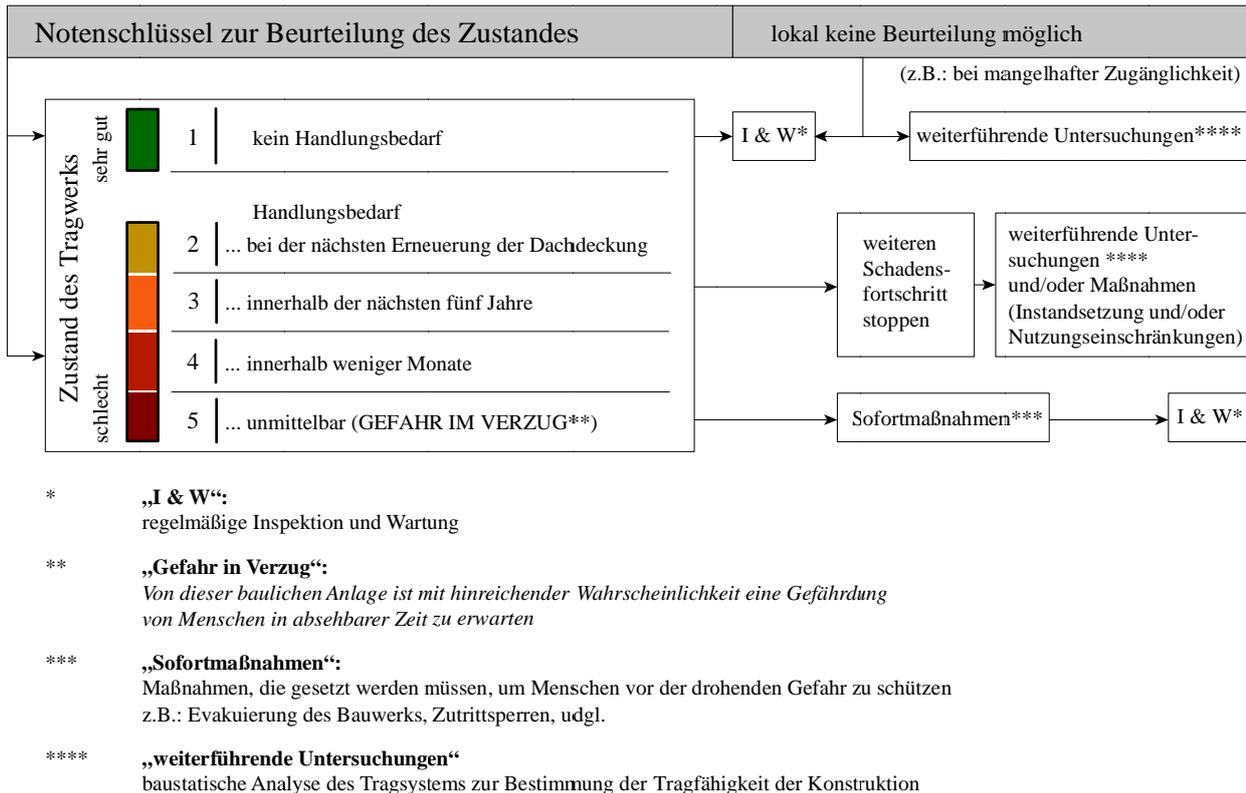


Abb. 3.14: Notensystem der Zustandsbeurteilung mit Empfehlung des jeweiligen Ertüchtigungszeitraums [39]

Zudem sei angemerkt, dass die Tragwerksbeanspruchung nur am Rande in dieses Beurteilungskonzept miteinfließt, zumal angenommen werden kann, dass die Tragwerke schon eine lange Standdauer aufweisen und ihrer Tragfähigkeit bei den anfallenden Belastungen bereits unter Beweis gestellt haben. Der überwiegende Teil historischer Konstruktionen wurde von erfahrenen Zimmermännern errichtet, welche die verwendeten Holzquerschnitte und Verbindungen ohne jegliche statische Berechnung sehr gut auf die später anfallenden Lasten abgestimmt haben. Die Belastungen, die bei einer statischen Analyse natürlich nach dem heutigen Normenstand anzusetzen wären, führen zu Ausnutzungsgraden deutlich über 100%. Dies zeigt das heutige Konstruktionen mit wesentlich höheren Lasten nachzuweisen sind. „Das Tragwerk trägt aus Gewohnheit“ - ein beliebter Spruch, um das Tragverhalten historischer Konstruktionen zu beschreiben stimmt also insofern, als dass man bei derartigen Konstruktionen tatsächlich von einer Experimentalstatik mit sehr langer Versuchsdauer sprechen kann.

⁶ unter den hier angesprochenen Schadensfolgeklassen kann jene Kategorisierung verstanden werden, die auch in der ÖNORM EN 1990: Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung zur Differenzierung der Zuverlässigkeit von Bauwerken vorgenommen wird. Je höher die Schadensfolgeklasse, desto höher die Folgen für Menschenleben im Falle eines Bauwerkversagens oder der Schaden infolge einer Funktionsbeeinträchtigung eines Tragwerks für das Allgemeinwohl.

Diesbezüglich wurde dem Ingenieur mit der ONR 24009 (vgl. [75]) ein geeignetes Werkzeug in die Hände gelegt, um die Tragfähigkeit eines Tragwerks oder einzelner Bauteile zu beurteilen. In dieser Richtlinie ist auch ein „**Vertrauensgrundsatz**“ geregelt:

Unter Nutzung stehende Bestandsbauwerke sind - im Gegensatz zum Entwurf neuer Tragwerke - langjährig unter Erprobung gestanden und lassen somit Rückschlüsse auf das reale Tragverhalten zu. Bei Fehlen von Bauschäden und konstruktiven Mängeln kann festgestellt werden, dass sich diese Tragsysteme bewährt haben. [...] Bei der Bewertung der Tragfähigkeit von bestehenden Hochbauten kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass das Bauwerk nach den zum Zeitpunkt der Errichtung geltenden technischen Regeln geplant ausgeführt wurde [...]

3-5.3 BEURTEILUNGSSHEMA

ZUSTANDSBEURTEILUNG eines historischen hölzernen Dachtragwerkes	
Schadensfolgeklasse	(maximal 1 Punkt) 0,5 ... für gewöhnliche Bauten 1 ... für Bauten mit Menschenansammlungen und Bauten an stark frequentierten Straßen
Tragsicherheit	(insgesamt maximal 4 Punkte)
Grad der statischen Unbestimmtheit [K1]	0,5 ... für statisch bestimmte oder nahezu statisch bestimmte Tragwerke
Umbauten und Instandsetzungen [K2]	0,5 ... für Tragwerke, die in den letzten Jahrzehnten (rund 50 Jahre) nicht fachgerecht verändert wurden 1 ... für Tragwerke, die in den letzten Jahrzehnten an statisch besonders wesentlichen Stäben und/oder Verbindungen offensichtlich nicht fachgerecht verändert wurden
Holzerstörung (Pilz- oder Insektenbefall) [K3]	0,5 ... für Tragwerke, die mäßige Schäden ohne fachgerechte Instandsetzung aufweisen. Diese Schäden gehen über oberflächige Beeinträchtigungen hinaus und betreffen auch statisch wesentliche Bauteile. 1 ... für Tragwerke, die schwere Schäden ohnefachgerechte Instandsetzung aufweisen 1,5 ... für Tragwerke, die schwere Schäden anstatisch besonders wesentlichen Stäben oder Verbindungen aufweisen
Verbindungs- und/oder Stabversagen [K4]	0,5 ... wenn einzelne, statisch wesentliche Verbindungen und/oder Stäbe infolge von Überbelastung oder Holzerstörung versagt haben 1 ... wenn mehrere, statisch wesentliche Verbindungen und/oder Stäbe infolge von Überbelastung oder Holzerstörung versagt haben und dies besondere Auswirkungen auf das Gesamttragverhalten hat
konstruktive Mängel [K5]	0,5 ... wenn die Dimensionen der statisch wesentlichen Bauteile außergewöhnlich schlank sind 1 ... wenn es sich beim Tragwerk offensichtlich um eine Fehlkonstruktion handelt und/oder statisch unbedingt erforderliche Stäbe oder Verbindungen fehlen
große Verformungen und/oder Klaffungen [K6]	0,5 ... wenn statisch wesentliche Stäbe und/oder das gesamte Tragwerk deutlich sichtbar verformt sind und/oder zahlreiche Verbindungen klaffen. Die Verformungen (oder Klaffungen) können nicht mehr durch die Anatomie des Holzes erklärt werden.
Verschlechterungstendenz [K7]	0,5 ... wenn die Dachdeckung, -anschlüsse und -entwässerung mangelhaft sind und/oder das angrenzende Mauerwerk durchfeuchtet ist und/oder die Bauhölzer stark verschmutzt sind und/oder aus anderen Gründen eine Verschlechterung des Zustandes zu erwarten ist.
Probebelastung	- 0,5 ... wenn in den letzten drei Jahren eine außergewöhnlich große Einwirkung auftrat und infolgedessen keine Schäden eintraten. - 1 ... analog wie zuvor, jedoch fürgezielt aufgebraachte Probebelastungen

AUFSUMMIERUNG der Punkte

weitere Kriterien [K8] und die Erfahrung des Gutachters

Die Summe der Punkte dient als erste Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung. Im Rahmen der „weiteren Kriterien“ erfolgt eine kritische Evaluierung der bisher vorliegenden Summe der Punkte als auch die Berücksichtigung aller bisher nicht beachteter Kriterien bzw. Aspekte. Die Durchführung regelmäßiger Inspektionen könnte hier beispielsweise berücksichtigt werden. Für die Vergabe dieser Punkte (positiv/negativ) ist die Erfahrung des Gutachters gefordert.

BEURTEILUNG des ZUSTANDES (Endsumme der Punkte = Note nach dem Schulnotensystem)

Abb. 3.15: Punktbasiertes Zustandsbeurteilungsschema zur Bewertung historischer Tragstrukturen [39]

3-5.4 ERLÄUTERUNGEN ZUM BEURTEILUNGSSHEMA

Nachfolgend sollen die einzelnen Kriterien [K1] bis [K8] des von MEISEL vorgeschlagenen Punktebewertungssystems (siehe Abb. 3.15), deren Aufsummierung zur „Zustandsnote“ des untersuchten Tragsystems führt, kurz erläutert werden. Als Grundlage hierfür wurde die Ausführung von MEISEL in [39] herangezogen.

3-5.4.1 Punktevergabe

Kriterien, die den Zustand eines Tragwerks nicht negativ beeinflussen, werden mit „0“ Punkten bewertet. Ebenso können in jüngster Zeit aufgetretene, extreme Lastereignisse oder in-situ durchgeführte Probelastungen, die vom Tragwerk ohne Schäden überstanden wurden, zur Vergabe von „Minuspunkten“ führen, die natürlich die Endnote dementsprechend verbessern können. Das Punktesystem ist so aufgebaut, dass je nach Schwere des vorliegenden Konstruktionsmangels oder Schadens Punktwerte folgendermaßen vergeben werden können:

- 0... keine Auffälligkeiten
- 0,5... mittelschwere Auffälligkeiten
- 1,0... schwere Auffälligkeiten
- 1,5... sehr schwere Auffälligkeiten

3-5.4.2 [K1] Grad der statischen Unbestimmtheit

Die Redundanz, also das Traglastumlagerungsvermögen einer Konstruktion im Falle eines lokalen Gebrechens, fließt in diesem ersten Beurteilungspunkt ein. Der Grad der statischen Unbestimmtheit beschreibt dabei die äußere⁷ und innere⁸ statische Unbestimmtheit des Tragwerks. Insbesondere historische, räumlich ausgebaute Dachstühle sind häufig hochgradig statisch unbestimmt, wodurch einzelne Schäden an Einzeltraggliedern in der Regel nicht zum Totalversagen der Gesamtkonstruktion führen. Einfache Sparren-, Kehlbalken- und Pfettendachkonstruktionen sind nahezu statisch bestimmt und besitzen demzufolge diese Eigenschaften hinsichtlich des Lastumlagerungsvermögens oftmals nur aufgrund des Tragvermögens der Sekundärtragstruktur (z. B.: Dacheinschalung, Dachlattung, etc.)

3-5.4.3 [K2] Umbauten und Instandsetzungen

Basierend auf dem bereits genannten „Vertrauensgrundsatz“ der ONR 24009 dürfen Bauteile und Verbindungen, die augenscheinlich ausreichend dimensioniert und sauber ausgeführt sind, als tragfähig angesehen werden. Häufig findet man in historischen Tragwerken allerdings bereits Umbauten oder Instandsetzungsmaßnahmen vor, deren Zuverlässigkeit mangels Dokumentation des Einbauzeitpunktes nicht zwingend „langjährig“ erprobt sein muss. Meistens kann aufgrund der Oberflächenfärbung des zur Instandsetzung verwendeten Holzes oder der verwendeten Verbindungsmittel zumindest eindeutig festgestellt werden, dass derartige Konstruktionen zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt in die bestehende Tragstruktur eingebracht worden sind. Je nachdem, ob dieser Einbau zu einer Veränderung und der damit meist verbunden Herabsetzung der statischen Unbestimmtheit des Gesamtsystems geführt hat, ist zu entscheiden, ob und wie viele Punkte vergeben werden sollen. Viel entscheidender hingegen ist die Qualität der Ausführung derartiger Instandsetzungsmaßnahmen. Nicht fachgerechte Ausführungen sind häufig unterdimensioniert, verändern, wenn auch meist ungewollt, das Lastabtragungskonzept der Gesamtstruktur oder sind handwerklich einfach schlecht ausgeführt und sollten im Bewertungsschema mit einem Punkt beurteilt werden.

⁷ Ein System ist äußerlich statisch unbestimmt, wenn die Anzahl der zur Verfügung stehenden Auflagerreaktionskräfte (= Festhaltekräfte) größer ist als die Anzahl der möglichen Bewegungsrichtungen eines Systems.

⁸ Ein System ist innerlich statisch bestimmt, wenn die Schnittgrößen (= Reaktion an freigeschnittenen Teilsystem) nur mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen vollständig aus der anstehenden Belastung berechnet werden können.

3-5.4.4 [K3] Holzerstörung

Eine Holzerstörung kann sehr viele Ursachen haben, deren detaillierte Erhebung bereits im Rahmen der Schadensanalyse durchgeführt worden sein sollte. Im Rahmen der Zustandsbeurteilung geht es nun darum, den entstandenen Schaden zu klassifizieren und dessen „Schwere“ abzuwägen. Als „**mäßiger Schaden**“ ist nach MEISEL eine Minderung der Tragfähigkeit des Querschnitts oder einer Verbindung um 30% bis 70% zu verstehen. „**Schwere Schäden**“ weisen jene Bauteile oder Anschlüsse auf, deren Tragfähigkeit um mehr als 70% reduziert ist oder die einen totalen Tragfähigkeitsverlust infolge der Holzerstörung erfahren haben. Außerdem sind die Lage des betroffenen Bauteils und damit seine Wichtigkeit für die Gesamttragstruktur entscheidend, ob ein schwerer Schaden mit 0,5 Punkten oder gar mit 1,5 Punkten zu bewerten ist. Tritt ein derartiger Schaden beispielsweise an einem Druckgurt eines Hängewerkes oder liegenden Stuhls auf, so ist die Tragfähigkeit des gesamten Gespärreabschnittes bei Ausfall dieses Bauteils bedroht. Findet sich ein schwerer Schaden allerdings an einem untergeordneten Bauteil, wie zum Beispiel an einem Sparren im Traufenbereich eines Pfettendachstuhls, so ist natürlich eine Ausbreitung des Schadens - Stichwort: Pilzbefall - zu verhindern, jedoch die Existenz des Tragwerkes nicht unmittelbar bedroht und kann mit entsprechend weniger Punkten bewertet werden.

3-5.4.5 [K4] Verbindungs- und/oder Stabversagen

Werden in der Tragstruktur Bauteile oder Anschlussknoten vorgefunden, bei denen bereits ein Versagen als Folge einer mechanischen Überbeanspruchung oder aufgrund einer herabgesetzten Tragfähigkeit durch eine fortgeschrittene Holzerstörung eingetreten ist, so ist dies in der Regel ein Zeichen dafür, dass die Gesamttragfähigkeit einer Konstruktion bereits gelitten hat. Mit der angewendeten Punktevergabe gilt es nun zu entscheiden, inwiefern dieses lokale Versagen einzelner Bauteile, Einfluss auf die globale Tragfähigkeit genommen hat. In jedem Fall ist, je nach Komplexität des statischen Systems, eine erste qualitative statische Analyse des nunmehr sicherlich neuen Kraftflusses unter Berücksichtigung des ausgefallenen Bauteils oder Verbindungsknotens anzustellen. Während redundant konstruierte Tragwerke den Ausfall mehrerer Bauteile ohne eine wesentliche Änderung im Hauptlastabtragungspfad überstehen, können beispielsweise ausgefallene Bundträme in Hauptgespärren von einfachen Sparrendächern, einen gänzlich anderen Kraftfluss bewirken, der nunmehr von anderen, hierfür nicht ausgelegten Bauteilen abgetragen werden muss.

3-5.4.6 [K5] konstruktive Mängel

Gelegentlich kommt es in historischen Dachtragwerken auch vor, dass wesentliche Bauteile fehlen (z. B.: fehlende Tragwerkslängssausteiung mangels Kopfband- oder Windrispenbauteile) oder auch falsche zimmermannsmäßige Verbindungen aufgefunden werden, die eine systemgerechte Kraftweiterleitung (z. B.: ungesicherte Zapfenverbindung zur Übertragung von Zugkräften) unmöglich machen. Zumeist sind von konstruktiven Mängeln betroffene Tragwerke durch große Verformungen oder bereits eingetretene lokalen Schäden gekennzeichnet. Diese Verformungen und Schadstellen weisen in vielen Fällen bereits nicht fachgerecht ausgeführte Instandsetzungsmaßnahmen auf oder wurden zumindest provisorisch unterstellt (siehe auch Punkt [K2]).

3-5.4.7 [K6] große Verformungen und/oder Klaffungen

Ist das gesamte Tragwerk oder einzelne Teile sichtbar zu deren Normallage verformt und können diese Verformungen nicht mehr durch die Schwind- und Quellvorgänge des Holzes erklärt werden, so liegt ein Schadensbild vor, das mit einem Punkt zu bewerten ist. Damit einhergehend kommt es häufig auch zu großen Klaffungen und Verschiebungen in den Anschlussknoten der zimmermannsmäßigen Verbindungen, sodass diese nicht in gewollter Art und Weise ihre Funktion im Tragwerk erfüllen können. Für Klaffungen und Fehlstellungen, die aus dem Quell- und Schwindverhalten des Holzes resultieren und die Tragfähigkeit der Verbindung beeinträchtigen (siehe auch Punkt [K5]), sollte ebenfalls, je nach Lage und Umfang im Tragwerk, ein halber Punkt vergeben werden.

3-5.4.8 [K7] Verschlechterungstendenz

Wenn selbst nach eingeleiteter Sofortmaßnahme (z. B.: Abdecken von Leckagen in einer Dachdeckung) von einer Verschlechterung des Tragwerkzustandes ausgegangen werden muss, sollten Bewertungspunkte hinsichtlich der Verschlechterungstendenz vergeben werden. Verschlechterungstendenzen liegen beispielsweise vor wenn:

- ...ein neuerlicher Feuchtigkeitszutritt zum bereits vorgeschädigten Bauteil nicht durch einfache Maßnahmen völlig ausgeschlossen werden kann. Dies gilt insbesondere im Fall von im Mauerwerk aufsteigender Feuchtigkeit.
- ...ein Wiederauftrocknen der Bauteile durch Verschmutzung, Einbauteile, Bretterverschlagen udgl. stark verlangsamt wird und damit eine Verschlechterung des Bauteilzustandes naheliegend ist.
- ...ein aktiver Pilzbefall vorliegt.
- ...ein aktiver Insektenbefall vorliegt.
- ...Bauwerkssetzungen als Grund für eingetretene Schäden des Dachtragwerkes ermittelt wurden und nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese wiederkehren. (z. B.: fehlende Unterfangungskonstruktionen, Erschütterungen infolge Baubetrieb,...)

3-5.4.9 [K8] weitere Kriterien

Dieser Punkt dient der Aufnahme weiterer Betrachtungskriterien in die Zustandsbeurteilung. Wie bereits vorab erwähnt, können hier auch positive Einflüsse („Minuspunkte“) in der Bewertung Einzug finden, um so die Gesamtbeurteilung des Tragwerkes zu verbessern. Beispielsweise können hier Einflüsse resultierend aus der Tragwerksgeometrie (z. B.: zu große Gespärreabstände) oder Schäden an Sekundärkonstruktionen, die zeitverzögert negativen Einfluss auf die Primärtragstruktur nehmen könnten (z. B.: Schäden in der Dacheindeckung bzw. deren Unterkonstruktion), mit in die Beurteilung aufgenommen werden.

3-6 STUFE V – PLANUNG BAULICHER MASSNAHMEN

Nach Abschluss der vier vorangegangenen Stufen liegen ausreichende Erkenntnisse über den Baubestand vor. In Abhängigkeit zu den in Stufe I definierten Zielen sind, auf diesen gewonnenen Informationen aufbauend, nun planerische Konzepte zu entwickeln, die die weitere Vorgehensweise mit der Bausubstanz festlegen. Diese Planungsmaßnahmen sind dabei stets bauwerksindividuell auszuarbeiten und an die durch die Bausubstanz vorgegebenen Umstände anzupassen (vgl. [41]). Dabei wird man nach MÖNCK (vgl. [15]) als planender Ingenieur mit mehreren Problemen konfrontiert. So sind alte Holzkonstruktionen meist aus handwerklichen Überlegungen und Fertigkeiten entwickelt und aufgerichtet worden, die es nun mit den derzeit verfügbaren Mitteln und Möglichkeiten (Baustoffen, Baumethoden,...) instandzusetzen, zu rekonstruieren oder zu adaptieren gilt. Diesem Umstand geschuldet, ergeben sich immer wieder Abhängigkeiten zur vorhandenen Bausubstanz, die besondere planerische Aufmerksamkeit und Fähigkeit verlangen und vom „Standard differenzierte“ Bauaufgaben fordern. Der Ingenieur ist also auf mehreren Ebenen gefordert und muss zahlreiche Fachbereiche abdecken. Im Speziellen Kenntnisse über...

- ...das Tragverhalten und die Standfestigkeitsgrenzen historischer Holzkonstruktionen in vollumfassender Hinsicht (Bauteile, Anschlüsse, Verbindungen,...),
- ...die Berechnungsmethoden und -verfahren komplexer, oft räumlicher Tragsysteme,
- ...die Modellierung zimmermannmäßiger Anschlüsse und deren Nachgiebigkeiten,
- ...die Grundsätze der zimmermannsmäßigen Holzbautechnik und Bearbeitungsmethoden,
- ...den Werkstoff Holz, seinen Einsatz und seinem Schutz - damals/heute,
- ...die zur Verfügung stehenden, modernen Bautechnologien und deren Anwendbarkeit auf ältere Tragstrukturen.

Für alle angestellten Überlegungen ist entscheidend, um welche „Art“ von Projekt es sich handelt. An dieser Stelle sei nochmals auf die Begriffsbestimmungen in Kapitel 2-3 hingewiesen, da es für die in dieser Stufe entwickelten Ausführungskonzepte von wesentlicher Bedeutung ist, ob es sich um ein Instandhaltungsprojekt oder aber um ein Modernisierungsprojekt handelt. Je nachdem, werden unterschiedlichste Überlegungen anzustellen sein, um die in der Zielanalyse festgelegten Ziele erreichen zu können.

BLIEM [35] fasst in seiner Diplomarbeit diese Stufe in der Methodik der Instandsetzung recht treffend zusammen, indem er behauptet:

„Ziel dieser Planungsstufe ist die möglichst effiziente Organisation und Koordination der einzelnen Bauabläufe [...]“

Darunter ist also zu verstehen, dass alle angestrebten Baumaßnahmen gewissenhaft auszuwählen und untereinander abzustimmen sind. Beispielsweise sollten gewisse Überlegungen unbedingt bei der Planung und Koordination berücksichtigt werden. (siehe Abbildung rechts)

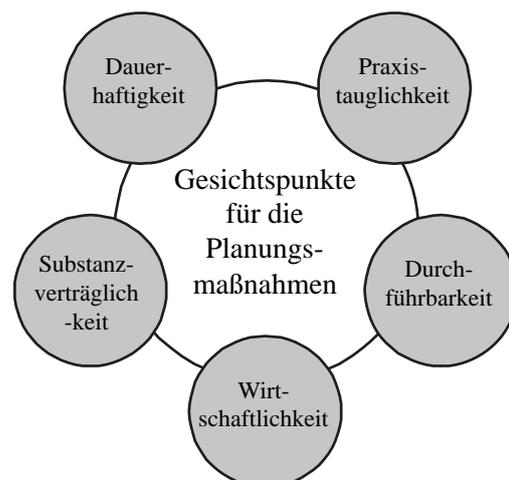


Abb. 3.16: Kriterien bei der Planung der baulichen Maßnahmen

Dieses Kapitel soll nicht der Darstellung möglicher Bauverfahren oder Bauprozesse dienen, sondern vielmehr Tipps für die Herangehensweise an die Planung der baulichen Maßnahmen abgeben.

3-6.1 GRUNDSÄTZE FÜR DEN UMGANG MIT HISTORISCHEN TRAGWERKEN

Historische Bauwerke sind häufig durch die Regelungen des Denkmalschutzes unter besonderen Schutz gestellt, wodurch die Anwendung „brachialer“ Methoden (z. B.: Abtrag und vollständiger Neubau) ohnehin untersagt ist. Doch auch bei nicht-denkmalgeschützten historischen Bauwerken sollte deren Originalität und Geschichtszeugnis durch sorgsam gewählte Baumethoden weitestgehend erhalten bleiben. Nachfolgend sollen einige **Grundsätze** zusammengetragen werden, die der planende Ingenieur bei seinen planerischen Überlegungen zu historischen Holztragwerken berücksichtigen sollte (vgl. [41], [1], [13; 15], [15], [33]):

- Die originale Bausubstanz soll möglichst erhalten bleiben!
- Das originale Tragsystem soll, insofern die Neunutzung dies zulässt, erhalten bleiben!
- Die Standsicherheit und Nutzungssicherheit des Tragwerks hat oberste Priorität!
- Den Eigentümer über die Grenzen der Machbarkeit und erzielbaren Qualität aufklären! Es entsteht selbst bei größter Sorgsamkeit kein neues Bauwerk. (Wärmeschutz, Brandschutz, Raumhöhe,...)
- Verformte Bauteile in ihrer Lage standsicher stabilisieren! Es wird ausdrücklich davor gewarnt, diese in die Ursprungslage zurückzuschieben oder zurückzudrücken.
- Keine übertriebenen Substanzauswechslungen vornehmen! Verstärkungsmaßnahme geht vor Totalaustausch!⁹
- Dem Werkstoff Holz ist bei Ertüchtigungs- und Verstärkungsmaßnahmen Vorrang zu geben!
- Holzartentreue!
- Die Holzfeuchte der neu eingebauten Teile ist mit der im Tragwerk zu erwartenden Ausgleichsfeuchte abzustimmen!
- Traditionelle Verbindungstechniken (z. B.: zimmermannmäßige Anschlüsse) sind neuartigen Verbindungssystemen (insb. Systemverbinder wie Balkenschuhe udgl.) vorzuziehen!¹⁰
- Unsachgemäße Sanierungen und Flickwerke entfernen und durch fachgerechte Maßnahmen ersetzen!
- „Schuster bleib bei deinem Leisten“ - Einfache Konstruktionslösungen entwickeln, die die vorhandene Bausubstanz berücksichtigen! Toleranzunabhängige Lösungen bevorzugen!
- Die Wirksamkeit der ausgeführten Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen muss nachweisbar sein!
- Erforderliche Eingriffe möglichst schonend gestalten! (Stichwort: Hochwinden des Tragwerkes)
- Tragende, intakte Bauteile keinen unnötigen Belastungen aussetzen!
- Sorgsamer Umgang mit auszubauenden, jedoch intakten Konstruktionshölzern! Diese sollten wenn möglich wiederverwendet werden!
- Vorhandene Konstruktionsteile nicht durch Einschnitte oder dergleichen schwächen, um diese mit neu eingebrachten Traggliedern verbinden zu können! (Stichwort: Knaggen und Aufhölzer)
- Beim Einbau von metallischen Verbindungsmitteln auf den Korrosionsschutz achten!

Außerdem sollten die durchzuführenden Arbeiten im Dachraum genutzt werden, um...

- ...alle Konstruktionsteile von Ablagerungen und Verunreinigungen zu säubern. Dies gilt generell für den gesamten Dachraum!
- ...vorhandene Schraubverbindungen nachzuziehen und schadhafte Holznägel durch neue zu ersetzen.
- ...Korrosionsschutzmaßnahmen (Verbindungsmittel) und Holzschutzmaßnahmen zu erneuern.
- ...Wartungs- und Bedienstege für die späterer Wartung und Inspektion einzubauen.
- ...Orientierungshilfen wie Gespärrekennzeichnungen und Beleuchtungen und Hinweisschilder anzubringen.

⁹ Anmerkung: sichtbare Verstärkungsmaßnahmen bestehender Konstruktionshölzer mindern den historischen Wert der Konstruktion. Diese lässt sich allerdings nicht immer vermeiden. Bei derartigen Verstärkungsmaßnahmen ist daher aufgrund der nicht auszuschaltenden ästhetischer Beeinträchtigung zwischen Substanzverlust bei Totalausbau des betroffenen Bauteils oder der additiven Ertüchtigungsmaßnahme abzuwiegen.

¹⁰ Nach der Charta von Venedig müssen neu eingebrachte Bauteile und Konstruktionstechniken, die zur Sicherung der historisch wertvollen Bausubstanz dienen oder diese ersetzen sollen, vom Original zu unterscheiden sein.

3-7 STUFE VI – AUSFÜHRUNG

In dieser vorletzten Stufe in der vorgestellten Methodik gilt es nun, die angestellten Überlegungen und Planungen in die Bauausführung zu überführen. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erwähnt, erscheint es wenig sinnvoll, an dieser Stelle mustergültige Beispiele oder gar „Regeldetails“ vorzustellen. Jede historische Holzkonstruktion fordert in Abhängigkeit zu ihrer Konstruktion, Ausführung, Schädigung und geplanten (Neu)Nutzung individuelle Lösungsansätze, die niemals zum „Standard“ werden können. Der interessierte Leser, der - nennen wir es „Ausführungsideen“ - einholen möchte, sei an dieser Stelle an die durchaus empfehlenswerte, bereits mehrfach zitierte Fachliteratur von MEISEL [38; 39], ORTNER [41], LISSNER/RUG [13], MÖNCK [15; 16] und die gesammelten einschlägigen Beiträge in den Veröffentlichungen des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz als auch jenen des Sonderforschungsbereichs 315 (SFB) der Universität Karlsruhe verwiesen. Die Betitelung dieser Fachliteratur kann beispielsweise dem Literaturverzeichnis dieser Masterarbeit entnommen werden.

Vielmehr soll in diesem Kapitel auf die Wichtigkeit der Ausführungsüberwachung durch den federführenden Ingenieur hingewiesen werden, da sich die Qualität der Planung nur durch eine baubegleitende Kontrolle bis in die Ausführung fortsetzen lässt. Außerdem wird versucht, die wesentlichen Instandsetzungsmethoden und -strategien in Anlehnung an MEISEL (vgl. [39]) und MÖNCK (vgl. [15]) zu gruppieren und entsprechend

- der Art und Weise der Ausführung
- dem Umfang der Arbeiten
- dem Schwierigkeitsgrad in der Herstellung
- der Veränderung der Tragwerksstruktur

zu ordnen. Erst durch diese Ordnung und Zuteilung wird es möglich, den Umfang, die technischen Schwierig- und Notwendigkeiten bei der Ausführung abzuschätzen.

3-7.1 ANERKANNTE REGELN DER TECHNIK

Wie für alle Bauleistungen, verpflichtet sich der planende Ingenieur auch bei den Ausführungen zur Instandsetzung von Konstruktionen die *allgemein anerkannten Regeln der Bautechnik und der Baukunst*¹¹ einzuhalten und die auszuführenden Maßnahmen dementsprechend auszulegen und zu berechnen. Durch diese Festlegung kann gewährleistet werden, dass die im Eurocode 0 [77] verlangten Forderungen an die *Tragsicherheit*, die *Gebrauchstauglichkeit*, die *Dauerhaftigkeit*, der *Brandschutz* und die *Robustheit* der Konstruktion erfüllt werden können.

¹¹ „Die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ sind technische Regelungen, die auf wissenschaftlichen Grundlagen oder fachlichen Erkenntnissen beruhen, in den Kreisen der Technik bekannt sind und in der Praxis angewendet werden. „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ können Normen, Merkblätter, sonstige technische Regelwerke aber auch Rechts- oder Verwaltungsvorschriften sein. [...] Die anerkannten Regeln der Technik unterscheiden sich vom Stand der Technik dadurch, dass letzterer eine höhere Stufe der technischen Entwicklung darstellt, sich aber in der Praxis noch nicht langfristig bewährt haben muss. Für Bauleistungen wird aufgrund der Dauerhaftigkeit des Werkes sowie des Kenntnisstandes der Ausführenden in der Regel die Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik gefordert. [...] Der Begriff „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ ist ein diffuser, unbestimmter Rechtsbegriff, dessen Wortsinn nur vage Hinweise zulässt. Fest steht nach Expertenmeinung, dass die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ keine Rechtsnormen sind. Auch ÖNORMEN sind keine Rechtsnormen, sondern lediglich private technische Regelungen mit Empfehlungscharakter. Da sie somit keine Gesetzesqualität haben, müssen sie vertraglich vereinbart werden, wenn sie zwischen den Vertragsparteien gelten sollen.“

Quelle: im Internet: http://www.abk.at/pdf/10_11_Technische_Normen_allgemein_anerkannte_Regeln.pdf (zuletzt geprüft am 05.04.2017)

3-7.2 INSTANDSETZUNGSMETHODEN

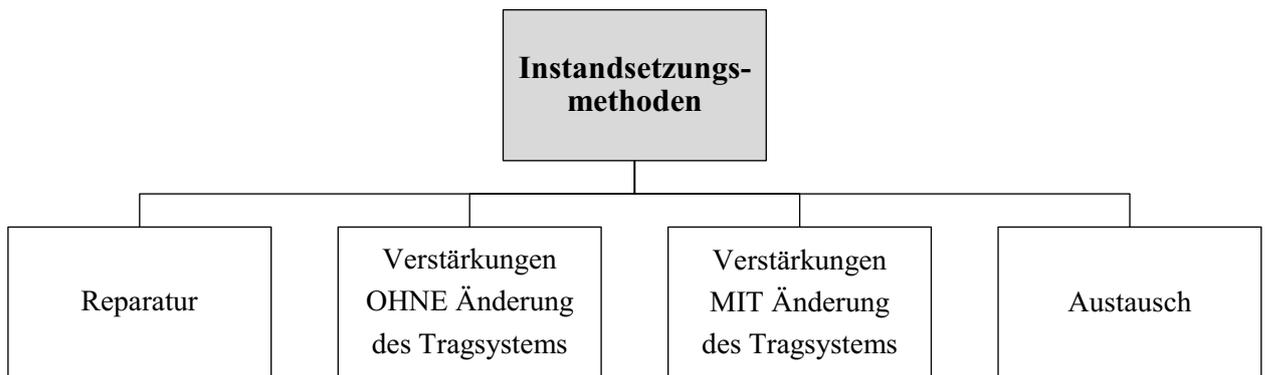


Abb. 3.17: Übersicht der zur Verfügung stehenden Instandsetzungsmethoden [15]

ad „Reparatur“

Reparaturmaßnahmen sind dadurch gekennzeichnet, dass schadhafte Teile entfernt und durch neue ersetzt werden. Diese neuen Tragwerksteile sind dabei in Form, Abmessung, Anordnung und Bearbeitung dem Original nachempfunden und diesem mindestens ebenbürtig. Bei Reparaturen wird das vorhandene Tragsystem NICHT verändert und bleibt in seiner ursprünglichen Funktionsweise und Form erhalten.

Reparaturen können unter bestimmten Voraussetzungen sinnbringend eingesetzt werden:

- Die Anzahl und Art der zu reparierenden Schäden erlaubt eine wirtschaftliche Baumaßnahme.
- Das vorliegende statische System genügt den Ansprüchen des vorgesehenen Verwendungszwecks.
- Der ästhetische Wert des Bauwerks wird durch die Reparaturmaßnahmen nicht beeinträchtigt.
- Der schadhafte Bauteil/Verbindung kann in ebenbürtiger Art und Weise reproduziert werden. (insbesondere bei aufwändigen zimmermannmäßigen Verbindungen)

ad „Verstärkungen OHNE Änderung des Tragsystems“

Darunter werden jene additiven Maßnahmen verstanden, die zusätzliche Bauteile in ein Tragsystem einbringen, ohne dieses in seinem Lastabtragungsprinzip und seiner äußeren Gestalt abzuändern. Sodosagen beschränken sich die gesetzten Maßnahmen auf die „Verstärkung“ bestehender Konstruktionshölzer, um diese für die neu gestellten Anforderungen an die Nutzung und Gebrauchstauglichkeit zu ertüchtigen. Vor allem bei denkmalgeschützten, ästhetisch wertvollen Bauten wie beispielsweise Profan- und Sakralbauten sind Verstärkungsmaßnahmen nicht immer erwünscht, da diese den historischen Wert dieser Bauwerke beeinträchtigen und/oder stören. Droht allerdings der Totalverlust bei Unterbleiben der Verstärkungsmaßnahmen, so sind diese mit Bedacht auf die Ästhetik in jedem Fall zu setzen.

ad „Verstärkungen MIT Änderung des Tragsystems“

Bei dieser Instandsetzungsmethode wird aktiv in das bestehende Tragsystem eingegriffen. Dabei werden gezielt Umbauten am ursprünglichen Tragsystem durchgeführt, wodurch die Lastpfade und die Tragwirkung bewusst abgeändert werden.

Derartige Verstärkungen sind untrennbar mit einer statischen Modellbildung und Untersuchung verbunden, um die Funktionsweise und Tragsicherheit der so neugeschaffenen Tragstruktur verantworten und nachweisen zu können. Die historische Aussage des Bauwerkes und Werterhaltung der ursprünglichen Konstruktion wird durch diese Maßnahmen meist stark eingeschränkt oder geht zur Gänze verloren.

ad „Austausch“

Quasi in letzter Konsequenz werden meist ganze Konstruktionen zur Unterstützung des desolaten historischen Tragwerks eingebaut, die deren Lasten teilweise oder zur Gänze übernehmen. Dabei kann zwischen zwei Ausführungsvarianten entschieden werden:

- eingebaute, eigenständige Zusatzkonstruktionen, die die Lasten der ursprünglichen Konstruktionen übernehmen. Dabei wird die Funktion des alten Tragwerks soweit aufgehoben, dass dieses quasi nur mehr „sich selbst tragen muss“.
- das alte Tragwerk bleibt bestehen und Konstruktionsteile werden entsprechend den neu gestellten Anforderungen ausgetauscht und adaptiert.

MEISEL fasst in [39] diese beschriebene Unterteilung nochmals sehr anschaulich grafisch zusammen:

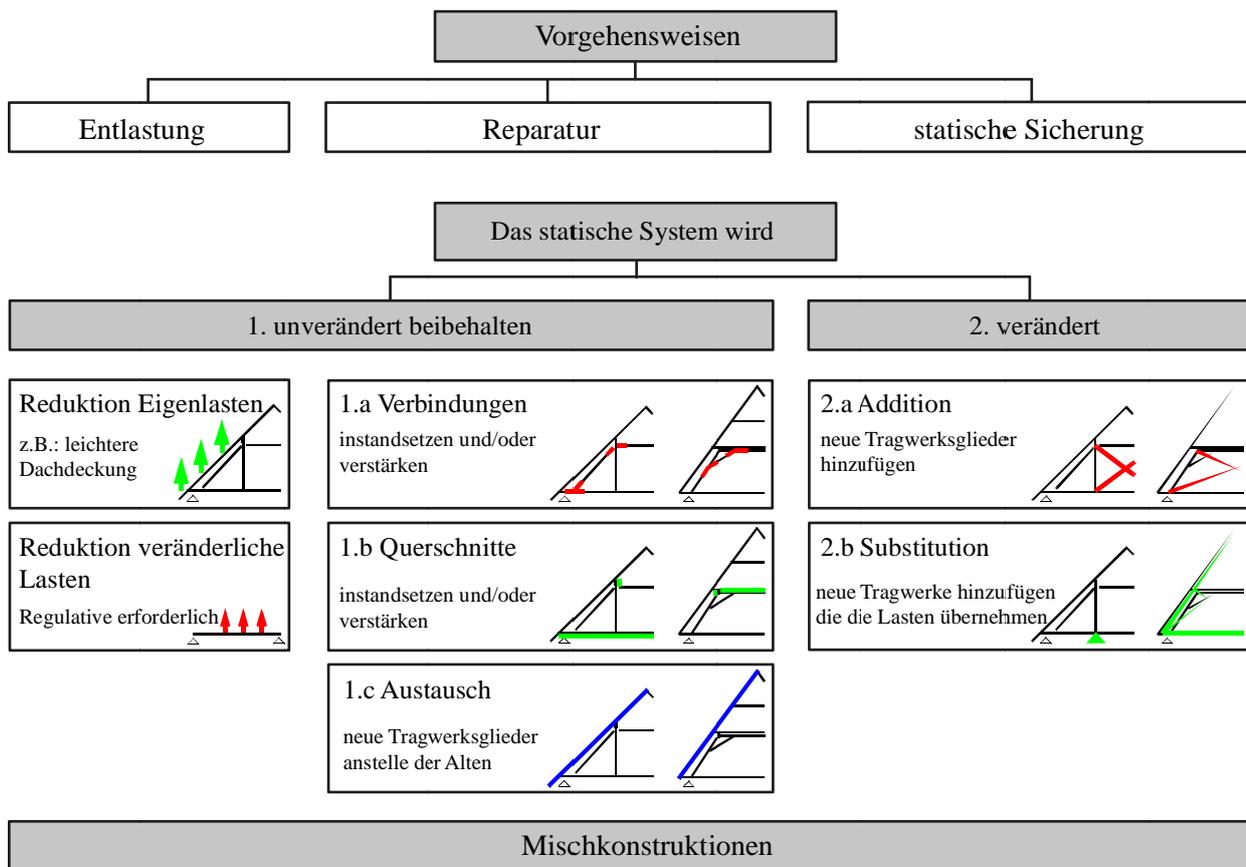


Abb. 3.18: Mögliche Gliederung der Instandsetzungsmethoden [39]

3-7.3 PRÜFUNG DER AUSFÜHRUNG

Die begleitende Kontrolle der Ausführung der Instandsetzungsmaßnahmen ist ein entscheidendes Instrument für die sachgerechte Umsetzung der geplanten Maßnahmen. Die genaueste Planung wird durch „Schlampigkeiten“ in der Ausführung zunichte gemacht. Trotz akribischer Planung und Vorarbeit werden im Laufe der Bauausführung immer wieder unvorhergesehene Problemstellungen auftreten, die durch eine begleitende Kontrolle und Prüfung der Ausführung rechtzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen gesetzt werden können. Außerdem sollte der gesamte Projektablauf in einem geführten Projektbuch dokumentiert werden. Dieses Projektbuch kann dann als Gesamtsammelsurium, beginnend mit den ersten Erkundungsmaßnahmen (Schritt II) bis zur abgeschlossenen Bauausführung (Schritt VI) als Grundlage für die anzustellenden Überlegungen hinsichtlich der Instandhaltung der Konstruktion (Schritt VII) weiterverwendet werden. Eine derartige Dokumentation als „*Unterlage für spätere Arbeiten*“ wird unter anderem in § 8 des Bauarbeitenkoordinationsgesetzes gefordert. (vgl. [66], [33])

Auszug aus dem BauKG [66]

§8 Unterlage für spätere Arbeiten

- (1) Der Bauherr hat dafür zu sorgen, dass eine Unterlage für spätere Arbeiten am Bauwerk erstellt wird.*
- (2) Die Unterlage muss die zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer bei späteren Arbeiten wie Nutzung, Wartung, Instandhaltung, Umbauarbeiten oder Abbruch erforderlichen Angaben über die Merkmale des Bauwerks (wie Zugänge, Anschlagpunkte, Gerüstverankerungspunkte, Gas-, Wasser- und Stromleitungen) enthalten, die bei späteren Arbeiten zu berücksichtigen sind.*
- (3) Die Unterlage ist in der Vorbereitungsphase zu erstellen.*
- (4) Die Unterlage ist bei Fortschritt der Arbeiten oder bei eingetretenen Änderungen anzupassen.*
- (5) Die Unterlage ist in der Vorbereitungs- und in der Ausführungsphase zu berücksichtigen.*
- (6) Der Bauherr hat dafür zu sorgen, dass die Unterlage für die Dauer des Bestandes des Bauwerks in geeigneter Weise aufbewahrt wird. Wird das Bauwerk während der Ausführung oder nach Fertigstellung vom Bauherrn an eine andere natürliche oder juristische Person oder sonstige Gesellschaft mit Rechtspersönlichkeit übergeben, hat diese für die Aufbewahrung der Unterlage zu sorgen.*

Das Objektbuch soll demnach das laufende Instandsetzungsprojekt vom ersten Projekttag an begleiten. Dabei soll es insbesondere zur Beschreibung des Tragwerks und dessen Zustands (Zuverlässigkeit), der Orientierung im Dachraum und zur Dokumentation allfälliger Instandsetzungsmaßnahmen dienen. Nach Projektabschluss werden entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen festgelegt, die im Zuge einer regelmäßigen Inspektion und Wartung am Tragwerk zu setzen sind. Beispiele, wie ein derartiges Objektbuch aufgebaut sein kann, sind beispielsweise in [22] zu finden und werden an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

3-8 STUFE VII – INSTANDHALTUNG

Generell empfiehlt sich, in einem nachgeschalteten Prozess eine „Vorher-Nachher-Analyse“, im Idealfall unter Einbeziehung aller am Instandsetzungsprojekt maßgeblich beteiligten Personen durchzuführen. Dabei können der (Miss-) Erfolg der angewendeten Instandsetzungsmethoden und die verwendeten Bautechniken besprochen und durch konstruktive, gegebenenfalls auch durchaus kritische bewertende Vorschläge verbessert werden. Aus dieser Abschlussbesprechung können wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, aus denen für künftige Projekte durchaus dienliche Grundlagen entwickelt werden können. Abseits dieses Projektresümées darf auch auf die abschließende Stufe der vorgestellten Methodik nicht vergessen werden - Die **Erarbeitung eines Instandhaltungskonzeptes**.

In einem separaten Katalog, der dem Objektbuch beigelegt wird, sind dabei wichtige Vorgaben für die künftige Handhabung des instandgesetzten Tragwerkes abzugeben. Dabei sollten unter anderem auch Intervalle festgelegt werden, innerhalb denen die vorgegebenen Instandhaltungsmaßnahmen zu erfolgen haben.

Leider konnten sich geplante, regelmäßig durchzuführende Inspektionen, Beurteilungen und Wartungen im Hochbau noch nicht in dem Ausmaß etablieren, wie diese beispielsweise im Straßen- und Verkehrsbrückenbau seit Jahren auch normativ geregelt und gefordert sind (vgl. [71]). Im Forschungsbericht „D(N)achhaltigkeit“ (vgl. [22]) nimmt sich das Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz dieser Thematik an und liefert einen, an die RVS für Straßenbrückenüberprüfung angelehnten Vorschlag ab, wie ein Wartungs- und Instandhaltungsprogramm für hölzerne Dachtragwerk im Hochbau organisiert werden kann. Dieser Vorschlag soll für die Gestaltung dieses Kapitels als Vorlage dienen.

3-8.1 VORRAUSSETZUNGEN FÜR DIE INSTANDHALTUNG

Wie bereits am Ende von Kapitel 3-6.1 vorgegriffen wurde, wird der Einbau von Wartungs- und Bedienstegen sowie eine entsprechende Beleuchtung im Rahmen der baulichen Ausführung ebenso empfohlen wie eine abschließende Reinigung des gesamten Tragwerkes von Schmutz, Bauschutt und sonstigen Verunreinigungen. Dem planenden Ingenieur wird an dieser Stelle ausdrücklich empfohlen, den Grundstein für eine spätere Überprüfbarkeit der getroffenen Maßnahmen bereits in Stufe V - Planung der baulichen Maßnahmen zu legen und Instandsetzungsmaßnahmen zu entwickeln, die auch nach Fertigstellung der selbigen eine Kontrolle der ursprünglichen Bauteile und Verbindungen zulassen. Ebenso ist eine explizite Festlegung von Zeiträumen, innerhalb denen die mit der Inspektion und Wartung beauftragten Personen die Kontrollen durchzuführen haben, zwingend festzulegen.

3-8.2 AUSMASS DER INSPEKTION

Das Ausmaß der durzuführenden Inspektionen lässt sich schwer verallgemeinern, zumal dieses stark vom Bedeutungswert und von der Schadenssensibilität des Bauobjektes abhängt. Generell sollten aber zwei „Inspektionsmodi“ festgeschrieben werden:

3-8.2.1 Kleine Inspektion

Diese Inspektion sollte in regelmäßigen Abständen, nach Meinung des Verfassers dieser Masterarbeit, im Idealfall jährlich durchgeführt und mit einem kurzen bebilderten Bericht dokumentiert werden. Der Aufwand dieser visuellen, handnahen Inspektion soll so festgelegt werden, dass diese in nur einem Tag abgeschlossen und von einer entsprechend eingewiesenen Person (z. B.: Hausmeister, Eigentümer,...) durchgeführt werden kann. Zweckgemäß sollte das Hauptaugenmerk dieser Inspektion auf die im Objektbuch festgelegten „potentiellen Schwachstellen“ (z. B.: Traufenbereiche, Verschneidungen, Durchführungen, Auswechslungen,...) gelegt werden.

Nach Durchführung dieser kleineren Inspektion können beispielsweise folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Können feuchte oder gar durchnässte Konstruktionsglieder im Tragwerk festgestellt werden?

- Kann frisches Bohrmehl von holzerstörenden Insekten vorgefunden werden?
- Weisen Konstruktionshölzer untypische Verfärbungen an ihren Oberflächen auf?
- Tritt Licht über die Dachhaut in den Dachraum? Wurden fehlende oder kaputte Dachziegel ausgemacht?
- Können Verunreinigungen wie beispielsweise Vogelkot an den Tragwerksteilen festgestellt werden?
- Wurden auch schlecht zugänglichen Tragwerksbereich bei der Inspektion untersucht?

Für die kleine Inspektion werden keinerlei technischen Hilfsmittel benötigt. (Ausnahme: Taschenlampe und Kamera für die abschließende Kurzdokumentation)

3-8.2.2 Große Inspektion

Eine große Inspektion wird von einem fachlich geeigneten Ingenieur unter Beisein der mit der Wartung und Inspektion beauftragten Person durchgeführt. Hinsichtlich der Vorgehensweise kann an dieser Stelle die in Kapitel 3-4.4 beschriebene Methodik zur Bauzustandsanalyse empfohlen werden.

3-8.3 INSPEKTIONSINTERVALLE

Als Faustregel sollte gelten:

- kleine Inspektion → jährlich
- große Inspektion → fünf bis zehnjährig

Natürlich können Umstände eintreten, die Anlass zur Verkürzung des Inspektionsintervalls geben. Beispielsweise sollte nach außergewöhnlichen Belastungen (Starkregenereignisse, Stürme, Schneefälle,...) oder im Anlassfall (heruntergestürzte Dachziegel, auftretende Wasserflecken,...) zumindest ein Kontrolldurchgang durchgeführt werden. Insbesondere bei größeren Dachlandschaften können im Objektbuch auch gestaffelte Inspektionsintervalle festgelegt werden. Ebenso ist es auch möglich, besonders gefährdete Bereiche durch eine entsprechende Festlegung im Objektbuch häufiger inspizieren zu lassen. Die Inspektionen sollten bestenfalls an oder unmittelbar nach einem Regentag durchgeführt werden, um eintretende Niederschlagswässer sozusagen „auf frischer Tat zu ertappen“.

3-8.4 AUSMASS DER WARTUNGSTÄTIGKEIT

Natürlich sollten kleinere Schäden, zum Beispiel fehlende Ziegel in der Dachhaut, sofort vom Inspektor selbst behoben werden. Bei Bedarf können auch Unternehmen (Dachdecker, Reinigungsunternehmer, Bauspengler,...) beauftragt werden. Größere festgestellte Mängel sind umgehend einem erfahrenen Bauingenieur oder Zimmermeister zu melden, sodass dieser entsprechende Reparaturmaßnahmen einleiten kann, die außerhalb der Möglichkeiten der mit der Wartung beauftragten Person liegen.

3-8.5 ZWECK DER INSPEKTION UND WARTUNG

Ogleich diese Instandhaltungsmaßnahmen natürlich mit anfallenden Kosten verbunden sind (z. B.: Honorar für den inspizierenden Zivilingenieur oder Zimmermeister bei einer großen Inspektion), kann eine regelmäßig durchgeführte Kontrolle des Tragwerkes einen wesentlichen Beitrag zur Langlebigkeit der Konstruktion leisten. Üblicherweise können Leckagen in der Dachhaut durch eine geordnete regelmäßige Inspektion frühzeitig erkannt und entsprechende Reparaturmaßnahmen gesetzt werden. Die Kosten, die aus der regelmäßigen Inspektion und Wartung heraus entstehen, sind in allen Fällen verschwindend klein im Vergleich zu jenen Kosten, die sich aus nicht entdeckten Mängeln und den daraus resultierenden Folgeschäden ergeben würden.

KAPITEL 4

GESCHICHTE DER „ALTEN TECHNIK“

4-1 UNIVERSITÄTEN IN ÖSTERREICH

(vgl. [94], [105], [101], [67], [68])

Universitäre Hochschulen haben in Österreich als Orte der Forschung, Wissenschaft und Lehre eine sehr lange Tradition. Mit der von Herzog Rudolf IV im Jahr 1365 gegründeten Universität Wien¹², hat Österreich sogar mitunter die älteste, bis heute bestehende Universität im deutschen Sprachraum. 220 Jahre später wurde die zweitälteste und damit erste Universität in der Steiermark, die Karl-Franzens-Universität von Erzherzog Karl II von Innerösterreich gegründet. Mit der Technischen Universität Graz, auf deren Geschichte in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird, wurde im Jahr 1811 von Erzherzog Johann die erste Technische Hochschule Österreichs gegründet.

Gemäß §6 des Österreichischen Universitätsgesetz (UG) gibt es in Österreich derzeit 21 öffentliche Universitäten. Durch das im Jahr 2004 erlassene Bundesgesetz über die Donauuniversität für Weiterbildung Krems (DUK-Gesetz) kommt eine weitere universitäre Bildungsstätte hinzu. Neben Studien an diesen 22 öffentlichen Universitäten können in Österreich auch noch Studien an den 12 Privatuniversitäten, an den 21 Fachhochschulen sowie an den 14 pädagogischen Hochschulen inskribiert werden.

Tab. 4.1: Staatliche Universitäten in Österreich

Universität	Gründung	Studierende WS 2015/16	Studierende SS 2016
Akademie der bildenden Künste Wien	1692	1409	1384
Alpen Adria Universität Klagenfurt	1970	10316	9533
Johannes Kepler Universität Linz	1966	19406	18361
Karl Franzens Universität Graz	1585	28780	27244
Leopold Franzens Universität Innsbruck	1669	28545	26695
Medizinische Universität Graz	2004	4164	4007
Medizinische Universität Innsbruck	2004	2991	2939
Medizinische Universität Wien	2004	7912	7758
Montanuniversität Leoben	1840	3940	3760
Paris Lodron Universität Salzburg	1962	17745	16955
Technische Universität Graz	1811	13758	13123
Technische Universität Wien	1815	29159	28072
Universität für angewandte Kunst Wien	1867	1672	1700
Universität für Bodenkultur Wien	1872	12692	12109
Universität für künstlerische und industrielle Gestaltung Linz	1973	1186	1163
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz	1970	1959	1890
Universität für Musik und darstellende Kunst Wien	1819	3025	2877
Universität für Weiterbildung Krems	1994	8644	8550
Universität Mozarteum Salzburg	1841	1739	1687
Universität Wien	1365	94738	89435
Veterinärmedizinische Universität Wien	1765	2254	2194
Wirtschaftsuniversität Wien	1898	23297	21524

¹² lateinisch: Alma Mater Rudolphina Vindobonensis

Tab. 4.2: Akkreditierte Privatuniversitäten in Österreich

Privatuniversität	Gründung	Studierende WS 2015/16	Studierende SS 2016
Anton Bruckner Privatuniversität Linz	2004	794	800
Danube Private University Krems	2009	910	1042
Karl Landsteiner Privatuniversität für Gesundheitswissenschaften	2012	83	152
Katholisch-Theologische Privatuniversität Linz	2000	393	463
Modul University Vienna Privatuniversität Wien	2007	468	584
Musik und Kunst Privatuniversität der Stadt Wien	2005	860	866
New Design University St. Pölten	2004	364	444
Paracelsus Medizinische Privatuniversität Salzburg	2003	1139	1137
Privatuniversität für Gesundheitswissenschaften Hall/Tirol	2001	1320	1369
Privatuniversität Schloss Seeburg, (Salzburg)	2007	402	506
Sigmund Freud Privatuniversität (Wien)	2005	2013	2315
Webster Vienna Private Universität	2001	541	524

Tab. 4.3: Fachhochschulen in Österreich

Fachhochschule	Gründung	Studierende WS 2015/16	Studierende SS 2016
Campus 02 Fachhochschule der Wirtschaft GmbH, Graz	1996	1061	1236
Fachhochschule Campus Wien	2001	4681	5472
Fachhochschule des bfi Wien GmbH	1996	1903	2047
Fachhochschule für Gesundheitsberufe Oberösterreich, Linz	2010	771	784
Fachhochschule Joanneum GmbH, Graz	1995	3830	4288
Fachhochschule Kärnten, Spittal an der Drau	1995	2005	2261
Fachhochschule Krems - IMC	1994	2466	2693
Fachhochschule Kufstein Tirol Bildungs GmbH	1997	1560	1735
Fachhochschule Oberösterreich Studienbetriebs GmbH, Wels	1994	5049	5685
Fachhochschule Salzburg GmbH, Salzburg Stadt	1995	2591	2863
Fachhochschule St. Pölten GmbH	1994	2093	2354
Fachhochschule Technikum Wien	1994	3592	4092
Fachhochschule Vorarlberg GmbH, Dornbirn	1989	1141	1282
Fachhochschule Wiener Neustadt für Wirtschaft & Technik GmbH	1994	3290	3616
Fachhochschulstudiengänge Burgenland GmbH, Eisenstadt	1994	1970	2289
Fachhochschulstudiengänge der Wiener Wirtschaft, Wien	1994	2492	2750
Fernfachhochschule Ferdinand Porsche, Wr. Neustadt	2006	599	689
FHG – Zentrum für Gesundheitsberufe Tirol GmbH, Innsbruck	2007	442	392
Lauder Business School, Wien	2003	303	361
MCI Management Center Innsbruck – internat. Hochschule GmbH	1995	2722	2992
Theresianische Militärakademie, Wr. Neustadt	1751	98	128

Tab. 4.4: Belegte Studien in Österreich (per Stichtag 05.01.2017)

Studium	Frauen	Männer	Gesamt
Bachelorstudien (B)	96.885	90.852	187.737
Masterstudien (M)	32.760	27.333	60.093
Doktorratsstudien (D)	11.649	13.765	25.414

Als ordentlicher Studierender können in Österreich derzeit 198 Bachelorstudiengängen (B), 201 Masterstudiengängen (M) und 16 Doktoratsstudien (D) belegt werden. Zudem bieten die zahlreichen Fachhochschulen Fort- und Weiterbildungslehrgänge an. Dem interessierten Leser dieser Masterarbeit sollen an dieser Stelle die übersichtlich angelegten Datenbanken des Bundesministeriums für

Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (bmwfw) empfohlen werden. Diese bieten einen guten Gesamtüberblick zu den einzelnen Studiengängen, etc.

Hochschulstandorte
 nach Politischen Bezirken

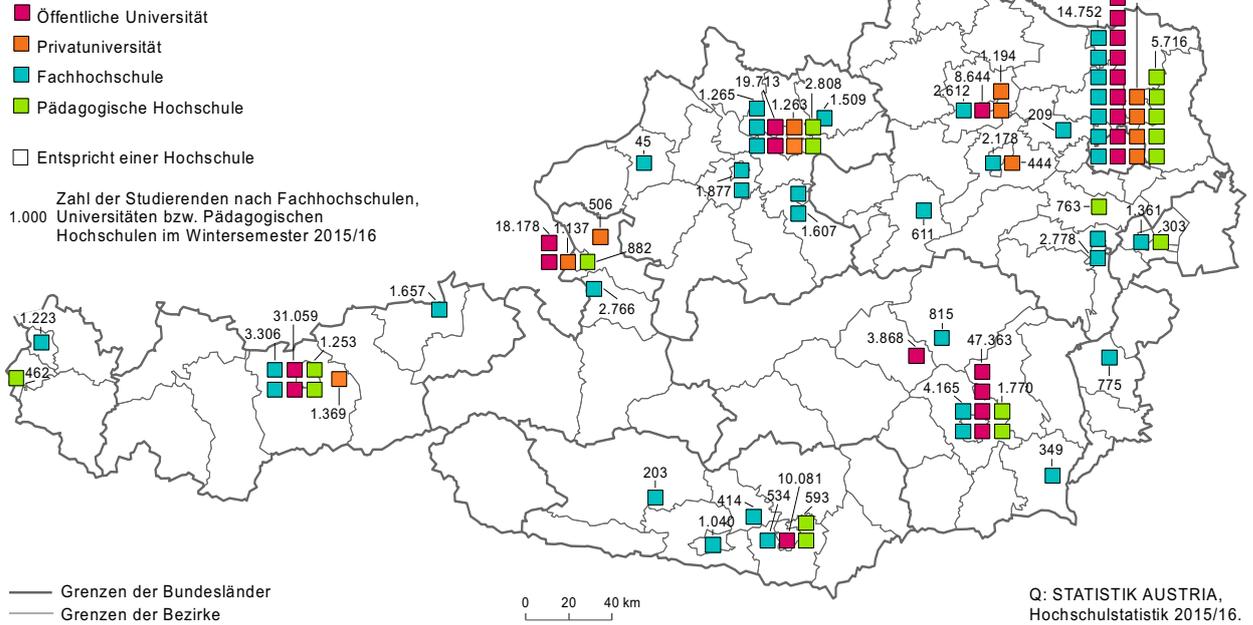


Abb. 4.1: Hochschulstandorte Österreichs [101]

4-2 LANGER WEG ZUM NEUBAU: VOM LESLIEHOF ZUR „ALTEN TECHNIK“

[19], [48], [49], [27]

Einleitend soll die Gründungsgeschichte der Technischen Universität Graz mit den wichtigsten Eckdaten chronologisch erzählt werden. Neben den „Meilensteinen“ betreffend der universitären Weiterentwicklung sollen dabei auch die Ereignisse hinsichtlich der Erweiterungsbautätigkeiten des Mutterinstituts im heutigen Grazer Joanneumsviertel sowie Eckdaten zu den zahlreich angemieteten und teilweise heute noch existierenden Gründerzeitbauten der Grazer Innenstadt erläutert werden. Dem interessierten Leser, der sich eingehend mit der Geschichte der Technischen Universität Graz beschäftigen möchte, seien an dieser Stelle vorab die Festschrift von REISMANN [19], als auch die umfangreichen Informationen auf der Homepage der Technischen Universität Graz [102] empfohlen.

1811 |

Die Leidenschaft an Natur, Technik und Volkskunde veranlassen Erzherzog Johann von Österreich (1782-1859) dazu, gemeinsam mit den Ständen der Steiermark eine Bildungsinstitution mit naturwissenschaftlich-technischer Ausrichtung zu begründen - das „Innerösterreichische Nationalmuseum Joanneum“. Am 26. November dieses Jahres überreicht der Erzherzog die Schenkungsurkunde über seine persönlichen naturwissenschaftlichen Sammlungen dem Land Steiermark und begründet damit den Ursprung der heutigen Technischen Universität Graz.

1812 – 1826 |

Als der erste Vorlesungs- und Unterrichtsbetrieb in der Grazer Raubergasse aufgenommen wurde („Lesliehof“), standen zu Beginn die Fächer Astronomie, Botanik, Chemie, Experimentalphysik und Mineralogie an der Tagesordnung. Dem Wunsch des Stifters Erzherzog Johann folgend, wurden im chemischen Labor des Joanneum verstärkt Studien zu Mineralwässern, Erzen und Erden durchgeführt. Der leitende Professor für Mineralogie Friedrich Mohs entwickelte zu dieser Zeit die nach ihm benannte „Mohs'sche Härteskala“ zur Klassifizierung der physikalischen Eigenschaften von Mineralien. Mit der wachsenden Forschungstätigkeit und Bedeutung des Joanneums stiegen auch die Anforderungen an den Gebäudekomplex des Lesliehofes, dessen Kapazitäten durch mehrere bedeutende Stiftungen und Schenkungen und dem damit einhergehenden Wachstum des Bücher- und Zeitschriftenbestandes bald an seine Grenzen stieß. Somit verhandelte man im Jahr 1820 über einen umfangreichen Erweiterungsbau in der Raubergasse und entschied über die Errichtung eines neuen chemischen Laboratoriums sowie über eine Vergrößerung der Bibliotheksräumlichkeiten. Beide Umbauten wurden in den Jahren 1825/26 fertiggestellt.

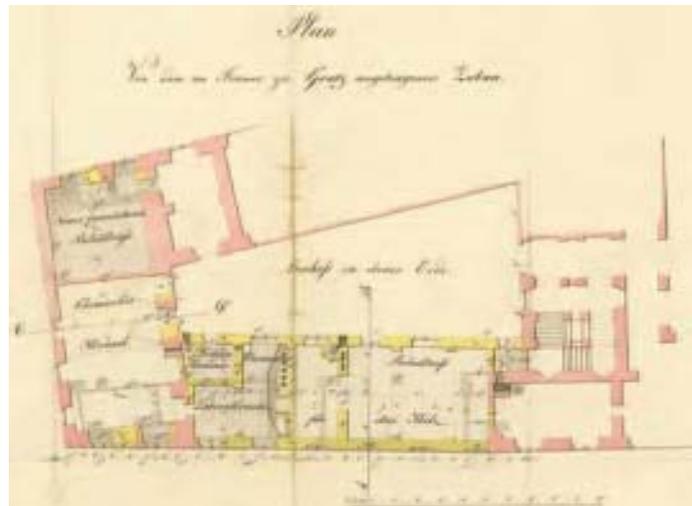


Abb. 4.2: Planskizze über die Erweiterungsbauten im Lesliehof [19]

1827 |

Nach einer Reorganisation der Lehranstalt Joanneum wurde entsprechend den Vorstellungen von Erzherzog Johann eine weitere Lehrkanzel für Mechanik und Maschinenlehre unter der Leitung von Josef von Aschauer etabliert, an der in einem zweijährigen, intensiven Lehrkurs grundlegende Mathematik, Mechanik, Hydrostatik und Aerostatik gelehrt wurde. Damit begann neben dem bis dato naturwissenschaftlich geführten Lehrbetrieb auch ein technischer Unterricht, der zugleich regen Zuström fand. Da zu dieser Zeit dem Joanneum ein einheitlicher Lehrplan weiterhin fehlte und dem Unterricht damit eine gewisse Regellosigkeit angehaftet war, wurden, trotz intensiven Bemühungen von Professor Aschauer und dem Erzherzog, die Zeugnisse des Joanneums nicht mit jenen des Wiener Polytechnikums gleichgestellt. Die rasche und positive Weiterentwicklung des Joanneums in seiner Funktion als Lehranstalt blieb dennoch nicht ungerühmt und wurde von der Studienhofkommission als „ständische Lehranstalt mit eigenem Charakter“ anerkannt und erhielt mit Ludwig Crophius von Kaisersieg, Abt des Zisterzienserstiftes Rein bei Graz, einen angesehenen Studiendirektor.

1841 |

Am 3. August 1841 wurde vom Professorenkollegium gemeinsam mit dem Erzherzog ein Lehrplan für mathematisch-technische und naturhistorische Lehrfächer beschlossen. Dieser Lehrplan führte schließlich dazu, dass Absolventen des Joanneum Graz nun mit jenen des Polytechnikums Wien gleichgestellt wurden. Die Studienhofkommission bewilligte im Rahmen dieser Gleichstellung auch die Errichtung einer ständischen Realschule in Graz, deren Besuch die technische Ausbildung der „Studierenden“ komplettieren sollte.

1845 – 1858 |

Der Studiendirektor Abt Ludwig Crophius von Kaiserstiege erkannte die Problematik des Raummangels, die sich vor allem durch die neubegründete Realschule im Joanneumsgebäude zusätzlich verschlechterte und dachte erstmals laut über eine Neuerrichtung eines größeren Lehrgebäudes nach. Nachdem er im Oktober 1845 die problematischen räumlichen Engpässe und seine Befürchtungen hinsichtlich des leidenden Studienbetriebes vor der Studienhofkommission dargelegt hatte, ersuchte er den damaligen Professor für darstellende Geometrie Moritz von Wappler einen entsprechenden Bauplanungsentwurf anzufertigen. Der geplante Neubau blieb zunächst jedoch bei einer „Idee“ und es wurden einige umliegende Häuser, wie beispielsweise das Miskay'sche Haus (heute: Stempfergasse Nr. 4), Räumlichkeiten des Palais Welsperheimb (heute: Hans-Sachs-Gasse Nr. 7) oder Mildshuh'sche Haus (heute: Schlögelgasse Nr. 7) angemietet. Im Mai 1854 erstattete die Studiendirektion dem steiermärkischen ständischen Ausschuss erneut Bericht über die angespannte Raumsituation des Joanneums. Das Joanneum-Hauptgebäude verfügte damals nur über drei größere Hörsäle - das chemische Laboratorium, einen Hörsaal für Mechanik und einen „Allgemeiner Hörsaal“ für Zoologie, Botanik, Mineralogie, Physik und Landwirtschaftslehre. Alle anderen Unterrichtsfächer mussten bereits auf die über die Stadt verteilten, angemieteten Lokalitäten ausgelagert werden. Der ständische Ausschuss lehnte den Antrag auf die Anschaffung neuer Bauplätze und einen geplanten Neubau jedoch ab, was zur Folge hatte, dass weitere Häuser in der Innenstadt angemietet werden mussten. Das Rektorat und die Professorenschaft haben die Errichtung eines neuen Gebäudes jedoch nie vollends aus den Augen verloren und verfassten, genötigt vom stetigen Wachstum der Studierendenzahlen und dem immer größer werdenden Raumbedarf, in den Folgejahren stets einen „Zustandsbericht“ an den steiermärkischen Landtag und erklärten darin die Notwendigkeit eines Neubaus zur Unterbringung der Räumlichkeiten des Joanneums.

1859 – 1862 |

Der unerwartete Tod von Erzherzog Johann infolge eines grippalen Infektes am 11. Mai 1859, der im Winter zuvor noch versuchte, die Aufstockung des Raumangebotes vor einer einberufenen Konferenz in Wien zu erwirken, machte jedoch alle Bemühungen zu einer baulichen Erweiterung des Grazer Joanneums zunächst nebensächlich und die Planungen und Verhandlungen wurden bis zum Jahr 1861 nur sehr zögerlich fortgeführt. Mittlerweile lag die Gründung des Joanneums 50 Jahre zurück. Im Rahmen einer Jubiläumsrückschau wurde die Gelegenheit genutzt, die problematische Raumsituation erneut zu thematisieren und mit den höheren Anforderungen an Technik, Forschung und Wissenschaft, die die einsetzende Gründerzeit an das Joanneum stellten, zu begründen. Aus einer Denkschrift über die Reorganisation der Technischen Lehranstalt, verfasst von Anton Winckler, einem Professor für höhere Mathematik, der mit der Ausarbeitung eines Reformentwurfs für das Joanneum betraut wurde, geht hervor, dass die geplante Etablierung einer „echten Architekturausbildung“ (bis zu diesem Zeitpunkt gab es nur eine Architekturprofessur) einen erheblichen Mehrbedarf an Räumlichkeiten für den Unterricht bedarf. Diesem Reformentwurf legte Winckler auch eine vollständige Auflistung aller benötigten neuen Räume samt geforderten Nutzungsflächen (insgesamt 2.863m² Nutzfläche) bei. Auf Basis dieser Raumkonzeptüberlegungen musste sich das Professorenkollegium nunmehr auch Gedanken über einen neuen Bauplatz machen, zumal die ursprüngliche Idee des verstorbenen Erzherzogs, das Joanneum Hauptgebäude im Lesliehof um ein drittes aufgesetztes Stockwerk zu erweitern aufgrund baustatischer Bedenken Wincklers und des zu geringen erzielbaren Raumgewinns verworfen werden musste.

1864 – 1871 |

In der fünften Sitzung des steiermärkischen Landtags am 08. März 1864 stand mitunter auch die Diskussion zur Raumknappheit der Technischen Lehranstalt auf der Tagesordnung. In späteren Sitzungen wurde ein siebenköpfiges Gremium gegründet, welches mit der Reorganisation des Joanneums betraut wurde. Im Abgeordnetengremium wurde alsbald über einen vollständigen Neubau des Hauptgebäudes, der den Unterricht, der zurzeit auf drei verschiedene Gebäude aufgeteilt war, unter ein gemeinsames Dach zusammenziehen sollte, eingehend diskutiert. Die neue Unterrichtsstätte sollte sowohl in seiner inneren Einrichtung als auch in seiner äußeren architektonischen Form dem Kaiserreich und einer technischen Hochschule gerecht werden. Die Baukosten wurden zunächst mit rund 200.000 Gulden abgeschätzt. Damals wie heute blieb die Finanzierung des Baus jedoch strittig, zumal nicht klar war, ob der Bau vom Land Steiermark oder dem Staat getragen werden sollte.

Mit dem vom Kaiser Franz Josef I genehmigten neuen Statut wurde das Joanneum mit dem Beginn des Studienjahres 1865/66 zur Technischen Hochschule aufgewertet und setzt sich nunmehr aus zwei allgemeinen Klassen und vier Fachschulen (technische Chemie, Ingenieurwesen, Maschinenbau und Land- & Forstwirtschaft) zusammen. Einhergehend mit dieser Aufwertung mussten weitere Räumlichkeiten des bereits teilangemieteten Mildschu'schen Haus in Anspruch genommen werden. Im Jahr 1868 einigte man sich über den Ankauf der so genannten „Neutorgründe“ und erwarb diese mitsamt dem Neutor und dem Areal des botanischen Gartens des Joanneums. Zeitnah legte man dem Professorenkollegium auch erste Planskizzen zur Begutachtung vor.

Allerdings war man mit dem neu angekauften Baugrund nicht ganz zufrieden, zumal die

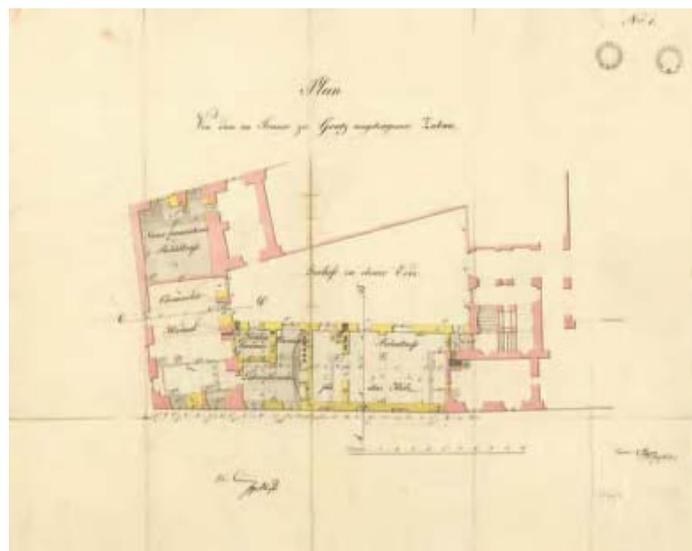


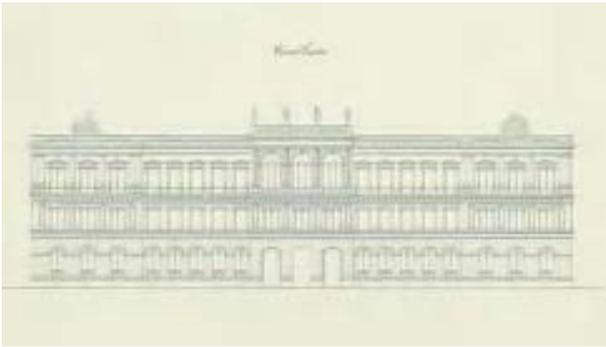
Abb. 4.3: Planskizze über den nie umgesetzten westlichen Anbau an den Lesliehof [19]

Neuerrichtung auf dem vorgesehenen Bauplatz im Bereich des Neutors, wie die Professoren befürchteten, auf heftigen Widerstand seitens der Stadtgemeinde Graz stoßen könnte. Trotz Bedenkens wurde dennoch erstmals am 30. Oktober 1869 vom Landtag dem Bauamt der Auftrag erteilt, konkrete Entwürfe für den Neubau zu liefern und diese dem Professorenkollegium zur Prüfung vorzulegen. Es wurden mehrere Architekten, darunter Josef Horky (Professor für Hochbau), Rudolf Franz Bayer (Ingenieur der k.k. privilegierten Elisabeth-Westbahn), Georg von Hauberrisser (u.a. Herz-Jesu-Kirche Graz, Neues Rathaus München) und Ernst Bartl (Direktor des steirisch landwirtschaftlichen Bauamtes), eingeladen, Projektpläne und Kostenvoranschläge vorzulegen. Die Ausschreibung forderte dem Beispiel des kurz davor, im Jahr 1870 eröffneten Polytechnikums Aachen (=erste polytechnische Lehranstalt des Königreich Preußen, heute: RWTH Aachen) folgend, zwei voneinander unabhängige Gebäudestrukturen für das „Hauptgebäude“ und das „chemische Laboratorium“. Dieses Bauwerk als Musterbeispiel in der Ausschreibung festzulegen war ein recht ambitioniertes Ziel, galt es doch damals europaweit als modernster Hochschulbau im technischen Bereich.

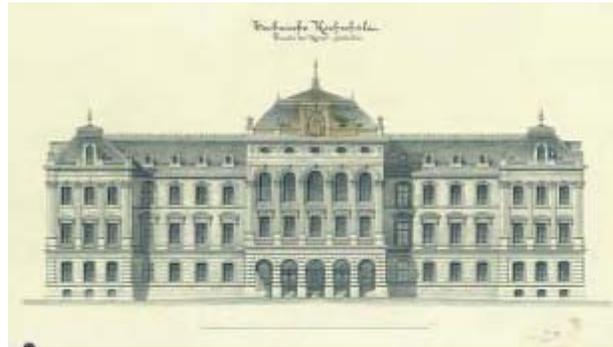


Abb. 4.4: Ansichtskarte der Technischen Hochschule Aachen (heute: RWTH Aachen) [19]

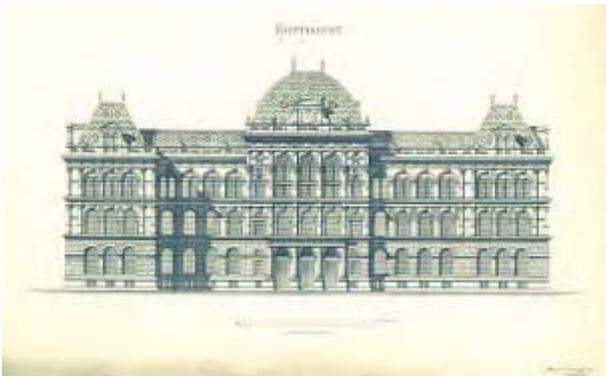
Inzwischen war die Technische Hochschule bereits weit über die südöstlichen Grenzen der Donaumonarchie bekannt und zählte in den Jahren 1870/1871 bereits 362 Hörer. Der Wunsch nach einem größeren Hauptgebäude war also durchaus begründbar. Alle vier eingeladenen Architekten lieferten bis zum Stichtag, der mit 1. September 1871 angesetzt war, erste Projektpläne und Fassadengestaltungen ab. Mit Ausnahme von Architekt Horky, der die U-förmige Grundrissform des Hauptgebäudes der Aachener Hochschule quasi übernommen hatte, setzten die anderen Architekten allesamt auf eine allseits geschlossene, nahezu quadratische Grundrissform mit zentral gelegenem Innenhof.



Fassadenentwurf von Franz Rudolf Bayer



Fassadenentwurf von Ernst Bartl



Fassadenentwurf von Georg von Haberrisser



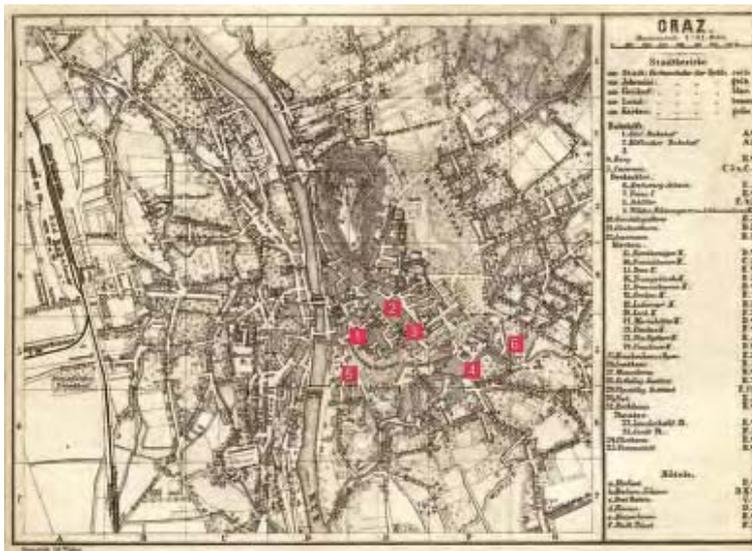
Fassadenentwurf von Josef Horky

Abb. 4.5: Fassadenentwürfe nach dem Vorbild der Technischen Hochschule Aachen [19]

Obgleich der bereits vorliegenden Entwürfe und Unterlagen über den Neubau, geriet die Umsetzung des Bauvorhabens erneut ins Stocken, da sich der steiermärkische Landtag hinsichtlich der Finanzierung nicht mit dem Staat einigen konnte.

1874 – 1875 |

Der steiermärkische Landesausschuss konnte schließlich doch ein zufriedenstellendes Übereinkommen mit der österreichischen Staatsregierung treffen. Mit der Zustimmung des Kaisers wurde die Technische Lehranstalt Joanneum als „kaiserlich-königliche Technische Hochschule in Graz“ (k.k. Technische Hochschule) vom Staat übernommen, wodurch die Kompetenzen nunmehr in der Hand des Gesamtstaates und damit nicht mehr im Verantwortungsbereich eines einzelnen Kronlandes lagen. Mit dieser Übernahme der Hochschule durch den Staat wurden auch mehrere strukturelle Änderungen und Neuerungen wie beispielsweise die Auflassung der Fachschule für Land- und Forstwirtschaft sowie die Etablierung neuer Professuren (Wasserbau, Baumechanik und Maschinenlehre) durchgesetzt. In dieser Zeit wurde auch die neue Bibliothek der Technischen Hochschule gegründet und die zahlreich angesammelten Standardwerke und Zeitschriften aus der Joanneumsbibliothek in diese überführt. Zum Zeitpunkt des Ausrufens der k.k. Technischen Hochschule waren die wesentlichen Räumlichkeiten des Joanneums durch die zahlreichen Anmietungen in den heutigen Stadtbezirken „Innere Stadt“ und „Jakomini“ bereits auf sechs „Hauptstandorte“ aufgeteilt.



1. Joanneums-Hauptgebäude (Raubergasse 10)
2. Miskay'sches Haus (Stempfergasse 4)
3. Palais Welserheimb (Hans-Sachs-Gasse 4)
4. Mildschuh'sches Haus (Schlögelgasse 5)
5. Lindner'sches Haus (Neutorgasse 48)
6. Mandellgründe (wurden im Jahr 1875 angekauft)

Abb. 4.6: Standorte des Joanneums zum Zeitpunkt der Überführung als k.k. Technische Hochschule [19]

Inzwischen liegt der Ankauf der Neutorgründe im Jahr 1886 bereits 7 Jahre zurück und wurde aufgrund des immer wieder aufgeschobenen Baustartes des westlichen Erweiterungsbaus des Lesliehofs einer anderen Widmung zugeführt¹³. Der Gedanke, die vorhandenen Forschungseinrichtungen der bereits seit 1870 im Ausbau befindlichen Karl-Franzens-Universität mitbenutzen zu können und das neue Hauptgebäude der k.k. Technischen Hochschule ebenso in diesem Baufeld zu errichten, wurde vom Professorenkollegium dankend abgelehnt. Die Professoren konnten der Idee der Stadtregierung nur wenig abgewinnen. Somit musste neuerlich ein geeigneter Bauplatz gefunden werden.

Dieser war mit den Mandellgründen, einem größeren freien Baufeld in der Nähe des gleichnamigen, herrschaftlichen „Mandellschlösschen“¹⁴ bald gefunden. Allerdings war auch das fürstbischöfliche Konsistorium an diesem Grundstück interessiert, um darauf jene Kirche zu errichten, die heute als Herz-Jesu-Kirche in der nahegelegenen Naglergasse bekannt ist. Der Kaufvertrag über dieses Grundstück wurde jedoch mit 86.000 Gulden zugunsten der Technischen Universität Graz abgeschlossen. Da der Baugrund allerdings etwas abgelegen vom Ursprungsinstitut situiert war, blieb nichts anderes übrig, als diese Distanz der Technischen Hochschule vom Joanneum in Kauf zu nehmen. Das damit, durch die technische Weiterentwicklung und der Industrie bedingten Aufkommens eines eigenen Fachgebiets – den Ingenieurwissenschaften, ein „eigener Universitätsstandort“ in Graz geschaffen wurde, konnten die Beteiligten wohl damals noch nicht wissen. Bekanntlich, wurde nämlich rund 40 Jahre später, im Jahr 1917 die Berufsbezeichnung „Ingenieur“ (und um 1938 die Bezeichnung „Diplom-Ingenieur“) in Österreich eingeführt, zu deren Erhebung in diesen Berufsstand ein Abschluss eines Studiums der Ingenieurwissenschaften an einer Hochschule erforderlich ist.

1878 |

Die Übernahme der Lehranstalt durch die staatliche Verwaltung und die Größe des neu erworbenen Baugrundes auf den Mandellgründen eröffneten neue Möglichkeiten für das Neubauprogramm. Es wurde erneut ein Professorenkomitee ins Leben gerufen, dem unter anderem die später federführenden Planer Professor Johann Wist und Professor Josef Horky angehörten. Horky hatte, wie bereits zuvor erwähnt, einen vielversprechenden Entwurf über den Ausbau des „Mutter-Institutsgebäudes“ abgeliefert. Auch Professor Wist, der zu dieser Zeit Studienreisen nach Berlin, Hannover und Dresden unternahm, schien

¹³ Anstelle des Erweiterungsbaus zum Lesliehof wurde der Bereich des ehemaligen Botanischen Gartens des Joanneums die „Neue Galerie“ des heutigen Universal Museums im Grazer Joanneumsviertel errichtet.

¹⁴ Das Mandellschlösschen musste im Rahmen des Neubaus der k.k. Technischen Hochschule geschliffen werden. siehe auch „Kapitel 2.2 – Das Mandellschlösschen und seine Geschichte“ der Eingangs empfohlenen Literatur.

wie dafür geschaffen, die nunmehr angedachten Baupläne, orientiert am Baukonzept des Dresdner Polytechnikums, durch seine Erfahrungen zu bereichern. Ein erneutes Aufkeimen der Idee über die geteilte Nutzung des chemischen Labors gemeinsam mit der Karl-Franzens-Universität wurde von beiden Universitätsseiten baldigst im Keim erstickt. Nachdem der Grazer Gemeinderat die neue Straßentrassierung im Bereich des Technikerviertels genehmigte und der Überwölbung des durch das Mandellgrundstück führenden Kroisbaches zugestimmt hatte, stand der Bewilligung des Neubaus nichts mehr im Weg und die Professoren Horky und Wist wurden vom Kollegiums mit der Detailplanung beauftragt. Seitens des Ministeriums in Wien wurde vor Planungsbeginn darauf hingewiesen, dass das Hauptgebäude möglichst einfach, um nicht zu sagen kostensparend und mit einer maximalen Grundflächengröße von 900 bis 950 Quadratklaftern (3.237 bis 3.415 m²) auszulegen ist. Das chemische Laboratorium sollte in etwa mit einem 1/3 dieser Größenordnung geplant werden.



Abb. 4.7: Das Polytechnikum Dresden als Musterbeispiel für den Neubau auf den Mandellgründen [103]

1881 |

Um einem neuerlichen Hinauszögern des Baustarts entgegenzuwirken - die Detailplanung hatte sich aufgrund der verordneten „Einsparungsmaßnahmen“ hinsichtlich der Bauwerksausgestaltung etwas schwieriger erwiesen - versuchte das Rektorat Druck auf das Ministerium in Wien auszuüben und ersuchte dieses, bei der Erstellung des Budgets einen Baustart der neuen k.k. Technischen Hochschule im Jahr 1883 zu berücksichtigen. Nach eingehender Prüfung der Planunterlagen von Wist und Horky durch das Departement für Hochbauten im Ministerium wurde das Projekt dem Kaiser vorgelegt und man erhielt schlussendlich die Erlaubnis 1884 mit dem Bau der Hochschule zu beginnen.

4-3 DIE BAUGESCHICHTE DER „ALTEN TECHNIK“

Der Neubau der k.k. Technischen Hochschule gilt als der erste moderne Grazer Hochschulbau, obgleich das neue Hauptgebäude der rund 220 Jahre zuvor gegründeten Karl-Franz-Universität erst im Jahr 1895 fertiggestellt und eröffnet werden konnte. Nachfolgend soll die Baugeschichte des heute als „Alte Technik“ bekannten Hochschulbaus dargestellt werden:

1884 |

Der offizielle Spatenstich zum Neubau der Technischen Hochschule erfolgte feierlich am 26. November 1884. Dieser Termin wurde wohlwissend und nicht zufällig gewählt, war es doch jener Tag, an dem vor exakt 73 Jahren das Joanneum durch Erzherzog Johann ins Leben gerufen wurde. Der Bedeutung dieses Tages für die Technische Universität Graz wird heute noch Tribut gezollt. Der eigens für die Feierlichkeiten angefertigte, reich ornamentierte Spaten mit eingraviertem Datum sowie eine kunstvoll verzierte Truhe sind heute in einer Vitrine vor der Aula der „Alten Technik“ ausgestellt.



Abb. 4.8: *Requisiten der Spatenstichfeier im Jahr 1884*

Die Bauleitung für das Projekt übernahm Professor Wist persönlich – sein Kollege Professor Horiky legte seine Mitarbeit am Projekt nach einer schweren, bereits lange andauernden Erkrankung nieder. Gemäß des ausgearbeiteten „Bauzeitplanes“ war eine Fertigstellung für das Jahr 1887 vorgesehen, was sich allerdings schnell als unhaltbar erwiesen haben dürfte, wie aus einem Gesuch auf Fristerstreckung auf Oktober 1888 an das Ministerium für Kultus und Unterricht hervorgeht. Für das Bauvorhaben wurde ein Gesamtkostenaufwand von rund 650.000 Gulden angeschlagen. Die Erd-, Mauer und Zimmermeisterarbeiten wurden dem Stadtbaumeister Johann De Colle, der neben zahlreichen anderen ansässigen Baumeistern das wohl vielversprechendste Offert gelegt haben dürfte, übertragen. Die einsetzende Dezemberkälte ließ allerdings einen größeren Baufortschritt in diesem Jahr nicht mehr zu.

1885 |

Am Ende der Frostperiode, im April 1885, wurden die Fundamente für den neuen Hochschulbau gelegt. Der Neubau stieß auf großes mediales Interesse, wie aus zahlreichen Zeitungsberichten dieser Zeit zu entnehmen ist. So ist beispielsweise in der Ausgabe der „Grazer Tagespost“ vom 25. August 1885 zu lesen:

“Die Entwicklung des zwischen der Leonhardstraße und der Mandellstraße gelegenen Stadtteiles macht heuer bedeutende Fortschritte. [...] In den meisten genannten Gassen sowie in der Rechbauerstraße und in der Wäschergasse sind in diesem Sommer Neubauten entstanden. An der Ecke Rechbauer- und der Morellenfeldgasse, gegenüber dem Baue der Technischen Hochschule, dessen – in der abfallenden Lessingstraße weit über das Straßenniveau hinausragendes – Souterrain bereits vollendet ist, wird an dem Fundamente eines großen Eckhauses gearbeitet.”

Demzufolge wurden im Umfeld der k.k. Technischen Hochschule auch weitere größere Bauvorhaben im Bereich des Glacis umgesetzt. Ende Dezember 1885 war der Rohbau des Mitteltraktes bereits provisorisch mit schiefergedeckten Brettern überdacht worden. Die anderen Teile des Bauwerks waren zu diesem Zeitpunkt etwa bis zur Parterrehöhe hochgezogen.

1886 |

Das Baugeschehen ging in diesem Jahr zügig voran. Bereits im Spätsommer waren alle Mauern bis zu den Traufengesimsen hochgezogen und alle Rauch- und Ventilationsschornsteine aufgesetzt. Auch die Zimmermannsarbeiten waren schon voll im Gange und konnten über den Regelbereichen der Längs- und Quertrakte mitsamt den vier kleineren Kuppeln bei den Eckrisaliten bereits fertig gestellt werden. Die große Hauptkuppel über der Aula blieb derweil außen vor. Auch die Fassadengestaltung, mit Ausnahme der Hauptfassade an der Gebäudenordseite, waren Ende 1886 mitsamt den eingesetzten Kastenfenstern weitestgehend fertiggestellt. Auch der bis dato frei fließende Kroisbach an der südwestlichen Bauplatzgrenze wurde inzwischen vollständig eingewölbt und war bereit für die Überbauung durch die späteren Einfriedungsmauer und Gartengestaltungsbauten. Im Gebäudeinneren waren alle Decken- und Gewölbedeckenkonstruktionen mitsamt dem Grobputz fertiggestellt, während die letzten zwei der insgesamt zwölf Heizungsanlagen für die Unterrichtsräume fertiggestellt wurden. Auf Wunsch des Rektorats wurden auch noch kleinere Änderungen betreffend der Raumsituierung vorgenommen. Beispielsweise wurden die ursprünglich um Hoftrakt vorgesehenen Rektoratsräume an die Nordseite zur großen Aula verlegt.

1887 |

Nachdem Ende 1886 der Großteil der Räumlichkeiten als auch die Fassaden des West- und Osttraktes fertiggestellt waren, wurden die Wintermonate dazu genutzt, die Bauarbeiten im Gebäudeinneren voranzutreiben, sodass der Studienbetrieb im Studienjahr 1887/1888 in den bereits fertiggestellten Bauabschnitten aufgenommen werden konnte. So wurden beispielsweise die verbleibenden Verputz- und Stuckarbeiten an den Wänden und Decken in Angriff genommen. Nachdem die Blindböden und die darauf verlegten Eichenbretterböden in einigen Hörsälen fertiggestellt waren, wurden sogleich erste Inneneinrichtungen und Möblierungen aufgestellt. Auch die Fertigstellung der aufwendigen Hauptstiege zur Aula konnte zu Sommerbeginn vermeldet werden. Als Hauptziel für das fortlaufende Jahr, war jedoch die Fertigstellung des nordseitigen, der Rechbauerstraße zugewandten Haupteingangsrisalits geplant, um alsbald mit dem Innenausbau des Vestibüls sowie mit der Fertigstellung des Aulafestsaales fortsetzen zu können. Die Fertigstellung der Hauptfassade mit den vier korinthischen Säulen, die ein reich ausgeschmücktes Gebälk mit der Aufschrift „k.k. Technische Hochschule“ tragen und von einem Giebel geziert wird, sollte mitsamt den Steinmetzarbeiten der Attikabalustraden im August desselben Jahres soweit fortgeschritten sein, dass die Gerüste größtenteils entfernt und mit der Aufrichtung der Hauptkuppel begonnen werden konnte. Für die Hauptkuppel räumte Stadtbaumeister De Colle eine Bauzeit von ungefähr 2 Monaten ein.



Abb. 4.9: Entwurf der nordseitigen Hauptfassade zur Rechbauerstraße¹⁵ [19]

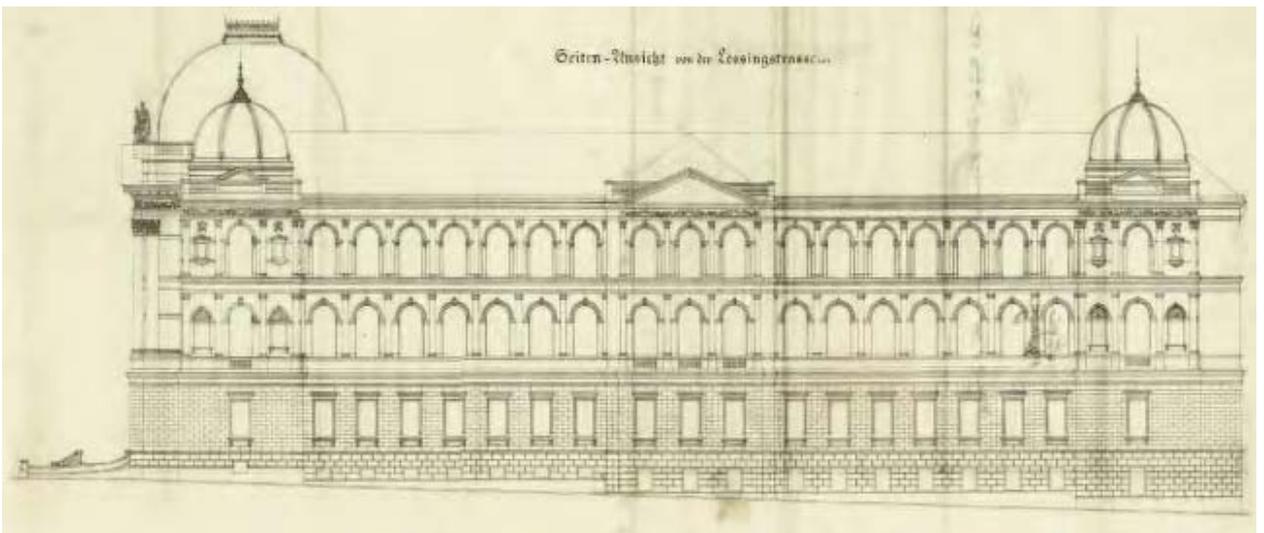


Abb. 4.10: Entwurf der westseitigen Fassade zur Lessingstraße [19]

¹⁵ Der Entwurf der Hauptfassade von J. Wist orientiert sich an den früheren Überlegungen Josef Horkys zur Fassadengestaltung für den nicht zur Ausführung gekommenen Erweiterungsbau des „Mutterinstituts“ bei den Neutorgründen. Der beeindruckend detaillierte planerische Entwurf der Fassade von Professor Wist, wurde bis ins letzte Detail bei der späteren Ausführung der repräsentativen Hauptfassade der „Alten Technik“ berücksichtigt und umgesetzt. Die Fassade selbst besteht aus einem gelblich-weißen Grobkalk, dem Aflenzer Sandstein. Für die gebäudeumlaufende Sockelverkleidung wurden feste Steine aus dem Steinbruch bei St. Georgen an der Stiefing verwendet. Die am Gesims des Hauptrisalits thronende, rund 3,30 m hohe Mittelstatue zeigt die Personengruppe „Austria, schützende Künste und Wissenschaften“ vom Bildhauer H. Brandstetter. Die weiteren 4 Statuen repräsentieren die vier Hauptrichtungen der an der Universität gelehrteten modernen Technik: Karl Friedrich Schinkel (Bauwesen), Georg Stephenson (Eisenbahnwesen), Ferdinand Jakob Redtenbacher (Maschinenbau) und Justus von Liebig (Chemie). Die Fassaden und Bauwerksgestaltung kann dem Elektizismus zugeordnet werden, einer architektonischen Stilrichtung, in der verschiedene Gestaltungselemente vergangener Stile verarbeitet und zu einem neuen Werk zusammengefügt werden.

Parallel zu den Arbeiten am Haupttrialsalit wurde die Gebäudetechnik wie etwa Gas- und Wasserleitungen, Abflussrohre und Entlüftungsstränge der Sanitärtrakte fertiggestellt. Noch im Herbst 1887 wurde mit den Erd- und Außenanlagengestaltungsarbeiten begonnen. Dabei wurden die Fundamente für die umlaufende Einfriedungsmauer und die großzügig angelegte, zehn Meter breite äußere Freitreppe gelegt. Ebenso wurden die Wege und Pflasterungen rund um das Gebäude und im Innenhof angelegt. Mit Einsetzen des Winters wurde, wenige Tage nachdem das Kronprinzenpaar Kronprinz Rudolf mit Gemahlin Stephanie die inzwischen weitestgehend fertiggestellte Hochschule besucht haben, mit der umfangreichen Übersiedelung von Bibliothek und Lehrmaterialsammlungen begonnen.

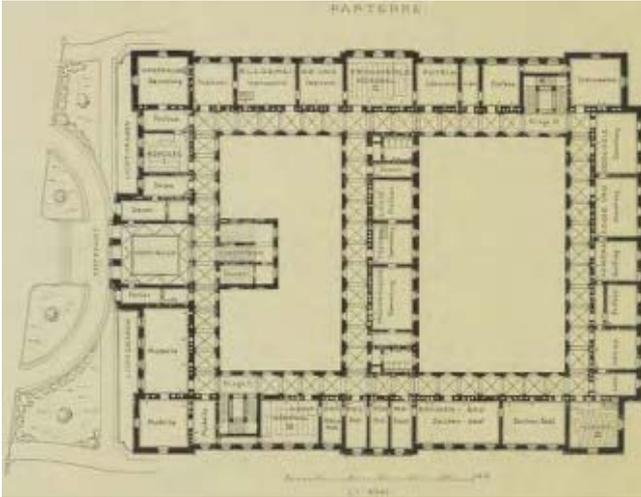


Abb. 4.11: Parterregrundrissplan der k.k. Techn. Hochschule Graz von J. Wist [49]

Die Raumaufteilung der neuen k.k. Technischen Hochschule wurde von J. Wist entsprechend den Anforderungen der damals 3 „Fakultäten“ (Bauingenieurschule, chemisch-technische Schule und Maschinenbauschule) ausgerichtet und stockwerkweise organisiert. Der Unterricht wurde überwiegend als theoretischer Basisunterricht frontal abgehalten. Deshalb wurde von einer Installation von chemischen Laboratorien im Hauptgebäude abgesehen. Diese wurden entsprechend der räumlichen Funktionalität in einem separaten Gebäude, dem chemischen Laboratorium, angeordnet. Insgesamt nimmt das fertiggestellte, dreistöckige Hauptgebäude eine bebaute Grundfläche von 84,5 x 66,5 Meter ein.

Aus einem Artikel von Professor Johann WIST (vgl. [49]), abgedruckt in der Zeitschrift „Der Bautechniker, Centralorgan für das Österreichische Bauwesen“ gehen weiters folgende, am Bau des Hauptgebäudes beteiligten Baufirmen und Unternehmer hervor:

- Johann de Colle (Erd-, Mauerer- und Zimmermannsarbeiten)
- Brüder Grein und Johann Franz (Steinmetzarbeiten)
- C. Schwab (Dachschieferdeckerarbeiten)
- A. Hanel (Spenglerarbeiten)
- Brüder Lapp (Tischler- und Schlosserarbeiten)
- Kurz, Rietschel & Henneberg (Ventilation und Heizung)
- Grazer Gaswerk (Gas und Beleuchtung)
- Hess, Wolff & Cie. (Wasser)
- Montan Gesellschaft (eiserne Konstruktionen – Deckenträger)
- B. Lamp & H. Lohmann (Anstreich- und Malerarbeiten)
- Brüder Grein & Chr. Moretti (Außenanlagen)

1888 |

Im Frühjahr wurden die letzten Arbeiten am Hochschulneubau getätigt. Der festliche Aulasaal wurde fertiggestellt und die Außenanlagen komplettiert. Bis zu Novemberbeginn war man dann mit der Übersiedelung in das neue Hauptgebäude beschäftigt - einer organisatorischen Meisterleistung, wenn man bedenkt, dass diese bei laufendem Studienbetrieb durchgeführt wurde. Der feierlichen Eröffnung des Neubaus stand nun nichts mehr im Weg und wurde im Vorfeld bereits akribisch von einem eigens eingesetzten Komitee hinsichtlich der erforderlichen Geldmittel geplant. Schließlich sollte niemand geringerer als der Kaiser selbst der Eröffnungszereemonie im Festsaal am 12. Dezember 1888 beiwohnen.

4-4 UNTER DER HAUPTKUPPEL: VESTIBÜL, HAUPTSTIEGE UND FESTSAAL

Bevor auf das Kernthema der vorliegenden Masterarbeit eingegangen wird - die hölzerne Hauptkuppel über dem Haupteingangsrisalit- sollen die darunterliegenden prunkvollen Räumlichkeiten der „Alten Technik“ vorgestellt und deren Baukonstruktion zum Verständnis näher erläutert werden.

Das Vestibül

Betritt man die „Alte Technik“ über einen der 3 Haupteingänge des Mittelrisalits, so gelangt man in die repräsentative Vorhalle (=Vestibül) mit annähernd quadratischem Grundriss. Diese rund 10 x 10 Meter große Eingangshalle wird von einem in Felder geteilten Spiegelgewölbe ohne Zwischenstützen überspannt, welches raumumlaufend von gekuppelten Pilastern und gekuppelten Säulen aus poliertem Marmor getragen wird. Auf die Fußbodenbekleidung wurden polierte Marmor-Zementplatten mit eingelegten Ornamenten im Rautenmuster verlegt. Der zentrale Raum, der ostseitig von der Portierloge und westseitig vom Dekanat der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften begrenzt wird, mündet südseitig in die Hapterschließungsgänge zu den Unterrichtsräumen im Parterre. Über das angeschlossene Haupttreppenaus können das Souterrain (=Tiefparterre, Kellergeschoß) und die Aulagänge im ersten Obergeschoß erreicht werden.



Abb. 4.12: Vestibül

Die Hauptstiege

Die aufwendig ausgeführte gemauerte, dreiarmlige Hauptstiege lagert auf der darunterliegenden Gewölbstützkonstruktion und wurde im Juni 1887 fertiggestellt. Die Tritt- und Setzstufen sind mit unterschiedlichen polierten Marmorplatten ausgestaltet und werden in ihrer Gesamtheit von seitlichen Geländerbalustraden begrenzt.

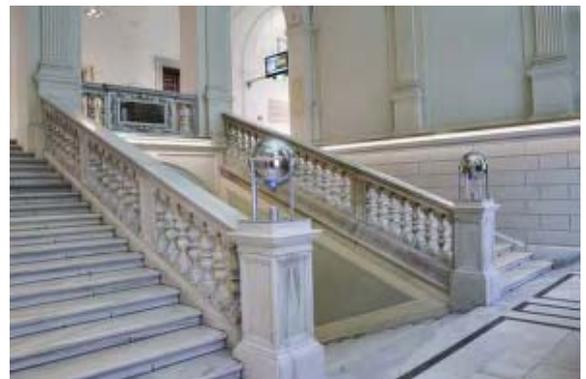


Abb. 4.13: Hauptstiege

Der Festsaal

Die Aula, das prachtvolle Herzstück der k.k. Technischen Hochschule, reicht, dem Vorbild der Wiener Universität folgend, über zwei Geschoße hindurch und liegt direkt über dem Vestibül im ersten Obergeschoß (vgl. [48]). Der 16,75 x 10,68 Meter große und rund 10 Meter hohe Festsaal wird von einer reich gegliederten und ornamentierten Spiegeldecke überspannt. Um die Spannweite herstellen zu können, wurde eine zwischen vier eisernen Traversenträgern eingebaute Dippelbaumdecke hergestellt. Diese Deckenhauptträger ragen aufgrund ihrer Querschnittshöhe bis in den Dachraum der Hauptkuppel (siehe Abb. 5.22). Die Untersicht des kassetierten Deckenschildes wird von kunstvollen, farbigen Malereien von Paul Scholz mitsamt großzügig vergoldeten Elementen komplettiert. Zwei im Dachraum der Hauptkuppel angeordnete Seilwinden erlauben das Herablassen der beiden großen

Beleuchtungsluster. Die Wände des Saales sind durch zahlreiche Pilaster und Bogenstellungen strukturell gegliedert und nordseitig durch drei große hölzerne Aulafenster und die direkt darüber angeordneten Oberlichtfenster durchbrochen, die den Raum mit Tageslicht fluten. Die östliche Stirnwand ist Kaiser Franz Joseph gewidmet, dessen in Marmor verewigtes Abbild die Mittelnische ziert. Die Statue ist flankiert von zwei majestätischen Marmorsäulen mit aufgesetztem Giebelgebälk, welches ebenfalls das kaiserliche Wappen trägt. Direkt neben dem Haupteingang zur Aula wird auch dem einstigen Begründer des Joanneums und damit auch der Technischen Universität Graz - Erzherzog Johann - mit einer Gedenktafel und einer Bronzestatue Tribut gezollt.



Abb. 4.14: Aquarell des Aulafestsaaes um 1900 [19]

KAPITEL 5 BESTANDSERFASSUNG DER HAUPTKUPPEL

5-1 EINLEITUNG: DACHLANDSCHAFT „ALTE TECHNIK“

Bevor auf den nachfolgenden Seiten die in Kapitel 3 beschriebene Methodik der Instandsetzung alter Holztragwerkskonstruktionen auf die Hauptkuppel des nördlichen Haupteingangsrisalit der „Alten Technik“ konsequent angewendet wird, soll einleitend die vielseitige Dachkonstruktion in seiner Gesamtheit kurz beschrieben und vorgestellt werden.

Die Dachlandschaft des Hauptgebäudes der Technischen Universität Graz kann im Wesentlichen in fünf Haupttrakte, vier kleinere Zierkuppelkonstruktionen an den Eckkrisaliten sowie der großen Hauptkuppel über dem Haupteingang gegliedert werden.

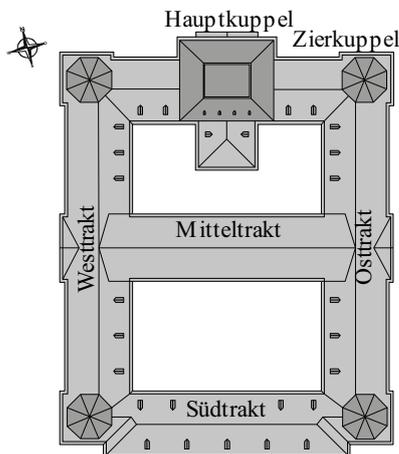


Abb. 5.1: Dachlandschaft „Alte Technik“



Abb. 5.2: Vogelperspektive „Alte Technik“ [96]

Die gebäudeformgebenden Außentrakte sind allesamt als asymmetrischer Pfettendachstuhl mit doppeltem Hängewerk mit Kniestockaufmauerung ausgeführt und wurden, wie bereits im Kapitel 4-3 beschrieben, im Jahr 1886 aufgerichtet. Der ursprünglich nur bis zum ersten Obergeschoß reichende Mitteltrakt wurde nach dem 2. Weltkrieg auf die volle Gebäudehöhe aufgestockt und das ursprüngliche Hängewerk wurde durch eine leichte Bretterbinderkonstruktion ersetzt. Im Rahmen einer ersten überblicksmäßigen Begehung des gesamten Dachbodens erscheinen die Konstruktionen der äußeren Gebäudetrakte mitsamt den Eckzierkuppeln durchaus solide und zimmermannsmäßig sauber ausgeführt. Der eigentlich „neuere“ Mitteltrakt präsentiert sich im Hinblick auf die verwendeten Querschnittsabmessungen der Bretter und Bohlen und der Ausführungsqualität wesentlich „sparsamer“, um nicht zu sagen in statisch bedenklicher Ausführung. Die Hauptgespärre der doppelten Hängewerkkonstruktion folgen einem zwischen 3,90 bis 5,00 Meter schwankendem Regelabstand und die Achsabstände der Sparren können mit rund einem Meter beziffert werden. Im Hinblick auf die zimmermannsmäßige Verbindungstechnik wurde auf durchaus übliche „Standardverbindungen“ gesetzt. Beispielsweise sind die Streben mittels Fersenversatz mit mittigen Zapfen an den Bundträmern und die Stuhlsäule angeschlossen. Die Bundträmme sind mit schmiedeeisernen Bändern und Schraubenmuttern an die Hängesäulen hochgehängt. Die Sparrenfußpunkte sowie die Aufklauung auf den Mittelfetten sind allesamt als „Gaißfuß“ ausgeführt. Um die horizontalen Lasten des 33° geneigten Daches abzutragen, wurde die auf dem Kniestockmauerwerk aufliegende Fußfette konstruktiv mittels Zangenhölzern an die Hängewerkstreben der Hauptgespärre zurückgehängt. Die Stuhlsäulen und Längspfetten wurden firstparallel mittels

eingezapften Kopfbändern zu Stuhlwänden ausgebaut, welche die Systemaussteifung in Tragwerkslängsrichtung gewährleisten. Die Zapfenverbindungen der Kopfbänder sind konstruktiv mit Hartholzdollen in ihrer Lage gesichert. Da an den zahlreichen zimmermannsmäßigen Verbindungsknoten kaum Klaffungen, ungewollte Fehlstellungen oder gröbere Schädigungen der Konstruktionshölzer erkennbar sind, scheint die Tragwerksaussteifung sowie das Lastabtragungskonzept des doppelten Hängewerkes weitestgehend zu funktionieren. Der Gesamtkonstruktion in den außenliegenden Längstrakten kann somit auf den ersten Blick ein sehr guter Zustand attestiert werden. Der Zustand der Bundtramköpfe, die in Mauerwerksnischen auflagen, kann aufgrund der geschlossenen Einmauerung mitsamt Kalkverputz nicht direkt überprüft werden. Durch die nahtlos an den Bundtramkopf grenzende Grundputzschicht wird der Tramkopf seiner Luftumspülung beraubt, wodurch allfällige Feuchtigkeit Zutritte nur erschwert abtrocknen können und die Gefahr von Fäulnissschäden steigt. Durch einfaches, stichprobenweises Abklopfen (=akustische Prüfmethode) mit einem Hammer konnten jedoch keine derartigen Schäden erkundet werden.



Abb. 5.3: Doppeltes Hängewerk (Seitentrakt)



Abb. 5.4: Bretterbinder (Mitteltrakt) [38]

Die vier Zierkuppeln sind als einfache achtseitige Zeltdachkonstruktion mit mittig angeordnetem Kaiserstiel, der umlaufend von schräg angestellten Abstreben unterstützt wird, ausgebaut. Bedingt durch die polygonale Grundrissform wurde die Bundtramebene sternförmig zu einem „Bundtramstern“ zusammengeschlossen, bei dem, abgesehen von den beiden durchlaufenden Hauptträmen, alle Bundträme in Wechselbalken verzapft und durch eiserne Bauklammern verbunden sind. Die auf der Mauerbank ruhenden Stuhlsäulen bilden gemeinsam mit den Fußpfetten und den Kopfbändern eine im Grundriss achteckige, ausgesteifte Stuhlwandkonstruktion. Wie schon bei der Hängewerkskonstruktion der Haupttrakte wird auch hier der horizontale Sparrenschub, wenngleich dieser aufgrund der steilen Kuppeldachneigung wesentlich geringer ausfällt als in den Regelbereichen, durch an die Strebebalken rückverhängte Zangenpaare aufgenommen. Zusätzlich wird die Zierkuppel im oberen Drittel durch ein kreuzendes Zangenpaar, deren Hölzer als Kreuzkamm mit mittig liegender Eisenbolzenverschraubung an die innenliegenden Kaiserstielabstreben angearbeitet sind, ausgesteift. Die Sparren sind bogenförmig aus einzelnen Pfostenstücken überlappend vernagelt. Diese Art der Sparrenausbildung findet auch bei der Hauptkuppel Anwendung und wird in den weiteren Kapiteln näher beschrieben. Die Sparren werden durch mehrere, geneigte Sparrenknechte auf die Strebebalken abgestützt. Mit Ausnahme der eisernen Schraubenbolzen der Zangenbalkenanschlüsse sind alle Verbindungen als reine Holz-Holz-Verbindungen zimmermannsmäßig als gerader Zapfen (Bundträme, Wechselträme, Abstreben) beziehungsweise als Kopfbandzapfen (teilweise auch als Jagdzapfenformen) ausgebildet. Da sowohl am einfachen Bretterverslag der Dachhaut, als auch an den Konstruktionshölzern teilweise sehr ausgeprägte Feuchtigkeitsschlieren erkennbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Zierkuppelkonstruktion längere Zeit einer direkten Feuchtigkeitseinwirkung, vermutlich hervorgerufen, durch eine schadhafte Dacheindeckung, ausgesetzt war. Aus den Bauaufzeichnungen des Archivs der Technischen Universität Graz geht hervor, dass die Dacheindeckungen in den Jahren nach dem 2. Weltkrieg teilweise erneuert wurden. Dies geschah offenbar auch im Bereich der Zierkuppeln, da die scheinbar durchnässten

Konstruktionsteile trotz stärkeren Regenfällen an den Tagen vor der Erstbegehung des Dachraumes am 10. Oktober 2016 allesamt trocken waren. Auch drei später durchgeführte Feuchtigkeitsmessungen zeigten keine problematische Holzfeuchte.



Abb. 5.5: „Bundtramstern“ der Zierkuppel



Abb. 5.6: Firstbereich der Zierkuppel

Nicht zuletzt wegen der Bedeutsamkeit des Bauwerkes als Hochschulgebäude, liegen, anders als beim überwiegenden Anteil anderer historischer Bauten, glücklicherweise noch zahlreiche Originalplanunterlagen im universitätseigenen Archiv auf. So konnte im Zuge der Recherche zu dieser Masterarbeit ein gebundenes „Abrechnungsbuch“ (vgl. [59]) aus dem Archiv der Technischen Universität Graz ausgehoben werden, das einige Blaupausen der Planunterlagen des bereits aus Kapitel 4-3 bekannten, federführenden Planers und Bauführers Professor Johann Wist enthält. Aus eben diesen Unterlagen geht hervor, dass der gut ausgebaute Wartungssteg im gesamten Dachboden bereits im Vorfeld mitsamt einem „Wartungslogbuch“ mitgeplant wurde. Leider ist dieses Wartungsbuch nur mehr auszugsweise in einem sehr schlechten bis kaum leserlichen Zustand vorhanden. Aus den eingetragenen Datierungen kann jedoch darauf rückgeschlossen werden, dass das Tragwerk bis zum Jahr 1932/1933 in regelmäßigen Abständen begangen, visuell überprüft und kleinere Schäden in der Dacheindeckung behoben wurden. Diesem Konzept von Professor Wist ist es wohl zu verdanken, dass trotz eintretender Feuchtigkeit keine massiven Schäden am Tragwerk entstanden sind. Grundsätzlich sollten auch heute derartige Wartungskonzepte schon bei der Bauplanung mitberücksichtigt, jedoch spätestens bei der ersten Tragwerkssanierung zwingend erstellt werden. Dank des vorweg eingebauten Wartungsstegs ist der gesamte Dachraum sehr gut begehbar. Auch die nachträglich eingebaute elektrische Beleuchtung erleichtert die Tragwerkbeschau ungemein. Oftmals wird dem Dachboden nach Abschluss der Dacheindeckungsarbeiten nur mehr wenig Aufmerksamkeit geschenkt, sodass gebrochene Dachziegel, Holzverschnitt und andere Bauabfälle einfach im Dachraum verbleiben. Größere Mengen derartigen Bauschutts sucht man im Dachraum der „Alten Technik“ vergeblich, zumal dieser, vermutlich im Rahmen von zahlreichen Einbauten der Lüftungs- und Gebäudetechnik nach und nach entfernt wurde.

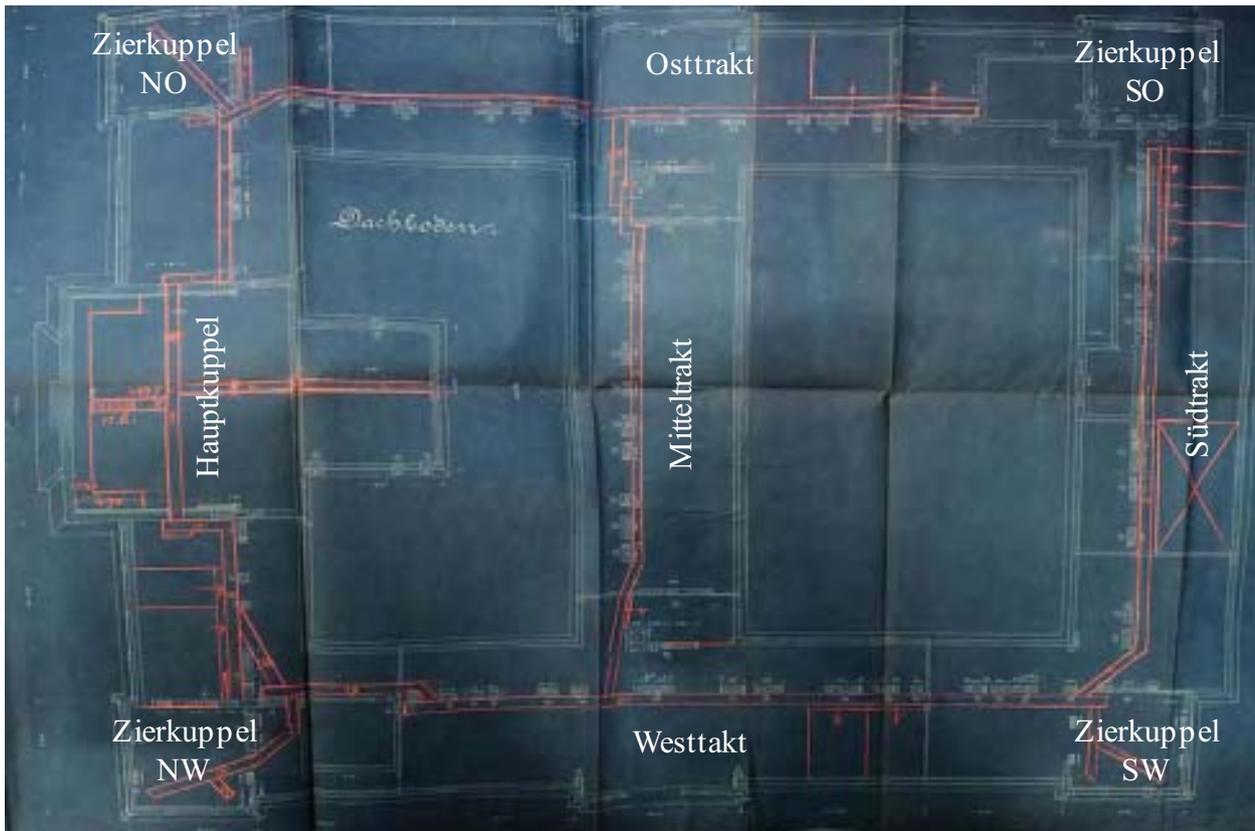


Abb. 5.7: *Originale Plandarstellung des Dachbodens, rot: geplante Wartungsstege [59]*

Die abschließenden Dachbodendeckenkonstruktionen, weitestgehend Dippelbaum- und Tramdeckenkonstruktionen, sind vollflächig mit einem Sand-Kies-Gemisch beschüttet und wurden quasi über die gesamte Dachbodenfläche mit Tonziegelsteinen gemäß den damaligen Brandschutzbestimmungen für letzte Geschoßdecken bepflanzt. Aufgrund dieses Bodenaufbaus war eine visuelle Erstbegutachtung insbesondere der Tramaufleger ohne manuelles Abtragen der oberen Bodenschicht nicht zerstörungsfrei möglich und wurde im Rahmen dieser Masterarbeit auch nicht weiter verfolgt. Die in den Dachraum reichenden Ziegelwände und Aufmauerungen sind vollflächig grob mit Kalkmörtel verputzt und abgezogen. Auch die Ablüftungs- und Kaminstränge der Untergeschoße sind voll verputzt ausgeführt und im Bereich der Dachdurchführungen konstruktiv mit Wechselparren ausgespart.

Das Bauholz, überwiegend gesägtes Fichten- oder Tannenholz, weist in den stichprobenartig erkundeten Bereichen keinen nennenswerten Insektenbefall oder Pilzbefall auf. Allerdings konnten zahlreiche, teils bis zu 15 mm breite Längsrisse in den tragenden Holzbauteilen beobachtet werden. Durch diese Schwindrisse getrennte Abbundzeichen an den Holzbalken zeugen davon, dass womöglich im Winter geschlägertes, „halbtrockenes“ Holz im darauffolgenden Sommer verzimmert wurde. Die Schwindrisse sind, lässt man die wesentliche Verschlechterung der Torsionssteifigkeit und der Schubfestigkeit der Bauteile außer Acht, für die Tragfähigkeit der Konstruktion unbedenklich. Die Dachflächen der außenliegenden Regeltrakte sind mit Dachlatten beschlagen, die die Faserzementplatten der Dacheindeckung aufnehmen. Die vier kleineren Zierkuppeln sind vollflächig mit sägerauen Brettern verschalt, und mit Schieferplatten bekleidet. Die Dachentwässerung erfolgt über die gebäudeumlaufende, hinter der Gesimsebalustrade angeordneten, verblechten Kastenrinne.



Abb. 5.8: *Von Schwindrisse durchtrennte Abbundzeichen [38]*

Dachgeschoßausbau der Seitentrakte Ost und West

Gegenwärtig (seit Mitte 2016) wird der Dachraum des Ost- und Westtraktes ausgebaut, um zusätzliche Räumlichkeiten für Unterrichts- und Seminarzwecke für die Fakultät für Architektur zu schaffen. Das architektonische Konzept sieht dabei vor, das ursprüngliche doppelte Hängewerk konstruktiv zu verstärken und dessen Hängesäulen mitsamt den seitlichen Abstreben und dem Druckriegel als gestalterisches Element sichtbar zu erhalten. Um den bis dato „kalten Dachraum“ für Unterrichtszwecke nutzen und den Anforderungen des Wärmeschutzes gerecht werden zu können, werden im Rahmen des Dachgeschoßausbaus Zwischensparrendämmungen in Kombination mit Sparrenaufdoppelungen installiert. Etwa 1,5 Meter oberhalb der Druckriegelebene wird eine zusätzliche Zangenlage aus einem gewalzten Stahlblech eingebaut, um im dadurch generierten „Spitzboden“ Lüftungskanäle für die Gebäudetechnik unterbringen zu können. Die Druckgurte des ursprünglichen doppelten Hängewerkdachstuhles wird mit U-Profilen verstärkt. Zudem wird den Kniestockmauern über die gesamte Traktlänge eine Trockenbauwand vorgeschaltet, um eine seitliche Installationsebene zu schaffen. Die Sparren der Leergespärre mussten für die Aufnahme der vorgesehenen großen Dachflächenfenster verstärkt oder teilweise durch Stahlträgerkonstruktionen ersetzt werden, um die schwere Isolierverglasung aufnehmen zu können.



Abb. 5.9: Blick in den derzeit in Ausbau befindlichen Westtrakt



Abb. 5.10: Große Dachfenster mit auf den Sparren verschraubten stählernen Halteprofilen

Der derzeit laufende Dachausbau stellt einen wesentlichen Eingriff in die Bestandtragstruktur dar. Sozusagen „ohne Rücksicht auf Verluste“ wurden dabei zahlreiche Sparren, Zangenbalken und auch Stuhlsäulen ausgebaut. Ebenso mussten zimmermannsmäßige Holzverbindungen mit Vollgewindeschrauben und Systemverbindern entgegen deren ursprünglichen Funktionsweise derart verstärkt oder umgestaltet werden, sodass diese den neuen Lastsituationen, resultierend aus den neuen Auflasten und dem teilweise vorgenommenen Tragsystemumbau standhalten können.



Abb. 5.11: Fragwürdige Verschraubung eines mit Holznagel gesicherten Kopfbandes



Abb. 5.12: Notwendige Verstärkung des hölzernen Hängewerkdruckgurtes mittels U-Profil

Nach Meinung des Verfassers dieser Masterarbeit, wird, obgleich der zugegebenermaßen gelungenen architektonischen Raumgestaltung, ein wesentlicher Grundsatz bei der Sanierung alter Holzkonstruktionen außer Acht gelassen - der sorgsame und schonende Umgang mit der ursprünglichen Bausubstanz.

Nichts desto trotz eröffnete sich durch den laufenden Baubetrieb am Dachgeschoßausbau des östlichen und westlichen Längstraktes und der damit einhergehenden einfachen Zugänglichkeit des gesamten Dachbodens eine durchaus günstige Gelegenheit, auch den Baubestand der Hauptkuppel über dem Aulafestsaal in seiner Gesamtheit möglichst genau zu erfassen und aufzunehmen. Die nachfolgenden Kapitel greifen diese Hauptkuppel als Referenzobjekt für die praktische Anwendung der beschriebenen theoretischen Grundlagen heraus. Dabei wird versucht, den Bestand sowie allfällige Schäden und Konstruktionsmängel vollständig und exakt zu erfassen und das vorliegende statische System in einem computergestützten Berechnungsmodell realitätsnahe abzubilden, sodass die räumliche Tragwirkung der Tragstruktur dargestellt und verstanden werden kann.

5-2 I – ZIELSETZUNG

5-2.1 KONKRETISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG UND NUTZUNGSZIELE

Ziel dieser Baubestandserfassung ist es, die hölzerne Hauptkuppel des Hauptgebäudes der Technischen Universität - „Alte Technik“ in ihrer Konstruktion, Tragwirkung und qualitativer Beschaffenheit vollumfänglich zu erheben, aussagekräftige Planunterlagen in Form von Grundrissplänen (Tramlagen) und Gespärreplänen nach dem Naturmaß in Zentimetergenauigkeit zu erstellen, sowie die Verbindungstechnik im Tragwerk zu ermitteln. Zwar liegen einige originale Planunterlagen von Johann WIST im Archiv der Technischen Universität Graz auf (vgl. [59]), allerdings sind diese für eine exakte Bestandsdokumentation unzureichend genau. Neben diesen planerisch-konstruktiven Erhebungen soll das Tragwerk auf vorliegende, frühere Konstruktions- und Instandsetzungsfehler sowie auf Schäden jeglicher Art untersucht und deren Lage im Tragwerk in Form einer Schadenskartierung mit zugehörigen fotografischen Aufnahmen dokumentiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse über den Baubestand sollen in eine computergestützte Modellbildung einfließen, um damit eine Aussage über das Tragvermögen der Bestandskonstruktion unter Zugrundelegung der derzeit gültigen Normen und Regeln treffen zu können.

Auf den in dieser Masterarbeit angestellten Untersuchungen aufbauend, soll in einem weiterführenden Studienprojekt im Rahmen einer Lehrveranstaltung des Instituts für Holzbau und Holztechnologie ein Konzept erarbeitet werden, den derzeit freien Dachraum einer Neunutzung - beispielsweise als erweiterter Veranstaltungsraum des darunterliegenden Aulafestsaaes - zuzuführen. Dieses (derzeit) fiktive Vorhaben soll von den Studenten auf Basis eines architektonischen Vorentwurfs auf zweierlei Arten bearbeitet werden:

Variante 1: Neubau der Dachkonstruktion

Variante 2: Bauen im Bestand - Adaptierung der Kuppelkonstruktion

Während bei Variante 1 das bestehende Kuppeltragwerk zur Gänze einer neuen Konstruktion weichen soll, wird in Variante 2 als oberste Priorität ein möglichst zerstörungsfreier und bestandsschonender Konstruktionsvorschlag definiert. Das heißt, das Tragwerk soll nicht nur in seiner Gesamtheit, sondern auch in seinen Detailausprägungen, wie beispielsweise der Verbindungstechnik, erhalten bleiben. Ein Umbau des Tragsystems soll dabei weitestgehend unterbleiben und die ursprünglichen Lastpfade überwiegend beibehalten werden. Die Planung dieser Maßnahmen konzentriert sich dabei auf die statisch-konstruktiven Fragestellungen zum hölzernen Tragwerk.

5-2.2 FESTLEGUNG DES DETAILIERUNGSGRADES BEI DER BESTANDSAUFNAHME

Aufgrund der Komplexität der räumlichen Tragstruktur sowie die beschränkte Zugänglichkeit einiger Konstruktionsteile und Detailpunkten in höher gelegenen Tramebenen (diese wären nur durch eine entsprechende Aufstiegsgerüstkonstruktion im Tragwerk erreichbar) wurde für die Aufnahme der Globalstruktur Zentimetergenauigkeit definiert. Nicht zugängliche Tragwerksbereiche sollen bestmöglich mit einem Distometer vermessen werden. Immerhin erlauben ein bereits vorhandener, etwa mittig im Tragwerk liegender Wartungsaufstieg und eine nachträglich eingebaute Wartungsgalerie, die einzelnen Tramebenen zumindest punktuell aufnehmen zu können. Obgleich der Vorteile dieses Wartungssteiges war dieser mitunter auch ein Grund dafür, dass auf den Einsatz eines 3D-Laserscans, der eine originalgetreue „Punktwolke“ für die spätere CAD-basierte Bearbeitung liefern würde, verzichtet wurde. Die voll verschaltete Plattform in Tragwerksmitte sowie die Treppen- und Geländerkonstruktion der Aufstiegsleiter stellen nicht zu vernachlässigende Störquellen für den rotierenden Messlaser, insbesondere durch „Abschattung“ dahinterliegender Dachwerksteile, dar. Die Querschnittsgeometrie der einzelnen Bauteile wird der Empfehlung nach MEISEL (vgl. [39; 38]) folgend auf halbe Zentimeter gerundet. Dies erscheint, obwohl das verwendete Bauholz weitestgehend gesägt wurde, aufgrund vorhandener Baumkanten und größerer Schwindverformungen an den Hölzern als durchaus sinnvoll. Besonders bei langen Konstruktionshölzern wie beispielsweise Hängesäulen und Bundträmen kann in historischen Tragwerken oft ein konischer Verlauf, also eine Verjüngung des Querschnitts entlang seiner Stabachse beobachtet werden. Beim Vorhandensein derartiger Hölzer im Dachtragwerk der Hauptkuppel soll daher

in weiterer Folge näherungsweise der Querschnitt in Stabmitte angegeben werden. Die zahlreichen, teils wiederholenden Anschlussdetails werden stichprobenartig aufgenommen, deren zimmermannsmäßige Anschlussgeometrie bestmöglich erfasst und in Form von Anschlussdetailblättern im ANHANG C dieser Masterarbeit abgelegt.

5-3 II – BESTANDSERFASSUNG

5-3.1 ALLGEMEINE ECKDATEN

allgemeine Angaben:

Bauwerk	Technische Universität Graz - Alte Technik
Adresse:	Rechbauerstraße 12, 8010 Graz, Steiermark
Besitzer:	Bundesimmobiliengesellschaft (BIG)
Baujahr:	1884 - 1888
Bauweise:	Massivbauweise
Nutzung:	Universität - Technische Hochschule



Abb. 5.13: „Alte Technik“ - Ansicht NW

Objektbezogene Angaben:

Objekt:	hölzerne Hauptkuppel über der Aula
System:	Pfettendachstuhl mit räumlichem Hängewerk und aufgesetzten abgestrebtem stehenden Stuhl mit Firstlaterne
Lage:	nördlicher Haupteingangsrisalit
Baujahr:	Sommer 1887 (vgl. Kapitel 4-3)
Nutzung:	freier Dachraum- ungenutzt, teilweise Leitungsführungen der Haustechnik



Abb. 5.14: Hauptkuppel - Ansicht NW

Das Hauptgebäude der Technischen Universität ist eines von 872 Baudenkmälern in Graz und steht per Bescheid unter Denkmalschutz. (vgl. [93; 69]) Durch die Erhebung in diesen Status sind sämtliche Bautätigkeiten am Objekt mit Zerstörungs- und Veränderungsverboten verbunden. (siehe auch Kapitel 2) Gemäß der Kartierung im GAEG (vgl. [65; 100]) befindet sich das Objekt in der sogenannten Schutzzone III und ist damit eines jener Gebäude, das zum erweiterten Schutzgebiet zählt. Es gehört also jenem erweiterten Kreis von Gebäuden an, die gemeinsam das von der UNESCO als Weltkulturerbe geführte, historische Altstadtbild prägen.

5-3.2 BAUHISTORIE DER HAUPTKUPPEL

Die Errichtung ist in den vorhandenen Archivunterlagen sowie den Aufzeichnungen des Zimmer- und Stadtbaumeisters Johann De Colle mit August 1887 datiert (vgl. [19]). Für die Aufrichtung der Hauptkuppel wurde eine Bauzeit von zwei Monaten kalkuliert. Die Hauptkuppel bildet gemeinsam mit der Überdachung der Hauptstiege jenen Dachbereich der „Alten Technik“, der zuletzt fertiggestellt wurde. Leider konnte das Offert und das Arbeitsverzeichnis von Johann De Colle, dem schlussendlich die Zimmermannsarbeiten übertragen wurden, nicht im Archiv aufgefunden werden. Allerdings liefern zwei weitere Arbeitsverzeichnisse (vgl. [57; 58]) einen guten Einblick über die damaligen Einheitspreistarife für die Errichtung eines derartigen Kuppeldachstuhles sowie zu zahlreichen anderen „Arbeitspositionen“ wie etwa Dippelbaumdeckenkonstruktionen, Tramdeckenkonstruktionen, Wartungsstege, Lehrgerüste, usw.. Da zur damaligen Zeit der österreichische Gulden¹⁶ als Zahlungsmittel galt, ist dieses Leistungsverzeichnis natürlich in dieser Währung ausgepreist. Eine Umrechnung zu den heute gültigen Eurosätzen ist natürlich nicht so einfach, allerdings bietet die Österreichische Nationalbank (ÖNB) einen Online-Währungsrechner (vgl. [98]) für historische Zahlungsmittel an, mit dem die Kaufkraft des Guldens im Jahr 1887 mit der aktuellen Kaufkraft des Euros verglichen werden kann. Die Umrechnung der alten Währungen basiert auf einer historischen Zeitreihe zur Inflationsrate für Österreich.

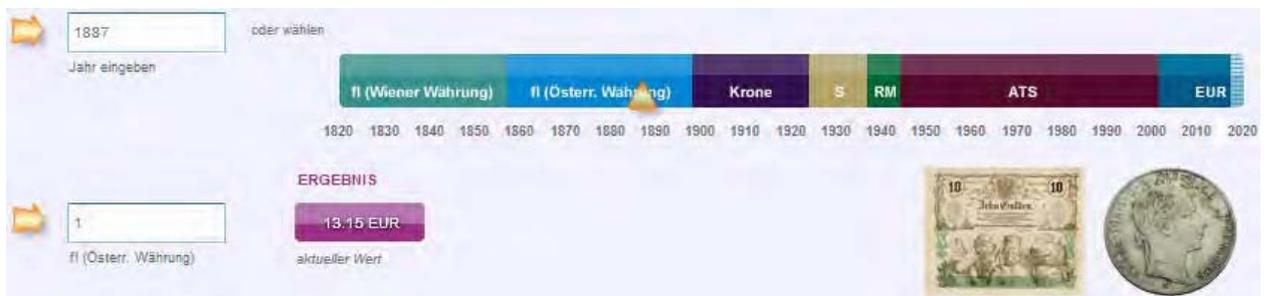


Abb. 5.15: Währungsrechner für historische Österreichische Zahlungsmittel [98]

Tab. 5.1: Originalabschrift des ausgepreisten Arbeitsverzeichnisses (auszugsweise) [57; 58]

Tarif- pos. Nr.	Gegenstand	Massen	Einheits- preis		Betrag (einzeln)	
			fl	kr	fl	kr
1	Dachstuhl über d. Haupttrakt, dem Seitentrakt = ü. Hoftrakt Quadratmeter (Horiz. Projekt.)	2920	1	70	4964	-
2	Dachstuhl für die 4 Eckpavillons (Kuppeldächer) Quadratmeter. (Horiz. Projekt.)	365	3	50	1277	50
3	Kuppeldach über d. Mittelbau Quadratmeter	310	4	-	1240	-
25	Einlattung für den Haupttrakt, den Seitentrakt = Hoftrakt	3560	0	30	1068	-

¹⁶ Gulden, Österreichische Währung (1 fl ö.W = 100 Kreuzer ö.W) war in der Donaumonarchie Österreich-Ungarn zwischen 1857 und 1892 als anerkannte Währung verbreitet. Später wurde der Gulden von der Krone als Zahlungsmittel abgelöst.

26	Einfache Einschalung für die Große Kuppel Quadratmeter	460	0	85	391	-
27	Einfache Einschalung für die Zierkuppeln Quadratmeter	390	0	85	331	50
28	Wulstleisten für die Grathe der Kuppeln Laufmeter	208	0	20	41	60
34	Kastenrinneneinschalungen Quadratmeter	210	1	30	273	-
37	Lauftreppen am Dachboden Quadratmeter	163	1	60	260	80
45	Dachaussteigtüren Stück	8	5	-	40	-

Aus den Einheitspreisen geht hervor, dass der doppelte Hängewerksdachstuhl über den Gebäudeaußentrakten sozusagen als einfacher Standarddachstuhl verhältnismäßig günstig ($\approx 22,35 \text{ €/m}^2$) verrechnet wurde. Nach einem informativen Fachgespräch mit einem Zimmermeister zufolge, müsste man für eine vergleichsweise hergestellte zimmermannsmäßige doppelte Hängewerkskonstruktion über den Regeltrakten etwa $50 - 70 \text{ €/m}^2$ für die Aufrichtung einkalkulieren. Die Tragkonstruktion der Zierkuppeln und der Hauptkuppeln hingegen bedeutete offenbar einen wesentlichen Mehraufwand in der Herstellung, da hierfür mehr als das Doppelte verrechnet wurde (kleiner Zierkuppeln $\approx 46,05 \text{ €/m}^2$; Hauptkuppel $\approx 52,60 \text{ €/m}^2$). Dem im Archiv aufgefundene Endbericht über die Zimmermannsarbeiten von Professor Johann Wist (vgl. [60]) kann man auch die aufsummierten Kosten für die gesamten Zimmermannsarbeiten entnehmen:

<i>Zimmermannsarbeiten präliminiert</i>	<i>fl</i>	<i>33.837,31</i>
<i>und für die Ausführungen ausgegeben</i>	<i>fl</i>	<i>34.016,81</i>
<i>also den Überschlag überschritten um</i>	<i>fl</i>	<i>179,50</i>

Leider ist in diesem Endbericht nur eine Endsumme - umgerechnet mit der damaligen Kaufkraft des Gulden etwa eine halbe Million Euro - angegeben, also auch Deckenkonstruktionen, Verkleidungen, Gerüste etc. sind darin eingerechnet und lässt damit keine genaue Aussage über die Teilkosten der großen Kuppel zu. Vergleicht man die angeführte Gesamtsumme mit den in den in Tab. 5.1 auszugsweise angeführten Einheitspreisen, so erhält man doch eine recht gute Aussage darüber, dass die Kosten für die gesamte Dachlandschaft mitsamt Einschalung und Dachlattung etwa ein Drittel der Gesamtkosten ausmachten. Der geringe Mehrkostenaufwand, umgerechnet rund $\text{€ } 2500,00$, zeugt außerdem von einer durchaus gut kalkulierten Kostenplanung. Neben einigen angeführten, nicht zur Ausführung gekommenen Positionen, sind im Bericht auch einige, die Dachlandschaft betreffende, kostensteigernde Mehraufwände im Endbericht angegeben (vgl. [60]):

*[...] Wie in anderen Fällen kommen übrigens auch hier kleine Verschiebungen vor, sodaß in einzelnen Fällen Ersparungen in anderen Fällen Mehrauslagen eintraten und diese **Summe das Endresultat bezeichnet**. Eine Ersparung ergab sich durch Hinweglassung der ebenen Plafondverschalungen bei den zwischen den Trägern gewölbten Decken in den Räumen über und unter der Bibliothek. Dafür Mehrauslagen für die Ausführung zweier Holzstiegen im Souterrain in dem Parterre für die Lehrkanzel für Physik und Technologie, ferner **eine Stiege zur Terrasse der großen Kuppel**, und im unteren Theile, in Verbindung mit einem Arbeitsgang, welcher die Ausstiegsöffnungen verbindet. Es wurden weiters **Mehrauslagen gemacht für die Lauftreppen am Dachboden** (Ausmaß größer als im*

Überschlag), [...], für die Ausführung des Dachaufzuges¹⁷, [...], für die Ausführung der stehenden Dachfenster (41 Stk, 6 Stk beim Kuppelbau),[...]

Alte Zeitungsartikel der „Grazer Tagespost“ (vgl. [47]) belegen eine rege Bautätigkeit im Bereich der k.k. Technischen Hochschule. So findet man beispielsweise in der Ausgabe vom 25. August 1885 folgenden Beitrag:

Die Entwicklung des zwischen der Leonhardstraße und der Mandellstraße gelegenen Stadttheiles macht heuer bedeutende Fortschritte. [...] In den meisten genannten Gassen sowie in der Rechbauerstraße und in der Wäschergerasse sind in diesem Sommer Neubauten entstanden. An der Ecke Rechbauer- und der Morellenfeldgasse, gegenüber dem Baue der Technischen Hochschule, dessen - in der abfallenden Lessingstraße weit über das Straßenniveau hinausragendes - Souterrain bereits vollendet ist, wird an dem Fundamente eines großen Eckhauses gearbeitet.

MEISEL in [38; 39] als auch das Institut für Holzbau und Holztechnologie in [22] beschäftigen sich eingehend mit historischen Dachstühlen in Graz. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden zahlreiche historische Dachstühle einer Bestandsaufnahme unterzogen, darunter auch das in unmittelbarer Nähe zur „Alten Technik“ befindliche Gebäude in der Mandellstraße 9, 8010 Graz, das heute die Personalabteilung sowie drei Bauzeichensäle beherbergt. Der Dachstuhl dieses Objektes, ein sogenannter „Grazer Dachstuhl“, der in unterschiedlichen Ausprägungen in diesem Stadtteil von Graz anzutreffen ist, wurde, wie zahlreiche andere im Herz-Jesu-Viertel, kurz vor dem Baustart der k.k. Technischen Hochschule aufgerichtet. Vergleicht man die verwendeten Konstruktionshölzer dieser Dachstühle mit jenem räumlichen Hängewerk der Hauptkuppel, so fällt auf, dass diese Hölzer überwiegend handbehauen, also mit Beilen zu Kanthölzern gehackt wurden. Die Bauteile der Kuppel hingegen, sind allesamt, mit Ausnahme der südlichen Mauerbank, gesägt worden und weisen anstelle der damals typischen eingeschnitzten/ingeschlagenen römisch-additive Abbundzeichen nur aufgestempelte Kennzeichnungen auf.



Abb. 5.16: *Eingeschlagene Abbundzeichen an einem Kopfband im Westtrakt*



Abb. 5.17: *Aufgestempelte Kennzeichnungen an den Konstruktionshölzern der Hauptkuppel*

Wie HOLZER in [11] ausführt, sind derartige Abbundmarken für den Tragwerksplaner wichtige Indizien, die auf die Bau- und Reparaturgeschichte eines historischen Holztragwerkes hindeuten. Die Zeichen dienten im Wesentlichen dazu, die am Abbundplatz vorbereiteten und vorab passgenau zurechtgearbeiteten Konstruktionshölzer am späteren Einbaustandort bestimmungsgerecht richtig zusammensetzen zu können. In historischen Plänen von Zimmermeistern finden sich diese Kennzeichnung auch in den *Werksätzen* wieder und erleichterte so das Aufrichten des Tragwerks. Ähnlich zur heutigen modernen Vorfertigung, wurden also schon damals die Tragwerksteile provisorisch passgenau zusammengesteckt und mit entsprechenden Marken gekennzeichnet. Die im Grazer Dachstuhl der Mandellstraße 9 auffindbaren Abbundzeichen folgen der an das römische Zahlensystem angelehnten

¹⁷ Mit dem angesprochenen „Dachaufzug“ ist vermutlich der handbetriebene Lastenaufzug im Dachraum über der Hauptstiege gemeint.

Beschriftungslogik und waren bis ins frühe 20. Jahrhundert quasi in ganz Europa in ähnlicher Ausführung in Gebrauch. Häufig findet man die Abbundmarken an der Bundseite von Anschlussknoten. Für die Bauhistorie besonders interessant sind Abbundmarken für die Identifikation sogenannter „*Abbundeinheiten*“, die heute in etwa mit Bauabschnitten verglichen werden können. Das heißt, dass vor allem bei größeren Dachtragwerken, die aufgrund ihrer Bauhöhe und Komplexität über mehrere Sommermonate oder gar Jahre errichtet wurden, mehrere Bauabschnitte festgelegt und nacheinander (oder parallel von zwei getrennten Arbeitsgruppen) errichtet wurden. Dabei kann gegebenenfalls auch auf die Aufrichttechnologie des Tragwerks rückgeschlossen werden. Ebenso sind auch später durchgeführte Änderungen, Anbauten oder in-situ vorgenommene Sanierungsmaßnahmen identifizierbar, zumal hierfür verwendete Konstruktionshölzer andere oder gar keine Abbundmarken aufweisen. Ein schönes Beispiel für das „Aufschlagen“ eines mehrstöckigen Dachstuhles findet sich beispielsweise in der Masterarbeit von ORTNER (vgl. [41]). Die unterschiedlichen Typen von Abbundmarken gestatten auch eine erste Abschätzung der Entstehungszeit der Konstruktion

Tab. 5.2: Zeitliche Einteilung unterschiedlicher Abbundzeichen [11]

Frühes Mittelalter (bis ca. 12. Jahrhundert)	Mit Röteln aufgemalte, individuelle Abbundmarken in Form von zimmermeistereigenen Symbolen - diese sind nicht sehr dauerhaft (abwisch- oder abwaschbar) und daher heute nur mehr selten aufzufinden.	
Hoch - und Spätmittelalter (bis ca. 15. Jahrhundert)	Mit eingeritzten Strichen und gebohrten Löchern gekennzeichnete Konstruktionshölzer. Diese einfachen Zeichen konnten mit den üblichen Handwerkzeugen der Zimmermänner schnell auf die Konstruktionshölzer aufgebracht werden. Vorteil: diese Markierungen sind wesentlich dauerhafter und auch bei schlechten Lichtverhältnissen auffindbar	
ab dem 15. Jahrhundert bis ins 20. Jahrhundert	Vor allem bei großen Tragwerken mit vielen verschiedenen Bauteilen reichte die einfache Strichmarkierung des Mittelalters nicht mehr aus und man verwendete nunmehr die ebenfalls sehr einfach herstellbare Zahlensymbolik der römischen Ziffern für die Kennzeichnung der Hölzer. Interessantes Detail: Um die Verwechslungsgefahr zwischen römischen Zahlen wie IV und VI oder IX und XI zu minimieren, wurde auf die subtraktive Schreibweise, beispielsweise IX (=9) verzichtet, und diese einfach als VIII geschrieben. Daher werden diese Abbundmarken auch als römisch-additive Kennzeichnungen bezeichnet. Dieses Abbundmarkierungssystem hat sich trotz dem aufkommenden arabischen Zahlenkennzeichnungssystem bis ins 20. Jahrhundert gehalten und ist somit nur ein bedingt aussagekräftiges Indiz für die Klassifizierung als sehr altes Tragwerk.	

ab dem späten
18. Jahrhundert

Arabische Ziffern und Buchstaben, aufgemalt mit
Röteln und schwarzer Farbe.

Achtung Verwechslungsgefahr! Markierungen mit
Bleistift und blauer Kreide wurden nicht als
Abbundzeichen eingesetzt und stammen
ausnahmslos aus dem 19. oder 20. Jahrhundert.
Werden derartige Markierungen an Dachtragwerken
des 18. Jahrhunderts gefunden, handelt es sich dabei
mit großer Wahrscheinlichkeit um nachträglich
vorgenommen Ein- und Umbauten.



ab etwa Mitte des
19. Jahrhundert

Gestempelte, aufgeprägte oder mit Schablone und
Farbe aufgemalte Abbundmarken.

Die Kombinationen aus Nummern und Buchstaben
geben oft die genaue Position des Elements in der
Gesamtstruktur an und wurde vor allem bei großen
Dachtragwerken häufig eingesetzt. Auch in der
Hauptkuppel der Alten Technik findet sich diese
„gemischte“ Kennzeichnung an zahlreichen
Konstruktionshölzern.



Die verwendeten Abbundzeichen in der 1887 aufgerichteten Hauptkuppel folgen also genau dem Trend der in Tab. 5.2 dargestellten zeitlichen Einordnung. Leider hinterließ keiner der Zimmermänner von Stadtbaumeister Johann De Colle einen Hinweis darauf, wo der Dachstuhl der Hauptkuppel abgebunden wurde. Die durchgängige Beschriftung nahezu aller Konstruktionshölzer lässt allerdings vermuten, dass sämtliche Tragwerksbestandteile am Werkplatz eines Zimmermeisters zugerichtet und eine überwiegende Anzahl der Holz-Holz-Verbindungen sozusagen vorgefertigt auf die Baustelle geliefert wurden. Die fertig abgebundenen Hölzer wurden wahrscheinlich, ebenso wie die genieteten Eisenträger für die Auladeckenkonstruktion, mit dem eigens eingebauten Lastenaufzug im Dachraum über der Hauptstiege hochgewunden und anschließend zum Gesamttragwerk zusammengefügt. Um eine ebene Arbeitsplattform im Tragwerk zu erhalten, wurde vermutlich die fertig hergestellte Bundtramebene mit Pfosten belegt. Dies würde auch das Vorhandensein der diagonal liegenden, zu den Mauerecken geführten Stichbundtrame erklären, da diese für das statische Konzept der Kuppelkonstruktion entbehrlich sind.



Abb. 5.18: Ebene Arbeitsfläche über der
Bundtramlage für Montagezwecke



Abb. 5.19: Noch vorhandener, handbetriebener
Lastenaufzug im Dachraum über der
Hauptstiege

Auffällig ist, dass ausnahmslos alle Konstruktionshölzer der Hauptkuppel vier gesägte Oberflächen aufweisen. Dies ist insofern bemerkenswert, steckte doch die maschinelle Sägetechnik zur damaligen Zeit

noch in den Kinderschuhen. Wie man am Tragwerk in der Mandelstraße 9 sieht (vgl. [38]), wurden nach wie vor hauptsächlich von Hand, mit Beilen behauene Hölzer mit verblüffend ebenen und glatten Oberflächen verzimmert. Diese Ebenheit konnte durch das saftfrische Bearbeiten unmittelbar nach dem Fällen des Baumes erreicht werden. Bei bereits getrocknetem Holz war die Bearbeitung mit großer körperlicher Anstrengung verbunden und führte auch nicht zu den gewünschten glatten Ergebnissen. Solche Balken sind aufgrund der tieferen, sich deutlich abzeichnenden Kerben meist recht einfach zu erkennen und deuten häufig auf eine Wiederverwendung von Altholz aus Vorgängerkonstruktionen hin, da diese entsprechend dem neuen Verwendungszweck ein weiteres Mal behauen werden mussten. Kleinere Holzquerschnitte, wie etwa Bretter, Pfosten und Latten für untergeordnete Verwendungszwecke wurden schon ab dem 18. Jahrhundert in wind- oder wasserbetriebenen Sägemühen - sogenannte Gattersägen - hergestellt. Große Holzquerschnitte allerdings mussten von Hand gesägt werden und kamen nur in Ausnahmefällen zum Einsatz, zumal der Sägevorgang doch ein sehr langsamer, aufwendiger und vor allem teurer Arbeitsvorgang war, der gleich 3 Arbeiter beschäftigte.

Dieses Längssägen von Hand hinterlässt eine leicht bogenförmige Sägestruktur am fertigen Balken, die die Orientierung etwa in Balkenmitte wechselt¹⁸ und ist damit eindeutig von maschinell gesägtem Holz, das durch dicht nebeneinanderliegende, parallele Sägespuren gekennzeichnet ist, zu unterscheiden. Der überwiegende Teil des in der Hauptkuppel verwendeten Holzes weist hingegen ein allseitig maschinengesägtes Schnittmuster auf. Diese vierseitigen Sägetechniken wurden erst im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts entwickelt und flächendeckend eingesetzt. Sozusagen wurden bei der Hauptkuppel keine Kosten und Mühen gescheut und nur modernes, vierseitig sägebearbeitetes - sozusagen „industriell gefertigtes“ Bauholz - verzimmert.

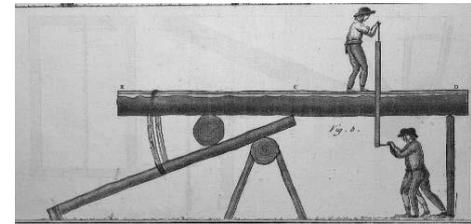


Abb. 5.20: Vorgang beim Längssägen eines Stammes [11]

Auch über die konkrete Herkunft sowie über den Zeitpunkt des Fällens des verwendeten Konstruktionsholzes kann eine recht zuverlässige Aussage getroffen werden. Ein im Archiv der TU Graz aufgefundener, sehr interessanter, teils witzig anmutender Schriftverkehr [56] des Baumeisters Johann De Colle an den Obmann des Baukomitees, Stadthalterrat Gustav Ritter von Crolloranza liefert diesbezüglich zahlreiche Informationen. Nachfolgend soll der kurrenthandschriftliche Text im Original auszugsweise und sinngemäß wiedergegeben werden¹⁹:

*[...]Laut Zuschrift dato 19. Mai 1885 wurden mir die Zimmermanns-Arbeiten für den Neubau der Technischen Hochschule übertragen. Von dieser Zeit ab konnte ich erst an die Beschaffung und Zurichtung des bei diesem Bau außergewöhnlich stark dimensionirten Holzes Hand anlegen. Ich hatte damals eine größere Partie Holz am Platze, welches im Winter 1884, theils aus den **Waldungen des Herrn Grafen Atteus in Gösting**, theils aus den **Waldungen der Österreichischen Alpenen Montan-Gesellschaft in Pernegg** geschlagen wurde.*

Damit wäre die exakte Herkunft und Schlägerzeit des Holzes bereits bestimmt. Zudem heißt es im Schriftverkehr weiter:

*Aus diesem Vorrathe wurde im Sommer vorigen Jahres das taugliche Holz für den Bau der technischen Hochschule ausgesucht, behaut und trocken aufbewahrt. Zur Deckung der Decken-Construktionen und des Daches insgesamt reichte aber dieser Vorrath nicht aus und musste ich **das fehlende Holz im November und Dezember 1885 schlagen und zugleich im Wald behauen lassen**, um es nun in Verwendung zu bringen. [...]Erst in neuerer Zeit wurde mir bedeutet, dass nur älteres*

¹⁸ Der Wechsel der Sägestruktur am Holzbalken ist auf den Sägevorgang zurückzuführen. Sobald der Stamm längs bis zur Hälfte aufgetrennt war, wurde dieser umgedreht und der Sägeschnitt vom anderen Stammende neu beginnend fertiggestellt.

¹⁹ Um die Authentizität des Schreibens zu bewahren, wurden auch die damalige Rechtschreibung und der Wortlaut direkt übernommen. Das Schreiben richtete sich wie bereits erwähnt an das Baukomitee. Dabei darf dieses Komitee nicht mit der im Brief erwähnten Bauleitung verwechselt werden.

*Holz zur Verwendung gestattet ist und seither wurde auch eine der rigorosesten Untersuchungen des **auf meinem Platze bereits abgebundenen Holzes** eingeleitet.*

Im Brief wird auch die zuvor angestellte Vermutung, das Bauholz sei direkt auf dem Platz des Zimmermeisters abgebunden und sozusagen für die Großbaustelle vorgefertigt worden, bestätigt. Nicht minder interessant sind folgende Zeilen des Briefes:

*Die Ergebnisse dieser Untersuchung von Seite der Bauleitung sind mir bis [...] dahin bekannt, daß ich nun die Thatsache constatiren kann, daß gerade das aus meinem oben erwähnten Vorrathe, im Winter 1884 geschlagenen, von der löblichen Bauleitung als solches geforderte Holz **größtentheils als untauglich befunden** wurde.*

Das würde bedeuten, dass für die Dachkonstruktion und auch für die Dippelbaumdeckenkonstruktion, die ebenfalls aus dem Holzvorrat des Baumeisters gefertigt worden war, „untaugliches“ Holz verwendet wurde. De Colle versucht diesen Umstand so zu erklären:

*[...] Die in neuerer Zeit bei der löblichen Bauleitung aufgetauchten Besorgnisse sind wohl nur anlässlich der bei der steiermärkischen Sparcasse erfolgten **Abmorschung der Dippeldecken** entstanden.*

Es ist nicht zu verkennen, daß solche Katastrofen die größte Beunruhigung in den Fachkreisen hervorrufen müssen, alleine wenn man diesen und andere vorgekommenen Fälle einer sorgfältigen, vorurteilsfreien Untersuchung unterziehen wollte, würde man gewiß die Überzeugung gewinnen, daß dieselben mit Gewalt herbeigeführt wurden.

Offenbar gab es einen größeren Bauschaden an einer Deckenkonstruktion, wodurch die Bauleitung veranlasst war, die erwähnten Untersuchungen am Bauholz durchzuführen. Leider geht aus dem Brief nicht hervor, ob der Baumeister auch für diese Baustelle der steiermärkischen Sparkasse verantwortlich war. Offenbar war De Colle dennoch über das Misstrauen hinsichtlich des von ihm eingeschlagenen Holzes sehr verärgert und äußert dies in folgenden Zeilen:

[...]Die Erfahrung hat mich aber hierüber anders belehrt, ich stehe nämlich heute auf dem Standpunkte, mit tief gefültem Bedauern constatiren zu müssen, daß durch grundlose Ängstlichkeiten von Seite der löblichen Bauleitung die Unzufriedenheit und das Mißtrauen des hochgeehrten Bau-Comites auf mir lastend zu haben, weiters durch die weitläufig colportirten Gerüchte über diese Angelegenheit die Discreditirung meines Geschäftes zu ertragen habe.

Es liegt mir fern, über diese für mich mit unabsehbaren Folgen verbundenen Angelegenheit jemand einen Vorwurf zu machen, allein mir bleibt nichts anderes übrig, als meine Klagen dem hochgeehrten Bau-Comite vorzulegen und an die Gerechtigkeit und das vorurteilsfreie Ermessen hochlößlich desselben zu appelliren.

Um die Gemüter zu beruhigen und vor allem die geschäftsschädigenden Gerüchte auszuräumen, bietet der Zimmermeister letztlich folgenden Kompromiss an:

*[...]Um nun die durch die erwähnte Katastrophe aufgeregten Gemüther zu beruhigen und dem hochgeehrten Bau-Comite meine Erklärung mitzutheilen, daß ich bereit bin, statt der **contractlich vorgeschriebenen Haftzeit von drei Jahren für die Zimmermanns-Arbeiten eine solche von fünf Jahren zu übernehmen**.*

De Colle sollte mit seiner Zuversicht Recht behalten, dass die Sorgen betreffend der Bauholzqualität seitens der Bauleitung unbegründet waren, zumal sich das Dachtragwerk heute noch in einem durchaus sehr guten Zustand befindet. Dieser Zustand soll nun in den folgenden Kapiteln näher beschrieben und erfasst werden.

5-3.3 MATERIALIEN

Das Hauptaugenmerk bei der Erkundung des Kuppeltragwerkes der „Alten Technik“ wird, dem Fachschwerpunkt dieser Arbeit geschuldet, natürlich auf die Beschaffenheit und Güte des verwendeten Konstruktionsholzes (siehe Kapitel 5-3.3.4) gelegt. Nicht minder interessant wäre natürlich auch die wissenschaftliche Erhebung der anderen verwendeten Baumaterialien und die Erforschung deren Handhabung in der damaligen Bautechnik. Eine exakte Untersuchung und Baustoffprüfung aller, der mit der Hauptkuppelkonstruktion in Zusammenhang stehenden Materialien, würde sicherlich einen derart großen Bedarf an Informations- und Recherchearbeit mit sich bringen, sodass eine weitere Masterarbeit daraus entwickelt werden könnte. Somit soll dieses Kapitel eine überblicksmäßige Zusammenstellung liefern, wie das bauliche Umfeld rund um die hölzerne Kuppelkonstruktion beschaffen ist. Dabei werden auch Literaturempfehlungen abgegeben, die eine weiterführende, detaillierte Bearbeitung der nicht-hölzernen Materialien erleichtern soll. Die nachfolgenden kurzen Beschreibungen der anderen nicht-hölzernen Baumaterialien sollen damit nur soweit erfolgen, dass der Leser ein Verständnis für den Baubestand erhält und eine prinzipielle Beurteilung eines gegebenenfalls auftretenden Schadens und dessen Ursachen möglich wird.

5-3.3.1 Deckenkonstruktion über dem Aulafestsaal

Literaturempfehlung: [16] - Kapitel 6: Holzdecken; [10] - gemauerte Gewölbe und Bogenkonstruktionen

Aus den Bestandsplanunterlagen [59; 58] geht hervor, dass die doch recht große Deckenspannweite der Aulafestsaaldecke ($\approx 11,00$ m) ein etwas komplexeres Tragsystem erforderte, als in den weniger weit gespannten Bereichen der Regeltrakte. Während diese Takte überwiegend durch gemauerte Tonnengewölbe (Gangbereiche) oder durch einfache Tram- oder Dippelbaumdecken überspannt wurden, wird in Position 7 des aufgefundenen Arbeitsverzeichnisses (vgl. [57]) folgende Konstruktion für die Decke über der Aula gefordert:

Dippeldecke zwischen eisernen Trägern über der Aula incl. Trägerverschalung, ferner mit Bogenlehren samt solider Befestigung derselben zur Imitation des Hohlkehlengewölbes, Stichkappen, Schalungen für die Plafondeinrahmungen und Cassetten nach Zeichnung und Angabe . Länge der Dippelbäume bis ca. 4 m bei einer Profilhöhe von mindestens 15 Centimeter [...]

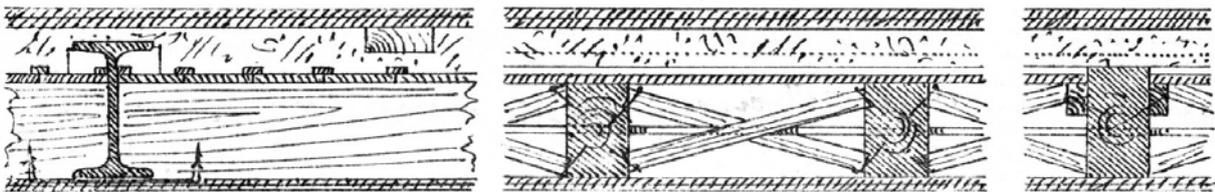


Abb. 5.21: Im Arbeitsverzeichnis geforderte Deckenkonstruktionen über den Regeltrakten. Originaldarstellung der Aufbauten [57]

Heute würde man eine solche Decke als Traversendecke mit Dippelbaumausfachungen bezeichnen. Derartige Deckenkonstruktionen waren neben der gemauerten Variante, die auch als sogenannte Kappendecke²⁰ oder preußische Kappe bekannt ist, vor allem für größere Spannweiten durchaus gebräuchlich und wurden häufig angewendet. Die Dippelbäume (dreiseitig bearbeitete, untereinander meist mit Holzdübeln verbundene Holzstämmen) werden bei dieser Deckenkonstruktion Mann an Mann auf die Gurte der parallel laufenden Eisenträgern aufgelegt. Einfache Dippelbaumdecken findet man recht häufig als letzte Geschoßdecke, waren sie doch aufgrund damaliger Bauvorschriften häufig verpflichtend, da sie einer allfälligen Trümmerlast (z. B.: wegen eines Dachstuhlbrandes) besser standhielten, als vergleichbare Tramdecken (vgl. [42]) . Ein Nachteil derartiger Deckenkonstruktionen ist der hohe

²⁰ In Österreich ist für eine derartige, zwischen zwei I-Trägern gemauerte Kappendeckenkonstruktion auch der Begriff „Platzl“ oder „Platzldecke“ gebräuchlich.

Holzverbrauch. Die Untersicht der Dippelbäume wurde meist durch eine einfache Stuckaturschalung, verputzt oder unverputzt bekleidet. Im Falle der Auladecke wurde jedoch eine aufwendig ornamentierte, untergliederte kassettierte Deckunterseite angebaut (siehe auch Abb. 4.14). Zum Ausgleich von Unebenheiten (ungleiche Dippelbaumhöhen) sind Dippelbaumdecken häufig mit einer Beschüttung versehen, in die Polsterhölzer für einen späteren Blindboden oder einen einfachen Bretter-Schiffboden eingelegt wurden. Durch die zusätzliche Deckenaufkast wurde dabei gleichzeitig die Schwingungsanfälligkeit der Deckenkonstruktion etwas gedämpft und die akustischen Eigenschaften (Schallschutz) verbessert. Eine Beschüttung kam auch bei der Decke über dem Aulafestsaal zur Ausführung, anstelle der hölzernen Bodenbeläge wurde aber eine Pflasterung aus gebrannten Ziegeln verlegt. Durch die vollflächige Beschüttung und Belegung mit Pflasterklinker²¹ an der Deckenoberseite und den verschlossene Putzträgern an der Deckenunterseite werden die Dippelbäume allerdings auch vollständig „luftdicht“ abgeschlossen. Dies kann insbesondere bei Feuchtigkeitszutritt oder mit hoher Feuchtigkeit eingebauten Dippelbäumen zu gravierenden Schäden, meist an den Auflagerbereichen führen. Generell reagieren Holztram- und Dippelbaumdecken wesentlich empfindlicher auf kurzfristigen Feuchteandrang als vergleichbare Massivbaudeckenkonstruktionen aus Stahlbeton oder Ziegelgewölben. Daher ist vor allem bei Dachsanierungen oder Dachneueindeckungen jener Bauwerke besondere Vorsicht geboten, deren letzte Geschoßdecke eine kostbare Deckenunterseite trägt, zum Beispiel eine gemalte Decke wie beim vorliegenden Aulafestsaal.



Abb. 5.22: Mit Pflasterklinker bekleidete Dippelbaum-Eisentraversendecke über dem Aulafestsaal

Der genaue Deckenaufbau und die Dimension der Dippelbäume sowie die Trägerhöhe der schmiedeeisernen Traversen wurden im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter untersucht, da eine Inspizierung dieser Tragwerksteile unweigerlich mit einem lokalen Abräumen der Deckenaufschüttung und der Pflasterkonstruktion verbunden gewesen wäre. Außerdem weist ein eigens an der Zugangstüre zur Kuppel angebrachtes Hinweisschild explizit darauf hin, die Deckenkonstruktion möglichst nicht zu betreten. Nicht verwunderlich wenn man bedenkt, dass die vom österreichischen Kunstmaler Paul Scholz (vgl. [19]) gestaltete Deckenunterseite des Aulafestsaaes durch zu starke Durchbiegung oder Schwingung Schaden nehmen könnte. Also können an dieser Stelle weder die Konstruktion selbst, noch deren Beschaffenheit in Bezug auf allfällige Schädigungen im Detail beurteilt werden.

²¹ Aus der Verlegerichtung des Pflasterklinkers kann in den meisten Fällen übrigens auch die Spannrichtung der Dippelbäume erahnt werden, da die Pflastersteine meist rechtwinkelig zu den Dippelbäumen verlegt wurden. Dies ist allerdings bei der vorliegenden Decke über dem Aulafestsaal nicht der Fall. Hier wurden die Steine parallel zur Verlegerichtung der Dippelbäume angeordnet.

5-3.3.2 aufgehendes Mauerwerk

Literaturempfehlung: [14] - Sammelwerk: *historisches Mauerwerk*; [28] - *historisch verwendete Mörtel*

Der historische Mauerwerksbau aufgehender Wände ist ebenso vielfältig wie die Materialien, die für diese Art der Massivbauweise verwendet wurden. Verschiedenste, häufig auch regional und epochal stark variierende Ausprägungen der Mauerwerksverbandstrukturen machen eine lückenlose Beschreibung aller auftretenden Formen quasi unmöglich. Ohne sich in Details zu verlieren, soll der Mauerwerksbau, mit Ausnahme von „verkeilten, ausgezwickten Mauerwerksbauten“²², vereinfacht als Dreistoffsystem beschrieben werden.

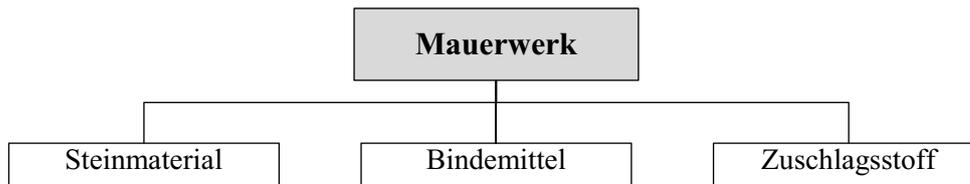


Abb. 5.23: *Mauerwerk als vereinfachtes Dreistoffsystem*

Als **Steinmaterial** können beispielsweise unterschiedlichste Natursteine (bearbeitet, unbearbeitet, gebrochen), gebrannte oder getrocknete Ziegelsteine aus verschiedensten Ton- und Lehmerden, aber auch künstlich hergestellte Steine wie beispielsweise Leichtbeton- und Glasbausteine verstanden werden. Nicht selten kommen in Mauerwerken auch Kombinationen aus verschiedenen Steinmaterialien zur Anwendung. Die Tragfähigkeit und physikalischen Eigenschaften derartiger Mischmauerwerke sind sehr schwierig zu bestimmen, da sie aufgrund der unterschiedlichen Einzelsteinfestigkeiten ein sehr inhomogenes Gefüge darstellen. Die Fugen zwischen dem Steinmaterial können je nach Präzision des Steinbearbeitungsgrades unterschiedlich stark ausgebildet sein. Während bei modernen, plangeschliffenen Tonziegeln quasi ein fugen- und mörtelloses „Verkleben“ möglich ist, weisen beispielsweise sogenannte Findlingsmauerwerke sehr große Fugen auf. Für das Fugenmaterial wird der aus den beiden anderen Stoffen hergestellte Mauermörtel verwendet. Als wichtiger Grundsatz sei an dieser Stelle auch noch folgende Bedingung hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Steinfestigkeit und Mörtelfestigkeit dargestellt (diese Bedingung findet sich beispielsweise auch im heute gültigen Eurocode 6 (vgl. [86])):

$$\frac{f_m}{f_s} \leq 2 \quad (5.1)$$

mit:

f_mFestigkeit des Mauermörtels

f_sFestigkeit des Mauersteines

Das heißt die Mörteldruckfestigkeit sollte niemals größer als der doppelte Wert der Steindruckfestigkeit sein.

²² Derartige Mauerwerkskonstruktionen kommen ohne Bindemittel aus. Als „Zuschlagsstoff“ können bei derartigen Konstruktionen die kleinen Gesteinszwickele verstanden werden, die die größeren, im bestmöglichen Verband gestapelten, meist unbearbeiteten Steine, stabilisieren.

Wie bereits erwähnt, besteht der Mörtel aus den beiden verbleibenden Stoffen des Dreistoffsystems. **Bindemittel** können vereinfacht in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- organische Bindemittel
 - historisch: Dung, Baumharze
 - modern: Kunststoffe und Harze
- anorganische Bindemittel
 - Kalk²³
 - Zement
 - Gips
 - Anhydrit
 - Magnesit
 - Lehme

Moderne (Fertig)Mörtel werden heute nach Rezept hergestellt. Das Mischungsverhältnis aus unterschiedlichen Bindemittelkomponenten, Zuschlagstoffen und Wasser wird dabei exakt aufeinander abgestimmt und somit kann auch die Mörtelfestigkeit „eingestellt“ werden. Bei älteren Mauermörteln ist diese konsequent nach Rezept erfolgte Vermischung der Einzelkomponenten nicht immer so genau genommen worden. Die Bindemittelherstellung war damals wesentlich schwieriger („Kalkgruben“ zum Löschen des Kalkes direkt am Einbauort) und teurer. Nicht selten kommt es daher vor, dass bei älteren Mörteln mit dem Bindemittel etwas gegeizt wurde und die Fugen zwischen den Mauersteinen „absanden“.

Für die Zusammensetzung der **Zuschlagstoffe** kommen meist mineralische Gesteinskörnungen unterschiedlichster Bestandteile zur Anwendung. Definitionsgemäß werden nicht zuletzt wegen der besseren Verarbeitbarkeit des Mörtels Korngröße < 4 mm zum Einsatz gebracht. Modernen Mörtelzuschlägen werden teilweise auch Kunststoffe zugesetzt, die die physikalischen Eigenschaften des Mörtels verbessern (Wärmedämmeigenschaften, Wasserresistenz, Dauerhaftigkeit). Natürlich müssen die Zuschläge für die Herstellung von Mörtel geeignet sein. Beispielsweise können verunreinigten Gesteinskörnungen Stoffe anhaften, die den Abbindeprozess des Bindemittels stören oder gar unterbinden und so die Festigkeit des erhärteten Mörtels deutlich herabsetzen. In besonders seltenen Fällen kommen auch organische Zuschlagstoffe wie beispielsweise Sägespäne zur Anwendung.

Das Mauerwerk im Bereich der Hauptkuppelkonstruktion wurde als reines Ziegelmauerwerk ausgeführt. Ob lokal auch einzelne Natursteine vermauert sind, konnte zerstörungsfrei nicht festgestellt werden, da quasi alle Wandoberflächen mit einem Kalk-Zement-Grobputz bekleidet sind. An einzelnen kleineren Fehlstellen im Putz und an den zahlreichen, nachträglich hergestellten Durchbrüchen für Leitungen der Haustechnik erkennt man allerdings das sauber im Block- bzw. Kreuzverband²⁴ ausgeführte Ziegelmauerwerksgefüge.

²³ Anmerkung: bei Kalk sind zwei wesentliche Unterschiede hinsichtlich des Abbindeprozesses zu unterscheiden: gelöschter Kalk: Dieses auch als „Luftkalk“ bekannte Bindemittel erhärtet an der Luft durch Wiederaufnahme des im Brennvorangang ausgetriebenen Kohlendioxids (=Carbonatbildung)

hydraulisch erhärtender Kalk: Je nach Gehalt an hydraulischen Bestandteilen erhärtet dieser Kalk, indem in einem chemischen Abbindeprozess wasserunlösliche Hydrate gebildet werden.

²⁴ um welchen dieser beiden Verbandstypen es sich tatsächlich handelt, kann nicht beantwortet werden, zumal die freiliegenden Ansichtsflächen nur von einer Mauerseite zugänglich sind.

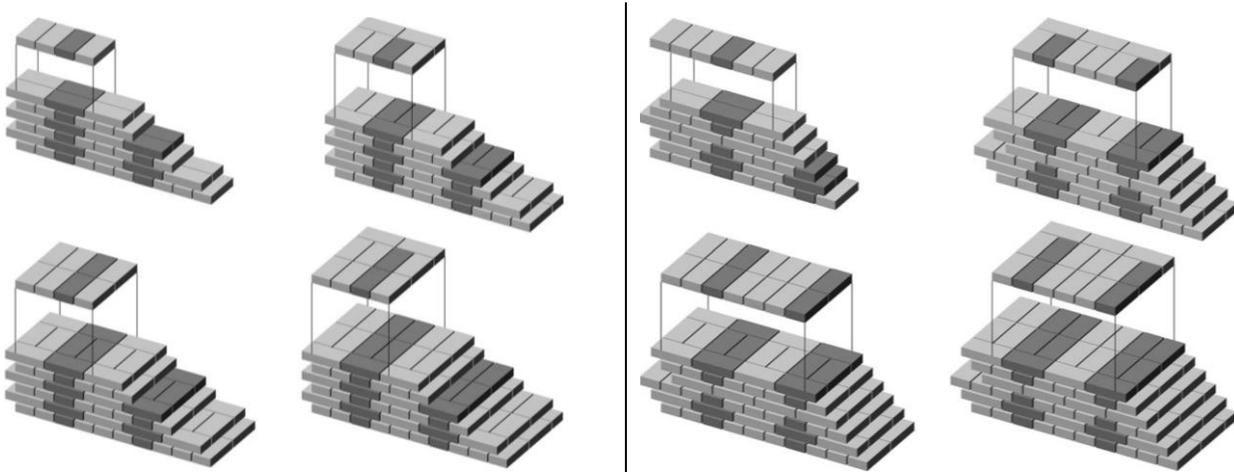


Abb. 5.24: Schematische Darstellung des bei der „Alten Technik“ angewandten Mauerwerkverbandes [2]
links: Blockverband; rechts: Kreuzverband

Sowohl die Lager-, als auch die Stoßfugen des Mauerwerks scheinen in den sichtbaren Mauerwerksansichten satt mit Kalkmörtel ausgemörtelt worden zu sein. Die Fugenstärken variieren geringfügig zwischen 8 bis 12 mm und liegen damit in jedem Fall im Normalbereich. Das Gesamtgefüge des Mauerwerks scheint besonders gut intakt zu sein. Frost- oder Feuchtigkeitsschäden in Form von Absprengungen oder Mauersalzausblühungen wurden ebenso wenig gefunden wie organischer Pilzbefall. Auch das Grundmaterial Ziegel weist optisch keine „Brennfehler“ oder Abplatzungen, die nicht mit dem Zurichten der Steine mit dem Hammer erklärbar wären, auf. Ebenso konnten keine größeren Spannungsrisse, die auf eine Spannungsspitze oder Setzung in der Tragstruktur hindeuten würden, beobachtet werden. Insgesamt wirkt die Mauerkonstruktion trocken - eine Mauerwerksflächenfeuchteuntersuchung im Rahmen der durchgeführten Holzfeuchteuntersuchungen hat dies auch bestätigt. An den nordfassadenbildenden massiven Wänden (hier wurde mit einem Bohrer eine Wandstärke > 75 cm festgestellt) wurde im Bereich der auskragenden Gesimse die Wandstärke konsolenartig unter Beibehaltung des Verbandgefüges erhöht, um darauf die umlaufende Rinnenkonstruktion und die Fassadenzierelemente anordnen zu können. Bei jenen Wänden, die an die umliegenden Dachbodenräume grenzen, konnte eine Mauerwerksdicke durch Messungen an den Zugangsdurchbrüchen von ca. 60 cm festgestellt werden. Ein etwa im Bereich der Vollgespärreachse VG-D durchlaufender, ca. 20 cm über die gepflasterte Deckenoberkante ragender Mauerwerkshochzug aus den darunterliegenden Geschoßen lässt auch im Dachraum noch die Abgrenzung der darunterliegenden Aulawand vom Gangbereich erkennen und trennt dabei die in Kapitel 5-3.3.1 beschriebene Auladeckenkonstruktion von der gewölbten Ziegeldeckenkonstruktion des Gangbereiches ab.

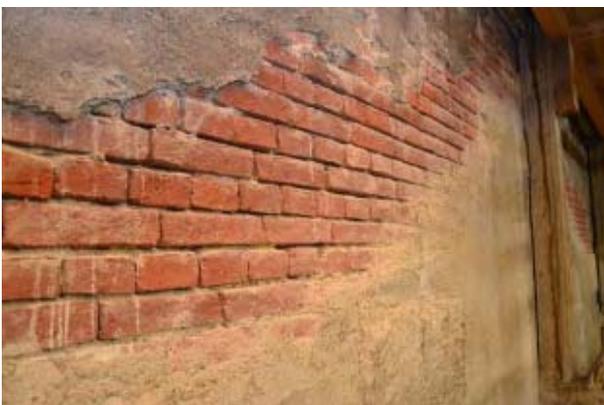


Abb. 5.25: Freiliegendes Mauerwerk an der Nordseite



Abb. 5.26: Mauerwerkshochzug unterhalb des Vollgespärre VG-D

5-3.3.3 Gesimse, Zierbalustrade, Statuen und Kastenrinnenkonstruktion

Literaturempfehlung: [20] - Schadensbilder an Natursteinen und deren Sanierung

Die bereits in Kapitel 4-3 angesprochene, kunstvoll gestaltete Hauptfassade an der Nordseite trägt im Bereich des Dachgesimses eine natursteinernerne, gebäudeumlaufende Zierbalustrade und die steinernen Statuen als Repräsentanten der vier Hauptunterrichtsschwerpunkte der Technischen Universität Graz. Gemäß den Nachforschungen von REISMANN (vgl. [19]) wurde für die Fassadengestaltung „Aflenzler Sandstein“, ein gelblich-weißlicher Grobkalk, der sich bildhauerisch leicht bearbeiten lässt und an der Luft eine Festigkeitszunahme erfährt, verwendet. Die Zierbalustraden und die Statuen wurden ebenfalls aus diesem Naturstein gefertigt. Die auf dem Gesimse befindlichen Zierelemente sind der direkten Bewitterung ausgesetzt und weisen demnach teils deutliche Abnutzungsspuren auf. Insbesondere der auf den Balustern auflagernde, horizontal liegende Obergurt ist merklich von Schlagregen-, Hagel- und Forstschäden sowie Winderosion betroffen. Ohne die Schädigungen genauer zu untersuchen, würde sich hier eine Blechabdeckung als einfache Lösung anbieten, um eine weitere Verwitterung zu begrenzen. Ein derartiger Verwitterungsschutz für die feingliedrigen Statuen würde natürlich deren Authentizität zerstören und scheint in diesem Fall auch nicht angebracht. Eine kunstbildhauergerechte Sanierung zur Erhaltung der Formschönheit der Statuen sollte allerdings in nächster Zeit unbedingt vom Hauseigentümer in Erwägung gezogen werden. Die bis zu 3,30 Meter hohen Statuen sind durch in Ösen eingehängte, schmiedeeiserne Stangen an einen im Kuppeltragwerk eingebauten, querliegenden Riegel gegen Absturz gesichert. Diese Rückverankerung erscheint durchaus intakt zu sein, das hierfür verwendete Gusseisen weist nur geringe Korrosionsspuren auf.



Abb. 5.27: Verankerung der Zierstatuen außen



Abb. 5.28: Rückverankerung der Zierstatuen an einen quer zu den Sparren liegenden Ankerbalken innen



Abb. 5.29: Zierbalustrade ohne Abdeckung an der Ostseite der großen Kuppel



Abb. 5.30: Zierbalustrade mit Abdeckung an der kleineren nordwestlichen Zierkuppel

Das Mauerwerkgesims trägt neben den genannten Zierelementen auch noch eine mit Stahlblech ausgeführte Kastenrinne. Die wenigen, visuell erkennbaren Schädigungen der gefalzten und teilweise verlöteten Blechpanale lassen vermuten, dass diese im Rahmen einer Dachdeckungsrenovierung erneuert oder saniert wurden. Die Kastenrinne sammelt das von der Kuppelkonstruktion abfließende Wasser und leitet dieses über angelötete Abfallrohre ab. Der Rinnenkörper selbst besteht aus einer einfachen Holzleistenkonstruktion. Die Ausführung der um die Kuppel umlaufenden Rinnenkonstruktion wurde damals besonders ausführlich im Detail geplant. (vgl. [59])

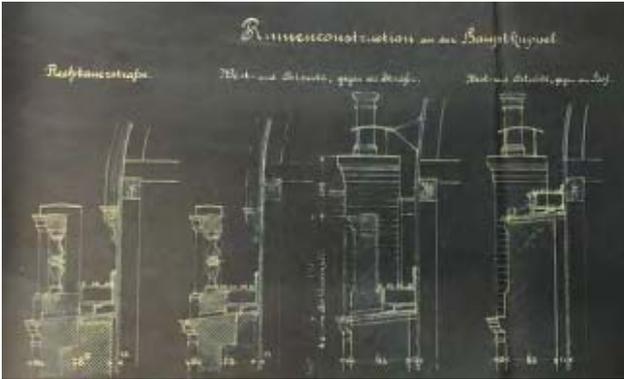


Abb. 5.31: Original geplante Entwässerung der Hauptkuppeldachfläche mittels Kastenrinne [59]



Abb. 5.32: Rinnenausbildung mit angelötetem Abfallrohr an der Ostseite der Hauptkuppel

5-3.3.4 Holz der Primärtragstruktur und der Dacheinschalung

Literaturempfehlung: siehe Fließtext und Literaturverzeichnis im Anhang

Für die später angestellte computergestützte Modellbildung und Nachrechnung der Hauptkuppelkonstruktion ist die Kenntnis über die Festigkeitskenngrößen des vorliegenden Konstruktionsmaterials von großer Bedeutung. Das Bauholz in alten Dachtragwerken wurde zwar von den erfahrenen Zimmermännern nach besten Wissen und Gewissen ausgesucht und entsprechend hochwertig verzimmert, allerdings wurde es bestimmt niemals einer vergleichbaren „Sortierung“ unterzogen, wie diese bei heute im Bau verwendeten Konstruktionshölzern standardmäßig durchgeführt wird. Nicht zuletzt wegen der aus dem Brief von Baumeister Johann de Colle hervorgehenden Beanstandung des Bauholzes seitens der Bauleitung (siehe Kapitel 5-3.2), sollte das verwendete Bauholz der Hauptkuppel genauer betrachtet werden. Zunächst soll an dieser Stelle der Bestandserfassung allerdings ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten einer „nachträglichen“ Beurteilung der Qualität von verbaute Holz gegeben werden.

Da es sich bekanntlich bei Holz um einen organisch gewachsenen, inhomogenen Werkstoff handelt, sind die physikalischen Eigenschaften des Holzes nur aus einer Vielzahl von Versuchen als approximiertere Durchschnittswerte angeben. Der Einfluss des Feuchtegehaltes, Wuchsfehler, Abweichungen der Faserrichtungen etc. erschweren eine treffende Aussage über die Festigkeiten und Steifigkeiten zusätzlich. Nicht selten weichen diese, quasi unter Laborbedingungen durchgeführten Untersuchungsergebnisse an neuem Bauholz, von den tatsächlichen Verhältnissen im historischen Bauwerk erheblich ab (vgl. [50]). Derzeit gibt es keine zuverlässigen Messverfahren für bereits verbautes Holz, die einen zweifelsfreien Rückschluss auf alle mechanischen Eigenschaften des Holzes zulassen. Eine Interpretation der tatsächlich vorhandenen Holzqualität bedarf dabei stets einer Kombination mehrerer verschiedener Messmethoden, wobei auch diese immer nur stichprobenartig durchgeführt werden können. Somit ist eine exakte Aussage über die Eigenschaften des vorliegenden Holzes der gesamten Tragstruktur immer an „Unsicherheiten“ geknüpft. Nach HOLZER (vgl. [11]) sind aus Sicht des Tragwerkplaners folgende Materialeigenschaften von Bauholz von Bedeutung:

- Holzfeuchte
- Schwindeigenschaften

- Steifigkeitseigenschaften
- Festigkeitseigenschaften
- Rohdichte

Vor allem die drei letztgenannten Materialeigenschaften stehen in direktem Zusammenhang mit der Holzfeuchte. Deshalb wurden im Rahmen dieser Bestandserfassung auch Holzfeuchtemessungen an ausgewählten Stellen im Hauptkuppeltragwerk durchgeführt (siehe Kapitel 5-3.6.2).

In der Hauptkuppel wurde überwiegend **Fichtenholz und Tannenholz** verzimmert. Auch die im Kuppeltragwerk häufig anzutreffenden Längsrisse können mit einer Änderung der Holzfeuchte erklärt werden. Häufig wurden in historischen Tragwerken und vermutlich auch im Dachwerk der „Alten Technik“ Holzbauteile bereits nach einer (zu) kurzen Trocknungsphase (z. B.: Fällen des Baumes im Winter, Einbau im darauffolgenden Sommer) „halbtrocken“ eingebaut. An dieser Stelle sei abermals HOLZER [11] zitiert. Dieser beschreibt den Rissvorgang recht anschaulich:

Wenn Holz [...] mit hoher Feuchte bearbeitet und eingebaut wird und dann auf die Gleichgewichtsfeuchte heruntergetrocknet wird, führt das dominierende Schwinden in Umfangsrichtung des Stammes zu Zugspannungen in Umfangsrichtung. Da Holz quer zur Faser nur geringe Zugfestigkeiten aufweist, bilden sich in der Folge radial ausgerichtete Schwindrisse, die bis in den Querschnittskern reichen können.[...] Häufig lässt sich beobachten, dass Schwindrisse von Stellen ausgehen, die durch Anschlüsse geschwächt sind (Bohrungen für Holznägel oder Bolzen, einspringende Ecken an Verbindungsdetails)[...]

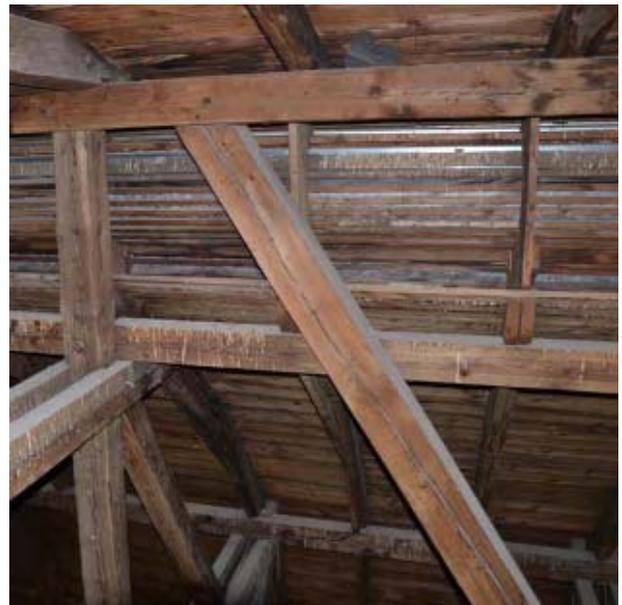


Abb. 5.33: Typische Schwindrisse an „halbtrocken“ verzimmertem Holz in der Hauptkuppel
links: Schwindriss ausgehend von einem Sicherungsbolzen einer Kreuzkammverbindung
rechts: Schwindriss an einer überwiegend Normkraftbeanspruchten liegenden Stuhlsäule

FRECH (vgl. [52]) führte intensive Untersuchungen an Kanthölzern und Biegebalken durch, um den Einfluss von schwindinduzierten Rissen an Holzbauteilen zu beurteilen. In seinem abschließenden Forschungsbericht erklärt er, dass bei überwiegend biegebeanspruchten Bauteilen, Schwindrisse bis zu einer Tiefe von rund 60 %²⁵ der Querschnittsbreite keine signifikante Minderung der Querschnittstragfähigkeit bewirken. Derart große Schwindrisse in überwiegend schubbeanspruchten

²⁵ Die angegebene, unbedenkliche Risstiefe von 60% der Querschnittsbreite gilt dabei für einen großen Einzelriss, oder für die Summe mehrerer Risse in eine Querschnittsrichtung.

Bereichen (z. B.: im Auflagerbereich liegender Balken) sind jedoch etwas zu groß²⁶. Hierfür gibt FRECH einen weiteren Richtwert mit 45% der Querschnittsbreite an. Diese angegebenen Grenzwerte bieten sich für eine erste, einfache Beurteilung der Holzbauteile durchaus an und wurden auch bei dieser Bestandsaufnahme berücksichtigt. In der Hauptkuppel konnten einige liegende Stuhlsäulen, Strebehölzer und Hängesäulen beobachtet werden, die teilweise bis zum Kern reichende Schwindrisse aufweisen (siehe auch Abb. 5.33). Da diese Tragwerksteile allerdings überwiegend normalkraftbeansprucht sind, können diese Rissbilder als statisch unbedenklich eingestuft werden. Dennoch stellen derartige Schwindrisse stets natürliche Wunden in der Holzstruktur dar, die Schädlingen wie Pilzsporen oder Insekten als „Eintrittspforte“ dienen könnten.

Das oftmals hohe Alter von Holzkonstruktionen wirft selbstverständlich die Frage nach der Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung über eine längere Zeitspanne auf. ELBECK, GÖRLACHER und NIER widmeten sich dieser Fragestellung in zahlreichen Forschungsberichten intensiv (vgl. [54; 53; 51; 29; 40]). Die Autoren lieferten hierfür sehr umfangreiche Forschungsberichte, deren eingehende Diskussion den vorgesehenen Rahmen dieser Masterarbeit bei weitem übersteigen würde. Entscheidend ist hingegen die Kernaussage all dieser Forschungsarbeiten (vgl. [51]):

„Die Untersuchungen der Werkstoffeigenschaften von altem Konstruktionsholz an kleinen, fehlerfreien Proben ergaben, dass die Druck-, Biege- und Scherfestigkeiten mit denen in der Literatur mitgeteilten Werten für neues Holz vergleichbar sind. Bisher wurden in keinem Fall niedrigere Festigkeiten nachgewiesen, die auf eine Alterung des Holzes oder auf negative Auswirkungen von Langzeitbeanspruchungen hindeuten würden.“

Man kann also mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass Holz keiner ausgeprägten Materialalterung und Ermüdung, wie diese vergleichsweise bei Stahl (siehe auch Wöhler-Linien Kerbschlagfälle lt. EC 3 etc.) der Fall ist, unterliegt.²⁷ Diese Feststellung wird auch für die nachstehend durchgeführte Festigkeitsdeklaration des Konstruktionsholzes der Hauptkuppel zugrundegelegt. Natürlich wäre eine Aussage wie: „Das wird schon alles in etwa C24 (S10) entsprechen!“, nicht nur unseriös, sondern auch durchaus gewagt, nimmt doch die vorliegende Festigkeit der Konstruktionshölzer für die Tragfähigkeitsermittlung der Gesamtkonstruktion eine bedeutende Rolle ein. Es müssen also Methoden gefunden werden, um das angetroffene verzimmerte Bauholz sozusagen im „Nachhinein“ einer bekannten Sortierklasse zuordnen zu können. Hierfür bieten sich folgende Verfahren an:

- manuelle visuelle Beurteilung gemäß den genormten Sortierkriterien
- Probeentnahme mit nachgeschalteter Laborprüfung
 - Kernbohrungen
 - Ausbau von Konstruktionsteilen
- Schwingungsverfahren (zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls (=dynamischer E-Modul²⁸)
 - Ultraschalllaufzeitmessung
 - Spannungswellenmessung nach Schwingungsanregung („Eigenschwingungen“)
- Durchstrahlungsverfahren
 - Röntgen
 - Computer-Tomographie (CT)
 - Mikrowellenmessverfahren
- sensorbasierende, optische Verfahren
 - digitale Farb- und Monochromkameras

²⁶ Risse beeinträchtigen die Schubfestigkeit eines Bauteils. Der Eurocode 5 berücksichtigt diese reduzierte Schubfestigkeit mit dem sogenannten Rissfaktor k_{cr} . Dieser Modifikationsbeiwert wird auf die Bauteilbreite angewendet und reduziert diese rechnerisch auf 2/3 der tatsächlich vorhandenen Breite.

²⁷ Der gering ausgeprägten Materialermüdung bei Holz wird unter anderem mit dem Modifikationsbeiwert k_{mod} Sorge getragen. Insbesondere im Holzbrückenbau kommen „strengere“ k_{mod} Beiwerte zur Anwendung. Ebenso wird der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit durch einen von den Belastungszyklen abhängigen Beiwert k_{fat} beeinflusst.

²⁸ der mit diesen Verfahren ermittelbare „dynamische“ E-Modul ist 5 bis 10 % größer als der statische E-Modul

- Nutzung des „Tracheid Effekts“²⁹

Man erkennt, es gibt also eine Vielzahl an Möglichkeiten und entsprechende Prüfungen und Messungen, die eine Sortierung nach den Festigkeitseigenschaften erlauben würden, doch eignen sich nicht alle gleichermaßen für den Einsatz in historischen Tragwerken. Eine Probeentnahme in Form von Kernbohrungen oder gar der Ausbau ganzer Tragwerksteile wäre natürlich eine sehr gute, aussagekräftige Methode. Allerdings handelt es sich dabei immer um eine zerstörende Probeentnahme, die nicht immer mit Statik (Querschnittsschwächung) oder dem bereits zuvor diskutierten Denkmalschutz vereinbar ist. Wegen dieser und aufgrund der hohen Arbeits- und Zeitintensität, die diese Methoden mit sich bringen, wurde im Rahmen dieser Masterarbeit darauf verzichtet. Die angegebenen Schwingungs-, Durchstrahlungs- und optische Verfahren bieten eine zerstörungsfreie Möglichkeit, die physikalischen Eigenschaften des Holzes zu überprüfen. Allerdings erfordern beispielsweise Laufzeitmessungen neben kostspieligem Equipment stets eine Bestimmung der Rohdichte, um eine seriöse Auswertung zu ermöglichen. Hierauf wurde ebenso verzichtet wie auf die Heranschaffung von Röntgeneräten Computertomographen, und Hochempfindlichkeitskameras. Verbleibt also nur noch eine manuell, visuelle Beurteilung der Konstruktionshölzer, beispielsweise nach den in ÖNORM DIN 4074-1 [92] definierten Sortierkriterien. Auch BLIEM und MEISEL (vgl. [35], [38]) empfehlen in ihren Masterarbeiten die Verwendung der visuellen Sortierung und geben hierfür eine zweckmäßige erste Unterteilung, die noch vor der Anwendung der genormten Sortierkriterien erfolgen kann, an:

„geeignetes“ Holz:

Darunter versteht BLIEM alle Konstruktionshölzer, die keine signifikante Schädigung (wie die Zerstörung durch Pilze oder Insekten) aufweisen und stuft diese, auf der sicheren Seite liegend, als „gutes Bauholz“ ein und weist ihnen die Güteklasse S10 (= C24), insofern sie die Sortierkriterien nach Tabelle 2 gemäß ÖNORM DIN 4074-1 erfüllen, zu.

„ungeeignetes“ Holz:

Darunter sind all jene Hölzer zu verstehen, die statisch relevante Schäden wie Pilzbefall, Fäulnis oder gravierenden Insektenbefall aufweisen. Je nach Ausmaß der Schädigung ist die weitere Handhabung des betroffenen Bauteils abzuklären. Dabei kommen Schädlingsbekämpfungsmaßnahmen und Kontrolle der Wirksamkeit mit nachfolgender Feststellung des intakten Restquerschnittes und Gesundschneiden mit Austausch des lokal schadhaften Holzes in Betracht.

Die ÖNORM DIN 4074-1 wurde ursprünglich für die Sortierung von geschnittenen Holzbauteilen geschaffen, die noch nicht verbaut und damit noch keiner Belastung ausgesetzt sind. Diese Tatsache kann für die Anwendung auf bestehende ältere Tragwerke jedoch insofern „erleichternd“ genutzt werden, als dass Bauteile, die ihre „Funktion im Tragwerk“ erfüllen (z. B.: ein noch intakter Bundtramm) zusätzliche Informationen für die Zuweisung einer Sortierklasse in sich tragen und dies eine Zuordnung erleichtern kann. Die in der Norm angegebenen Regelungen haben sich auch für die Anwendung von „behauenen“ Holzbauteilen als praktikabel erwiesen, wie sich beispielsweise in der Masterarbeit von BUCHHÄUSL (vgl. [36]) zeigt. Nachfolgend sollen nun die wichtigsten Merkmale des Schnittholzes, die für die Sortierung nach [92] zur Anwendung kommen, angeführt werden:

- Baumkante
- Äste³⁰
- Jahrringbreite
- Faserneigung
- Risse (Blitz-, Frost-, Schwindrisse)
- Verfärbungen (Bläue, Rot- und Weißfäule)
- Druckholz
- Insektenfraßgänge
- Mistelbefall

²⁹ =Lichtleitereffekt von Fehlstellen in der Holzoberfläche

³⁰ dabei wird eine zusätzliche Unterscheidung der Astigkeit von Kanthölzer, Bohlen und Brettern getroffen

- Krümmung (Verdrehungen, Längs- und Querverwölbungen)
- Markröhre

Hinsichtlich Erläuterung der einzelnen Begrifflichkeiten wird an dieser Stelle auf die Norm verwiesen.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden im Zuge der Ermittlung der Querschnittsdimensionen und der Systemabmessungen die Bauteile gleichzeitig auf die Sortiermerkmale der ÖNORM DIN 4074-1 untersucht. Dabei wurde neben den oben genannten Merkmalen auch auf die Funktion des Bauteils in der Gesamtstruktur geachtet und entsprechend bei der Holzgütedeklaration berücksichtigt. Natürlich stünde der Aufwand, jedes einzelne Bauteil der Hauptkuppel genauestens zu untersuchen in keinem Verhältnis zum Nutzen. Daher wurden überwiegend jene Tragwerksteile genauer betrachtet, die festigkeitsmindernde Anzeichen aufweisen, beziehungsweise essentiell für die Tragfunktion sind. Aufgrund der bereits angesprochenen fehlenden Zugänglichkeit von höher gelegenen Tragwerkteilen, konnten auch diese nicht „handnah“ überprüft werden. Diesem Problem wurde insofern Abhilfe geschaffen, als dass diese Bauteile von möglichst vielen Seiten mit einem starken Teleobjektiv an einer digitalen Spiegelreflexkamera abgelichtet wurden, um das so gewonnene fotografische Bildmaterial später, sozusagen „sekundär-visuell“ am Computer überprüfen zu können. Nicht zuletzt durch die Konstruktion selbst (z. B.: eng liegende Zangenbalken, aufeinanderliegende Hölzer), sondern auch im Bereich von Verbindungsknoten (z. B.: Stirnflächen in Holz-Holzverbindungen) konnten nicht alle Oberflächen im Detail betrachtet werden. Auf den nächsten Seiten soll nun eine, aufgrund der oben genannten Gründe, vereinfachte visuelle Sortierung durchgeführt werden:

Tab. 5.3: Sortierkriterien für Kanthölzer bei visueller Sortierung nach ÖNORM DIN 4074-1 [92]

Sortiermerkmal		Sortierklasse gemäß ÖNORM DIN 4074-1		
		S 7 / C18	S 10 / C24	S13 / C30
1	Baumkante	alle vier Seiten müssen durchlaufend von Schneidwerkzeug gestreift sein	bis 1/3 in jedem Querschnitt muss mindestens 1/3 jeder Querschnittsseite frei von Baumkante sein	bis 1/8 in jedem Querschnitt muss mindestens 2/3 jeder Querschnittsseite frei von Baumkante sein
2	Äste	bis 3/5	bis 2/5 nicht über 70mm	bis 1/5 nicht über 50mm
3	Jahringbreite	-	bis 6mm	bis 4mm
4	Faserneigung	bis 200mm/m	bis 120mm/m	bis 70mm/m
5	Markröhren	zulässig	zulässig	nur bei Kanthölzern mit einer Breite > 120mm zulässig
6	Risse - radiale Schwindrisse - Blitzrisse - Frostrisse	zulässig nicht zulässig nicht zulässig	zulässig nicht zulässig nicht zulässig	zulässig nicht zulässig nicht zulässig
7	Verfärbungen - Bläue - nagelfeste braune und rote Streifen - Rot- und Weißfäule	zulässig bis zu 2/3 der Querschnitts- oder Oberfläche zulässig nicht zulässig	zulässig bis zu 2/5 der Querschnitts- oder Oberfläche zulässig nicht zulässig	zulässig bis zu 1/5 der Querschnitts- oder Oberfläche zulässig nicht zulässig
8	Druckholz	bis zu 2/3 der Querschnitts- oder Oberfläche zulässig	bis zu 2/5 der Querschnitts- oder Oberfläche zulässig	bis zu 1/5 der Querschnitts- oder Oberfläche zulässig
9	Insektenbefall	Fraßgänge von Frischholzinsekten bis zu 2mm Durchmesser zulässig		
10	Mistelbefall	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
11	Krümmung - Längskrümmung Verdrehung	bis 15mm / 2m	bis 8mm / 2m	bis 5mm / 2m

vorgefunden Merkmale in der Hauptkuppel

ad 1: Baumkante

Ausgeprägte Baukanten konnten, wenn überhaupt, nur an wenigen untergeordneten Bauteilen (z. B.: Laternensparren) oder an Bauteilen mit sehr kurzer Spannweite (Fußpfette an der Nordseite, Firstpfette der Laterne) festgestellt werden. An höher beanspruchten Tragwerkskomponenten, wie etwa liegenden Stuhlsäulen konnten, mit Ausnahme weniger Fälle, kaum signifikante Baumkanten aufgefunden werden. Bei den betroffenen Bauteilen erstreckt sich diese immer nur auf maximal zwei der Längskanten und verläuft dabei etwa gleichmäßig über 1/3 der Bauteillänge. Da sich das Vorhandensein von Baumkanten wie gesagt auf nur wenige Bauteile beschränkt, kann hinsichtlich dieses Kriteriums von einem Vollholz der Güte C30 ausgegangen werden.



Abb. 5.34: Auswahl von Kuppelbauteilen, an denen Baumkanten aufgefunden wurden

*links: Fußpfette an der Nordseite (VG-A)
Mitte: Firstpfette (VG-C) und Sparren der Laternenkonstruktion
rechts: liegende Stuhlsäule (VG-B)*

ad 2: Äste

Die Astigkeit³¹ wurde an eine Vielzahl von Bauteilen, die größere Äste aufweisen, exemplarisch geprüft. Dabei konnte nur dreimal eine geringfügige Überschreitung der zulässigen Astigkeitsgrenze für die Zuordnung der Konstruktionshölzer in die oberste Güteklasse (1/5 der Querschnittshöhe bzw. Querschnittsbreite) festgestellt werden. Es gibt keine Äste, deren Durchmesser >40 mm ist. Dahingehend kann auch für diese Kriterium von einem Vollholz der Güte C30 ausgegangen werden. Generell weisen die Hölzer allesamt eine sehr geringe Astigkeit auf, wie man anhand eines, für das Tragwerk repräsentativen Ausschnitts in der rechts abgebildeten fotografischen Aufnahme erkennen kann.



Abb. 5.35: Geringe Anzahl von Ästen

ad 3: Jahrringbreite

Leider waren nur weniger Bauteilanschnittflächen für eine Messung mit der Schiebelehre zugänglich. Eine für die Gesamtheit der Hölzer gültige Aussage kann daher nicht getroffen werden. Die Jahrringbreite an den gemessenen Zangenquerschnitten der Hauptgespärre VG-3 bzw. VG-C in Höhe der ersten Tramlage (Tramlage E1) lag mit rund 5 mm im Übergangskriterium zwischen C24 (max. 6 mm) und C30 (max. 4 mm).

³¹ Die Astigkeit eines Konstruktionsteiles wird bestimmt durch die Division des größten sichtbaren Astes durch die zugehörige Querschnittsbreite des Konstruktionsteiles.

ad 4: Faserneigung

Die Faserneigung konnte, wie in der ÖNORM DIN 4047-1 empfohlen, anhand der Neigung einiger ausgeprägter Schwindrisse stichprobenartig sehr gut gemessen werden. Wie man am ausgewählten Fotobeispiel deutlich erkennen kann, verlaufen die Fasern in Bezug zur nahegelegenen Längskante nahezu parallel. Hinsichtlich des Faserneigungskriteriums können die zur Anwendung gebrachten Konstruktionshölzer allenfalls der Güteklasse C30 zugeordnet werden, zumal hierfür eine Faserneigung von 70 mm/m erlaubt ist.



Abb. 5.36: *Faserneigung der Strebe, erkennbar am Schwindriss*

ad 5: Risse

Einige Schwindrisse wurden aufgefunden, deren Tiefe stellt jedoch in den meisten Fällen keine Einbußen in Bezug auf die Querschnittstragfähigkeit dar (vgl. [52])

ad 6 Markröhre

Die Markröhre ist in den meisten Fällen vorhanden. Dies ist aber ohnehin in allen Holzgüteklassen nach ÖNORM DIN 4047-1 zulässig. Grundsätzlich ist die Lage der Markröhre im Querschnitt für das Quell- und Schwindverhalten eines Bauteils von Bedeutung. In alten Dachtragwerken kann das Quellen und Schwinden als abgeschlossen betrachtet werden. Damit spielt das Kriterium „Markröhre“ eine eher untergeordnete Rolle. In den meisten beobachteten Fällen sitzt die Markröhre nahe der Querschnittsachse, also etwa in Querschnittsmitte. Dies ist insofern günstig, da sich das so genannte „adulte Holz“ mit höheren Festigkeitseigenschaften im höher beanspruchten Querschnittsrandbereich befindet. Das „juvenile Holz“, liegt rund um den Bereich der Markröhre und weist signifikant geringere Festigkeitseigenschaften auf. Interessante Ausführungen zu diesem Thema finden sich beispielsweise in [36] und [31].³²

ad 7: Verfärbungen

Holzverfärbungen, etwa verursacht durch den Bläuepilz, konnten nur in sehr geringem Maß festgestellt werden. Holzsubstanzzerstörende oberflächige Rot- oder Weißfäule konnte gar nicht aufgefunden werden. Einige Holzbauteile weisen braunrote, radial verlaufende Streifen an den Längsseiten auf, die auf ein Vorhandensein von Rotstreifigkeit hindeuten. Allerdings ist die Beurteilung schwierig, da einige der betroffenen Bauteile, resultierend aus früheren Schäden an der Dachhaut, ausgeprägte Feuchtigkeitsschlieren und Wasserflecken aufweisen. Messungen der Holzfeuchte (siehe Kapitel 5-3.6.2) haben aber gezeigt, dass die Holzfeuchte deutlich unter 20% liegt und die Holzoberflächen trocken sind. Daher kann davon ausgegangen



Abb. 5.37: *Feuchteschlieren an der Dacheinschalung und an horizontal liegenden Bauteilen*

³² Auszug aus der Vorlesungsunterlage „Holzbau“ - Der Roh- und Werkstoff Holz von SCHICKHOFER: „In den ersten Wachstumsjahren produziert der Baum sogenanntes juveniles Holz, das im Zentrum des Stammes in unmittelbarer Nähe zur Markröhre liegt. Die Eigenschaften des juvenilen Holzes ändern sich dabei von Jahrring zu Jahrring deutlich. Während der Übergangszeit vom 5. bis zum 20. Wachstumsjahr verbessern sich die Holzeigenschaften und werden im sogenannten adulten Holz ungefähr ab dem 20. Wachstumsjahr relativ konstant. Das juvenile Holz ist, i.d.R. durch breitere Jahrringe gekennzeichnet. [...] Das juvenile Holz weist letztlich eine um 50 bis 70% geringere Steifigkeit und Festigkeit auf, als adultes Holz. [...]“

werden, dass ein vorhandener Rotstreifepilz inaktiv ist. Gemäß ÖNORM DIN 4074-1 ist beim Auftreten von Rotstreifigkeit eine „Nagelprobe“ durchzuführen. Lässt sich neben der Pilzverfärbung auch die Holzoberfläche mit dem Fingernagel einfach abkratzen, so liegt bereits eine Schädigung der Holzsubstanz vor. An mehreren im Tragwerk durchgeführten Kratzproben war eine derartige Schädigung nicht gegeben. Hinsichtlich der doch vorhandenen, teils sehr stark ausgeprägten Holzverfärbungen wird das Holz nach diesem Kriterium der Holzgüte C24 zugeordnet.

ad 8: Druckholz (vgl. [36])

Druckholz wird im lebenden Baum als Reaktion auf einen äußeren Krafteinfluss gebildet. Es hat großen Einfluss auf das Quell- und Schwindverhalten von Bauteilen. Da sich in eingebautem Holz bereits die Ausgleichsfeuchte eingestellt hat und somit keine Quell- und Schwindverformungen mehr zu erwarten sind, spielt es für die Sortierung von eingebautem Holz nur eine untergeordnete Rolle [...]

An den untersuchten Bauteilen der Hauptkuppel wurde kein Druckholz festgestellt und kann damit als C30 eingestuft werden.

ad 9: Insektenbefall

Es konnten zwar einige lokale Fraßgänge und Bohrlöcher an der vollflächigen Bretterverschalung der Kuppel gefunden werden, allerdings scheint der Insektenbefall bereits vor Einbau des Dachverschlages abgeklungen zu sein, zumal weder aktive Käfer noch frisches Bohrmehl zu finden sind. An den für die Tragstruktur relevanten Primärbauteilen wurden keine Spuren von Insektenschäden festgestellt.

ad 10: Mistelbefall

- nicht feststellbar

ad 11: Krümmung

Ein genaues Aufmaß und Kontrolle der Verkrümmung und Verwerfung der Bauteile wurde nicht durchgeführt. Visuell konnten keine außerhalb der zulässigen Grenzen liegende Verkrümmungen festgestellt werden.

Resümee und Festlegung der Holzgüte für die einzelnen Bauteile:

Hinsichtlich der vorgefundenen Merkmale wird das Holz der **Primärtragstruktur** als **C30** eingestuft. Dem Bretterverschlag und einigen **untergeordnete Bauteilen**, wie beispielsweise einige Hölzer zum Auskeilen zwischen den Zangenbalken, den zu bogenförmigen Balken vernagelten Sparren und den Kopfbändern wird die Holzgüte **C24** zugesprochen. Insgesamt erscheint das Bauholz von sehr guter Qualität zu sein, wie sich insbesondere an der geringen Anzahl größerer Äste, an den großen, baumkantenfreien Holzquerschnitten und an der geringen Faserneigung erkennen lässt. Auch das Fehlen von Fraßspuren und Pilzschädlingen jeglicher Art spricht für hochwertiges Bauholz. Womöglich wurde sogar teilweise im Vorfeld getrocknetes Konstruktionsholz (vgl. hierzu auch die Jahresangaben des im Kapitel 5-3.2 auszugsweise zitierten Schriftverkehr aus [56]) verwendet. Die damalige Beanstandung hinsichtlich der Holzqualität durch die zuständige Bauleitung kann vom Verfasser dieser Masterarbeit, zumindest was das Bauholz der Hauptkuppelkonstruktion betrifft, nicht nachvollzogen werden.

5-3.3.5 schmiedeeiserne Bauteile - Verbindungsmittel

Die räumliche Hängewerkskonstruktion der Kuppel als zimmermannsmäßiges Tragwerk, das ausschließlich mit reinen Holz-Holz-Verbindungen ausgeführt wurde, zu bezeichnen, wäre prinzipiell zwar richtig, zumal der überwiegende Teil der Knotendetails mit eben diesen typischen Zimmermannsverbindungen gelöst wurde. Andererseits, bedingt durch die selbst in der Gespärreebene „räumlichen“ Tragwerkstruktur (z. B.: Zangenbalken - Stuhlsäule - Zangenbalken), kamen quasi in allen Knotendetails auch „lagesichernde“ eiserne Verbindungsbolzen mit aufgeschnittenem Gewinde zum Einsatz. Bei der Tragstruktur handelt es sich also um eine Mischkonstruktion, die aus ingenieurmäßiger Tragwerksplanung gepaart mit Knotenlösungen der bewehrten Holz-Holz-Verbindungstechnik der Zimmermannskunst entstanden sein dürfte. Also kamen, bedingt durch die Konstruktion, auch zahlreiche Eisenbauteile wie zum Beispiel Anker, Klammern, Nägel und Schließen zum Einsatz.

Dieses alte Guss- oder Schmiedeeisen weist meist einen erstaunlich hohen Korrosionswiderstand auf und wirkt auf den ersten Blick meist völlig intakt. Dies stimmt auch, wenn man die minimalen Korrosionsschäden unter Laborbedingungen betrachtet. Allerdings war die Herstellungstechnologie im 19. Jahrhundert noch nicht in dem Umfang ausgereift, als dass diesen alten Eisenbauteilen eine so hohe Tragfähigkeit zugesprochen werden kann, wie man sie beispielsweise von heutigen Konstruktionsstählen kennt. Auf diesen Umstand ist besonders dann zu achten, wenn, bedingt durch eine Umnutzung zusätzliche Lasten auf derartige Verbindungsmittel aufgebracht werden sollen. Die Holzbauteile, die häufig ausreichend dimensioniert sind, mögen dieser neuen Lastsituation zwar ohne zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen gewachsen sein, die eisernen Verbindungsmittel allerdings stoßen dann oftmals an ihrer „Grenzen“. Es ist schwierig, die Tragfähigkeit dieser Eisenteile, ohne sie einer zerstörenden Prüfung zu unterziehen, zu ermitteln. Allerdings erlauben ältere Kennwertsammlungen (z. B.: [12]) eine recht gute Abschätzung der Festigkeitseigenschaften des Eisens.



Abb. 5.38: *Eiserne Aufhängung eines Bundtrams an eine Stuhlsäule. Vollgespärre VG-2 An der rechten Bundtramskante sind leichte Holzquetschungen erkennbar.*

5-3.3.6 Dacheindeckungen der Hauptkuppel

Literaturempfehlung: [21] - insb. Kapitel 5.1: Sanierung von metallischen Dächern; [6] - insb. Kapitel 1.6: „Dachdeckungen“

Für die Dacheindeckung der Hauptkuppel wurden Schieferplatten verwendet und nach dem Prinzip der Doppeldeckung auf die vollflächig mit Holzbrettern eingeschaltete Dachkonstruktion montiert. Die Dacheindeckung macht einen sehr neuen Eindruck und scheint bereits einmal grunderneuert worden zu sein. Leider konnte im Rahmen der Recherche im Archiv nicht herausgefunden werden, ob und wann diese Erneuerung der Dacheindeckung an der Hauptkuppel stattgefunden hat. Die bereits angesprochenen Verfärbungen und Feuchtigkeitsschlieren an den Schalungsbrettern lassen aber vermuten, dass größere Undichtigkeiten an der Dachhaut vorhanden waren. Diese Schäden scheinen allerdings behoben worden zu sein, wie die nunmehr trockenen Bretter im Dachraum beweisen. Die Bretter sind direkt mit den Schieferplatten beschlagen, eine Unterdachbahn oder ein Bitumenanstrich der Bretter wurde nicht ausgeführt. An den Graten der Kuppel wurde die Dachdichtheit durch schalenförmige Bleche erreicht, die großzügig dimensioniert um die kuppelformbedingte Dachkante führen. Diese Grateinfassungsschalen sind mit Haftern an eine direkt auf dem Gratsparren angenagelte, stehende Trägerbohle schuppenförmig überlappend befestigt. Im Traufenbereich der steil anstehenden Kuppelneigung geht die Schieferplattendeckung in eine Blechschürze über, die gleichzeitig den Übergang zur Rinnenkonstruktion darstellt.



Abb. 5.39: Schieferplattendeckung der Hauptkuppel



Abb. 5.40: Ausbildung der Dacheindeckung im Gratbereich der Hauptkuppel

Für die Dacheindeckung der wesentlich flacher geneigten, auf der Kuppel aufgesetzten Laternenkonstruktion wurde eine gefalzte Zinkblecheindeckung verwendet. Der Aufstieg bis zum Firstpunkt der Laterne ist über den eingebauten Wartungssteg bis zur Dachausstiegs Luke möglich. Die Konstruktion des Laternendaches ist allerdings nur für das Betreten zu Wartungszwecken ausgelegt. Im Traufenbereich der Laterne wurde umlaufend, wohl eher mit Hinblick auf gestalterischen Nutzen, eine filigrane „Absturzsicherung“ angebracht. Für den Übergangsbereich zwischen Kuppel und Laterne wurde eine gerundete Trägerleistenkonstruktion geformt. Diese ist mit einer Unterdachbahn bespannt und mit haftergehaltenen Blechschalen abgedichtet.



Abb. 5.41: Trägerleistenkonstruktion für den verblechten Übergangsbereich Kuppel-Laterne



Abb. 5.42: Blecherne Dachhaut der Laterne mit Ausblick zum Grazer Schlossberg

5-3.4 TRAGSYSTEM DER HAUPTKUPPEL

5-3.4.1 Systemabmessungen und Querschnittsgeometrie

Dank des Engagements des Archivs der Technischen Universität Graz liegen für die „Alte Technik“ tatsächlich zahlreiche Planunterlagen vom Hauptplaner Professor Johann Wist, gesammelt in einem „Abrechnungsbuch“ [60] als Blaupause vor und sind von wahrlich verblüffender zeichnerischer Feinheit und Qualität. Allerdings dokumentieren diese vorhandenen Planunterlagen zwar die Gebäudegrundriss- und Fassadengestaltung sehr detailliert, die hölzerne Dachlandschaft allerdings ist leider nur sehr schematisch dargestellt und kann hinsichtlich der Darstellungsgenauigkeit bestenfalls der Genauigkeitsstufe 1 (vgl. Kapitel 3-3.4) zugeordnet werden. Die vorliegende Masterarbeit setzt sich demnach auch zum Ziel, die System- und Querschnittsabmessungen am Naturmaß möglichst genau aufzunehmen und diese in Form von Bestandsplanblättern darzustellen.

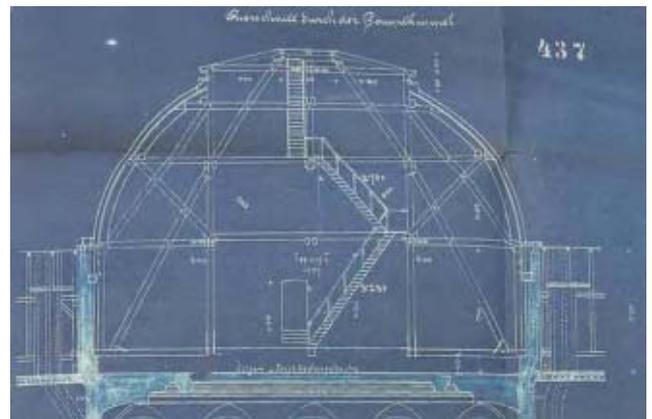
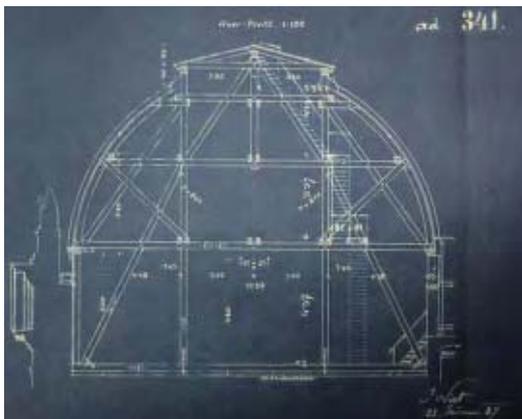


Abb. 5.43: Originale Planunterlagen von Johann Wist als Blaupause [59]
 links: Vollgespärre VG-3; rechts: Vollgespärre VG-C mit geplantem Wartungsaufstieg

Zum besseren Verständnis der textlichen Beschreibungen im weiteren Fließtext, sollen nachfolgend die auf Bauteil- und Achsdarstellung reduzierten Miniaturen der Planunterlagen die Orientierung erleichtern. Die vollständigen Pläne können in ANHANG B eingesehen werden.

Grundrisse der einzelnen Tramlagenebenen und Sparrenlagen

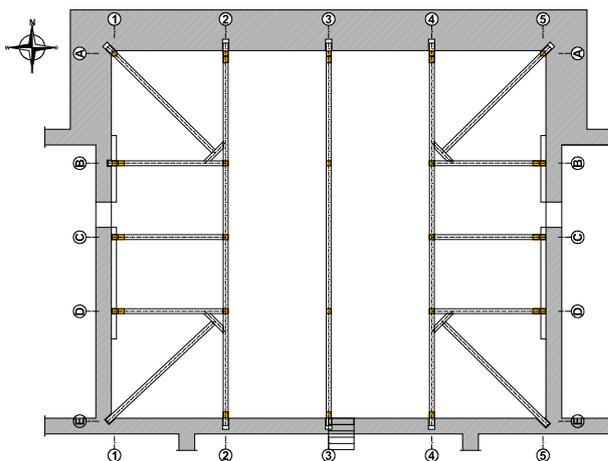


Abb. 5.44: Tramebene E0 (Bundtramlage)

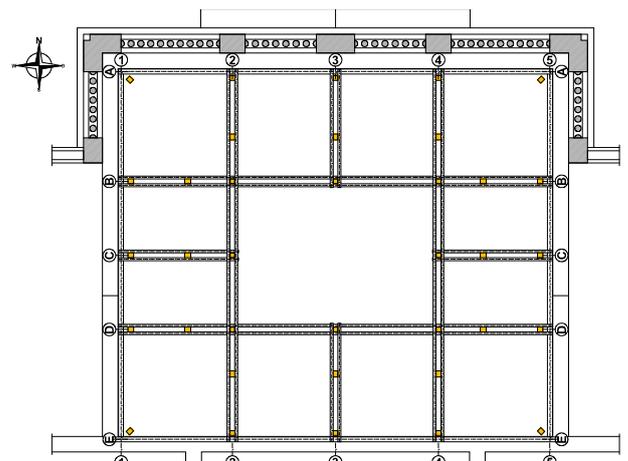


Abb. 5.45: Tramebene E1 (erste Zangenbalkenlage)

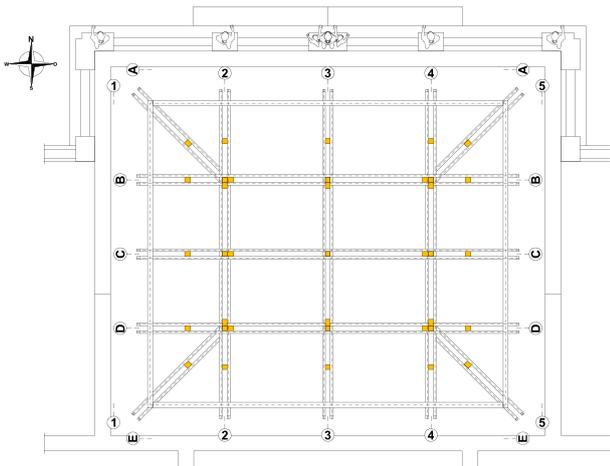


Abb. 5.46: Tramebene E2 (zweite Zangenbalkenlage)

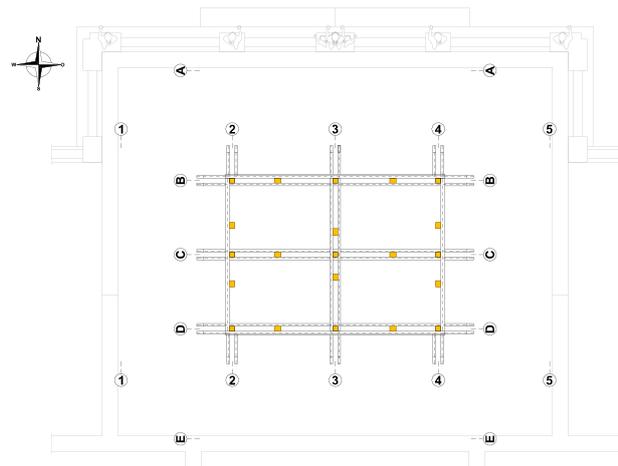


Abb. 5.47: Tramebene E3 (dritte Zangenbalkenlage)

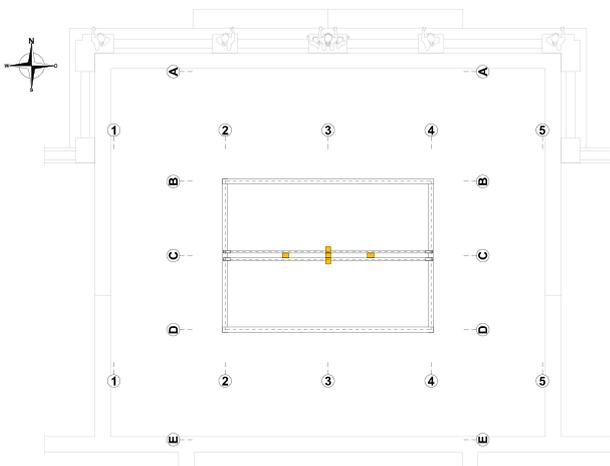


Abb. 5.48: Tramebene 4 (Fußfette Laterne)

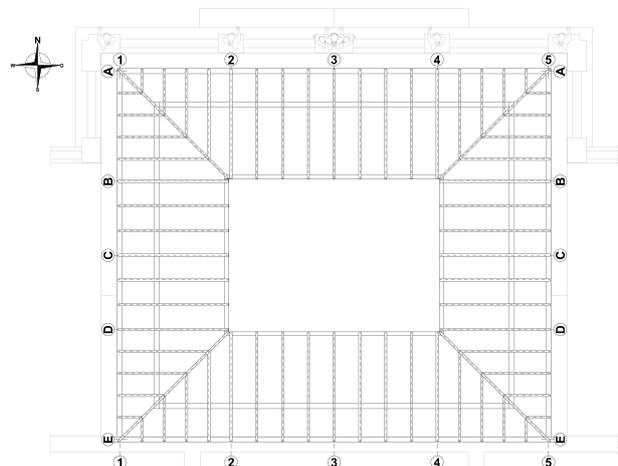


Abb. 5.49: Sparrenlage Kuppel

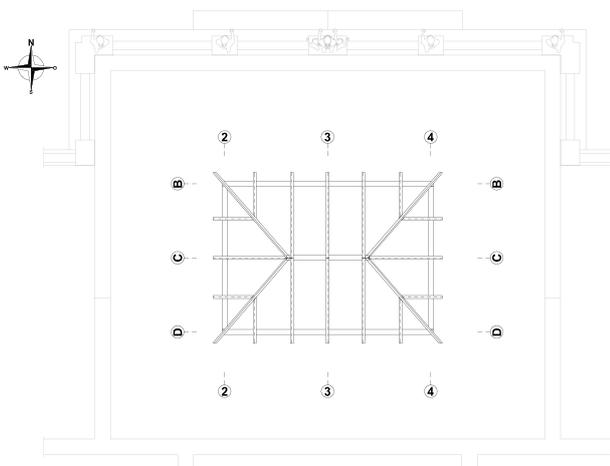
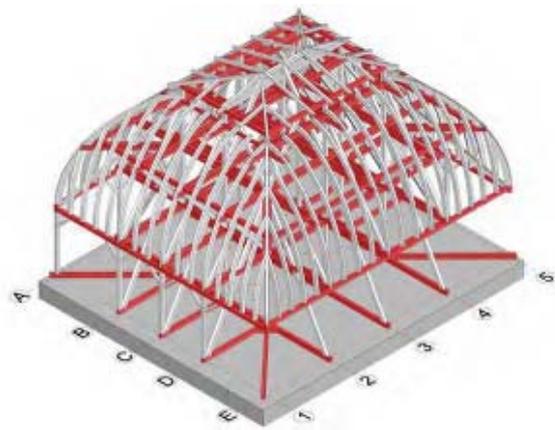


Abb. 5.50: Sparrenlage Laterne



Regelschnitte der Hauptgespärre (Nord-Süd-Orientierung)

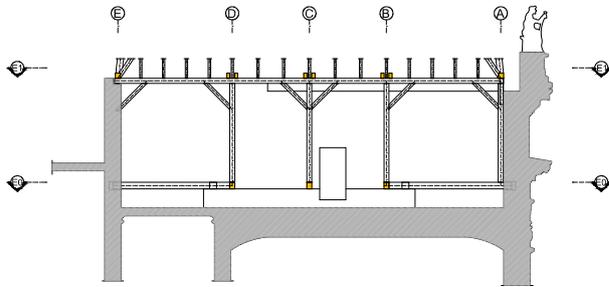


Abb. 5.51: Vollgespärre VG-1 (Blickrichtung West)

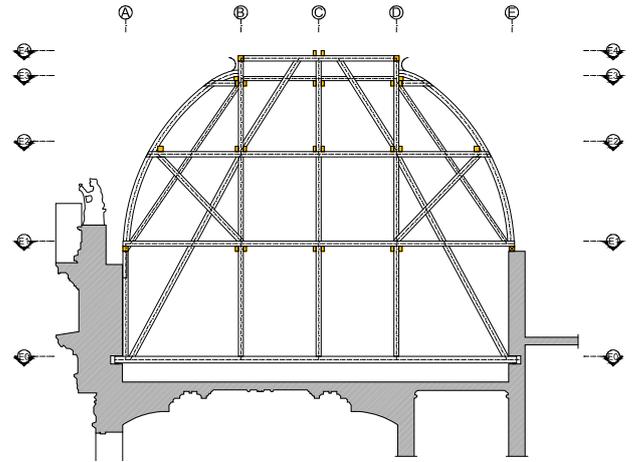


Abb. 5.52: Vollgespärre VG-2 (Blickrichtung Ost)

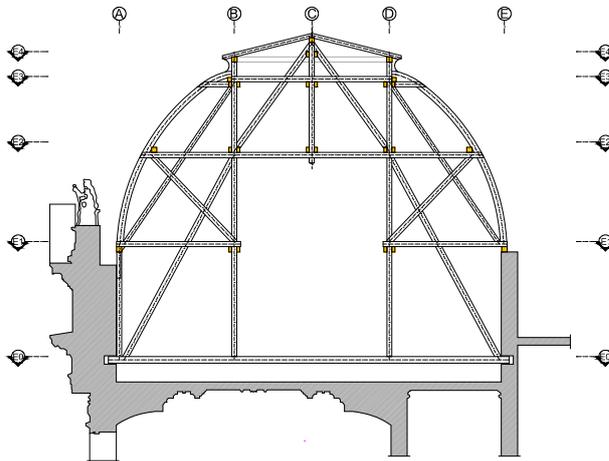


Abb. 5.53: Vollgespärre VG-3 (Blickrichtung Ost)

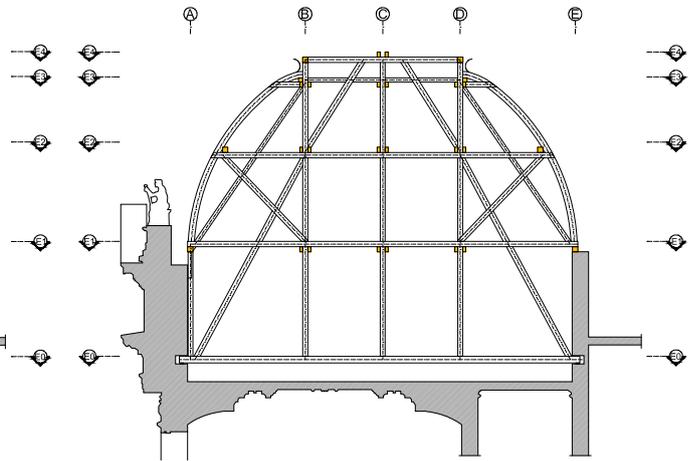


Abb. 5.54: Vollgespärre VG-4 (Blickrichtung Ost)

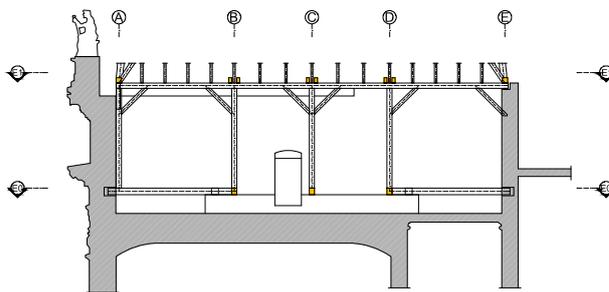
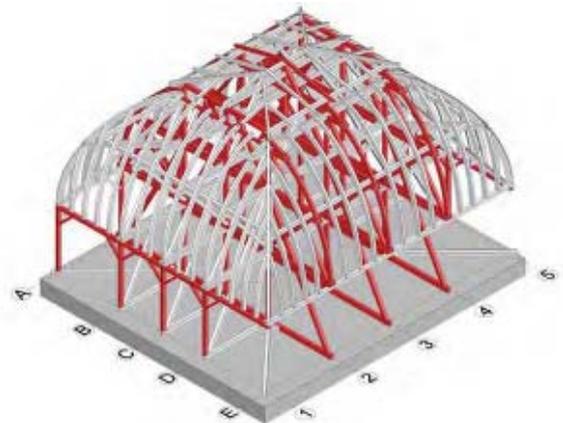


Abb. 5.55: Vollgespärre VG-5 (Blickrichtung Ost)



Regelschnitte der Hauptgespärre (Ost-West-Orientierung)

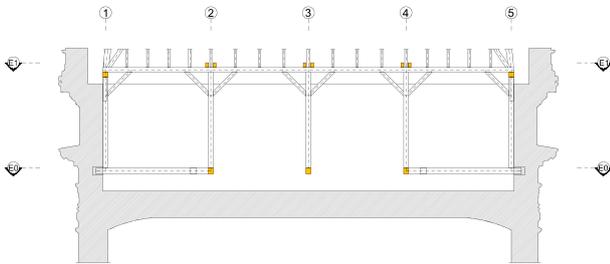


Abb. 5.56: Vollgespärre VG-A (Blickrichtung Nord)

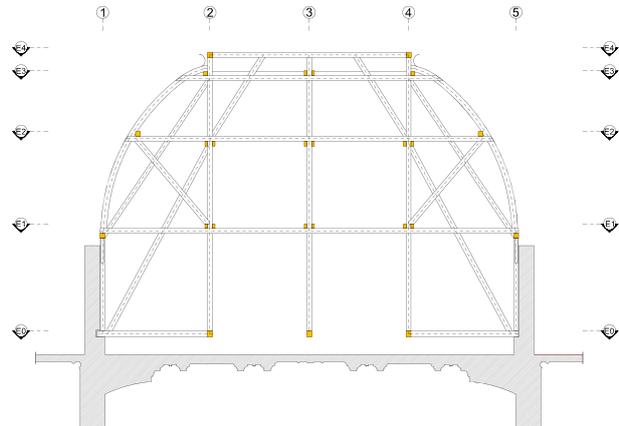


Abb. 5.57: Vollgespärre VG-B (Blickrichtung Nord)

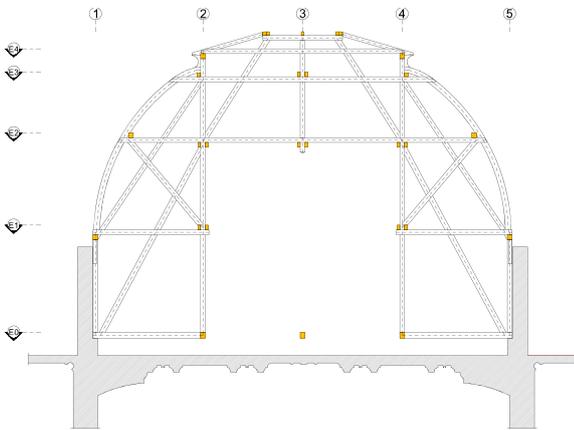


Abb. 5.58: Vollgespärre VG-C (Blickrichtung Nord)

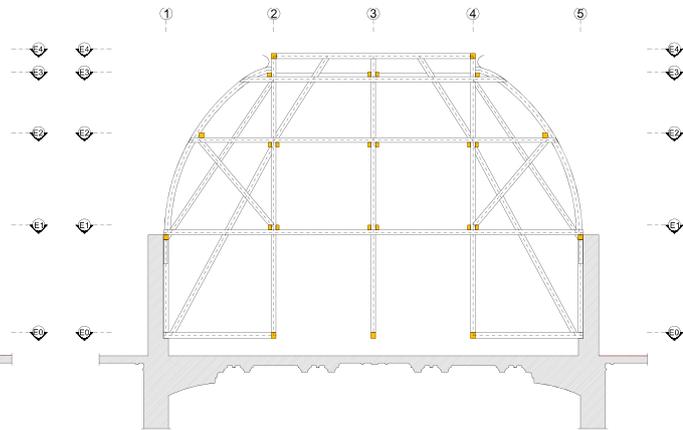


Abb. 5.59: Vollgespärre VG-D (Blickrichtung Nord)

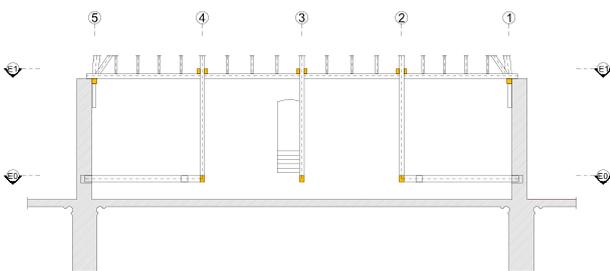
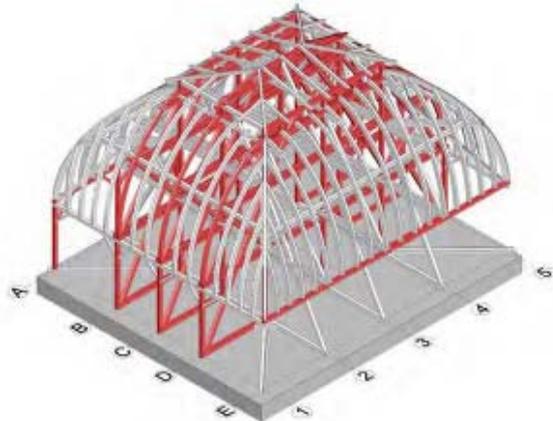


Abb. 5.60: Vollgespärre VG-E (Blickrichtung Süd)



Nachfolgend sollen anhand des Vollgespärres VG-3 die Querschnittsbezeichnungen angegeben werden.

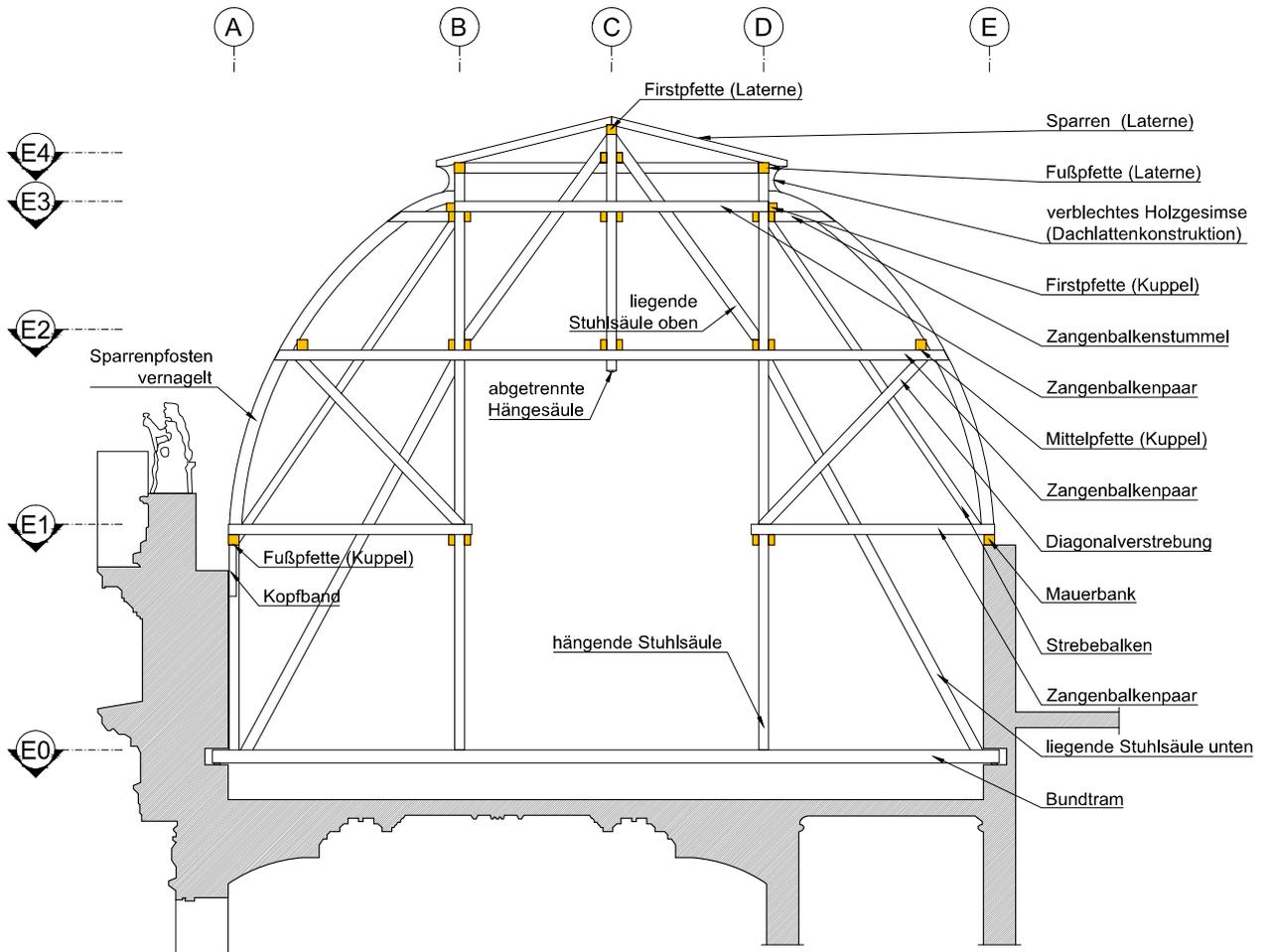


Abb. 5.61: Bauteilbezeichnungen anhand des Vollgespärres VG-3

Das Aufmaß der Holzquerschnitte der einzelnen Bauteile wurde stichprobenartig durchgeführt, wobei für jeden „Bauteiltyp“ mindestens vier Referenzmessungen an unterschiedlichen Lagen im Tragwerk vorgenommen wurden. Dabei wurde festgestellt, dass die Maßabweichungen zwischen gleichartigen Bauteilen eine, nach Meinung des Verfassers, vernachlässigbar kleine Streuung hinsichtlich der Kantenabmessungen (max. $\pm 1,5$ cm) aufweist. Der Aufwand, jedes Bauteil in der Gesamtstruktur einzeln zu erkunden steht damit in keiner Relation zum tatsächlichen Nutzen. Nahezu aller Bauteile sind vierseitig gesägt, gehackte Querschnitte konnten nicht aufgefunden werden. An dieser Stelle sei jedoch erwähnt, dass insbesondere bei sehr alten Dachtragwerken mit gehackten Querschnitten die Maßabweichungen ein nicht zu vernachlässigendes Ausmaß annehmen können (vgl. [38]). Für die später angestellte statische Systemberechnung der Konstruktion wurde aufgrund der geringen Unterschiede keine Differenzierung der Bauteile in den einzelnen Gespärren vorgenommen, sondern jeweils der aus den mindestens 4 Referenzmessungen gebildete Mittelwert stellvertretend für die Querschnittsgeometrie verwendet. Wohlwissend, dass die Lastabtragung hochgradig statisch-unbestimmter Systeme mitunter auch sehr stark von den Stabsteifigkeiten einzelner Tragglieder abhängt, bietet die Mittelwertbildung einen, mit vertretbarem Aufwand gangbaren Weg. Natürlich nimmt man damit auch kleine Unschärfen hinsichtlich der Schnittgrößermittlung in Kauf, diese sind jedoch im Vergleich zu falsch interpretierten Anschlusssteifigkeiten (=Steifigkeiten der Holz-Holz-Verbindungen) vernachlässigbar klein. Die in der nachfolgenden Tabelle angegebene Querschnittsabmessungen und -werte sind also stets als das arithmetische Mittel mehrerer Aufmäße zu verstehen.

Tab. 5.4: Querschnittsgeometrie der Tragwerksglieder

Bezeichnung	Breite	Höhe	Querschnittswerte						
			b	h	A	I_y	W_y	i_y	I_z
	[cm]	[cm]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm]
Bundtram	19 / 25		475	24740	990	7,22	14290	752	5,48
Wechselbundtram	18,5 / 25		462,5	24089	964	7,22	13191	713	5,34
Stuhlsäule	19 / 19		361	10860	572	5,48	10860	572	5,48
hängende Stuhlsäule	19 / 19		361	10860	572	5,48	10860	572	5,48
liegende Stuhlsäule unten	19 / 21		399	14663	698	6,06	12003	632	5,48
Kopfband	14 / 14		196	3201	229	4,04	3201	229	4,04
Mauerbank	20 / 20		400	13333	667	5,77	13333	667	5,77
Fußpfette (Kuppel)	20 / 20		400	13333	667	5,77	13333	667	5,77
Zangenbalkenpaar*	2x11,5 / 20		230	7667	383	5,77	2535	220	3,32
Zangenbalkenstummel*	2x11,5 / 20		230	7667	383	5,77	2535	220	3,32
Strebebalken	18 / 15,5		279	5586	360	4,47	7533	419	5,20
Mittelpfette (Kuppel)	20 / 20		400	13333	667	5,77	13333	667	5,77
Diagonalverstrebung*	2x11,5 / 20		230	7667	383	5,77	2535	220	3,32
Sparrenpfosten (Kuppel)	2x4,5 / 24		216	10368	432	6,93	1458	162	2,60
liegende Stuhlsäule oben	19 / 21		399	14663	698	6,06	12003	632	5,48
Firstpfette (Kuppel)	16 / 16		256	5461	341	4,62	5461	341	4,62
Fußpfette (Laterne)	20 / 20		400	13333	667	5,77	13333	667	5,77
Sparren (Laterne)	12 / 16		192	4096	256	4,62	2304	192	3,46
Firstpfette (Laterne)	19 / 19		361	10860	572	5,48	10860	572	5,48

* die angegebenen Querschnittswerte entsprechen dabei dem Einzelquerschnitt

mit:

AQuerschnittsfläche

I_yTrägheitsmoment um die horizontale Achse

W_yWiderstandsmoment um die horizontale Achse

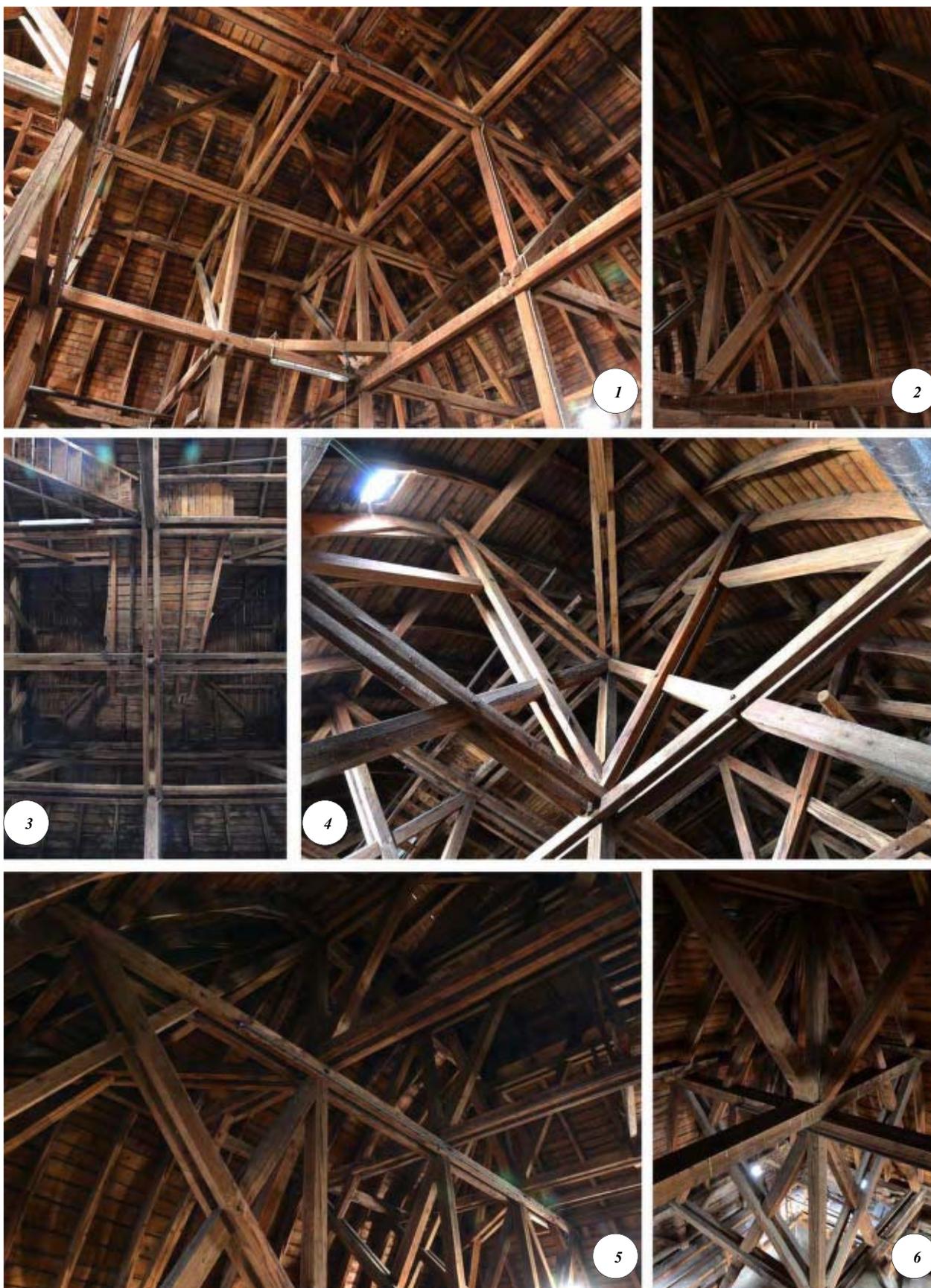
i_yTrägheitsradius in x-Richtung

I_zTrägheitsmoment um die vertikale Achse

W_zWiderstandsmoment um die vertikale Achse

i_zTrägheitsradius in y-Richtung

5-3.4.2 Fotografische Eindrücke des Tragsystems



- 1.....*Blickrichtung zum nordwestlichen Kuppelgrat*
- 2.....*Diagonalverstrebung bei Vollgespärre 2 (VG-2) zur nordseitigen Kuppeldachfläche*
- 3.....*Untersicht der zweiten Zangenlage (E2); deutlich erkennbar: Wartungstegkonstruktion*
- 4.....*Ausbildung der Diagonalverstrebung am südwestlichen Kuppelgrat*
- 5.....*Detailausschnitt Vollgespärre 4 (VG-4)*
- 6.....*Wechsel der liegenden Stuhlsäulen im Achsenschnitt 4-B*

Abb. 5.62: Fotografische Impressionen des Hauptkuppeltragwerks

5-3.4.3 Beschreibung des Tragsystems

Vor der textlichen Beschreibung des eigentlichen Kuppeltragsystems soll an dieser Stelle zum besseren Verständnis noch kurz ein Auszug aus MEISEL (vgl. [38]) zitiert werden, dessen Ausführungen zu den beiden Tragsystemen „Hängewerk“ und „Sprengwerk“ sicherlich auch für das vorliegende Tragsystem zutreffend formuliert sind:

[...]Ein Hängewerk ist im Prinzip ein liegender Stuhl mit zusätzlichen Hängesäulen. Asymmetrische Lasten werden nicht wie beim liegenden Stuhl über Rahmenwirkung, sondern über die Biegetragfähigkeit des Bundtrams abgetragen. Der Bundtram kann aufgrund seiner verringerten Gesamtstützweite auch Lasten aus schweren Unterdecken beziehungsweise aus der Dachraumnutzung aufnehmen. Im Gegensatz dazu wird beim Sprengwerk der für die gesamte Stützweite nicht tragfähige Balken durch ein unter ihm liegendes Tragwerk unterstützt. Die Strebendruckkräfte sind durch entsprechend ausgebildete Widerlager aufzunehmen. „Hängesprengwerke“ sind Stühle, welche sich aus der Kombination von Hänge- und Sprengwerken ergeben.

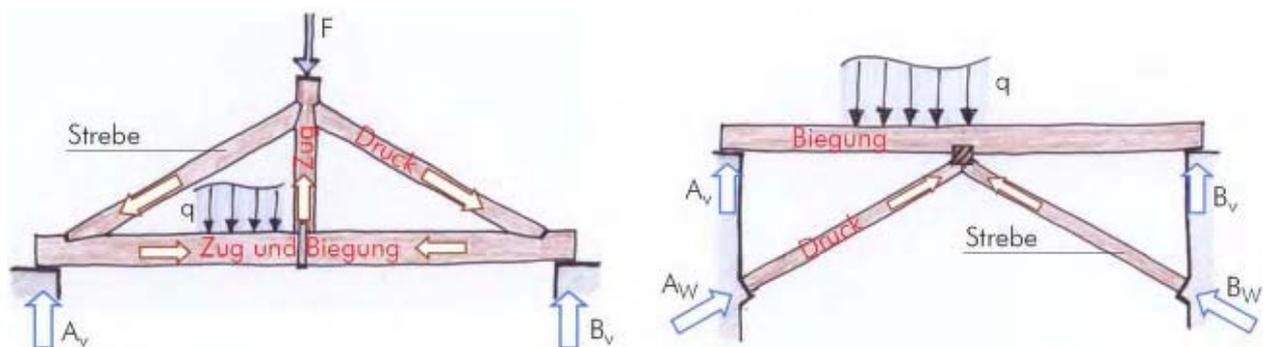


Abb. 5.63: links: Prinzip einfaches Hängewerk; rechts: Prinzip einfaches Sprengwerk [38]

Das sehr komplexe Tragsystem der Hauptkuppel kann am besten als räumliche, doppelte Hängewerkskonstruktion mit darüber angeordnetem „Sprengwerk“ beschrieben werden. Anders als bei einem klassischen Sprengwerk, dessen Streben ein eigenständiges, starres Widerlager aufweisen, wirkt der für das Hängewerk vorgesehene Druckgurt gleichzeitig wie ein Zugband für den wirkenden „Sprengwerkstrebenshub“. Damit werden die Druckkräfte im Druckriegel des Hängewerkes etwas reduziert. Die von Bundtramebene bis zur Laternenfußpfette durchlaufenden Hängesäulen haben damit praktisch eine Doppelfunktion. Einerseits wirken sie als Hängesäulen für das unterer doppelte Hängewerk, andererseits bilden sie gemeinsam mit den oberen liegenden Stuhlsäulen („Sprengwerkstreben“) die Stuhlwände des oberen Kuppeldachabschnittes (=Bereich über E2). Zusätzlich sind die durchlaufenden Hängestuhlsäulen durch Strebenhölzer zur südseitigen Mauerbank bzw. zu den Kuppelfußpfetten abgestrebt. Anders als bei klassischen Hängewerkskonstruktionen ist ein wesentliches Bauteil - der oben liegende Druckriegel - zweiteilig als Zangenbalkenlage ausgebildet (E2). Bedingt durch die räumliche Tragstruktur sind praktisch in allen Achsschnittpunkten übereinanderliegende, kreuzende Zangenbalken mittels Kammverbindungen und lagersichernden Bolzen an die Hängesäulen angeschlossen. Die Bundtramlage (E0) findet ihre Auflagerpunkte in ausgesparten Mauerwerksnischen beziehungsweise auf, bei den ost- und westseitigen Wänden, vorgemauerten Lagersockeln. Die Zangenbalkenlage (E1) lagert südseitig auf einer durchgehenden, voll aufliegenden Mauerbank auf (Achse E). An den anderen drei Seiten wurde die Konstruktion hinter die Außenmauern als stehender Stuhl auf die Bundträme aufgestellt und durch Kopfbänder ausgesteift. Auf diesen Stuhlsäulen lagert die Fußpfette der Kuppelsparren. Das besondere an der ersten Zangenbalkenlage (E1) ist, dass die Zangenhölzer nicht von Achse A bis Achse E beziehungsweise Achse 1 bis Achse 5 durchlaufen, sondern am ersten innenliegenden Achsenkreuzungspunkt abgetrennt sind. Erst die zweite Zangenbalkenlage (E2) läuft über die volle Tragwerksseitenlänge durch und wird in jedem Vollgespärre durch diagonal liegende Hölzer unterstützt. Diese, nach außen gerichteten, zangenförmigen Diagonalverstreben umfassen dabei sowohl die liegenden Stuhlsäulen des Hängewerkes als auch die Strebebalken der Hängestuhlsäulen und unterstützen so die auf der zweiten Zangenlage (E2) auflagernde Mittelpfette. Die Aussteifung und Unterstützung der Kuppelmittelpfette in den Gratbereichen erfolgt dabei in analoger Weise, wodurch sich

ein interessanter Verschnitt mehrerer Konstruktionshölzer in diesem Bereich ergibt (siehe Abb. 5.62. Nr. 4 und Nr.6). Im Übergangsbereich zwischen Hauptkuppel und aufgesetzter Laterne ist eine weitere Zangenlage (E3) angeordnet und nimmt die Firstpfettenlage der Kuppelsparren auf. Auf den bereits angesprochenen, über die gesamte Tragwerkshöhe reichenden Hängestuhlsäulen lagern die, von den liegenden Stuhlsäulen („Sprengwerkstreben“) in den Achsen B, D bzw. 2,4 zusätzlich gestützten, Fußpfetten der Laternenkonstruktion auf. Die Laterne selbst kann als sehr einfache, an der kürzeren Kuppelseite angewalmte Pfettendachkonstruktion bezeichnet werden. In der nachfolgenden 3D-Axonometrie werden die oben beschriebenen Tragstrukturen „doppeltes Hängewerk (rot)“, und „Sprengwerk“ (grün) farblich am Beispiel des Vollgespärres in Achse 3 (VG-3) hervorgehoben.³³

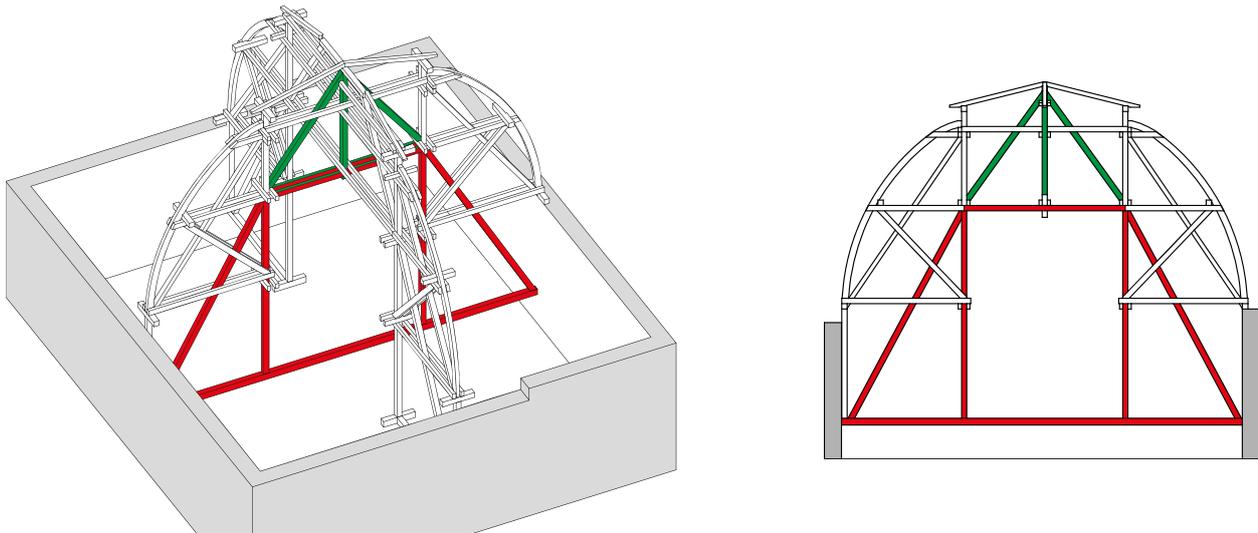


Abb. 5.64: Grundlegendes räumliches Tragsystem der Hauptkuppel bestehend aus doppelten Hängewerken und darüber angeordneten „Sprengwerken“

Durch die kreuzweise angeordneten Zangenbalkenlagen, gepaart mit den nach außen und innen verlaufenden, diagonal im Tragwerk liegenden Diagonalverstrebungen ist die Kuppelkonstruktion sehr gut in alle Tragwerksrichtungen ausgesteift. Aufgrund der steil angestellten Kuppelkrümmung bietet die Dachfläche eine nicht zu unterschätzende Windangriffsfläche. Die Windbelastung stellt neben dem Konstruktionseigengewicht und der Dachhaut den bemessungsbestimmenden Lastfall dar, zumal anfallende Schneelasten auf dem steilen Kuppeldach nicht zu liegen kommen werden. Im Rahmen einer zweiten Begehung der Kuppel am 08.10.2016, einem sehr windigen Tag, konnte man die Kraft des Windes selbst im Schutz des Dachtragwerkes noch erahnen, da die Konstruktion hörbar „arbeitete“. Die anfallenden Lasten, insbesondere die windinduzierten Lasten, werden über Biegung der Kuppelsparren und der Pfetten in die Tragkonstruktion eingeleitet und dort über die Diagonalstreben und Zangenbalken räumlich abgetragen. Der Lastabtrag erfolgt also überwiegend pfettendachartig und wird über die liegenden Stuhlsäulen des Hängewerks zu den Bundtramauflagern geführt und mittels der Bundträme „kurzgeschlossen“.

Beindruckend sind vor allem die langen, vollständig durchlaufenden Hängestuhlsäulen mit knapp 12 Metern Gesamtlänge, deren Aufrichtung mit den damaligen verfügbaren Hebewerkzeugen sicherlich eine große Herausforderung darstellte. Generell wird davon ausgegangen, dass die Errichtung „etappenweise“ von Zangenbalkenlage zu Zangenbalkenlage stattgefunden hat. Ähnlich wie in Abb. 5.18 dargestellt, wurden vermutlich auch hier die fertig hergestellten Zangenlagen mit Pfosten belegt, wodurch eine betretbare Arbeitsplattform entstand, um mit dem Aufrichten bis zur nächsten Zangenbalkenlage beginnen zu können.

³³ Die Darstellung zeigt nur die Vollgespärre VG-3 und VG-C. Alle anderen Voll- und Lehrgespärre sind zugunsten der Übersichtlichkeit ausgeblendet.

Um eine Vorstellung über die Komplexität des Tragwerks zu bekommen, lassen wir dieses in den nachfolgenden Illustrationen langsam, von der Bundtramebene beginnend, in die Höhe wachsen. Als Blickrichtung der Axonometrie die NO Richtung gewählt (=Ansicht Kuppelgrat SW). Das rechts daneben „mittwachsende“ Gespärre zeigt das Vollgespärre VG-3.

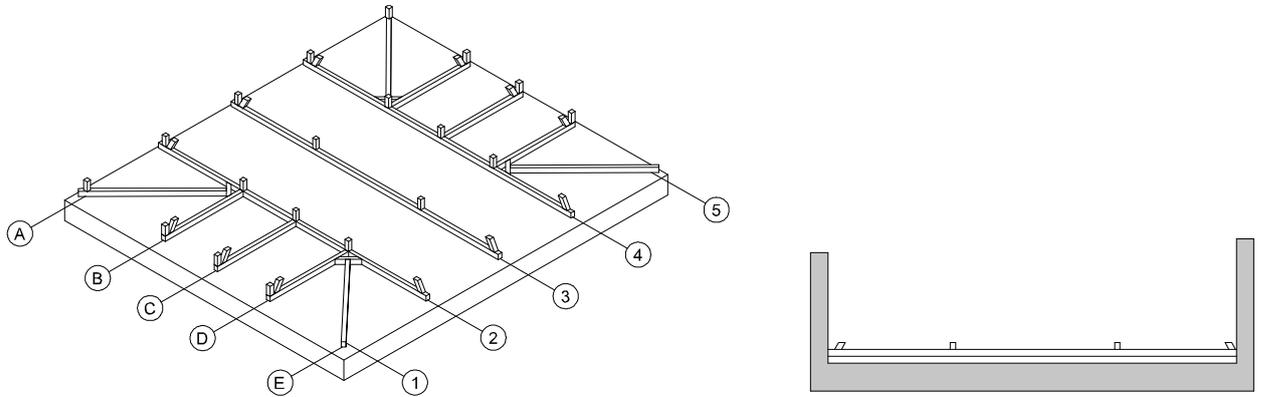


Abb. 5.65: Tragwerk bis zur Bundtramebene (E0)

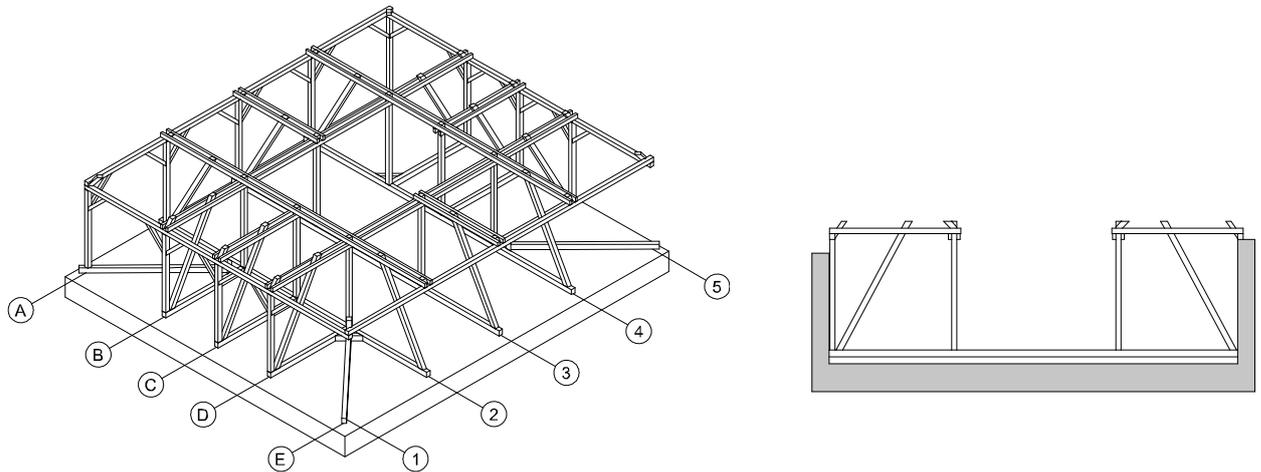


Abb. 5.66: Tragwerk bis zur ersten Zangenbalkenebene (E1)

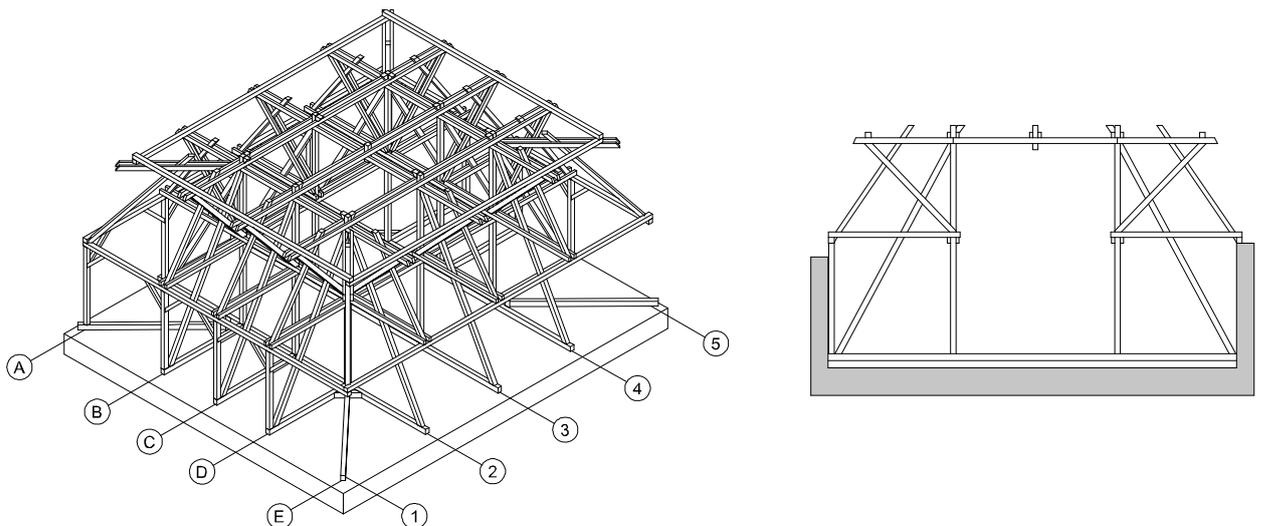


Abb. 5.67: Tragwerk bis zur zweiten Zangenbalkenebene (E2)

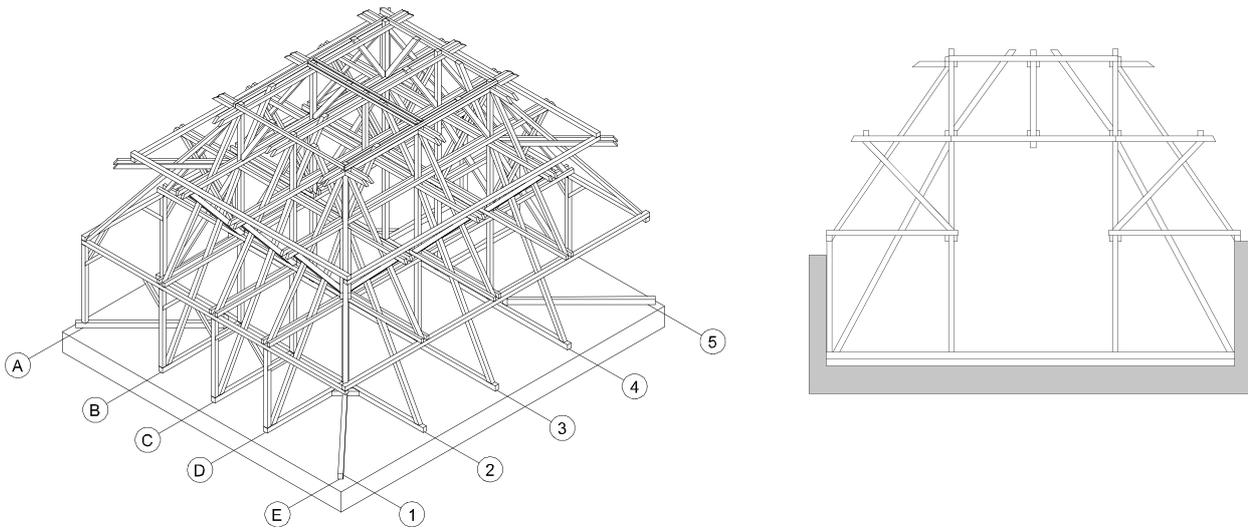


Abb. 5.68: *Tragwerk bis zur dritten Zangenbalkenebene (E3)*

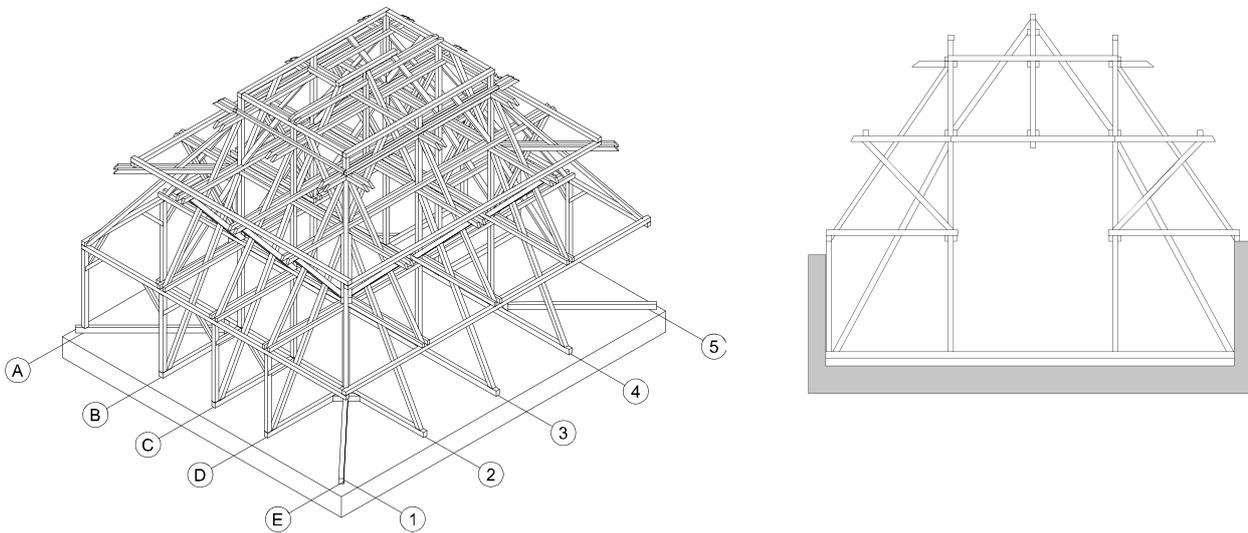


Abb. 5.69: *Tragwerk bis zur vierten Zangenbalkenebene (E4)*

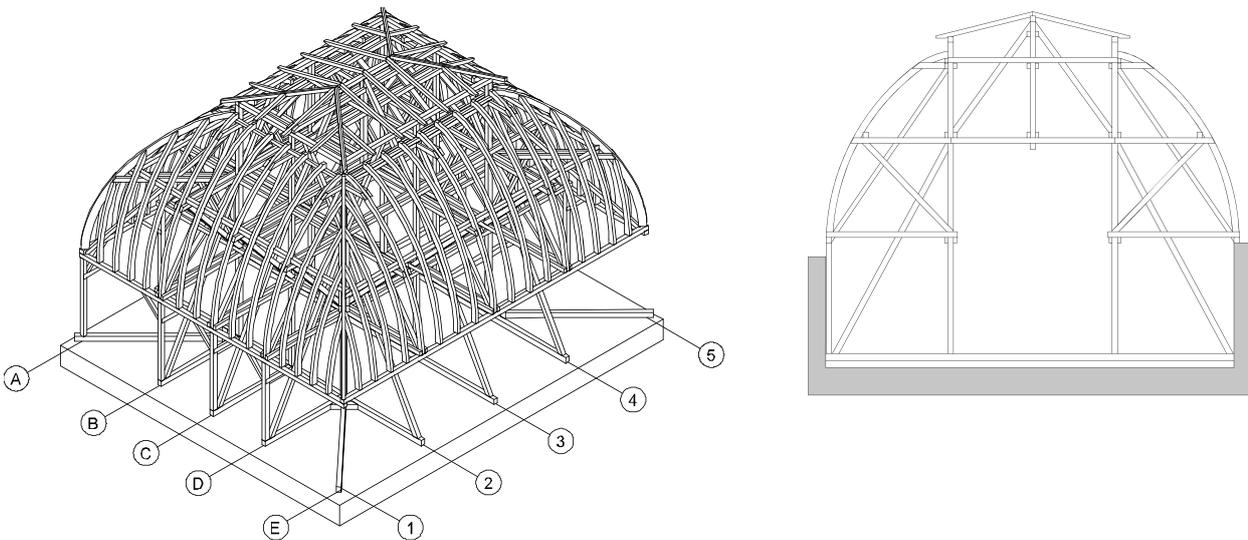


Abb. 5.70: *Fertiges Tragwerk mitsamt Sparrenlagen*

5-3.5 ZIMMERMANNSMÄSSIGE ANSCHLÜSSE

Wie bereits in Kapitel 5-3.3.5 vorweggenommen, kamen im Hinblick auf die Fügetechnik überwiegend alt bewehrte zimmermannsmäßige Holz-Holz-Verbindungen zur Anwendung. Anders als bei klassischen, historischen Holz-Holz-Verbindungen, deren stiftförmige „Sicherungsverbindungsmitel“ quasi immer in Form von Holznägeln³⁴ ausgebildet waren, erkennt man anhand der Fügetechnik im Kuppeltragwerk der „Alten Technik“ erste Tendenzen hin zum ingenieurmäßigen Holzbau. Etwa ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurden eiserne oder gar stählerne Verbindungsmittel kostengünstig und industriell produzierbar und lösten, vor allem bei größeren Dachtragwerken, die oftmals sehr aufwendig ausgearbeiteten zimmermannsmäßigen Verbindungen mehr und mehr ab. Da die Tragwerkskonstruktion nicht zuletzt wegen ihrer Spannweite und Bauhöhe definitiv in die Kategorie „größere Dachtragwerke“ einzustufen ist, setzten die Tragwerksplaner sogleich auf diese neu verfügbaren, eisernen Verbindungsmittel. Dem gewählten statischen Konzept des räumlichen Hängewerkes mit zangenförmig ausgebildeten Druckgurten kamen diese lagesichernden eisernen Verbindungsbolzen natürlich sehr entgegen, erlaubten sie doch ein Zusammenspannen der horizontalliegenden Zangenbalken mit den stehenden Hängestuhlsäulen. Natürlich wäre es übertrieben zu behaupten, es handle sich bei der anzutreffenden Fügetechnik mit nur einem mittig angeordneten Sicherungsbolzen um eine ingenieurmäßige Verbindung, wie wir sie heute kennen, jedoch im Hinblick auf das Baujahr der Kuppel (1887), wählten die Tragwerksplaner eine doch eher untypische, neuartige Form der Ausführungstechnik. Dennoch verließ man sich überwiegend auf „altbewehrte“ zimmermannsmäßige Methoden, um den Zusammenschluss der Konstruktionsglieder sicherzustellen.

5-3.5.1 Einleitung: zimmermannsmäßige Verbindungen

Bevor die einzelnen, in der Kuppel anzutreffenden Knotendetails im Einzelnen erläutert und grafisch dargestellt werden, soll einleitend eine kurze Übersicht über die Vielfältigkeit der zimmermannsmäßigen Verbindungstechnik gegeben werden.

Zimmermannsmäßige Verbindungen haben eine lange Tradition und wurden von den bauschaffenden Zimmermännern je nach Einsatzzweck ausgewählt und entwickelt. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein erheblicher Teil der zimmermannsmäßigen Fügetechnik bereits um 3000 v. Chr. bekannt war und sowohl im Schiffsbau als auch im Tragwerksbau genutzt wurde. Zimmermannsmäßige Verbindungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Verbindung mindestens nach einer Richtung beweglich und damit lösbar bleibt, nämlich in jene Richtung, in der das Zusammenfügen erfolgte. Somit sind zimmermannsmäßige Verbindungen stets lösbare Verbindungen, deren Konstruktionsteile durch die Bearbeitung im Knotenbereich jedoch mehr oder weniger geschwächt werden. „Reine“ zimmermannsmäßige Holz-Holz-Verbindungen sind daran zu erkennen, dass die zu verbindenden Teile handwerklich derart bearbeitet werden, dass ein Zusammenfügen der Holzbauteile und damit eine Kraftübertragung zwischen den Hölzern, ohne Verwendung holzfremder Materialien möglich wird. Mit diesen, nicht unerheblichen Querschnittsschwächungen geht häufig auch eine große Exzentrizität der Stabachsen der zu verbindenden Hölzer einher, die eine deutlich geringe Kraftübertragung im Vergleich zu ingenieurmäßigen Verbindungen zulassen. Die Passgenauigkeit, also die Herstellungsqualität der Holz-Holz-Verbindung spielt diesbezüglich ebenso eine entscheidende Rolle, erfolgt doch die Kraftübertragung zwischen zwei Konstruktionsgliedern überwiegend über Flächenpressung (vgl. [17]). Insbesondere bei kombinierten Verbindungen, wie beispielsweise einer Versatzverbindung mit mittig angeordneten, lagesichernden, Zapfen, können Herstellungsungenauigkeiten ungewollte Druckspannungen in Bereichen hervorrufen, die entgegen der eigentlichen Funktionsweise der Verbindung sind. In diesem genannten Beispiel würde sozusagen ein „zu langer“ Zapfen die gesamte Druckkraft über die im Verhältnis zur Versatzfläche viel kleinere Zapfenkopffläche in das liegende Holz einleiten. Quasi müsste erst ein Querdruckversagen im Bereich des Zapfens eintreten, sodass die eigentliche Versatzverbindung wirksam werden kann. Dieses Beispiel zeigt aber auch auf, dass derartige zimmermannsmäßige Verbindungen ein gewisses Maß an verbindungseigener „Redundanz“ innehaben - also das Vermögen, den Kraftfluss nach einem Teilversagen umzulenken. Nicht zuletzt wegen dieser

³⁴ In Deutschland ist beispielsweise auch der Begriff „Dollen“ für hölzerne Nägel gebräuchlich.

Eigenheiten sind die „Knotensteifigkeiten“ derartiger Verbindungen stark von deren geometrischer Ausbildung abhängig. Am Institut für Holzbau und Holztechnologie wurde dem Tragverhalten von Holz-Holz-Verbindungen ein eigener Forschungsschwerpunkt gewidmet. Im zugehörigen Forschungsbericht (vgl. [23]) sind sowohl Steifigkeitsansätze für die computergestützte Tragwerksberechnung als auch das Tragverhalten und die Tragfähigkeit einzelner zimmermannsmäßiger Verbindungen angeführt. Für die in Kapitel 6 angestellte Systemberechnung wurden die in diesem Forschungsbericht empfohlenen Ansätze bestmöglich auf das vorliegende Kuppeltragwerk angewendet.

Traditionelle Holzverbindungen sind optisch schön anzusehen und zeigen bei fachgerechter Herstellung den Kräfteverlauf der Konstruktion. Durch moderne Abbundanlagen können sie heute passgenau hergestellt werden und bieten vor allem beim Aufrichten des Dachtragwerkes durch teils selbstsichernde Funktionsweise Vorteile. WARTH (vgl. [24]) unterscheidet in seinem bereits älteren, jedoch nicht minder empfehlenswerten Buch die zimmermannsmäßigen Verbindungsmittel hinsichtlich deren Verwendung folgendermaßen:

- 1.) *Verbindungen zur Verlängerung der Hölzer*
- 2.) *Verbindungen zur Verschränkung und Versteifung der Hölzer*
- 3.) *Verbindungen zur Richtungsänderung der Hölzer*
- 4.) *Verbindungen zur Verknüpfung der Hölzer in gleicher Ebene*
- 5.) *Verbindungen zur Verknüpfung der Hölzer in unterschiedlicher Ebene*

ad 1)

Längsverbindungen stellen die einfachste Art der Holzverbindung dar und dienen der Verlängerung der Hölzer. Die Hölzer werden dabei stumpf gestoßen oder durch verschiedene, schräg angeordnete Schnitttechniken gegen seitliches Ausweichen gesichert. Zusätzlich werden stiftförmige Verbindungsmittel in Form von Holznägeln zur Lagesicherung verwendet.

ad 2.)

Aus dieser von WARTH gewählten Formulierung erschließt sich nicht sofort, welche Verbindungstypen damit gemeint sind. Nach längerem Studium der Literatur erkennt man aber bald, das WARTH unter diesen Verbindungstypen Versatzverbindungen und Zapfenverbindungen versteht.

Zapfenverbindungen zählen zu den ältesten und häufigsten zimmermannsmäßigen Verbindungstypen. Sie werden hauptsächlich für die Verbindung von senkrechten zu waagrechten Hölzern verwendet. Schräge Zapfenverbindungen, wie sie teilweise bei Kopfbandanschlüssen verwendet werden, sind eher die Ausnahme, zumal die Druckkraftübertragung mittels Versatzverbindungen oder Anblattungen besser gewährleistet werden kann. Zapfenverbindungen werden heute ausschließlich zur Lagesicherung und zur Übertragung von Druckkräften verwendet. Werden Zapfenverbindungen in frei bewitterten Bereichen verwendet, ist auf die Wassersackbildung im Zapfenloch konstruktiv Rücksicht zu nehmen (z. B.: Lochbohrung im Zapfenloch). Während historische Zapfenlöcher mühevoll aus dem Schwellenholz herausgestemmt wurden, werden diese heute mit gängigen Zapfenlochkettsägen geschnitten. Um eine Druckkraftübertragung über den Zapfenkopf zu vermeiden, wird das Zapfenloch tiefer ausgearbeitet (=Zapfenluft). Weiters werden die Flanken der Zapfenstirnfläche schräg zurückgeschnitten, um den Montageablauf zu erleichtern. Häufigstes Einsatzgebiet für Zapfenverbindungen sind die Verbindungsknoten Bundtram/Schwelle/Pfette zur Stuhlsäule.

Versätze dienen der Übertragung von Druckkräften bei schräg angeschlossenen Konstruktionselementen wie Streben, Kopfbändern und liegenden Stuhlsäulen. Je nach Ausführung des Versatzes kann er bis zu einem Strebenneigungswinkel von 25° sinnvoll eingesetzt werden. Unabhängig von der Form des Versatzes wird eine Druckkraftübertragung über die Hirnholzfläche des abgestrebten Konstruktionselementes in die faserparallele Richtung des liegenden/stehenden Holzes angestrebt. Vor allem die geometrischen Einflussparameter wie Anschlusswinkel, Versatzeinschnitttiefe und die verbleibende Vorholzlänge des liegenden/stehenden Holzes sind entscheidend für die Tragfähigkeit der

Versatzverbindung. Werden Versätze mit Zapfenverbindungen kombiniert, spricht man gegebenenfalls auch von zapfenförmigen Versätzen. Diese eingezapften Versätze haben jedoch nur konstruktive Aufgaben und deren Kontaktfläche sollte bei der Ermittlung der Auflagerfläche entsprechend rechnerisch unberücksichtigt werden („Zapfenluft“)

ad 3.)

Wenn zwei Tragwerkselemente waagrecht um eine Ecke geführt werden sollen (beispielsweise die Mauerbank beim Walmdach), werden Eckverbindungen aus den Hölzern ausgearbeitet. Eckverbindungen ermöglichen die Verbindung von Hölzern in gleicher Höhenlage. Eckverbindungen werden auch in stehender Position eingesetzt. Häufigste Anwendung finden sie dabei beim Firststoß der Sparren. Das Tragverhalten auf Zug kann bei allen Eckverbindungen durch den Einsatz von stiftförmigen Verbindungsmitteln oder durch Leimeinsatz verbessert werden. Durch zusätzliche Auflast am Eckblatt, zum Beispiel durch eine aufstehende Stuhlsäule, werden Reibungskräfte zwischen den Hölzern aktiviert. Liegen Eckblätter nicht auf einer Unterkonstruktion auf, so ist auf deren richtigen Einbau zu achten. Wie beim Gerberstoß muss dabei das untere Eckblatt auf das obere Eckblatt mittels Schraubenbolzen „aufgehängt“ werden, um ein Aufspalten am Stirneinschnitt zu vermeiden.

ad 4.)

Diese Verbindungen kommen immer dann zur Anwendung, wenn sich 2 Hölzer in gleicher Ebene bleibend schneiden. Von Einblattungen spricht man, wenn eines der beiden Hölzer durchläuft, und das andere in dieses einmündet. Bei den sogenannten Überblattungen laufen beide Hölzer in gleicher Ebene durch. Aufgrund der teils großen Querschnittschwächungen können Querkräfte nur bedingt übertragen werden. Durch moderne Verbindungsmittel wie Nagelplatten und eingeschlitzten Konstruktionsblechen, die ein stumpfes, bearbeitungsloses Verbinden der Hölzer ermöglichen, verlieren diese Verbindungen mehr und mehr an Bedeutung.

ad 5.)

Verkämmungen bezwecken, zwei sich kreuzende Hölzer, deren Oberkante nicht auf selber Höhe liegt, unverschieblich miteinander zu verknüpfen. Im Kreuzungspunkt der Hölzer werden beide Hölzer eingeschnitten, sodass diese ineinander greifen. Verkämmungen dienen der Stabilisierung des Tragwerkes und zeigen vor allem während der Tragwerksmontage durch ihre „selbstsichernden“ Eigenschaften große Vorteile. Werden Verkämmungen auf Zug oder auf Druck beansprucht, entstehen je nach Kammtiefe Spannungen, die zum Abscheren der Holzfasern führen können. Da die Längsachsen der verbundenen Hölzer nicht in einer Ebene liegen, entstehen zufolge Exzentrizität Versatzmomente, die zur Zerstörung von Kammverbindungen mit unzureichendem Einschnitt führen können. Verkämmungen werden nach wie vor eingesetzt, allerdings aufgrund ihrer teils aufwendigen Herstellung durch Systemverbinder und Lochbandkonstruktionen, die ein stumpfes Übereinanderlegen ermöglichen, verdrängt. Je nach Einsatzgebiet werden Verkämmungen unterschieden in:

- Vollverkämmung – beide Konstruktionshölzer laufen durch
- Endverkämmung – eines der beiden Konstruktionshölzer endet
- Eckverkämmung – beide Konstruktionshölzer enden.

Diese von WARTH gewählte, sehr allgemein formulierte Gruppierung der unterschiedlichen Verbindungsformen wird von MEISEL und ORTNER (vgl. [38; 41]) konkretisiert und in ihren Masterarbeiten sehr eingehend behandelt. Daher sollen an dieser Stelle die allgemeinen Ausführungen zu den zimmermannsmäßigen Holz-Holz-Verbindungen beendet werden, ohne die einzelnen historischen Verbindungstypen im Detail zu diskutieren. Diesbezüglich wird auf die einschlägige Literatur, auf die oben genannten Masterarbeiten beziehungsweise die Forschungsarbeit „Holz-Holz-Verbindungen“ (vgl. [23]) verwiesen, die sich der sehr weitreichenden Formenvielfalt und deren Bearbeitung sehr gut annehmen. Abschließend soll in Anlehnung an MEISEL ein kompakter Überblick über die Grundtypen der zimmermannsmäßigen Verbindungen angeführt und deren typische Lage innerhalb eines Tragwerks angezeigt werden.

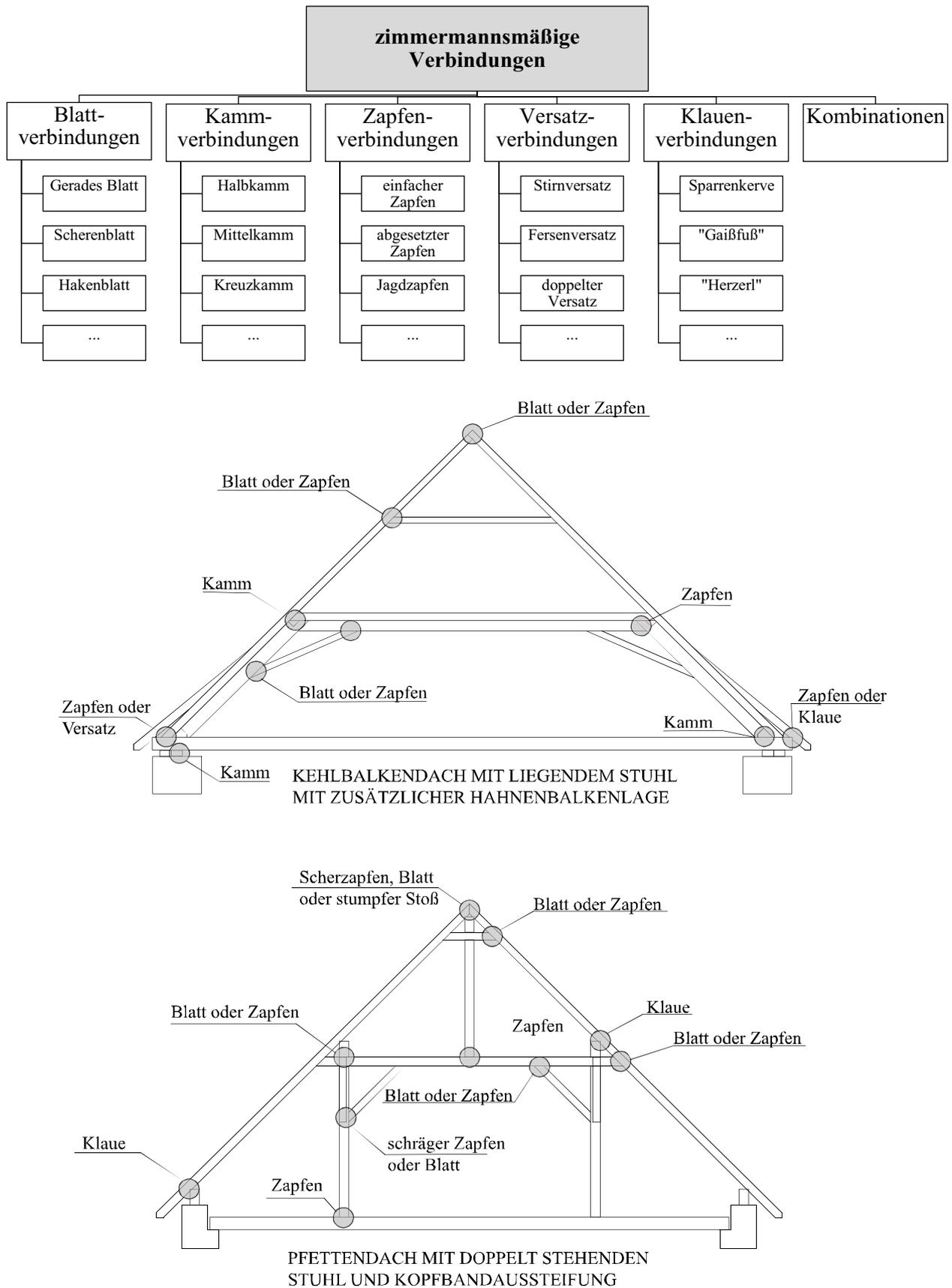


Abb. 5.71: Übersicht der zimmermannsmäßigen Verbindungen und deren typische Lage im Tragwerk [38; 41]

5-3.5.2 Anschlussknoten der Hauptkuppel

Nachfolgend sollen die Verbindungsknoten des Hauptkuppeltragwerkes vorgestellt werden. Der Aufnahme der Knotenverbindungen wurde bereits beim Aufmaß besondere Aufmerksamkeit geschenkt, sodass sämtliche, in der Hauptkuppel vorkommenden Holzanschnitts-, Zapfen- und Versatzabmessungen bestmöglich in Form von Anschlussdetailblättern dokumentiert werden können. Im Rahmen mehrerer Begehungen wurden 18 unterschiedliche Anschlussausprägungen vorgefunden. Diese doch beträchtliche Anzahl an unterschiedlichen Details kann als Indikator dafür verstanden werden, dass es sich bei diesem Kuppelbau um eine sehr komplexe Tragstruktur handelt. Insbesondere an den Kuppelgraten stößt eine Vielzahl an Trag- und Aussteifungskonstruktionsgliedern aufeinander, die mit interessanten Holzanschnitten konstruktiv ausgebildet wurden. Die Detailblätter mitsamt den Maßangaben und Bezeichnungen des Verbindungstyps und der zu fügenden Bauteile sind im ANHANG C beigelegt.

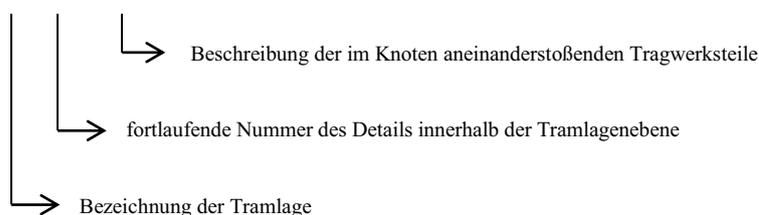
Vorweg kann attestiert werden, dass die zimmermannsmäßige Ausführung der Verbindungsknoten höchst präzise und gewissenhaft ausgeführt wurde. Im gesamten Tragwerk konnten keine Bereiche vorgefunden werden, an denen die Verbindungen markante Verschiebungen, Klaffungen, geschweige denn bedenkliche Schäden aufweisen. Demzufolge war auch die Feststellung der im Inneren der Anschlussknoten verborgenen Details, wie beispielsweise die exakte Schnittführung der häufig anzutreffenden Kreuzkamm-Verbindungen an den Zwischenhölzern der Zangenbalken oder die genaue Zapfengeometrie an den Stuhlsäulen nicht immer möglich. Überall dort, wo geringfügige Klaffungen der Verbindungen dies zuließen, wurde direkt mit dem Zollstock Maß genommen. An ausgewählten anderen, nicht direkt messbaren Anschlüssen, wurde die Verbindungsgeometrie indirekt mit einer Bohrwidstandsmessung ermittelt. Dies ist eine sehr praktikable Methode, um verborgene Zapfenverbindungen und deren Lochspieltiefe zu ermitteln, da sich diese Verbindungsgeometrie sehr deutlich anhand des im Bohrwidstandsgerät geführten Messstreifens ablesen lassen.

Die Qualität und die Beschaffenheit der Verbindungsknoten sind für die Tragfähigkeit älterer hölzerner Dachtragwerke entscheidend. Oftmals sind die Querschnitte historischer Holzkonstruktionen überdimensioniert und würden höhere Traglasten erlauben. Somit stellen die Anschlussbereiche sozusagen häufig das schwächste Glied in der Lastabtragungskette dar und sind damit der tragfähigkeitsbestimmende Faktor. Ebenso sind eine exakte Erfassung der Anschlusskonzentrität und Knotensteifigkeiten entscheidend für die spätere statische Analyse am computergestützten Berechnungsmodell.

Um die Knotenpunkte im Tragwerk auffinden zu können, wurde zusätzlich zur Namensgebung des Details - diese spiegelt im Wesentlichen die miteinander verbundenen Hölzer wider - auch eine Angabe der jeweiligen „Tramlage“ sowie eine geschoßweise fortlaufende Detailnummerierung gewählt.

Beispiel einer Detailkennzeichnung:

E0-D01: Anschluss Mauerwerk-Bundtram-Stuhlsäulen



Auf den nachfolgenden Seiten werden die Anschlussdetails in Form von Explosionszeichnungen und direkt im Tragwerk aufgenommenen Detailfotos dargestellt. Hinsichtlich der Bezeichnungen der einzelnen Verbindungen innerhalb eines Knotenanschlusses sowie auf die Bauteilbezeichnungen und die bemaßte Anschlussgeometrie sei auf die Detailaufmaßblätter in ANHANG C verwiesen.

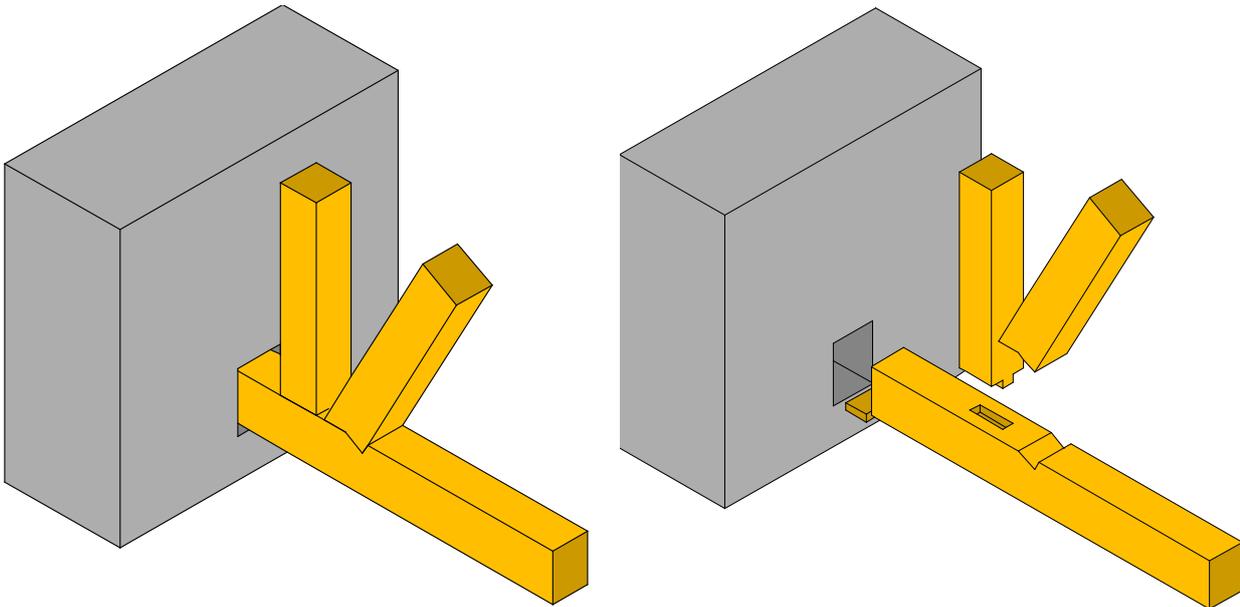
E0-D01: Anschluss Mauerwerk-Bundtram-Stuhlsäulen


Abb. 5.72: Anschlussknoten E0-D01

Diese Auflagerausbildung der Bundträme wurde an allen, in Nord-Süd-Richtung orientierten Vollgespärren ausgeführt. Die Bundträme lagern auf einer Holzunterlage in einer etwa 35 bis 45 cm tiefen Mauerwerksnische auf. Wie in der fotografischen Aufnahme ersichtlich, wurde der Wandputz in vielen Fällen bis an den Bundtram herangezogen, wodurch die Beschau der Tramköpfe nicht immer möglich war. Dieses umlaufende „Verspachteln“ der Träme ist nicht unbedingt ideal, wird doch eine Luftumspülung und damit eine Trocknung der Tramköpfe erschwert. Die Stuhlsäule ist mittels geraden Zapfen gegen Verdrehen und Verschiebung zur Bundtramlage gesichert. Die liegende Stuhlsäule ist mit einem klassischen Fersenversatz an den liegenden Tram angeschlossen.

E0-D02: Anschluss Bundtrankreuzung

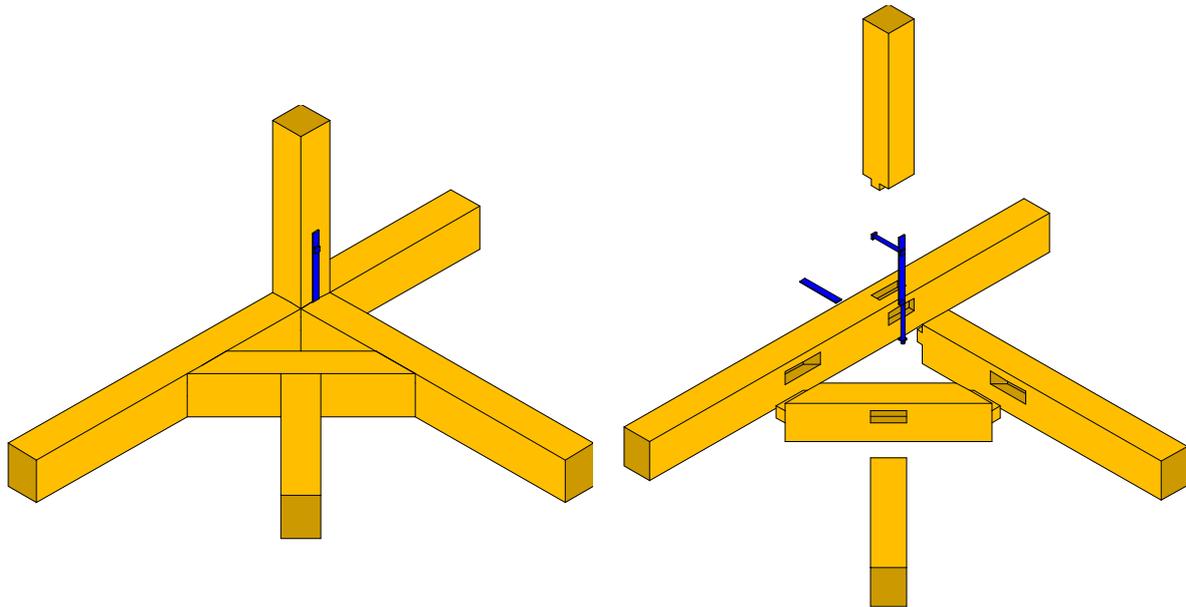
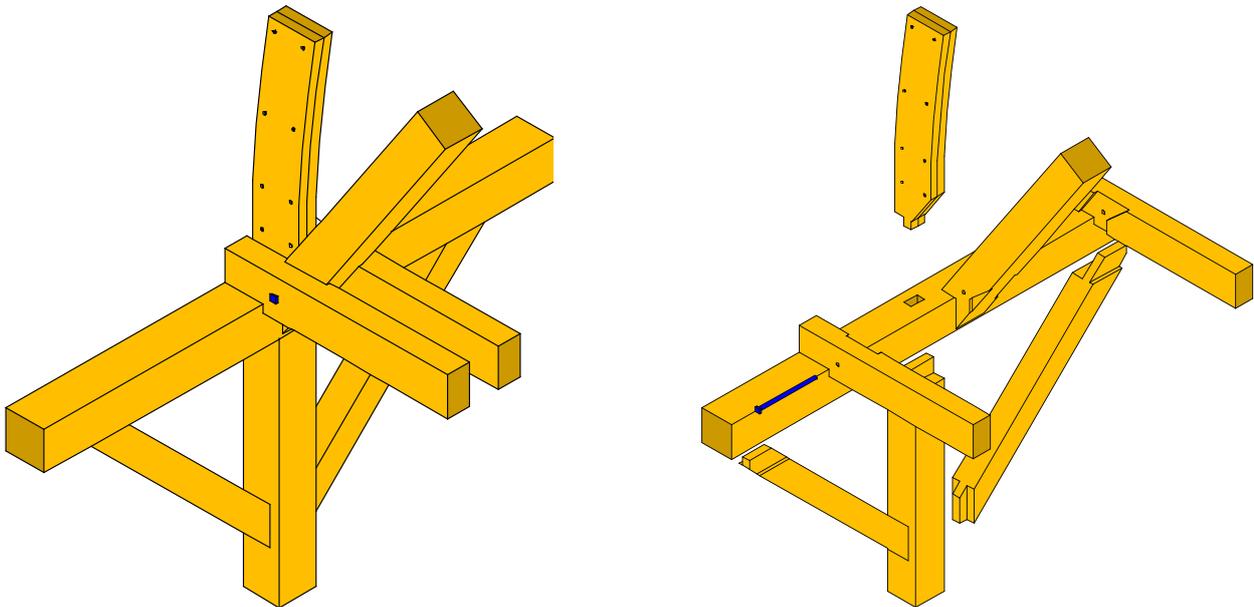


Abb. 5.73: Anschlussknoten E0-D02

Die Nord-Süd-Gespärre laufen in ihrer vollen Bundtramlänge durch. Bedingt durch die ebene Bundtramlage mussten die Bundträme in Ost-West-Richtung abgetrennt und in die Hauptträme eingezapft werden. Durch diese verzapfte Ausführung wird die Zugbandfunktion dieser, auch als Stichträme bezeichneten, abgetrennten Bundträme allerdings gestört, können doch über die Zapfenverbindungen keine Zugkräfte übertragen werden. Bedingt durch die Verzapfung der Stuhlsäule in den Haupttram war die Ausführung einer zugtragfähigen Blattverbindung (z. B.: Schwalbenschwanzblatt) bei diesem Anschluss allerdings nicht möglich. Der Haupttram selbst ist mit einer Eisenschließe an die Hängesäule hochgehängt. Die Bundtramebene erhält durch den diagonal eingebauten Wechseltram, der mit beiden Bundtramlagen mit einem Kopfbandzapfen verbunden ist, eine zusätzliche Aussteifung.

E1-D01: Anschluss Fußfette-Sparren-Strebebalken-Zangenbalken


Da die Kuppelkonstruktion an der Kuppelnordseite kein Mauerwerksauflager (Mauerbank) findet, wurde in diesem Bereich eine kopfbandgestützte Fußfette ausgebildet. Alle Kopfbänder sind als zentrische Zapfenverbindungen ausgeführt, jedoch etwas ausmittig, nämlich mit der Außenkante bündig, an die Stuhlsäulen und Fußpfetten angeschlossen. Der Strebebalken lagert mit einer einfachen Aufklauung auf der Fußfette auf. Diesem Klauenanschnitt sollte allerdings nur wenig Tragfähigkeit zugesprochen werden, da die Klauenlagerfläche bedingt durch den schräg an die Strebenneigung angeschnittenen, verzapften Sparren äußerst kurz ausgefallen ist. Diese Verbindung ist also tatsächlich als sehr einfach gehaltene Scher-Lochleibungsverbindung mit dem mittig liegenden Sicherungsbolzen zu verstehen. Am Abstand der Klauenferse zur Fußfette erkennt man auch im Foto, dass die Lasten nicht über Klaue, sondern überwiegend durch Pressung an die kreuzkammähnlich bearbeiteten Zangenanschnitte, über Bolzenscherkraft und Lochleibung übertragen werden. Die aus Pfo­stensegmenten vernagelten Kuppelsparren sind auch in den Leergespärren mit der Fußfette verzapft und somit trotz fehlenden Zangenbalken gegen Verschiebung gesichert.

Abb. 5.74: Anschlussknoten E1-D01

E1-D02: Anschluss Fußfette-Sparren-Strebebalken-Zangenbalken bei Kuppelgrat

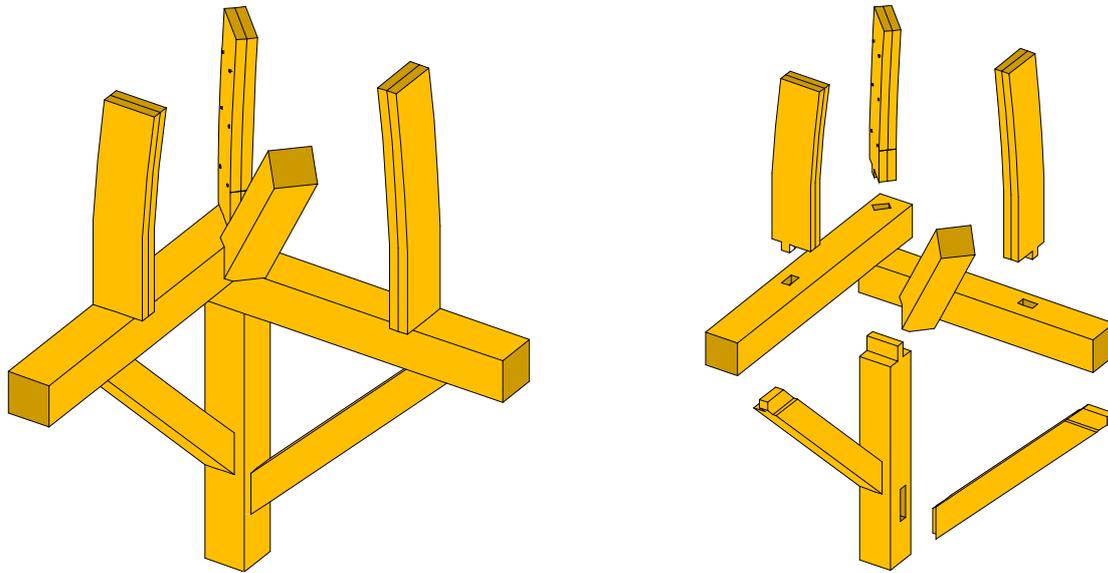


Abb. 5.75: Anschlussknoten E1-D02

Die bereits im vorangegangenen Detail E1-D01 diskutierte, geometrisch bedingte Problematik hinsichtlich des Klauenanschlusses des Strebebalken an die Fußfette wird im Bereich des Kuppelgrates wahrlich zur Herausforderung. Die Fußfetten liegen nämlich nicht in einer Ebene, sondern sind im Eckbereich stumpf übereinanderliegend ausgebildet. Auch hier wurde der im Grundriss winkelhälfierend angeordnete Gratsparren in die Fußfette eingezapft und raubt der Strebebalkenaufklauung zusätzlich Platz. Außerdem wurden in dieser ersten Tramlage (E1) keine zum Dachtraufeneck geführten Zangenbalken ausgeführt, die den Strebebalkenfuß in seiner Lage sichern würden. Tatsächlich lagert der Strebebalken stumpf, durch den exakt geführten „Negativanschnitt“ auf beiden Fußfetten auf.

E1-D03: Anschluss Mauerbank-Sparren-Strebebalken-Zangenbalken

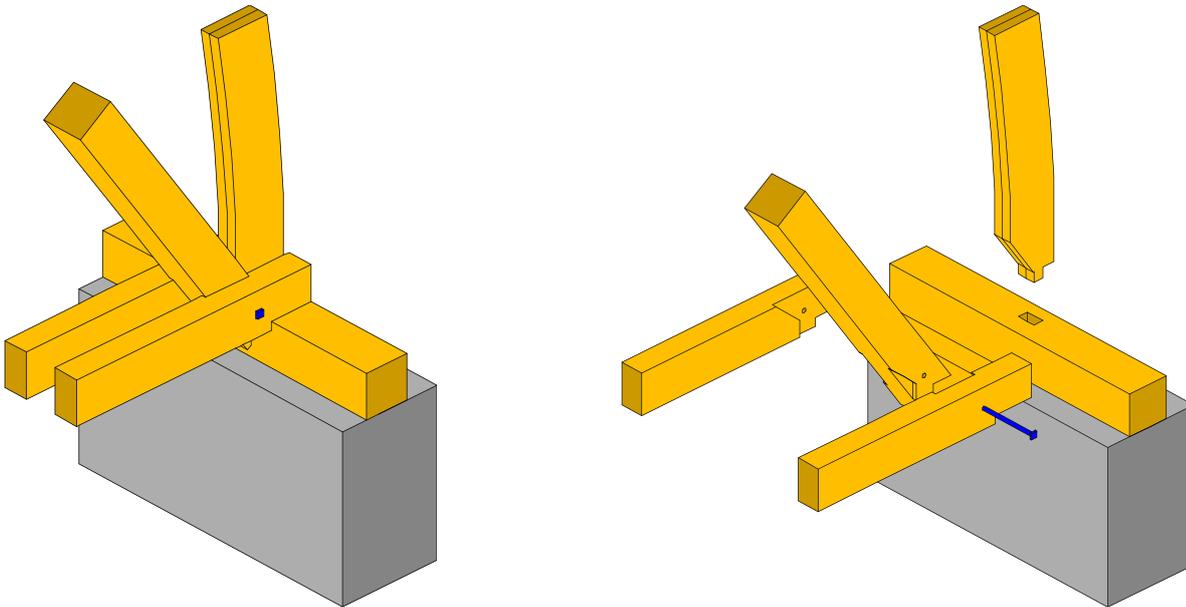


Abb. 5.76: Anschlussknoten E1-D03

An der Kuppelsüdseite (Achse E) wurde, anders als an den übrigen drei Seiten, keine, den Außenwänden vorgesetzte Stuhlwand zur Aufnahme der Fußfette hergestellt, sondern ein direktes Mauerbankauflager für die Kuppelsparren geschaffen. Auch hier wurden die Sparrenfußpunkte allesamt mit dem liegenden Mauerbankholz verzapft. Ansonsten ist dieser Anschlussknoten in Bezug auf die Verknüpfung des Strebebalkens mit den Zangenhölzern in analoger Weise zum Anschlussdetail E1-D01 ausgeführt.

E1-D04: Anschluss Stuhlsäule-Zangen-Diagonalverstrebung-Strebebalken (Gespärre Nord-Süd)

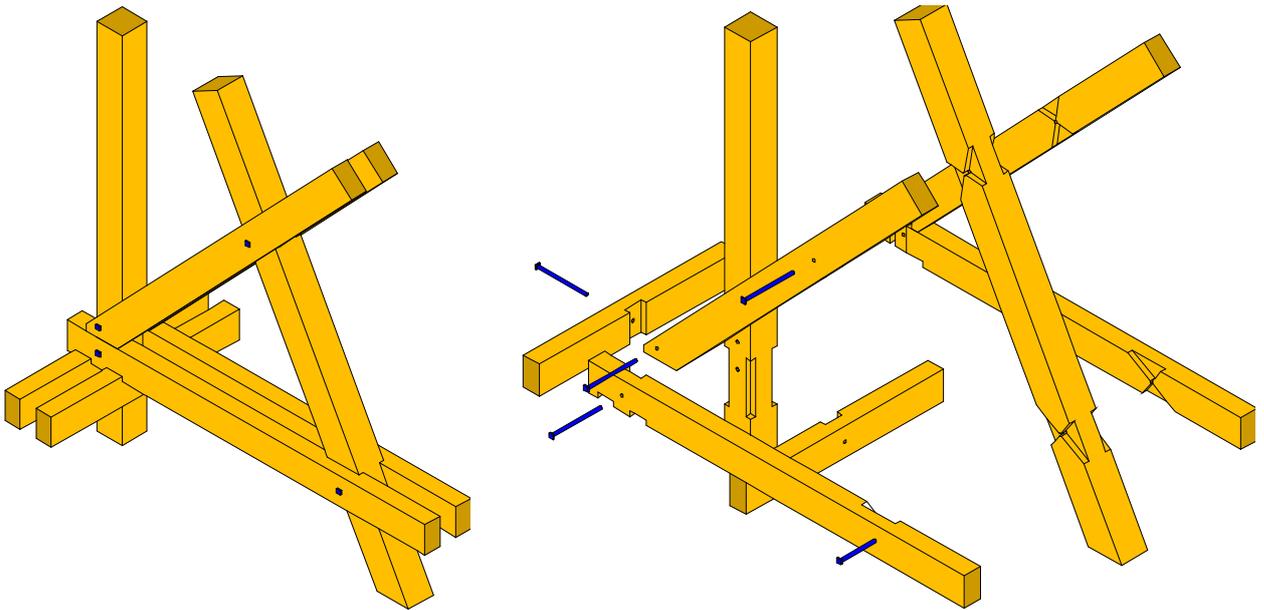


Abb. 5.77: Anschlussknoten E1-D04

Ein interessanter Anschluss ergibt sich im Kreuzungsbereich der als Zangen ausgebildeten und zur Kuppelmittelfette geführten Diagonalverstrebung mit der liegenden Stuhlsäule des Hängewerkes. Die Zangenbalken wurden allesamt mit einem Kreuzkamm an die mittig liegende, geneigte Stuhlsäule angeschlossen und mit einem mittig sitzenden Durchsteckbolzen gesichert. Durch diese Art der Ausführung ergeben sich mehrere geschlossene Dreiecke, deren Spitzen durch die Kreuzkammeinschnitte sogar geringe Drehmomente über die kammformbedingte Holzstirmpressung übertragen können. Diese Anschlüsse können damit als sehr steif angesehen werden. Der Kreuzungsbereich der Zangenhölzer bei der Hängesäule wurde mit zweierlei Mittelkämmen ausgeführt, sodass sowohl die Zangen selbst ineinander greifen, als auch die Hängesäule von den Zangenanschnitten umschlossen wird.

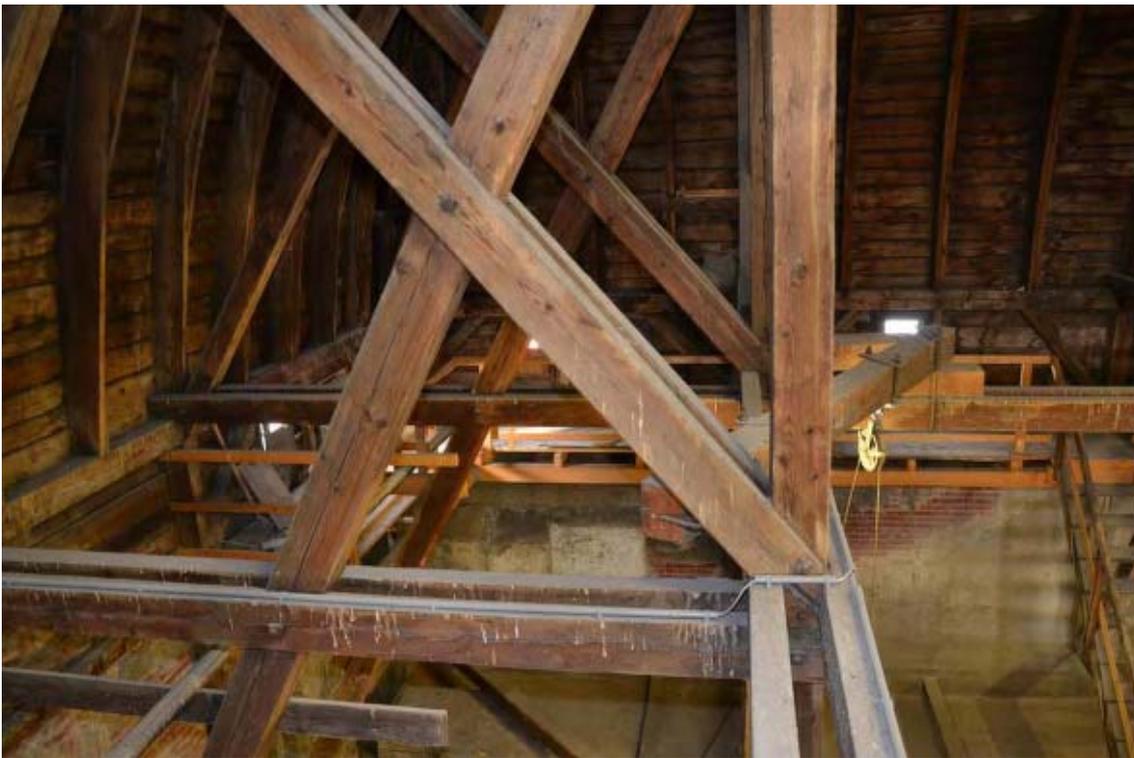
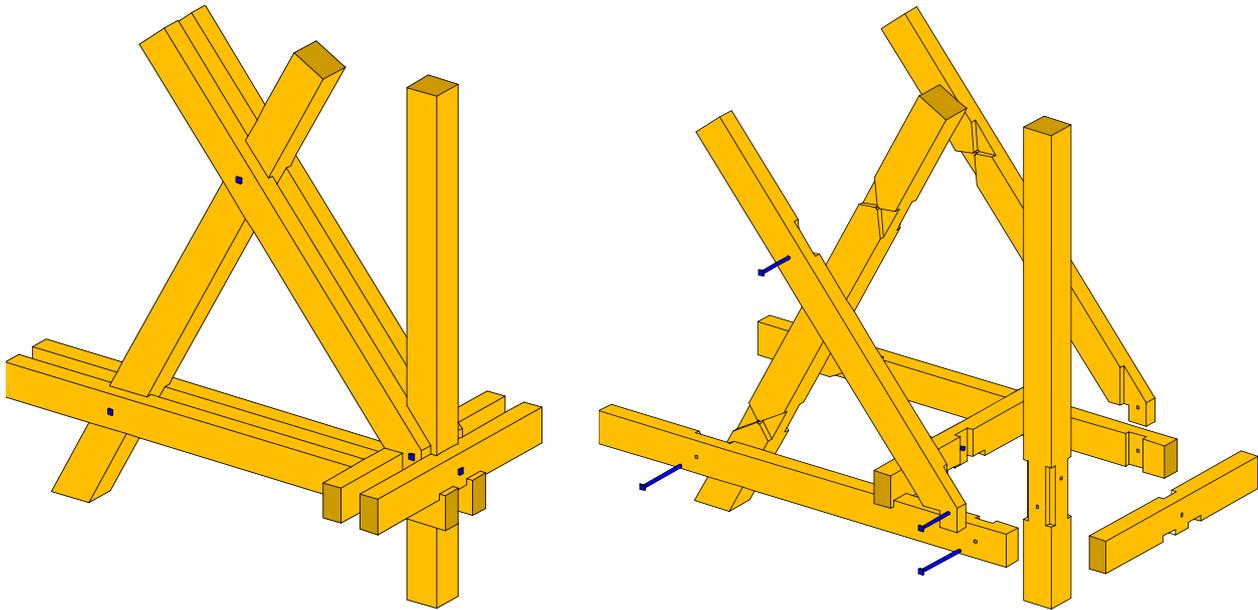
E1-D05: Anschluss Stuhlsäule-Zangen-Diagonalverstrebung-Strebebalken (Gespärre Ost-West)


Abb. 5.78: Anschlussknoten E1-D05

Dieser Anschluss mag auf den ersten Blick vielleicht ident zum zuvor beschriebenen Knotendetail erscheinen. Hinsichtlich der Kreuzkammverbindungen an die liegende Hängewerksstuhlsäule stimmt dies vollends, die Fußpunkte der Diagonalverstrebung allerdings laufen in diesem Fall nicht parallel zur oben liegenden Zangenbalkenlage, sondern schließen an diese im rechten Winkel an. An der Explosionsdarstellung und auch bei genauer Betrachtung des Fotos erkennt man, dass die Zangen nicht einfach winkeltreu horizontal abgetrennt wurden, sondern diese derart angeschnitten sind, dass sozusagen ein „Sporn“ in den Zangenzwischenraum eingreift. Ob dieser, doch wesentlich aufwändiger herzustellende untere Diagonalverstrebungsanschluss tatsächlich einen statischen Nutzen bringt, sei in Frage gestellt, zumal die Kraftweitergabe an die Stuhlsäule hauptsächlich über den Bolzen passiert.

E1-D06: Anschluss Stuhlsäule-Zangenbalken-Diagonalverstrebung beim Kuppelgrat

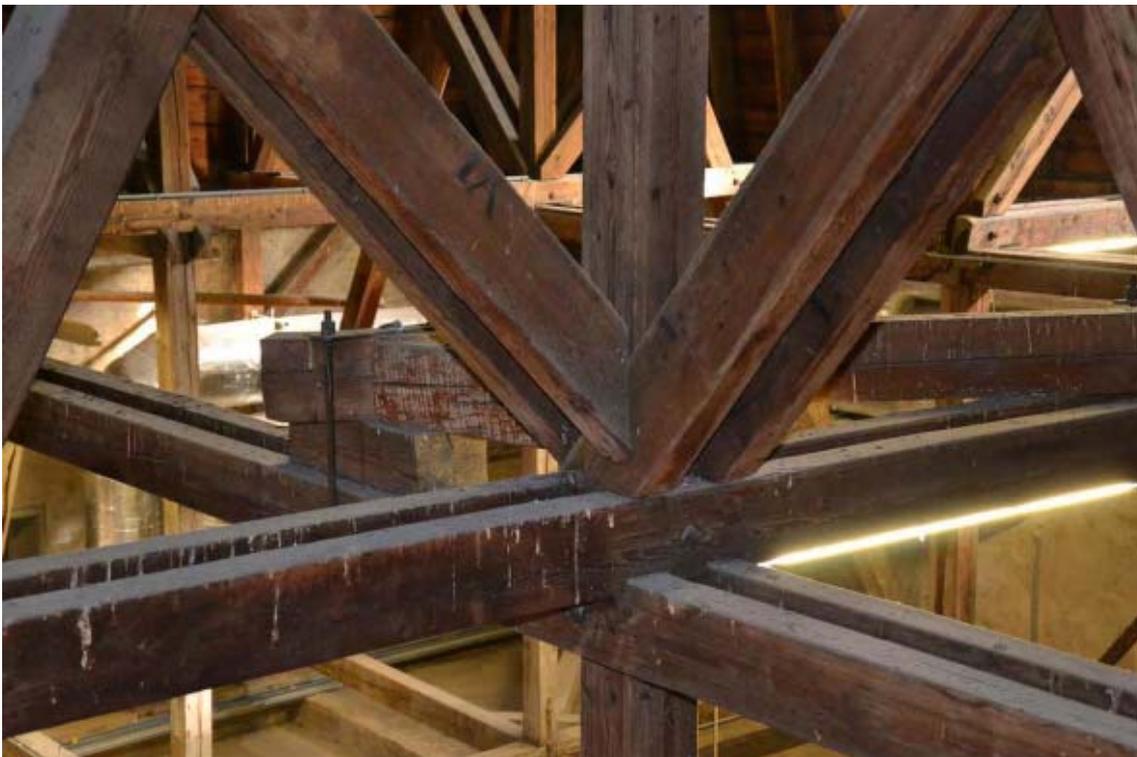
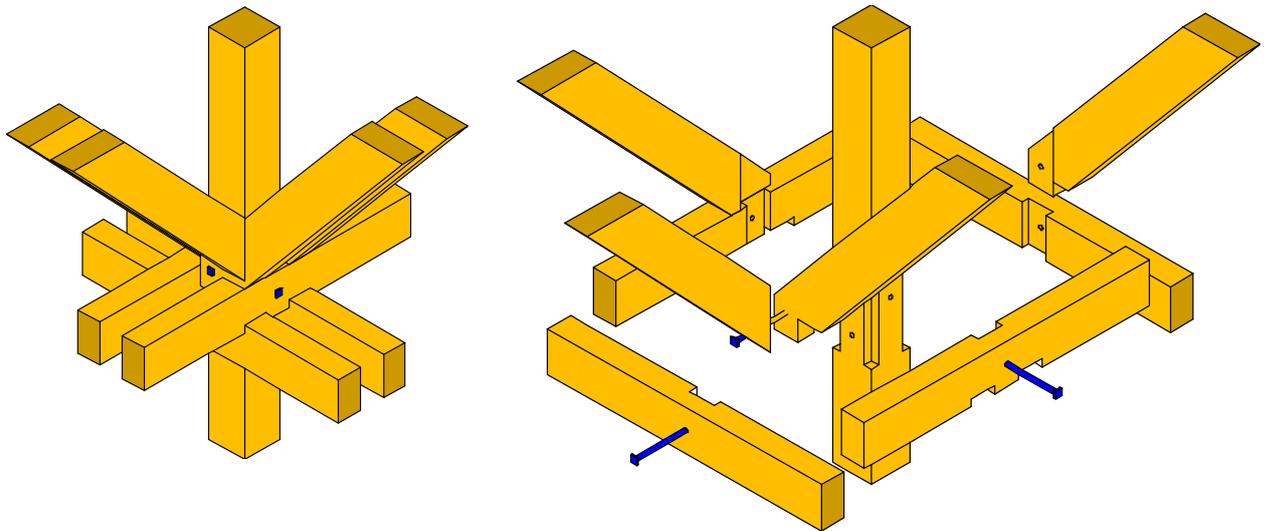


Abb. 5.79: Anschlussknoten E1-D06

Was bei den mittig gelegenen Vollgespärren noch gut funktionierte, konnte natürlich nicht in analoger Weise dort angewendet werden, wo vier Diagonalverstrebungszangenhölzer sozusagen „ums Eck“ geführt werden mussten. Irgendwie zeugt dieser Anschlussbereich von einer gewissen „Ratlosigkeit“, wenn man die nach links oben verlaufende, stumpf gestoßene, abgetrennte Diagonalverstrebung mit der übrigen Ausführung der Kuppelanschlussdetails vergleicht.

Ansonsten funktioniert dieser Anschluss wie die bereits zuvor vorgestellten Details der anderen Vollgespärre.

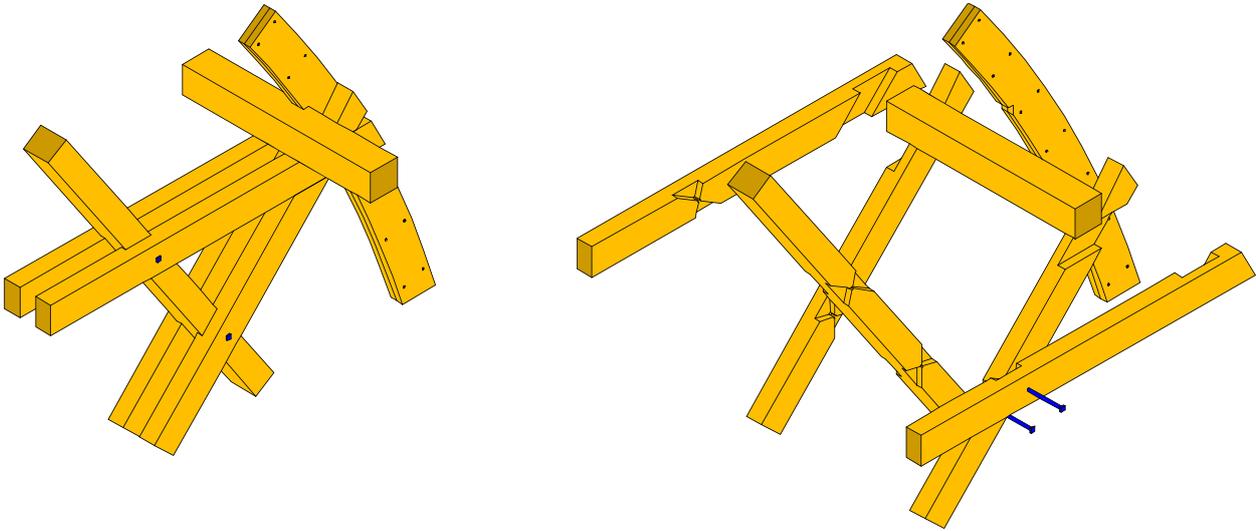
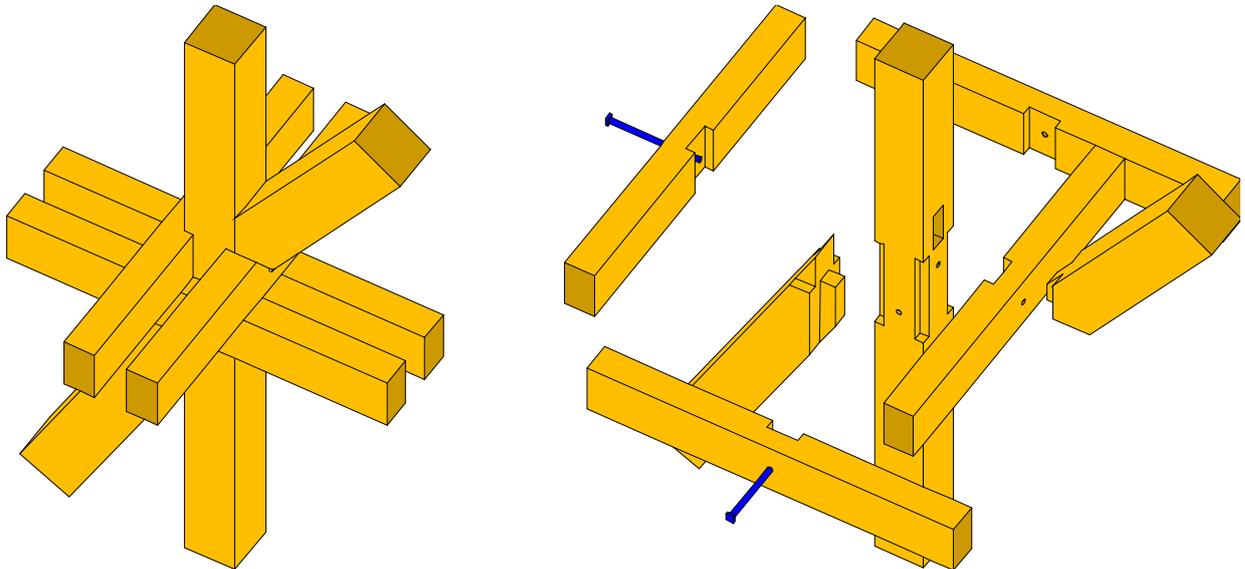
E2-D01: Anschluss Diagonalverstrebung-Zangenbalken-Mittelfette-Sparren


Abb. 5.80: Anschlussknoten E2-D01

Um die, auf der zweiten Zangenbalkenebene (E2) stumpf aufgelegte Mittelfette des Kuppeldaches zu unterstützen, wurden die bereits erwähnten Diagonalverstrebungszangen eingebaut. Ohne diese würden die Zangenbalken der zweiten Ebene quasi frei auskragend die Lasten der Mittelfette übernehmen müssen. Die Diagonalverstrebungsbalken wurden oben mittels Überblattung an die Zangenbalken der oberen Zangenlage angeschlossen. Diese Blattverbindung so passgenau herzustellen ist aufgrund der geneigten Lage der Hölzer nicht so einfach, ist aber in den überwiegenden Fällen sehr sauber gelungen. Der mittig laufende Strebebalken ist wie die Stuhlsäule ebenfalls mit Kreuzkammverbindungen an die Zangenhölzer angeschlossen. Das lose Auflegen der Mittelfette auf die Zangenhölzer ist nur aufgrund der immer noch sehr steilen Kuppeldachneigung möglich. Die Sparren lagern, mit Kerben auf der Mittelfette auf.

E2-D02: Anschluss liegende Stuhlsäule unten-Hängesäule-liegende Stuhlsäule oben (Gespärre Nord-Süd)



In der zweiten Zangenbalkenlage kommt es zum Wechsel der oberen („Sprengwerk“) und der unteren liegenden Stuhlsäule (Hängewerk). Dieser Übergang wäre theoretisch auch mit einem einfachen Stirnversatz an die Hängesäule auszuführen gewesen. Allerdings hat man sich, wahrscheinlich wegen der steil anzuschließenden Bauteile für eine Zapfenverbindung entschieden. Außerdem hätte der Versatzeinschnitt an der Hängesäule eine größere Querschnittsschwächung bedeutet als die zur Anwendung gekommene Zapfenverbindung. Die obere liegende Stuhlsäule kann, wenn die Zapfenverbindung zur Hängestuhlsäule versagt, auch Lasten über die Holzpressung auf die kreuzende obere Zangenbalkenlage übertragen. Die Zangenbalken selbst sind in gewohnter Manier durch eine Mittelverkämmung an die Hängesäule angeschlossen. Anders als in der darunterliegenden Zangenbalkenebene (E1) wurde auf eine Verknüpfung der kreuzenden Zangen untereinander verzichtet, sodass diese stumpf übereinanderliegend, also ohne gegengleich angeordnete Kammeinschnitte, ausgebildet sind. Wie bei den zuvor behandelten Anschlüssen kommen auch hier lagesichernde Durchsteckbolzen zum Einsatz.

Abb. 5.81: Anschlussknoten E2-D02

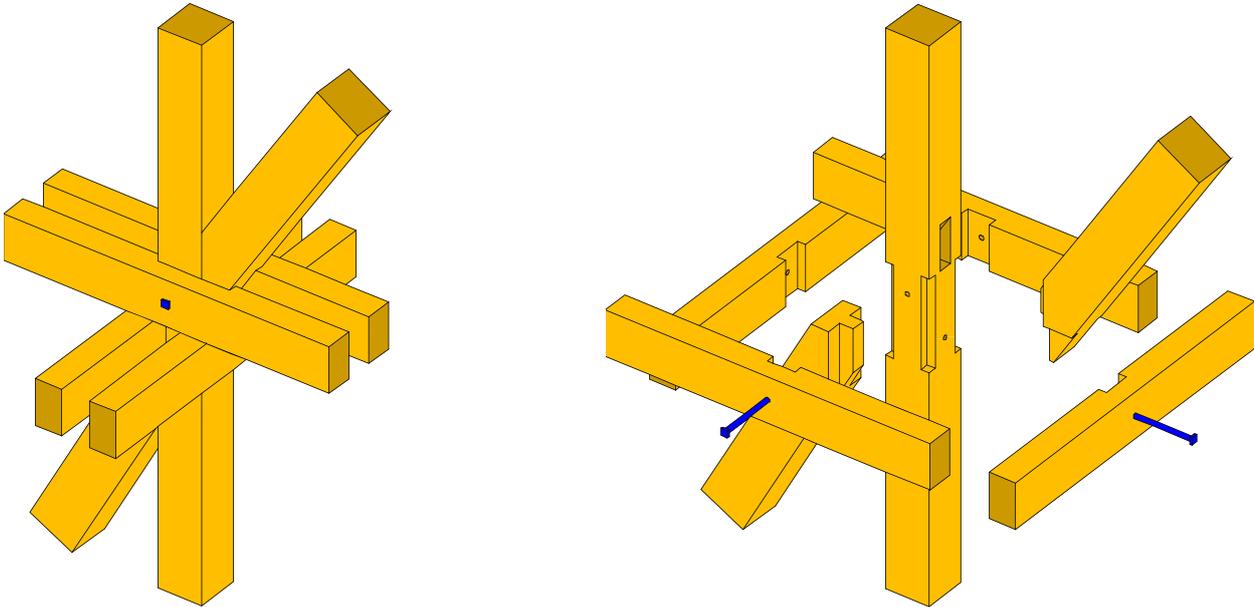
E2-D03: Anschluss liegende Stuhlsäule unten-Hängesäule-liegende Stuhlsäule oben (Gespärre Ost-West)


Abb. 5.82: Anschlussknoten E2-D03

Ähnlich dem Vergleich der Anschlussknoten E1-D04 und E1-D05, unterscheidet sich dieser Anschlussknoten auch nur hinsichtlich der unterschiedlichen Lage der Zangenhölzer von dem zuvor vorgestellten Anschlussknoten E2-D02. In diesem Anschluss verläuft die untere Zangenbalkenlage rechtwinkelig zur unteren liegenden Stuhlsäule (Hängewerk) und erlaubt damit, im Falle eines Zapfenversagens, eine Krafteinleitung über Stirnpressung an die Zangenbalkenunterseite. Die Zangenbalken in dieser Lage haben die bereits zu Beginn des Kapitels 5-3.4.1 beschriebene „Doppelfunktion“ inne. Sie werden nämlich sowohl als Zugband für das „Sprengwerk“ (grün) als auch als zweigeteilter Druckgurt für das Hängewerk (rot) verwendet. (siehe Abb. 5.64)

E2-D04: Anschluss liegende Stuhlsäule unten-Hängesäule-liegende Stuhlsäule oben bei Kuppelgrat

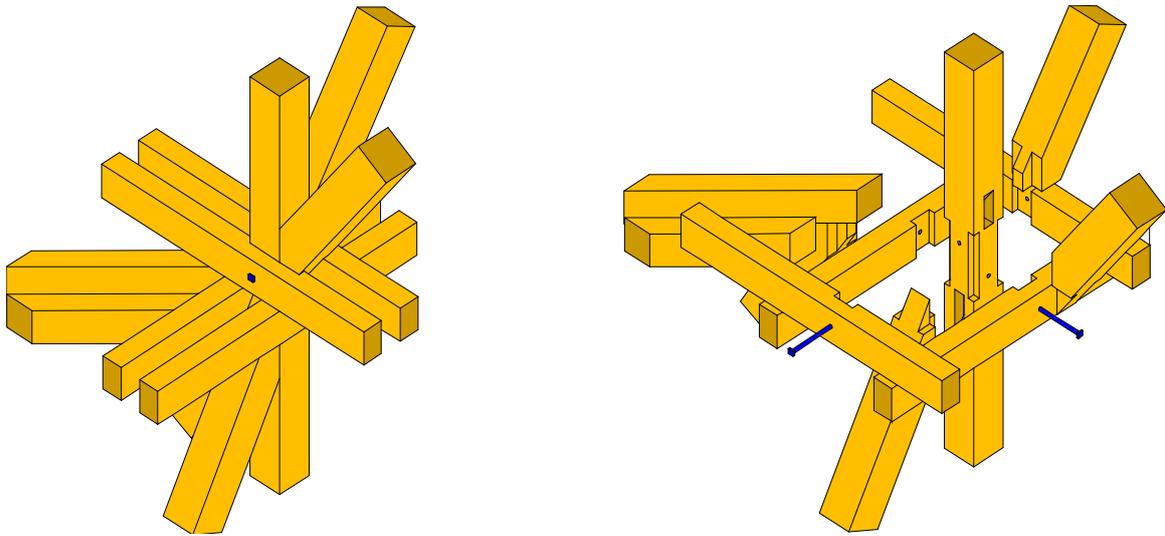


Abb. 5.83: Anschlussknoten E2-D04

Insgesamt stoßen elf Tragglieder in diesem Anschlussknoten aufeinander. Dementsprechend komplex ist auch dessen geometrische Ausbildung. Bedingt durch die Einschnitte der Mittelverkämmung an den Zangenhölzern und an der Hängestuhlsäule passen die liegenden Stuhlsäulen, die in gleicher Querschnittsbreite ausgeführt sind wie die Hängesäule, nicht mehr zwischen die Zangenlagen. Darum mussten diese im unteren Bereich entsprechend ausgenommen werden. Die vier erforderlichen Zapfenlöcher in der Hängesäule, als Resultat der Verzapfung jeder liegenden Stuhlsäule, bedeuten allerdings eine doch problematische lokale Querschnittsschwächung in diesem Übergangsbereich. Besser wäre bei diesem Tragwerksknoten wohl gewesen, vom Grundschemata abzuweichen und nur zwei Zapfenverbindungen auszubilden und die übrigen liegenden Stuhlsäulen stumpf an die Zangenbalken zu stoßen. Die zum Kuppelgrat geführte horizontale Zangenlage ist stumpf an das orthogonale Zangenkreuz angeschlossen und vernagelt.

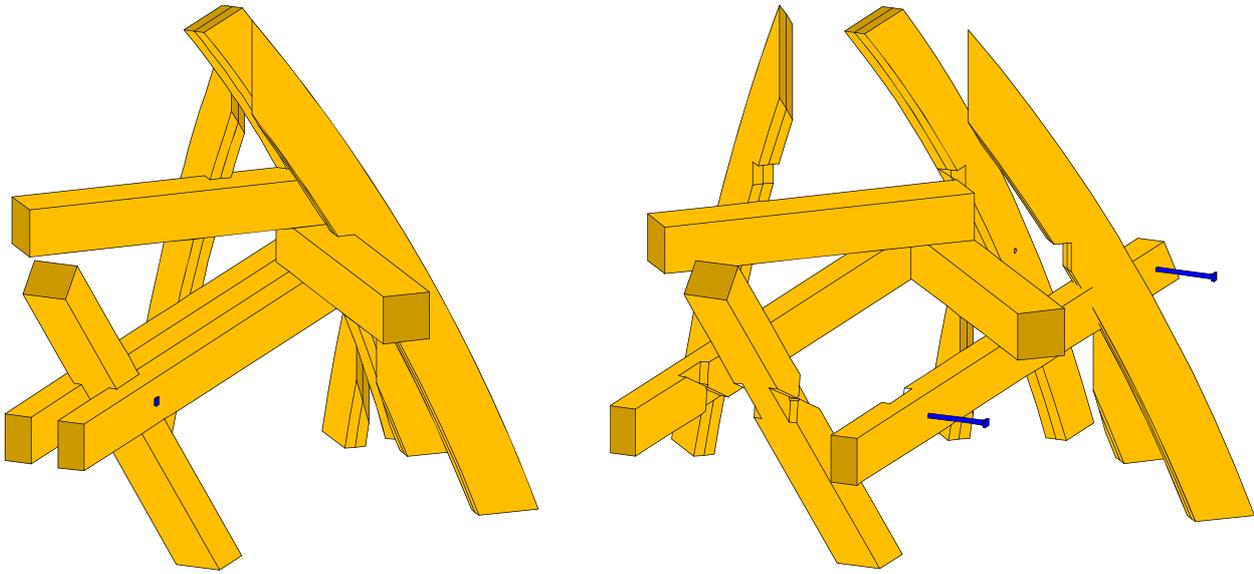
E2-D05: Anschluss Diagonalverstrebung-Zangenbalken-Mittelpfette-Gratsparren


Abb. 5.84: Anschlussknoten E2-D05

Mit der unterschiedlichen Höhenlage der Zangenbalken geht natürlich auch die ungleiche Höhenlage der lose aufgelegten Kuppelmittelpfetten einher. Dieses Anschlussdetail ist leider nicht direkt zugänglich, liegt es doch etwas neun Meter über der Auladecke und ist vom Wartungsaufstieg aus nicht zu erreichen. Anhand von Fotoaufnahmen konnte die Ausführung in diesem Tragwerksbereich aufgenommen werden. Die Mittelpfetten scheinen stumpf aufeinander gelegt zu sein und werden von den diagonal liegenden Zangen, die mittels Bolzenverbindung an den Gratsparren angeschlossen sind, unterstützt. Die Schifter sind stumpf an den Gratsparren genagelt. Am Foto kann man außerdem erkennen, dass die Pfostensegmente der vernagelten Sparrenteile so angeordnet sind, dass diese ein großzügiges Auflager auf den Mittelpfetten finden. Ab dieser Zangenlage weisen die Kuppelsparren eine stärkere Krümmung auf, um die vorgesehene Kuppelform zu realisieren.

E3-D01: Anschluss Firstpfette-Sparren (Übergangsbereich Kuppel-Laterne) bei Kuppelgrat

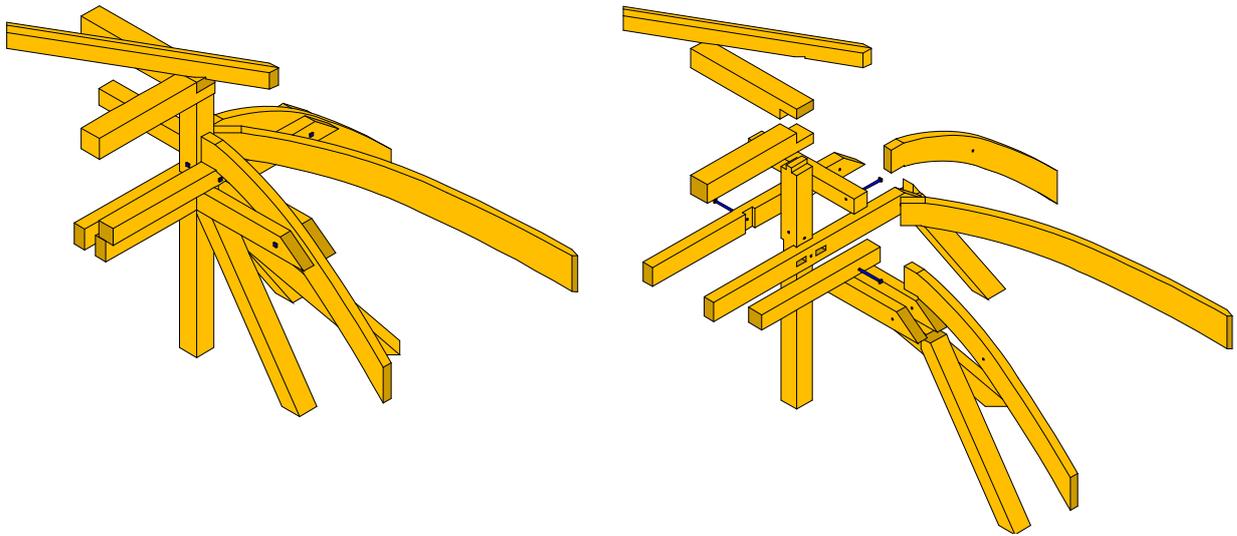


Abb. 5.85: Anschlussknoten E3-D01

Auch in diesem Bereich treffen zahlreiche Konstruktionsteile aufeinander und werden um die zentral liegende Hängestuhlsäule im Gratbereich um die Ecke geführt. Während in den Ost-West orientierten Vollgespärren VG-B und VG-D noch Zangenbalken mit einer darauf aufliegenden Firstpfette zum Einsatz kommen, sind diese in den Vollgespärren VG-2 und VG-4 durch eine einzelne Kuppelfirstpfette ersetzt. Die Sparrenpfosten lagern auf diesen Kuppelfirstpfetten auf. Diese liegen, anders als die Fuß- und Mittelpfette in Ebene E2, umlaufend in gleicher Höhe. Die Sparrenpfosten des Hauptgespärres sind mit Durchsteckbolzen an die Zangenhölzer angeschlossen. Diese Art der Sparrenkopfsicherung erscheint in den Gespärren (VG-B & VG-D) mit durchlaufenden Zangen sinnvoll. Die Lösung mit „Zangenbalkenstummeln“ in die dazu orthogonale Richtung ist mehr als fragwürdig, da die eingezapften Stummeln ohnehin keine Zugkräfte übertragen können.

E3-D02: Anschluss Firstpfette-Sparren (Übergangsbereich Kuppel-Laterne) (Gespärre Ost-West)

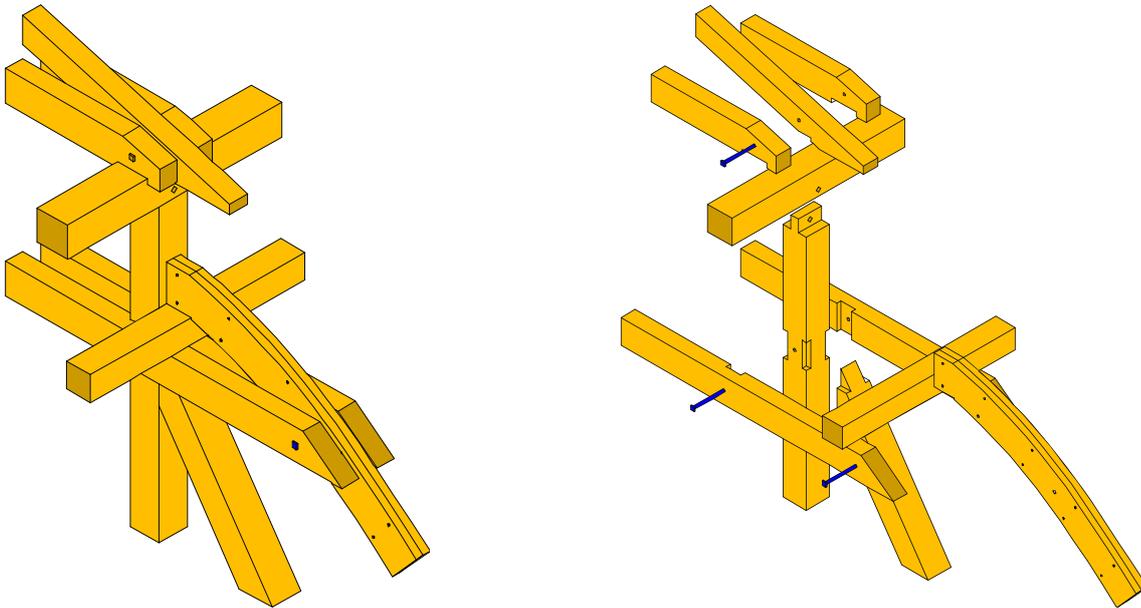


Abb. 5.86: Anschlussknoten E3-D02

Dieses Kuppelfirstdetail des Vollgespärres VG-C lässt sehr deutlich erkennen, dass die Firstpfette auf den Zangenbalken stumpf aufliegt und mit einem Durchsteckbolzen an die Hängesäule gegen Abheben angeschlossen ist. Am Foto erkennt man, dass die vollflächige Kuppeldacheinschalung im Bereich des Übergangsgesimses zwischen Kuppel- und Laternendach bis an die Hängestuhlsäule herangeführt wurde. Für die Unterkonstruktion des blechgedeckten Gesimses wurden Trägerleisten auf ein formgebendes, kreisförmig zugeschnittenes Pfostenstück genagelt und mit Unterdachbahn bespannt. Das Vorhandensein dieser Unterdachbahn ist ein Indiz dafür, dass die Dacheindeckung zumindest teilweise saniert wurde.

E3-D03: Anschluss Firstpfette-Sparren (Übergangsbereich Kuppel-Laterne) (Gesparre Nord-Süd)

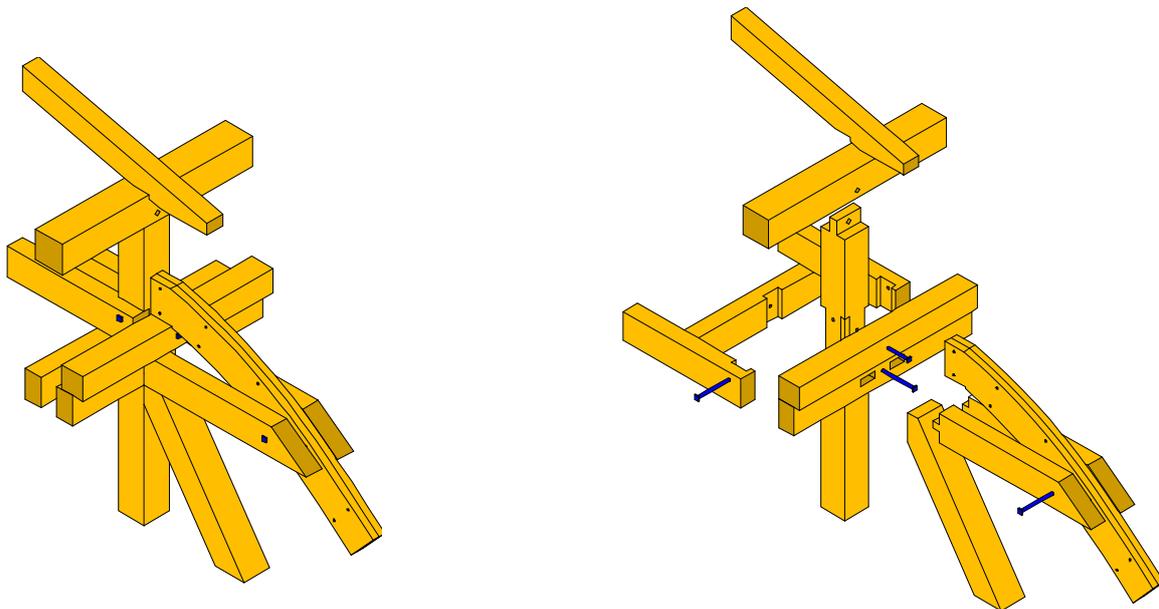


Abb. 5.87: Anschlussknoten E3-D03

Die Zangenbalken des Vollgespärre VG-3 liegen sozusagen in der „falschen Höhe“ und werden vor der auf dem Zangenbalken des Vollgespärre VG-B bzw. VG-D auflagernden Kuppelfirstpfette abgeschnitten. In der Explosionsdarstellung erkennt man die eingezapften Zangenbalkenstummel, deren Steckbolzenanbindung durch die Kuppelsparren aufgrund der fehlenden Zugtragfähigkeit der ungesicherten Zapfenverbindung mehr oder weniger obsolet ist. Hier wollten die Zimmermänner wohl einfach die Systemsymmetrie bestmöglich aufrechterhalten, reichen doch die durchlaufenden Zangenbalken der Ost-West orientierten Gespärre bis an die Sparrenoberkante hinaus.

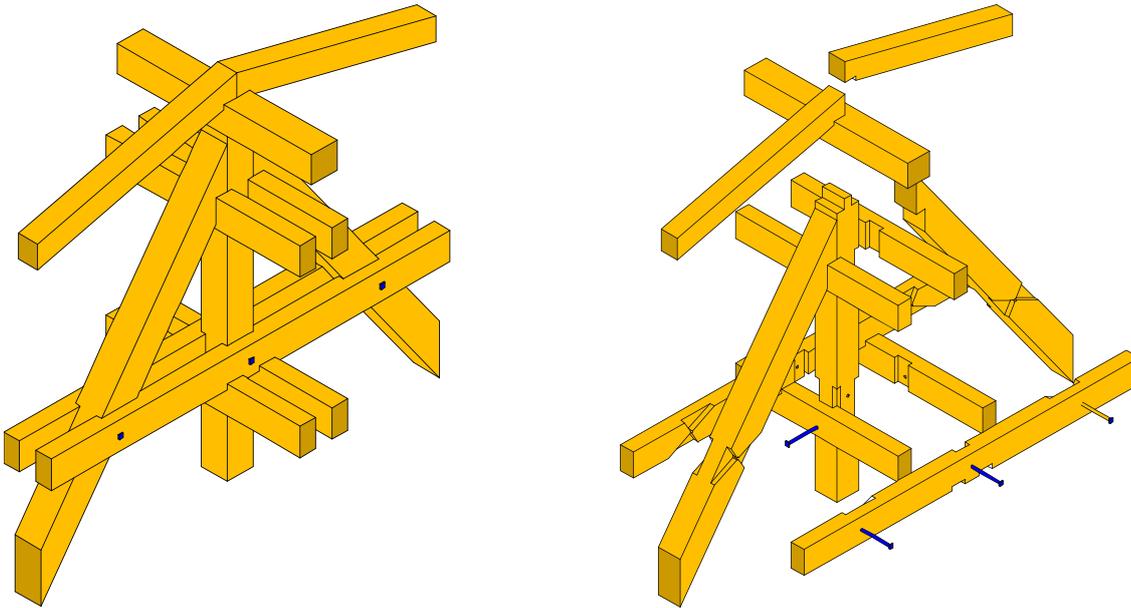
E4-D01: Anschlussbereich Firstpfette Laterne


Abb. 5.88: Anschlussknoten E4-D01

Durch die rechteckige Grundform der Kuppel ergibt die geometrische Dachausmittlung des Laternendaches kein Zeltdach, sondern ein angewalmtes Pfettendach mit kurzer Firstlinie. Die mittlere, in Höhe der Zangenbalkenebene E2 abgetrennte Stuhlsäule trägt diese Laternenfirstpfette gemeinsam mit den oberen liegenden Stuhlsäulen („Sprengwerk“). Die Anschlüsse aller Stuhlsäulen sind als einfache Zapfenverbindung ausgeführt, wobei die beiden Zapfen der liegenden Stuhlsäulen zusätzlich mit einem Holznagel gesichert sind (die einzigen Holznagelverbindungen in der gesamten Kuppelkonstruktion). Die Zangenbalken sind in üblicher Art mit der Mittelsäule verkämmt. Zusätzlich wird die mittlige Stuhlsäule von den liegenden Stuhlsäulen des Vollgespärres VG-3 „sprengwerkartig“ abgestrebt.

E4-D02: Anschluss Walm Sparren Laterne

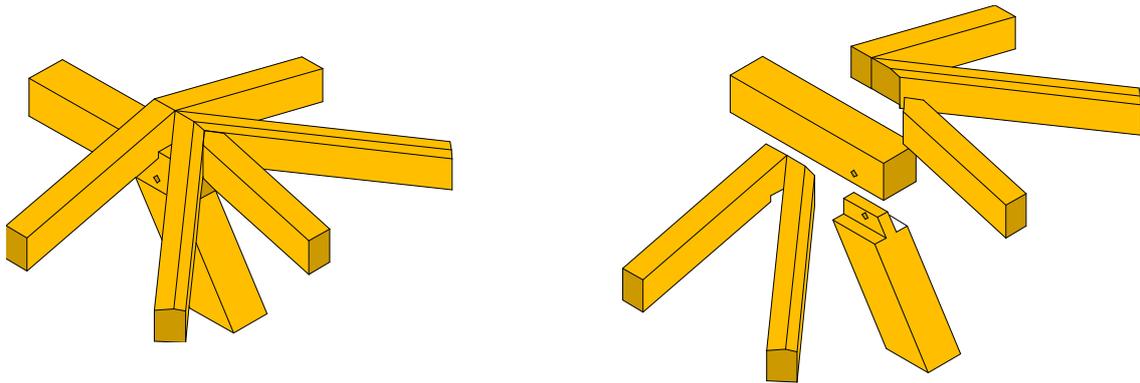
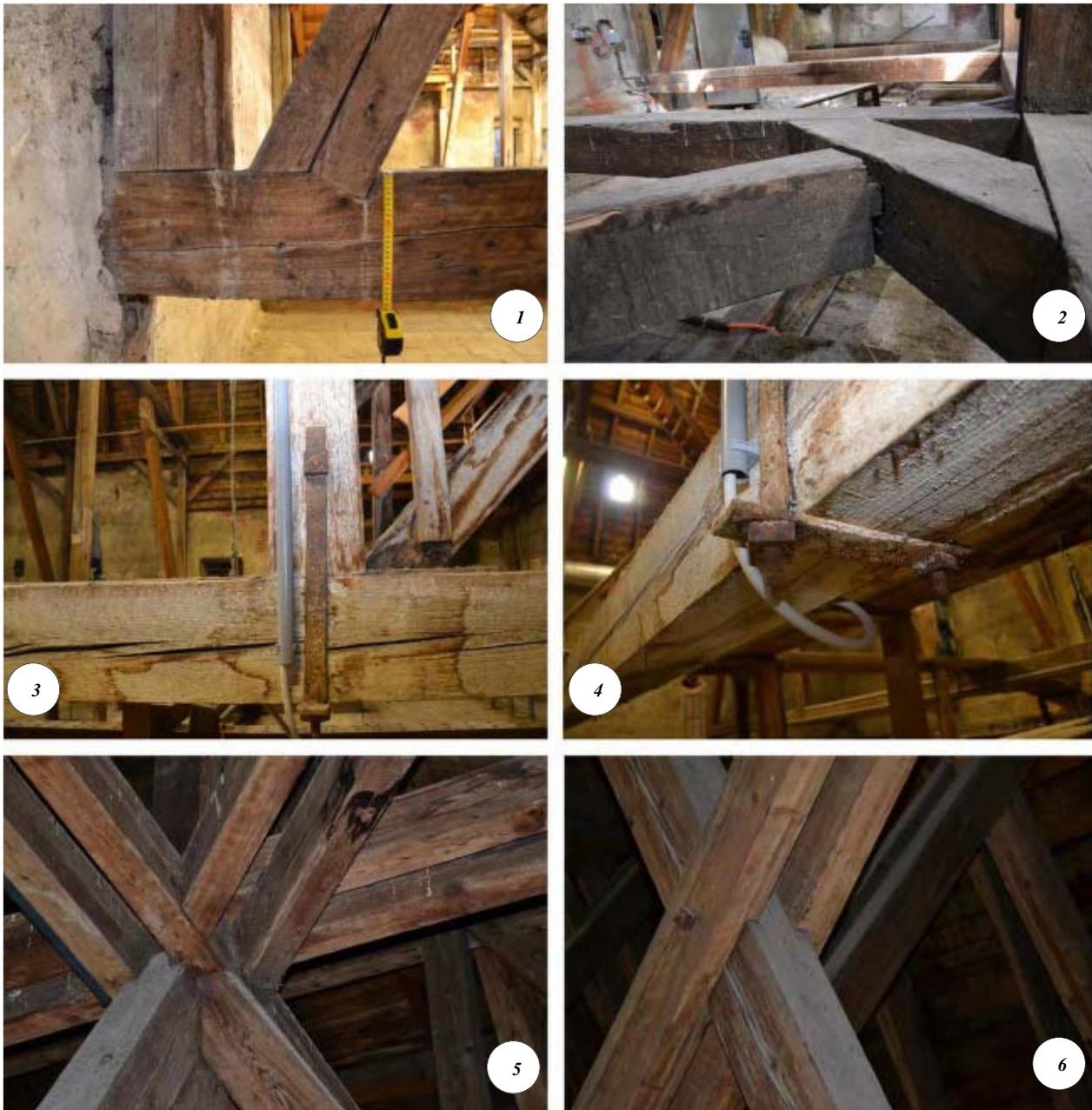


Abb. 5.89: Anschlussknoten E4-D02

Die Walmausbildung des Laternendaches ist denkbar einfach gelöst. Die Walmgratsparren lagern jeweils bis zur halben Firstpfettenbreite auf. Der Walmsparren selbst wurde entsprechend an den Walm Sparrenverschnitt winkeligerecht angearbeitet und mit diesen beiden Konstruktionsgliedern vernagelt. Die gesamte Laternenkonstruktion ist vollflächig mit Rauschalung beschlagen und mit einer Blecheindeckung ausgeführt.

5-3.5.3 Fotografische Eindrücke der Verbindungstechnik



- 1 Versatztiefe eines einfachen Fersenversatzes beim Anschluss an den Bundtram
 2 leicht klaffende, gerade Zapfenverbindung im Bundtramkreuzungsbereich
 3 eiserne Bundtramaufhängung an die Stuhlsäule des Hängewerkes
 4 Detailansicht der Bundtramaufhängung mit quadratischen Muttern
 5 Verschnitt der Zangenhölzer mit den liegenden Stuhlsäulen und den Hängesäulen
 6 passgenau ausgeführte, bolzensicherte Kreuzkammverbindung

Abb. 5.90: Fotografische Impressionen der Verbindungstechnik

5-3.6 DURCHFÜHRTE MESSUNGEN IN DER HAUPTKUPPEL

5-3.6.1 Lage der Messstellen im Tragwerk

Nachfolgend sollen die Messstellen der durchgeführten Holzfeuchte- (HFM_blaue) und Bohrwidstandsmessungen (RES_rot) anhand von Grundrissdarstellungen der einzelnen Tramlagen dargestellt werden.

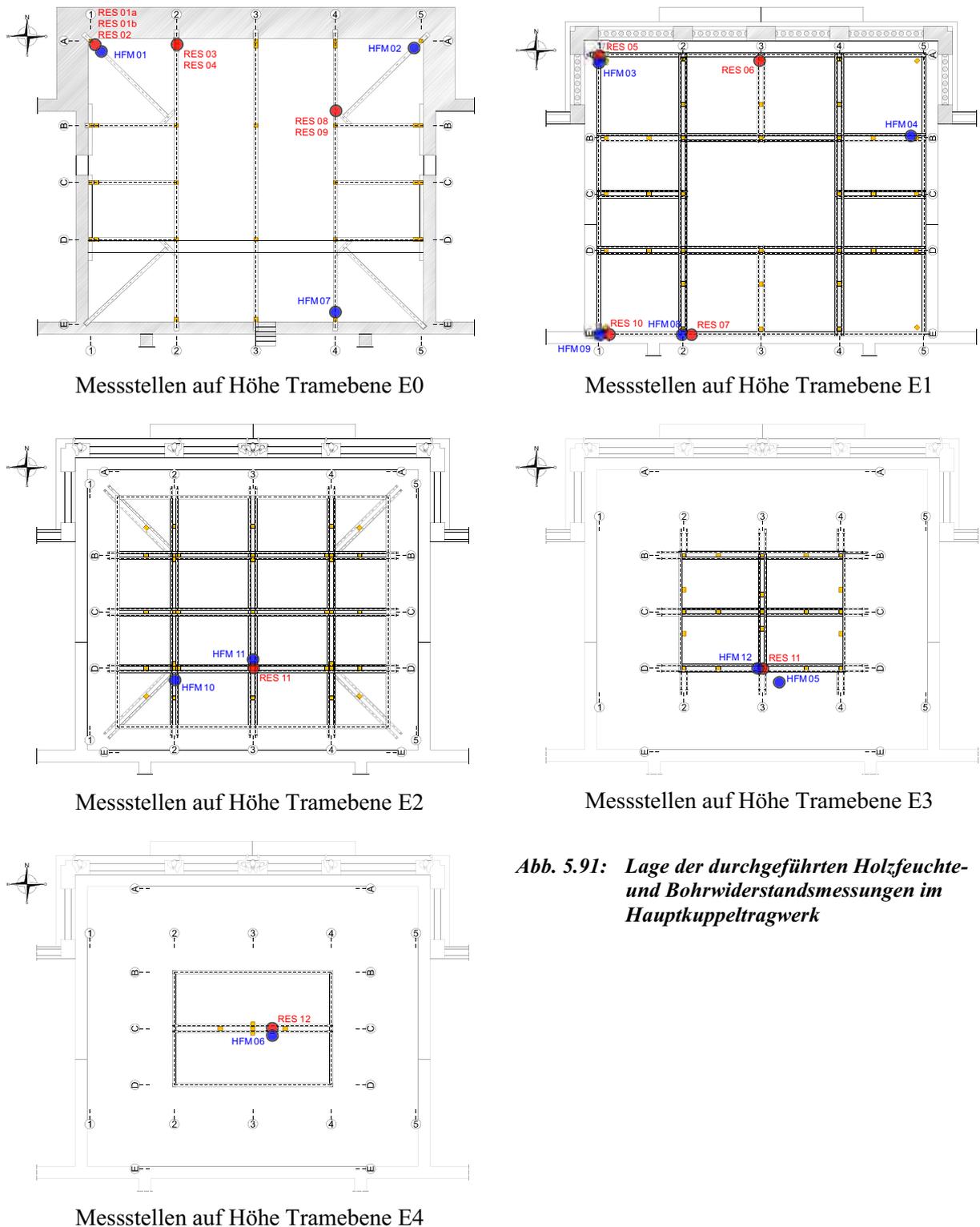


Abb. 5.91: Lage der durchgeführten Holzfeuchte- und Bohrwidstandsmessungen im Hauptkuppeltragwerk

5-3.6.2 Holzfeuchtemessungen

Im Rahmen einer vierten Begehung des Kuppeltragwerkes wurden zwölf Holzfeuchtemessungen an ausgewählten Bauteilen ausgeführt. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass in jeder Tramlage (E0 bis E4) mindestens zwei bis drei unterschiedliche Bauteile einer Holzfeuchteprüfung unterzogen wurden. Die genaue Lage der Messstellen ist in Kapitel 5-3.6.1 dargestellt.

Für die Kennzeichnung und Wiederauffindbarkeit der Messstellen wurden entsprechende Markierungskärtchen direkt im Tragwerk hinterlassen, die auch für die zeitgleich durchgeführte Fotodokumentation als Orientierungshilfe dienen können. Generell wird das Anbringen von haltbaren Markierungen (z. B.: gestanzte Metall oder Kunststoffkärtchen, die an der betreffende Stelle mit kurzen Nägeln befestigt werden können), so es denn erlaubt ist, empfohlen, um auch bei später durchgeführten Kontrolluntersuchungen die bereits einmal gemessenen Stellen wieder auffinden zu können. Im konkreten Fall wurden keine „dauerhafte“ Markierungen verwendet, sondern auf einfache Kartonkärtchen zurückgegriffen.



Datum der Holzfeuchtemessungen

Mittwoch, 15.02.2017 14:00 bis 17:00 Uhr

Wetterdaten

Da die Außentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit sowie die Niederschlagsmengen der letzten Tage (insofern es direkt bewitterte Tragwerksteile betrifft) ebenso Einfluss auf die Holzfeuchte nehmen können, wurden die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) erhobenen Wetterdaten der nahegelegenen Messstelle „Universität Graz“ für einen 7-Tagezeitraum ausgelesen. Aus den nachfolgend dargestellten Wetterdaten erkennt man, dass die Messung an einem überdurchschnittlich warmen, sonnigen Februartag durchgeführt wurde, dem eine Hochdruckwetterlage mit nur sehr geringen Niederschlagsmengen vorangegangen ist. Zum Zeitpunkt der Messung betrug die relative Luftfeuchte etwa 45% bei einer Außentemperatur von ca. 11°C.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Kuppeltragwerk

Zusätzlich zu den externen Wetterdaten wurden die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit direkt im Kuppeltragwerk gemessen. Dabei konnte auch ein markanter Temperaturunterschied zwischen dem tiefst gelegenen Punkt im Tragwerk (Bundtramlage E0) zum höchst gelegenen Punkt (=Firstpfette Laterne) gemessen werden. Die lokal vor Ort gemessene rel. Luftfeuchtigkeit im unbeheizten Kuppeltragwerk entspricht mit 52% etwa den Messwerten der ZAMG.

Temperatur Tramebene E0: 12°C (entspricht in etwa der Außentemperatur)

Temperatur Firstpfette Laterne: 16°C

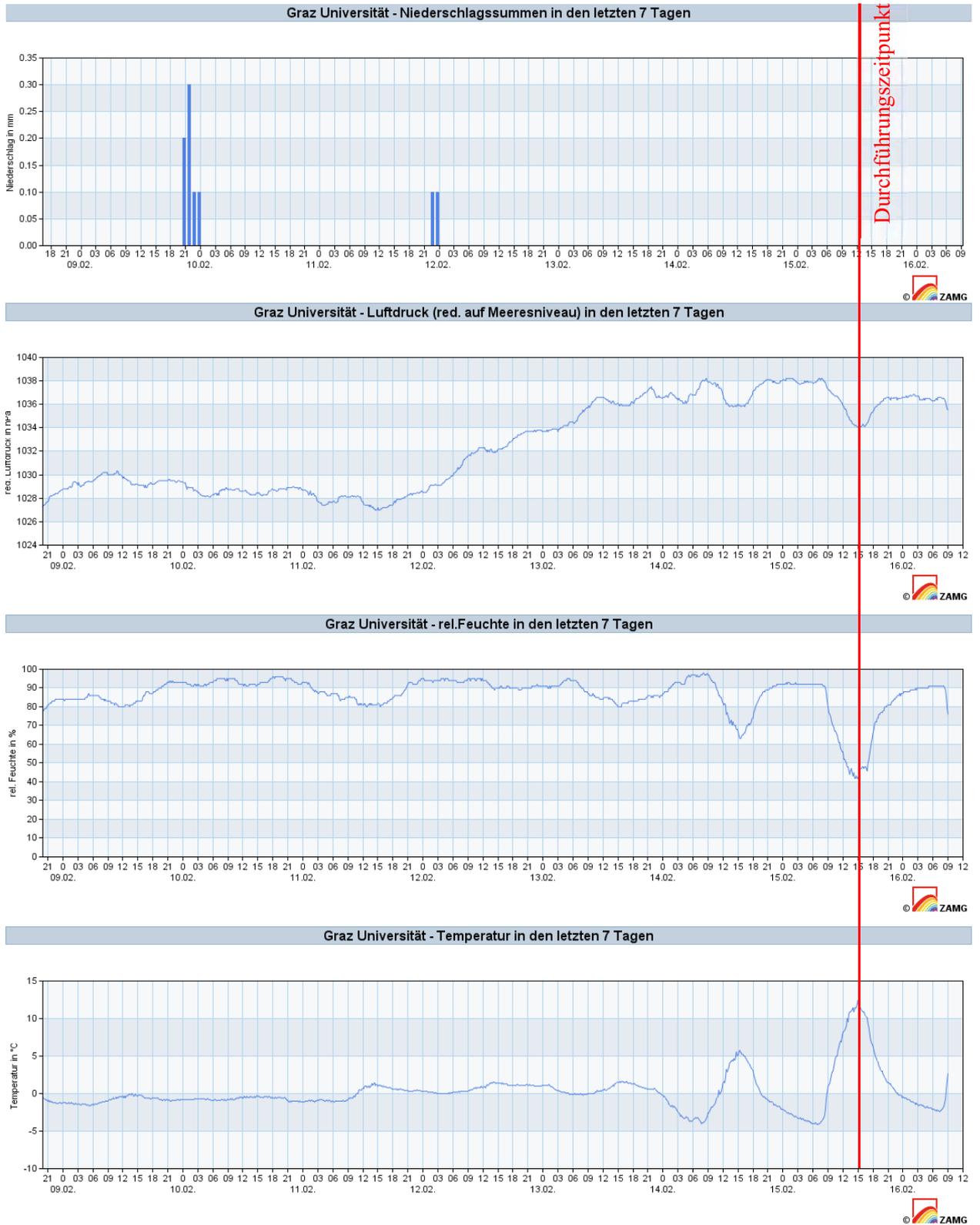


Abb. 5.92: Wetterdaten im 7-Tagesverlauf vor den durchgeführten Holzfeuchtemessungen [106]

verwendetes Messgerät

Alle Feuchtemessungen wurden mit dem seitens des Instituts für Holzbau und Holztechnologie zur Verfügung gestellten, multifunktionalen Hygrometer vom Typ *Gann Hydromette M4050* in Kombination mit der zugehörigen Rammelektrode Typ *M18* durchgeführt. Laut Auskunft des Instituts für Holzbau und Holztechnologie liefert dieses Messgerät hinreichend genaue Messergebnisse bis zu einer Holzfeuchte von ca. 30% (=Fasersättigungsbereich). Eine derart hohe Holzfeuchte sollte bei verbautem Holz allerdings aus den oben genannten Gründen ohnehin nicht vorkommen. Die Konstruktionshölzer sind allesamt aus Fichten bzw. Tannenholz. Dies wurde am Gerät mit der entsprechenden Materialnummer #176 ebenso berücksichtigt wie die zuvor gemessenen Umgebungstemperaturen von 12°C bzw. 16°C am Firstpunkt.



Abb. 5.93: *Verwendetes Holzfeuchtemessgerät GANN M4050 mit Rammelektrode M18*

Holzfeuchte Messprotokoll

Tab. 5.5: *Messprotokoll der durchgeführten Holzfeuchtemessungen*

Messpunkt Nr.	Messstelle (in Klammer stehende Werte kennzeichnen die Achsenschnittpunkte)	Messwert GANN HF in [%]	Anmerkungen
HFM 01	E0_diagonal liegender Bundtram (A-1)	15,6	im Bereich Stuhlsäule
HFM 02	E0_diagonal liegender Bundtram (A-5)	12,9	im Bereich Stuhlsäule
HFM 03	E1_Fußpfette Kuppel (A-1)	11,0	im Bereich Gratsparren
HFM 04	E1_Zangenbalken (B-5)	10,9	im Bereich Mittelpfette
HFM 05	E3_Kuppelsparren (D-3)	9,0	im Bereich Firstpfette
HFM 06	E4_Firstpfette Laterne (C-3)	10,6	im Bereich Dachausstieg
HFM 07	E0_Bundtram (E-4)	11,9	im Bereich Mauernische
HFM 08	E1_Mauerbank (E-2)	11,4	im Bereich Zangenaufleger
HFM 09	E1_Mauerbank (E-1)	11,1	im Bereich Gratsparren
HFM 10	E2_liegende Stuhlsäule (D-2)	10,9	im Bereich Kreuzkamm
HFM 11	E2_Hängestuhlsäule (D-3)	10,8	im Bereich Zangenkreuzung
HFM 12	E3_Firstpfette Kuppel (D-3)	9,3	Im Bereich Sparrenaufleger
Mittelwert		11,30	-
Median		10,95	-
Standardabw.		1,63	Standardabw. von Mittelwert
Δ max/min		6,60	-

Interpretation der Holzfeuchtemessergebnisse

Die Messergebnisse zeigen, dass über den gesamten Dachraum betrachtet, die Holzfeuchte bei etwa 11% liegt. Wie im Protokoll ersichtlich, wurden überwiegend horizontal verbaute, am Dachrandbereich befindliche Tragwerksteile überprüft, da diese Bauteile im Falle eines vorliegenden Schadens in der Dachhaut am ehesten von Durchfeuchtung betroffen sind. Die Holzfeuchte der Bundträme wurde stets nahe den Mauerwerksauflagernischen gemessen. Insbesondere Messpunkt HFM 01 hebt sich deutlich vom Mittelwert ab. Diese Messstelle wurde wohlgermerkt nicht zufällig gewählt, legte doch eine vorangegangene „Hammerklopfprüfung“ bereits den Verdacht nahe, dass in diesem Bereich ein Problem im Bundtramauflagerbereich vorliegt. (siehe auch Kapitel 5-4). Ebenso ist aus der Auswertung erkennbar, dass auch die Lage der Bauteile im Tragwerk Einfluss auf die messbare Holzfeuchte nimmt. Während die zu den sonnenexponierten Himmelsrichtungen (Südseite/Westseite) orientierten Bauteile im Vergleich zu den an den „kühleren“ Seiten des Daches gelegenen Bauteilen nur marginale Unterschiede in ihrer Holzfeuchte aufweisen, so spielt die Höhenlage im Tragwerk doch eine nicht unbedeutende Rolle. Der geringe Unterschied des erst genannten Vergleichs kann mit dem Zeitpunkt der Durchführung begründet werden, da die Temperaturdifferenzen zwischen sonnenexponierten und abgeschatteten Dachflächen in den späten Wintermonaten noch nicht so extrem ausgeprägt ist wie beispielsweise im Hochsommer. Die aufsteigende Konvektionswärme, die sich im Firstbereich sammelt, reduziert die messbare Holzfeuchte, wie man am Vergleich der Messpunkte in den Tramlagen E0 zu E4 erkennt, doch immerhin um knapp 1,5%. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Effekt in den Sommermonaten noch zusätzlich verstärkt und dass in Firstnähe gelegene Konstruktionsglieder bis auf wenige Prozent Holzfeuchte heruntergetrocknet werden.

Der Eurocode 5 und das zugehörige nationale Anwendungsdokument (vgl. [84; 85]) definieren zulässige Holzfeuchten unter Angabe von Referenzgebäudetypen (die Nutzungsklasse der Konstruktionshölzer wird mitunter über den mittleren Feuchtegehalt der Konstruktionshölzer bestimmt), die nicht überstiegen werden dürfen:

- | | |
|--------------------------|--|
| Nutzungsklasse 1 (NKL 1) | Die mittlere Holzfeuchte der meisten Nadelhölzer übersteigt nicht 12 % (Wohn-, Schul-, Veranstaltungsbauten,...) |
| Nutzungsklasse 2 (NKL 2) | Die mittlere Holzfeuchte der meisten Nadelhölzer übersteigt nicht 20 % (Innenräume von Nutz- & Industriebauten, überdachte Konstruktionen,...) |
| Nutzungsklasse 3 (NKL 3) | Diese Nutzungsklasse erfasst all jene Klimabedingungen, die zu höheren Holzfeuchten führen. (z. B.: Bauteile im freien mit konstr. Holzschutz) |

Die bereits im Jahr 2009 zurückgezogene Normenrichtlinie ÖNORM B 4100-2 (vgl. [89]) präziserte hierfür die Angaben hinsichtlich der zulässigen Holzfeuchte in Bauwerken:

allseitig geschlossene Bauwerke:	9 ± 3% (beheizt)
	12 ± 3% (unbeheizt)
überdeckte offene Bauwerke	15 ± 3%
direkt bewitterte Bauwerke	18 ± 6%

Hinsichtlich der Nutzung kann das Kuppeldach als allseitig geschlossene, jedoch unbeheizte Konstruktion eingestuft werden. Durch die fehlende Unterdachbahn (Schieferindeckung Kuppel, Blecheindeckung Laterne) liegt die Dacheindeckung direkt auf der Dacheinschalung. Dadurch ist ein Luft- und Klimaaustausch zwischen Kuppelinnenraum und Außenbereich möglich. Hinsichtlich der gemessenen Holzfeuchten und der Umgebungskonditionierung kann das Tragwerk gemäß den oben stehenden Normenbestimmungen der Nutzungsklasse 2 zugewiesen werden, also einem allseitig geschlossenen, unbeheizten Bauwerk. Diese Festlegung wird auch in der statischen Analyse der Konstruktion eingehalten.

5-3.6.3 Bohrwiderstandsmessungen

Bei der besagten vierten Begehung des Tragwerks wurden zusätzlich zu den Holzfeuchtemessungen auch 14 Bohrwiderstandsmessungen an ausgewählten Bauteilen durchgeführt. Häufig wurden dabei jene Bauteile ausgewählt, die bereits einer Holzfeuchtemessung unterzogen wurden. Die Lage der Messstellen ist wiederum in Kapitel 5-3.6.1 anhand von Tramlagengrundrisszeichnungen dargestellt.

Wie schon bei den Holzfeuchtemessungen wurden auch für die Resistographie entsprechende Kennmarken vorbereitet, sodass die Wiederauffindbarkeit der Messstellen gegeben und diese für die Fotodokumentation erkenntlich gemacht werden konnten. Die Kennmarken wurden dabei jeweils auf der angebohrten Seite des Bauteils, direkt unterhalb des Bohrloches angeordnet. Durch diese schlüssige Vorgehensweise kann auch später auf den Fotos nachvollzogen werden, wo, aber vor allem wie das Bauteil angebohrt wurde. So wird eine Interpretation und Dokumentation der Messergebnisse erleichtert.



Datum der Bohrwiderstandsmessungen

Mittwoch, 15.02.2017 14:00 bis 17:00 Uhr

Holzart der angebohrten Konstruktionshölzer

Fichte

verwendetes Messgerät

Alle Bohrwiderstandsmessungen wurden mit dem seitens des Instituts für Holzbau und Holztechnologie zur Verfügung gestellten Resistographen vom Typ IML RESI-F300 durchgeführt. Die Mechanik des Bohrwiderstandsmessaufbaus wird von einem 12V Akkubohrschrauber betrieben. Die Bohrnadelgeschwindigkeit (Rotation) beträgt je nach Bohrmaschinengetriebeeinstellung 400 bzw. 1200 U/min. Für die Anwendung des Gerätes auf Konstruktionsholz empfiehlt die Bedienungsanleitung die höhere Drehzahl. Auch die Empfindlichkeit des Messschreibers muss je nach Holzart eingestellt werden. Zumal die Hauptkuppel aus Fichtenholz errichtet wurde, wurde hierfür die Einstellstufe 1 „Weichhölzer“ gewählt. Das Messgerät lässt einen maximalen Bohrweg von 320 mm zu und ist damit für das vollständige Durchbohren sämtlicher, in der Kuppel vorkommenden Holzquerschnitte geeignet.



Abb. 5.94: *Verwendetes Bohrwiderstandsmessgerät IML Resi F300*

Interpretation einiger ausgewählter Bohrwiderstandsdiagramme

Widerstandsmessung RES 01a und RES 02

Ein erster Klopfest mit einem Hammer ließ bereits vermuten, dass dieser diagonal liegende Bundtram im Bereich der Mauerwerksnische eine mögliche Schadstelle aufweisen könnten. Auch die Feuchtigkeitsmessung signalisierte in diesem Bereich eine, verglichen zur Durchschnittsholzfeuchte des Gesamttragwerks, leicht erhöhte Holzfeuchte des Bundtrams. Dem ersten Anschein nach wies der Bundtram bis auf einen kleinen, bereits abgeklungen Insektenbefall keine weiteren markanten Schädigungen auf. Die Messung RES01a wurde etwa in 20 cm Abstand zur direkt auf dem Bundtram aufgestellten Stuhlsäule im Achsenkreuzungspunkt (A-1) durchgeführt. Die Bohrrichtung verläuft dabei von der Bundtramoberkante zur Bundtramunterkante. Diese Bohrwiderstandsmessung wurde dabei gleich zweimal durchgeführt weil die erste Messung (RES 01a-1) ein derart schlechtes Ergebnis lieferte, dass dieses zunächst als Fehler interpretiert wurde. Eine zweite etwa 20 cm in Richtung Dachraum abgerückte Messung (RES 01a-2) bestätigte jedoch den Verdacht, dass dieser Bundtram im Bereich der Mauernische wesentliche Schädigungen aufweist.

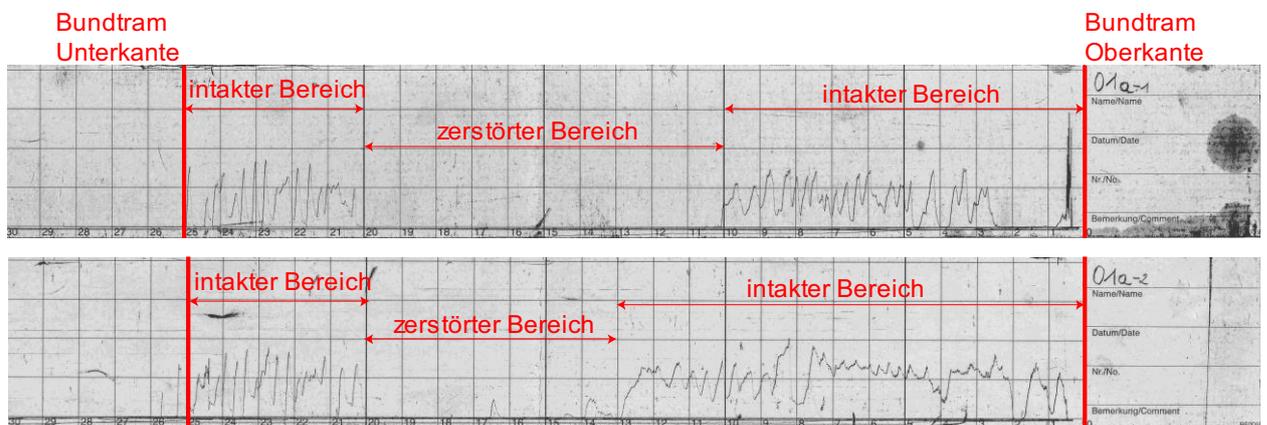


Abb. 5.95: Messstreifendiagramm RES 01a-1 und RES 01a-2

Der fehlende Bohrwiderstand ab etwa 10 cm Bohrtiefe macht deutlich, dass dieser Bundtram in seinem Kern völlig zerstört ist. Doch wie ist die Beschaffenheit des Bundtrams direkt unterhalb der Stuhlsäule? Hierfür wurde eine Bohrung direkt unterhalb der Stuhlsäule durchgeführt:

Bohrwiderstandsmessung RES 02

Um den Bereich direkt unterhalb der Stuhlsäule überprüfen zu können, wurde der geschädigte Bundtram direkt unter der Stuhlsäule, also von unten nach oben angebohrt. Das nachfolgende Messstreifenbild zeigt sehr deutlich, dass lediglich eine ca. 2 cm dicke „Außenschale“ um den vollständig zerstörten Bundtramquerschnitt intakt ist. Diese Schale konnte mit nur wenigen Hammerschlägen durchbrochen werden und das vollständig zerstörte Innere des Bundtrams „bröselte“ förmlich zu Boden. Die Resttragfähigkeit des Bundtrams ist demzufolge gleich Null. Dass die direkt auf diesem Bereich auflagernde Stuhlsäule noch nicht „abgesagt“ ist, zeigt, dass diese nur äußerst geringe Auflagerkräfte erfährt oder sich die Last bereits entsprechend auf andere Tragwerksauflager umgelagert hat.

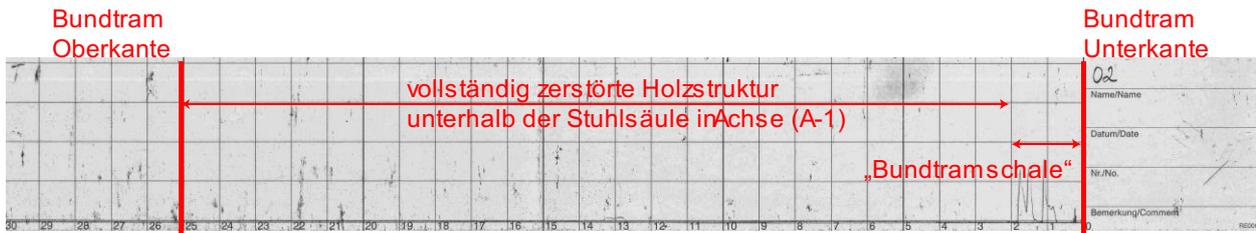


Abb. 5.96: Messstreifendiagramm RES 02



Abb. 5.97: Vermutlich intakter Bundtram im Achskreuzungspunkt (A-1)



Abb. 5.98: Vollständig zerstörter Auflagerbereich des Bundtrams

Bohrwiderstandsmessung RES 01b

Ogbleich die Beschaffenheit der Stuhlsäule hinsichtlich der Totalzerstörung des Bundtrams keine Rolle mehr spielt, da diese quasi ihres Auflagers beraubt wurde, wurde interesseshalber auch diese noch einer einzelnen Bohrwiiderstandsmessung im unmittelbaren Auflagerbereich unterzogen. Interessanterweise zeigte die Bohrwiiderstandsmessung eine völlig intakte Stuhlsäule an. Die Bohrung wurde mit Blickrichtung Westen bis zur vollständigen Durchhörterung der Stuhlsäule geführt.



Abb. 5.99: Messstreifendiagramm RES 01b

Am Messstreifen erkennt man auch den gleichbleibenden Verlauf im marknahen Bereich sehr gut. Der Stuhlsäulenquerschnitt wurde genau mittig angebohrt, wodurch man das radiale Wachstum des Baumes um den mittigen, weicheren Kern sehr deutlich erkennen kann. Die ausschlagenden Spitzen vor dem Kernbereich zeigen, wie bereits erwähnt, die Spätholzbereiche, die dazwischen abfallende Kurvenform repräsentiert den Widerstand des Frühholzes.

Bohrwiderstandsmessung RES 03 und RES 04

Natürlich wird man beim Fund eines derartigen Bundtramlagerschadens hellhörig. Deshalb wurde auch sogleich der benachbarte Bundtram in Achse 2 einer Bohrwiiderstandsmessung unterzogen. Da nach einer einfachen Hammerprüfung ein Schaden wie beim ersten Bundtram eigentlich schon vollständig ausgeschlossen werden konnte, sollten die beiden durchgeführten Bohrwiiderstandsmessungen an diesem Bauteil auch gleichzeitig dafür verwendet werden, um die Zapfengeometrie des Anschlusses Bundtram-Stuhlsäule zu ermitteln.

Die Messung RES 03 wurde von der Bundtramunterkante direkt unterhalb des vermeintlichen Zapfenloches angesetzt, um die Zapfenlochtiefe zu erkunden. Leider wurde bei dieser Bohrung das Zapfenhirnholz nicht getroffen, sondern vielmehr der seitliche Zapfenspielraum angebohrt, wodurch auch der ca. 70 mm lange widerstandslose Bereich erklärbar wird. Die Stuhlsäulenauflegerfläche, also der Holzquerschnitt um den Stuhlsäulenzapfen wurde nach vollständigem Durchbohren der Bundtramquerschnittshöhe von ca. 24,5 cm erreicht und zeichnet sich als parallele Linie im Diagramm ab. Derartige Parallelen entstehen immer dann, wenn ein Konstruktionsholz in Faserrichtung angebohrt wird, wodurch in logischer Konsequenz keine Jahrringe durchörtert werden. Der Bereich bis 17,5cm Bohrlänge zeigt einen gesunden Bundtramquerschnitt, wobei ab etwa 8 cm Bohrtiefe wiederum der marknahe Bereich zu erkennen ist.

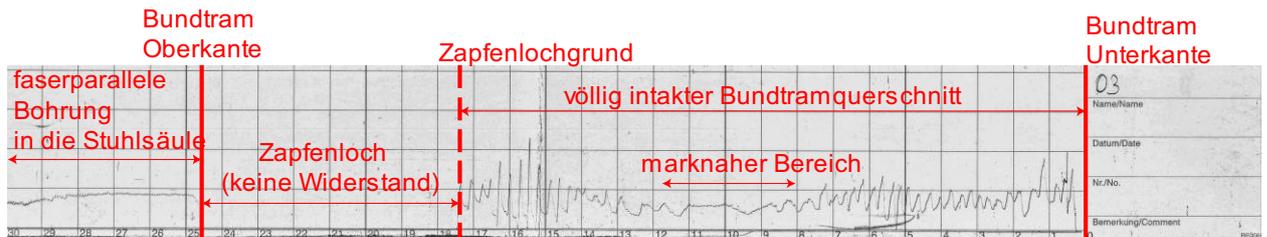


Abb. 5.100: Messstreifendiagramm RES 03

Eine weitere Messung (RES 04) sollte nun Aufschluss über die Zapfenbreite und über das Zapfenspiel geben. Das Zapfenloch wurde auf Anrieb getroffen und auch das Zapfenspiel (blau) mit etwa 8 mm beidseits zeichnet sich deutlich im Messdiagramm ab. Die Bundtramsubstanz ist in dieser gemessenen Stelle völlig intakt und weist keinerlei Schädigungen auf.

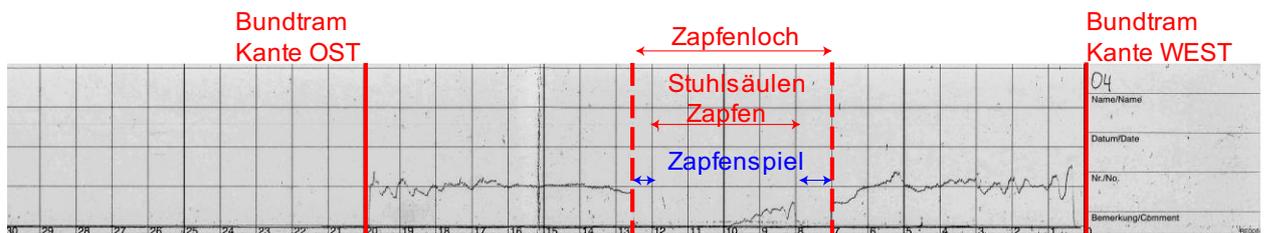


Abb. 5.101: Messstreifendiagramm RES 04



Abb. 5.102: Lage der Messung RES 03 zur Ermittlung der Zapfenlochtiefe des Stuhlsäulenanschlusses



Abb. 5.103: Lage der Messung RES 04 zur Ermittlung der Zapfenlochbreite des Stuhlsäulenanschlusses

Bohrwiderstandsmessung RES 05

Diese Bohrwiderstandsmessung wurde an jener Fußpfette des nordwestlichen Gratbereichs durchgeführt, an der auch schon die Holzfeuchtigkeitsmessung HFM 03 durchgeführt wurde, um zu überprüfen, ob die deutlich erkennbaren, jedoch inzwischen trockenen Feuchtigkeitsschlieren eine Schädigung der Fußpfette bewirkt haben. Die im normalen Wertebereich liegende Holzfeuchtemessung würde auf keine feuchtigkeitsinduzierte Schädigung des Fußfettenauflagers hindeuten. Die Bohrwiderstandsmessung wurde, wie schon bei der Messung RES 03 von der Unterkante aufwärts durchgeführt, um auch hier einen Einblick in den sehr aufwendig zurechtgeschnittenen Anschlussbereich des Strebenholzes zu erhalten. Nach Durchbohrung der Mittelpfette musste die Bohrung allerdings nach nur 25 mm Einbohrlänge in das Strebenholz abgebrochen werden, da die Bohrnadel merklich abgelenkt wurde. Wahrscheinlich wurde ein Astansatz des Strebenholzes angebohrt. Um die Bohrnadel nicht unnötig einer Biegebelastung auszusetzen, wurde die Messung beendet. Außerdem würde ein gekrümmte Bohrnadel auch die Messergebnisse verfälschen, da der Schaftmantelreibungsanteil stark zunimmt und dadurch nicht mehr der reine Bohrkopfwiderstand aufgezeichnet wird.

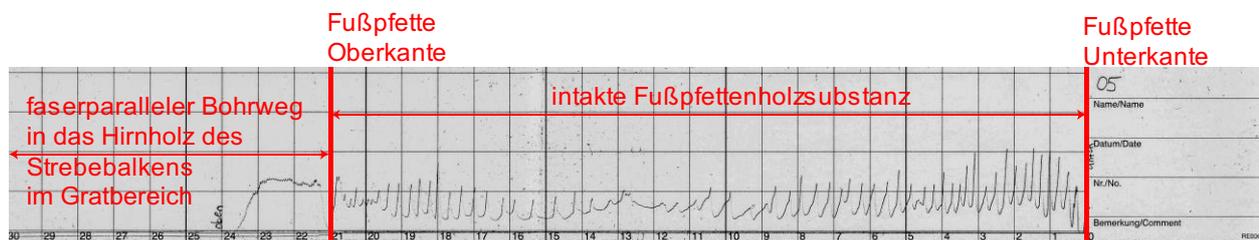


Abb. 5.104: Messstreifendiagramm RES 05



Abb. 5.105: Lage der Messung RES 05
Die aufgetrockneten Feuchtigkeitsschlieren der Fußpfette sind deutlich zu erkennen.



Abb. 5.106: Draufsicht auf Fußpfette der Kuppel mit Blickrichtung entlang des Strebenholzes

Bohrwiderstandsmessung RES 06 und RES 07

Zu diesen Bohrwiderstandsmessungen werden keine näheren Angaben gemacht. RES 06 diente der Überprüfung der Stuhlsäule an der Nordseite in VG-3 im Bereich des Kopfbandanschlusses. RES 07 wurde an der Mauerbank an der Südseite der Kuppel durchgeführt. Beide Widerstandsmessungen bestätigten eine intakte Holzsubstanz.

Bohrwiderstandsmessung RES 08 und RES 09

Am Bundtramkreuzungspunkt (B-4) wurde eine leicht klaffende Brustzapfenverbindung beim Übergang des diagonal liegenden Bundtrams in den kurzen Wechselbalken festgestellt. In diesem Fall wäre die Ermittlung der Geometrie der Zapfenverbindung auch mit einfacheren Hilfsmitteln, zum Beispiel durch Stochern mit einem dünnen Metallstreifen, möglich gewesen. Zu Anschauungszwecken wurde auch in diesem Fall eine Bohrwiderstandsmessung durchgeführt, um zu verdeutlichen, dass sich die Zapfenlochgeometrie im Wechselbalken, als auch des Brustzapfens des Bundtrams sehr gut im Bohrwiderstandsdiagramm erkennen lassen.

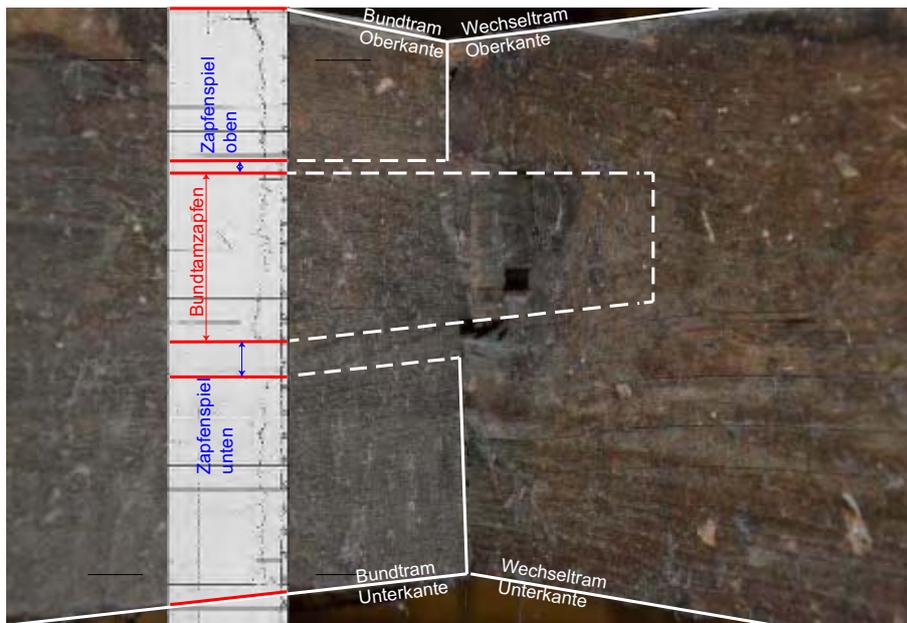


Abb. 5.107: Messstreifendiagramm RES 08

5-4 III – SCHADENSANALYSE

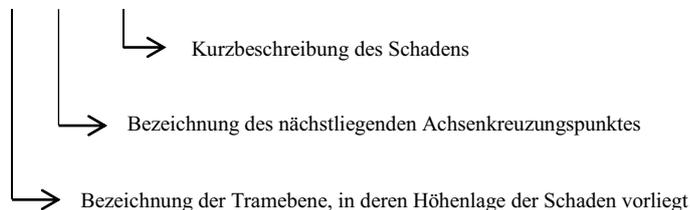
Dank der nahezu schadensfreien Beschaffenheit des Kuppeltragwerks kann dieses Kapitel (zum Glück für den Hauseigentümer) relativ kurz gehalten werden. Nachdem die geometrischen Abmessungen des Kuppeldaches mitsamt seinen Anschlussgeometrien vollständig aufgenommen wurden und damit eine sehr gute Grundlage für die weitere Vorgehensweise vorlag, wurde das Tragwerk in zwei weiteren Durchläufen auf allfällige Schadstellen erkundet. Neben einer genauen visuellen Überprüfung wurde auch mit einfachen Handwerkzeugen (Hammer, Lotschnur, Akkubohrmaschine,...) auf „akustischem“ Weg versucht, allfällige Schadstellen aufzuspüren und Fehlstellungen anzubohren oder bedeutsame Schiefstellungen zum Lot zu erkennen. Vermeintlich vorhandene Schäden, die von außen her nicht sofort einsehbar waren, wurden danach mit den, in Kapitel 3-4 genannten Spezialwerkzeugen genauer erkundet.

Diese Schadensanalyse bezieht sich in weiterer Folge ausschließlich auf die hölzerne Konstruktion der Hauptkuppel. Die Auladeckenkonstruktion, der Dachbereich über der Hauptstiege sowie die an die Hauptkuppel anschließenden Nebentrakte wurden nur überblicksmäßig kontrolliert. Auf den ersten Blick konnten auch in diesen Bereichen keine groben Schäden aufgefunden werden, die einen sofortigen Handlungsbedarf erfordern würden. Schäden, die an der Dachrinnenkonstruktion und an den Zierelementen im Traufenbereich der Kuppel festgestellt wurden, sind bereits in den jeweiligen Unterkapiteln zu Kapitel 5-3.3 entsprechend fotografisch dokumentiert und erläutert worden.

In den folgenden Ausführungen werden die wenigen vorhandene Schäden und problematischen Tragwerksbereiche beschrieben und versucht deren Ursachen zu deuten. Dabei wird, wie bereits aus dem Kapitel der Anschlussdetails bekannt, eine „Schadenskodierung“ eingeführt, die ein Lokalisieren der betroffenen Tragwerksbereiche vor Ort erleichtern soll.

Beispiel einer Schadenskodierung:

E0-(A-1): vollständig zerstörtes Bundtramauflager



5-4.1 SCHADEN E0-(A-1): VOLLSTÄNDIG ZERSTÖRTES BUNDRAMAUFLAGER

Dieser schadhafte Bereich ist bereits aus dem Kapitel 5-3.6.3 bekannt, da bei diesem Bundtramauflager mehrere Bohrwiderstandsmessungen vorgenommen wurden, die den katastrophalen Zustand des Auflagerbereichs bereits anhand der Bohrwiderstandskurven erkennen lassen. Dieser Schaden ist der einzige gröbere Schaden, der im Kuppeltragwerk aufgefunden wurde und ist glücklicherweise aufgrund seiner Lage im Tragwerk nicht unbedingt „existenzbedrohend“. Dennoch sollte der betroffene Bundtram zur Gänze ausgebaut und durch einen gleichwertigen, neuen Bundtram ersetzt werden. Aufgrund der guten Zugänglichkeit und der einfachen Totalausbaumöglichkeit des Bauteils stellt ein Austausch des gesamten Bundtrams sicherlich die kostengünstigste und einfachste Reparaturvariante dar. Im Zuge dieser Arbeiten sollte auch unbedingt die Mauerwerksnische kontrolliert werden, um die Ursache für den Schaden zu erheben. Möglicherweise resultiert der vollständig durchmorschte Bundtramkopf aus einem, über längeren Zeitraum andauernden Wasserzutritt in die Mauerwerksnische. Ursache hierfür war wahrscheinlich die bereits mehrfach angesprochene schadhafte Dacheindeckung gepaart mit einer Leckage in der mittlerweile erneuerten Traufenentwässerungsrinne. Da das Mauerwerk gegenwärtig völlig abgetrocknet zu sein scheint, liegt das Eintreten des Schadensereignisses wohl schon länger zurück und die Schadensursache wurde durch die Reparatur der Rinnen und Dachdeckung wahrscheinlich bereits ausgeschaltet. Dennoch sollte das Mauerwerksnischenlager zugunsten einer besseren Luftumspülung des Bundtrams etwas größer aufgebrochen und die Nische entsprechend mit einer bituminösen Abdichtungsbahn ausgekleidet werden. Dem Bundtram sollte dabei im Idealfall eine, auf diese Abdichtungsmaßnahme aufgelegte Hartholzunterlage als Widerlager dienen. Die Stuhlsäule, die, wie man an der Bohrwiderstandsmessung RES 02 (vgl. Abb. 5.96) erkennt, aus dem Feuchtezutritt in die Mauerwerksnische keinen Schaden genommen hat, kann im Tragwerk verbleiben und soll nach Neueinbau des Bundtrams wieder auf diesen aufgestellt werden. Dabei ist auf eine passgenaue Zapfenlochführung am neuen Bundtram zu achten.

Generell sei an dieser Stelle empfohlen, den Mauerwerksverputz, der teilweise bis an die Bundtramkanten geführt wurde, abzuschlagen und die Mauerwerksnischen bei Bedarf etwas zu vergrößern, um die Bundtramköpfe besser kontrollieren zu können. Außerdem wird dadurch ein Abtrocknen allfällig zutretender Feuchtigkeit wesentlich erleichtert.



Abb. 5.108: vollständig zerstörtes Bundtramauflager

links: Der Bundtram kann sehr einfach zur Gänze ausgebaut und ersetzt werden.

Mitte: mit wenigen Hammerschlägen konnte die „Bundtramschale“ durchbrochen werden...

rechts: ...und das Bundtraminnere „bröselte“ zu Boden. Totalschaden des Auflagerbereichs.

5-4.2 BEREICH E0-(D-2): INITIALSETZUNG DER EISENAUFHÄNGUNG

Dieser Bereich stellt keinen Schaden im eigentlichen Sinne dar. Allerdings erkennt man an diesem Beispiel einer Bundtramaufhängung recht gut, dass die Funktion des doppelten Hängewerks gegeben ist. Die leichte, in jeglicher Hinsicht unbedeutende Einschnürung an der Bundtramkante lässt in Kombination mit der Lochleibungspressung der Bolzendurchführung durch die Hängestuhlsäule erkennen, dass eine Initialsetzung des Tragwerks stattgefunden hat und die Stuhlsäule tatsächlich unter Zugnormalkraft steht. Bei größeren Belastungen besteht aufgrund des einzigen Durchsteckbolzens die Gefahr eines Aufreißens der Hängesäule entlang der Faser ausgehend vom Bolzenloch. Ebenso ist die Hängesäule auch nicht vor einem Lochleibungsversagen gefeit und der Durchsteckbolzen selbst könnte seiner Biege- und Scherbeanspruchung erliegen. Allerdings sind derartige Schadensszenarien höchst unwahrscheinlich, da aufgrund des Alters der Konstruktion bereits davon ausgegangen werden kann, dass die größte anfallende Knotenlast bereits aufgetreten ist und sozusagen „überstanden“ wurde.



Abb. 5.109: Durchsteckbolzen einer Eisenaufhängung durch die Hängestuhlsäule



Abb. 5.110: Deutlich erkennbare Kantenpressung am hochgehängten Bundtram

5-4.3 SCHADEN E0-(B-3): ABGEKLUNGENER INSEKTENBEFALL AN HILFSKONSTRUKTION

Der vorliegende Schaden an einer Hilfskonstruktion für die Aufstellung der Wartungstreppe und Wartungsstege betrifft zwar nicht die Primärtragstruktur selbst, lässt aber erkennen, dass für untergeordnete Zwecke deutlich schlechter verarbeitetes, weniger hochwertiges Konstruktionsholz verwendet wurde. Die Wartungsstege, mit Ausnahme der „Galerie“ an der Nordseite (erkennbar an der helleren Holzoberfläche in der nachfolgenden Abbildung) sind nämlich unmittelbar nach Fertigstellung der Kuppel, also ebenfalls 1887 eingebaut worden und damit ebenso alt wie die Kuppelkonstruktion selbst. Fehlendes Bohrmehl und das nicht Vorhandensein toter oder gar lebender holzerstörender Insekten lässt allerdings vermuten, dass der Insektenbefall am Querriegel der Stiegenunterkonstruktion bereits sehr lange abgeklungen ist. Ein Überschlag des Insektenbefalls auf Bauteile der Primärtragstruktur konnte nicht festgestellt werden. Dennoch sei an dieser Stelle empfohlen, die gesamte Wartungsstegkonstruktion im Kuppeltragwerk zu überprüfen und gegebenenfalls zu sanieren, da auch die hohe Aufstiegstreppe zum First der Kuppel beim Betreten der selbigen nicht mehr den sichersten Eindruck hinterlässt. Beispielsweise könnten die, nach Erachten des Verfassers dieser Masterarbeit zu gering dimensionierten Stiegenholme seitlich mit stärkeren Pfosten aufgedoppelt werden. Ebenso konnten in der Laufstegeebene einige schadhafte, mitunter bereits durchgetretene Pfosten aufgefunden werden, die bei nächster Gelegenheit zugunsten der Sicherheit ausgewechselt werden sollten. Die angesprochene, wahrscheinlich im Zuge der Dacheindeckungsarbeiten eingebaute neuere Wartungsgalerie entlang der Kuppelnordseite macht insgesamt einen guten Eindruck. Die Konstruktion dieser Galerie lagert auf Knaggenhölzern auf, die auf die liegenden Kuppelstuhlsäulen geschraubt wurden. Auch die zugehörige Geländerkonstruktion aus Brettern und Pfostenstielen macht einen durchaus soliden Gesamteindruck. Der unzureichend dimensionierte, insektenfraßgeschädigte Querbalken der Aufstiegstreppe soll ausgebaut und durch einen deutlich stärker dimensionierten Balken ersetzt werden.



Abb. 5.111: Wartungstreppe zum Aufstieg auf die neuere, nördliche Wartungsgalerie



Abb. 5.112: Abgeklungener Insektenbefall am Lagerbalken der Wartungstreppe

5-4.4 SCHADEN E1-(B-5): DEFEKTE TRAUFRINNE

Auch dieser aufgefundene Schaden betrifft nicht direkt die Kuppelkonstruktion, kann aber, falls er nicht behoben wird, negative Auswirkungen auf Mauerwerk, Auladeckenkonstruktion und die nahegelegenen Kuppeltragwerkselemente mit sich bringen. Die nachfolgenden fotografischen Aufnahmen zeigen die Unterkonstruktion der Traufendachrinnenkonstruktion an der östlichen Hauptkuppelflanke, die deutliche Feuchteschäden aufweist. Auch die Ursache für den ungewollten Wasserzutritt war schnell gefunden - eine schadhafte Lötstelle beim Übergang zweier Blechrinnelemente, die provisorisch mit ungeeignetem Silikondichtstoff von außen her „repariert“ wurde. Dieser Schaden in der Dachrinnenkonstruktion ist ehestmöglich von einem Bauspengler fachgerecht zu beheben, um weiteren Feuchtigkeitszutritt in den Kuppeldachraum und das darunterliegende Mauerwerk zu unterbinden.



Abb. 5.113: Erkennbarer Wasserschaden am Brettverschlag im östlichen Traufenbereich der Hauptkuppel



Abb. 5.114: Untersicht der Rinnenkonstruktion. Die liegenden Bretter sind bereits weitestgehend durchgemorscht.

5-4.5 BEREICH E1-(A-1): ALTHOLZVERWENDUNG

Repräsentativ für die vielen Kopfbänder in der Tramebene E1, für die Altholz zum Einsatz kam, soll dieses im nordwestlichen Gratbereich der Hauptkuppel dokumentiert werden. Wie man erkennt, wurde auch bei der prestigeträchtigen Hauptkuppel für untergeordnete Tragwerkselemente auf Altholz zurückgegriffen. Vermutlich handelt es sich bei diesen Kopfbandhölzern um einen „Sparrenverschnitt“ der bereits zuvor fertiggestellten Regeldachkonstruktionen, zumal die Kopfbandquerschnittsabmessungen als auch der Kerbeneinschnitt darauf hindeuten würden. Dieses Extrembeispiel wurde gewählt, um aufzuzeigen, dass einem derart geschwächten Kopfband in der Modellbildung keine Tragfähigkeit zugesprochen werden sollte. Allerdings kann die Kopfbandunterstützung der Kuppelfußpfette ohnehin als untergeordnet angesehen werden.



Abb. 5.115: Wiederverwerteter Sparrenverschnitt als Kopfbandkonstruktion der Hauptkuppel

5-4.6 BEREICH E1-(A-3): DIAGONALVERSTREBUNG

Am nördlichen Teil des Vollgespärres VG-3 wurde ein durchaus fragwürdiger Einbau einer einseitigen Diagonalverstrebung aufgefunden. Selbst bei näherer Betrachtung konnte nicht herausgefunden werden, warum dieses Konstruktionselement eingebaut wurde und welchen Zweck und Nutzen dieses erfüllen sollte, zumal für den Einbau keinerlei Anlass festgestellt werden konnte. Die Vollgespärrekonstruktion weist in diesem Bereich keinerlei Schäden auf. Auch eine Anbringung des Balkens zu Montagezwecken scheidet aufgrund der gänzlich anderen Holzfärbung im Vergleich zur umliegenden Tragstruktur aus. Die einseitige Zange wurde also definitiv nachträglich eingebaut. Der Einbau nimmt allerdings keinerlei negativen Einfluss auf die Tragstruktur und kann somit verbleiben.



Abb. 5.116: Sinnlos eingebaute, einseitige Diagonalverstrebung am Vollgespärre VG-3

5-4.7 SCHADEN E4-(B-4): SCHADHAFTHEIT BLECHEINDECKUNG DES LATERNENDACHES

Bei einer abschließenden Begehung des Dachtragwerkes am 28.04.2017, gemeinsam mit den Betreuern dieser Masterarbeit und einer Architektin des Studios FreyMüller aus Wien wurde ein geringfügiger Wasserzutritt im Traufenbereich des Laternendaches festgestellt. Die unmittelbare Schadstelle konnte aufgrund mangelnder Zugänglichkeit der Laternentraufe nicht festgestellt werden. Allerdings lassen herabfallende Wassertropfen, die als oberflächenfeuchter Bereich auf der Auladecke nahe der Beleuchtungslusteraufhängung sichtbar wurden, auf eine Schadstelle im lotrecht darüberliegenden Traufenbereich der Laterne schließen. Da dieser Schaden erst vor kurzem an einem Regentag bemerkt wurde, sollte beim nächsten Regenereignis versucht werden, die genaue Schadstelle aufzufinden und eine entsprechende Reparatur der wahrscheinlich schadhaften Blecheindeckung der Laterne vorzunehmen.



Abb. 5.117: Vermutete Schadstelle an der Blecheindeckung der Laterne

5-4.8 SONSTIGE FESTGESTELLTE BEREICHE

Anhand der geringen Anzahl der vorgefundenen Schäden, die sogar in den meisten Fällen nicht einmal das Tragwerk selbst betreffen, merkt man, dass sich die Hauptkuppel der „Alten Technik“ in einem sehr guten Zustand befindet und bis auf den Austausch des zerstörten Bundtrams (vgl. Kapitel 5-4.1) keinerlei Handlungsbedarf besteht. Ebenso erkennt man, dass die wenigen vorgefundenen Schäden allesamt nur in bzw. unterhalb der Tramebene E1 liegen. Auch dieser Umstand ist leicht erklärt, stellt doch die steile Dachneigung der Kuppel, vorausgesetzt die Dacheindeckung bleibt ohne Schaden, gewissermaßen eine Art Selbstschutz gegen anfallende Feuchtigkeit dar. Auch die Bauhöhe und der damit einhergehende große Kuppeldachraum ermöglichen eine konvektive Luftzirkulation und damit eine ausgezeichnete Belüftung aller Konstruktionshölzer. Dank der Geometrie der Kuppelform entfallen auch jene Bereiche, die in zahlreichen historischen Tragwerken größte Probleme bereiten - einspringende Ecken. Wie Masterarbeiten von MEISEL (vgl. [38; 39]) BUCHHÄUSL (vgl. [36]) oder ORTNER (vgl. [41]) zeigen, treten Schäden an älteren Dachkonstruktionen überwiegend im Traufenbereich von Dachhansen auf.

In diesem Kapitel soll abschließend eine Problematik angesprochen werden, die in zahlreichen unbenutzten Dachräumen anzutreffen ist - *Verschmutzung*. Leider werden unbenutzte Dachräume, insbesondere nach größeren Sanierungsarbeiten an der Dacheindeckung oder im unmittelbaren Umfeld des Dachraumes stattfindende Umbauarbeiten dazu genutzt, um Bauschutt zu deponieren beziehungsweise verbleiben herabgestürzte, gebrochene Dachziegel und Holzbauteile direkt am Dachboden. Abgesehen von der, in extremen Fällen bedenklichen Zusatzauflast auf die letzte Geschoßdecke (z. B.: Abbruchmaterial), besteht auch die Gefahr, dass saugfähige oder wasserleitende Materialien wie Dämmwolle, Papiersäcke von Verpackungen, Plastikfolien udgl. als Wasserspeicher bzw. -transporter dienen und mit ihnen in Kontakt stehende Konstruktionsteile wie z. B.: Mauerbänke kontinuierlich einer Durchfeuchtung aussetzen. Doch nicht nur vom Menschen hinterlassene Abfälle können großen Schaden an Konstruktionen anrichten. Auch tierische Abfälle wie beispielsweise Vogelkot, der sich in historischen Gebäuden „bergeweise“ auf horizontalliegenden Balken sammelt, dienen als feuchtigkeitsspendender Nährboden für holzzersetzende Pilze und Insekten. Zudem sollte auch die Gesundheitsgefährdung der für die mit der Wartung und Inspektion der Dachlandschaft betrauten Personen, die von diesen getrockneten tierischen Exkrementen durch unvermeidbare Staubbildung ausgeht, nicht unterschätzt werden. Auch in der Hauptkuppel der „Alten Technik“, die im Großen und Ganzen recht gut „aufgeräumt“ ist, wurden einige der oben beschriebenen „Hinterlassenschaften“ vorgefunden, die bei nächster Gelegenheit entfernt werden sollten:



Abb. 5.118: Verschmutzungen und tierische Exkremente im Hauptkuppeltragwerk der „Alten Technik“

5-4.9 SCHADENSKARTIERUNG

Die nachfolgenden Grundrissdarstellungen zeigen die Lage der vorgefundenen Schäden in den Tramebenen E0 und E1. In den darüber liegenden Tramlagen wurden bis auf wenige Verunreinigungen durch Vogelkot keine nennenswerten Schäden festgestellt und somit nicht dokumentiert.

Rot dargestellte Bereiche kennzeichnen jene Stellen des Tragwerkes, an denen Schäden aufgefunden werden konnten. Die Schadensbeschreibung erfolgte bereits im zugehörigen Kapitel. Ein entsprechender Sanierungsvorschlag wurde in diesem Kapitel bereits abgegeben.

Gelb dargestellte Bereiche kennzeichnen jene Stellen, in den zu vernachlässigende kleinere Schäden bzw. starke Verunreinigungen vorgefunden wurden. Es wird eine baldige Entfernung der Verunreinigungen empfohlen.

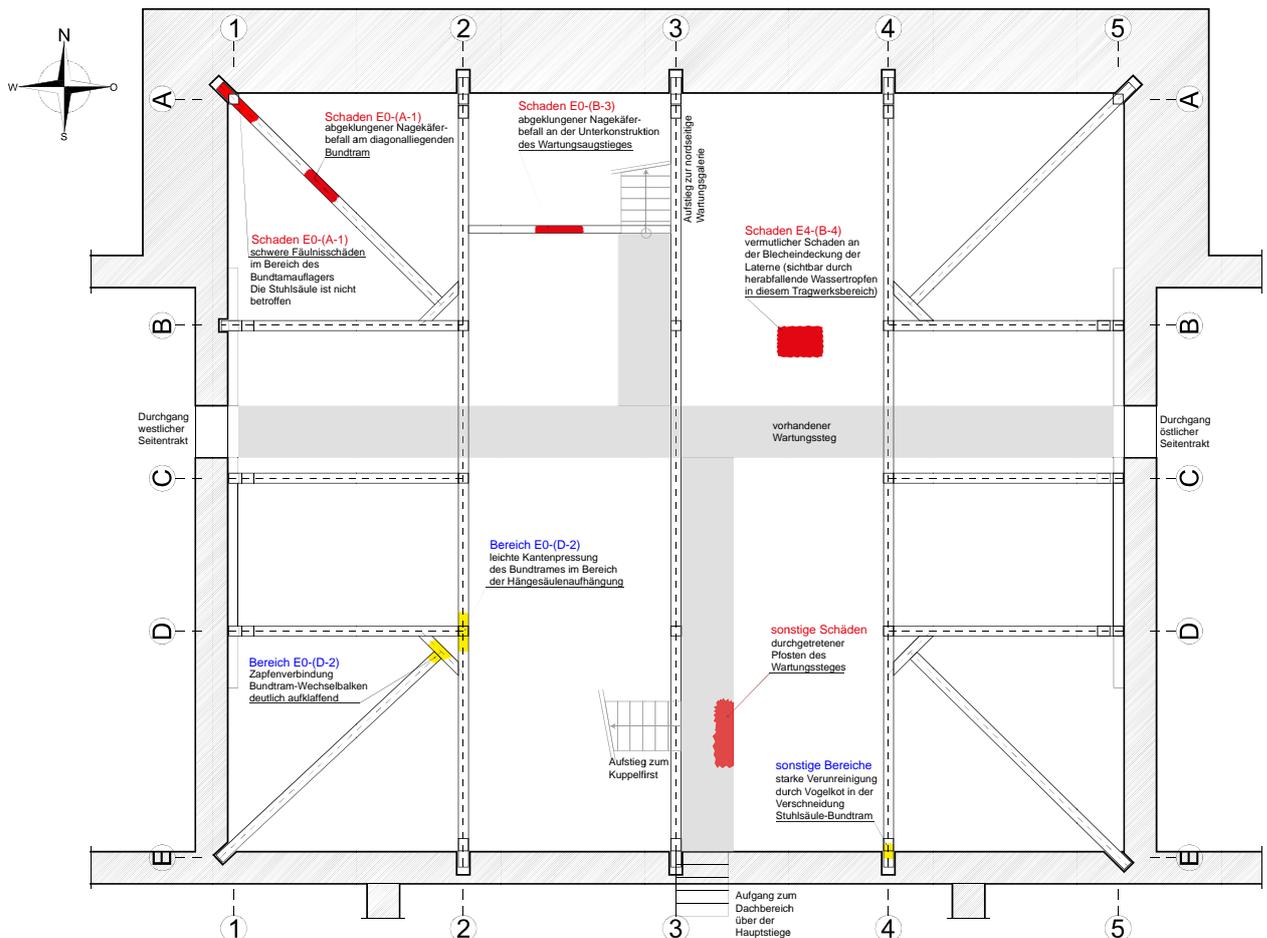


Abb. 5.119: Kartierung und Zuordnung der dokumentierten Schäden in der Bundtramlage (E0)

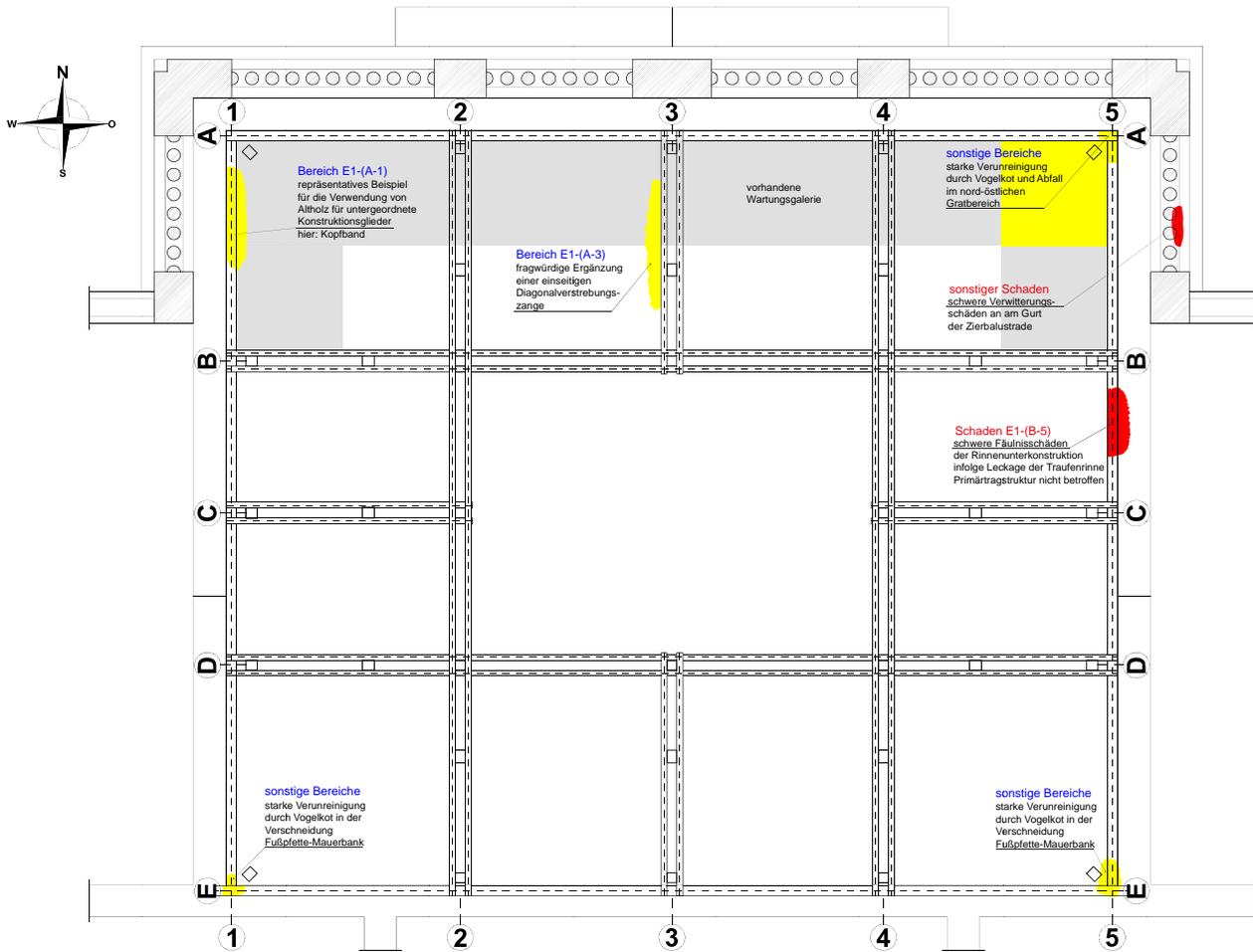


Abb. 5.120: Kartierung und Zuordnung der dokumentierten Schäden in der ersten Zangenbalkenlage (E1)

5-5 IV – BAUZUSTANDSANALYSE

Für die nachfolgende Bauzustandsanalyse soll das in Kapitel 3-4.4 vorgestellte, von MEISEL (vgl. [39]) entwickelte „Punktevergabesystem“ mit anschließender „Benotung“ des Hauptkuppeltragwerkes angewendet werden. Zur Erinnerung: Das Punktevergabeschema basiert auf der Vergabe von insgesamt fünf Punkten, aufgeteilt auf die drei Hauptbeurteilungskriterien „Schadensfolgeklasse“, „Tragsicherheit“ und „durchgeführte Probelastung“. Nachfolgend soll diese Beurteilung tabellarisch erfolgen, wobei zu den einzelnen vergebenen Punkten ein kurzes, begründendes Statement abgegeben wird:

Tab. 5.6: Zustandsbeurteilung der Hauptkuppel der „Alten Technik“

Schadensfolgeklasse	1	Die „Alte Technik“ ist das Hauptgebäude der Technischen Universität Graz. Es steht per Bescheid unter Denkmalschutz und wird regelmäßig von unzähligen Personen frequentiert. Gemäß Eurocode 0 sind Universitätsgebäude in ihrer Gesamtheit der höchsten Schadensfolgeklasse CC3 zuzuordnen.
Tragsicherheit		
[K1] statische Unbestimmtheit	0	Bei dem Kuppeldach handelt es sich um eine hochgradig statisch unbestimmte, räumliche Hängewerkkonstruktion. Der Konstruktion kann eine hohe Redundanz zugeschrieben werden.
[K2] Umbauten und Instandsetzungen	0	Das Kuppeltragwerk ist im Originalzustand vollständig erhalten. Die Konstruktion der neuen Wartungssteggalerie ruht auf Knaggenhölzern, die mit den liegenden Stuhlsäulen des Hängewerkes verschraubt wurden, beeinflusst aber das Tragvermögen der Kuppelkonstruktion aufgrund des geringen Galerieeigengewichtes nicht. Auch eine, aus fragwürdigem Grund montierte einseitige Zange (siehe Kapitel 5-4.6) nimmt keinen negativen Einfluss auf das Tragsystem
[K3] Holzerstörung	0,25	Die Primärtragstruktur ist in einem sehr guten Zustand. Es konnten keine Holzerstörungen infolge von Pilz- oder Insektenbefall festgestellt werden. Dennoch wird, aufgrund des aufgefundenen völlig zerstörten Bundtramkopfes im Achsenschnittpunkt (A-1) (siehe Kapitel 5-4.1) ein Viertelpunkt vergeben. Wie bereits im entsprechenden Kapitel beschrieben, sollte dieser Bundtram zu Gänze ausgetauscht werden, sodass die nordwestlichste Stuhlsäule der Konstruktion wieder ein solides Auflager findet. Da es sich bei diesem diagonal im Tragwerk liegenden Bundtram um einen doch untergeordneten Bauteil handelt, ist nicht davon auszugehen, dass der Totalausfall wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkonstruktion nimmt.
[K4] Verbindungs- oder Stabversagen	0	Es konnten weder Anschlussknoten noch Tragglieder aufgefunden werden, die infolge einer mechanischen Überbeanspruchung versagt haben.

[K5] konstruktive Mängel	0	Die Konstruktion weist keine nennenswerten Abweichungen vom Vertikallot auf. Die Anschlussknoten sind zimmermannsmäßig sehr sauber ausgeführt und zeigen nur an einzelnen Stellen im Tragwerk verschwindend kleine Klaffungen oder Fehlstellungen, die allesamt durch die Anatomie des Konstruktionsholzes (Quellen- und Schwinden) erklärbar sind und somit keine Anlass geben, aus ihnen einen Rückschluss auf konstruktive Mängel zu ziehen. Ebenso fehlen augenscheinliche Durchbiegungen oder Verwindungen der Konstruktionshölzer, die auf eine Fehlkonstruktion hindeuten könnten.
[K6] große Verformungen	0	siehe auch [K5] konstruktive Mängel. Vereinzelt größere Schwindrisse resultieren aus der Nachtrocknung des saftfrisch verzimmerten Konstruktionsholzes.
[K7] Verschlechterungstendenzen	0,5	Obgleich des guten Zustandes des Tragwerkes, müssen an dieser Stelle doch „Schadenspunkte“ vergeben werden, zumal die Leckage in der Traufenrinne (siehe Kapitel 5-4.4) im Falle eines größeren Regenereignisses einen nicht zu vernachlässigenden Wassereindrang, insbesondere zum Mauerwerk der Kuppelkonstruktion zulässt. Gepaart mit den Verunreinigungen in den Gratbereichen der Konstruktion kann dieses eintretende Niederschlagswasser langfristig zu einer Verschlechterung des Zustandes mauerwerksnaher Konstruktionsglieder und Verbindungen führen. Die defekte Rinnenkonstruktion sollte daher umgehend repariert und die stark verschmutzten Tragwerksbereiche entsprechend gesäubert werden.
[K8] weitere Kriterien	0	Alle Bauteile scheinen ausreichend, dimensioniert und in entsprechenden Abständen und Spannweiten verzimmert worden zu sein. Auch die bereits einmal sanierte Dacheindeckung weist keinerlei Schäden auf. Die vollverschaltete Dachhaut der Kuppelkonstruktion bietet den Sparrenpfosten eine ausreichende Fixierung und wirkt sich durchaus positiv (scheibenartige Aussteifungsfläche und Windlastverteilung) auf die Aussteifung der Kuppelkonstruktion aus.
Probebelastungen	0	Es wurden keine Probebelastungen durchgeführt.
ENDSUMME	1,75	Das Tragwerk befindet sich in einem guten bis sehr guten Zustand. Die bereits angesprochene Reparatur der Traufenrinne sollte im Rahmen der Dachgeschoßausbauarbeiten in den Regeltrakten noch dieses Jahr vorgenommen werden! Bei dieser Gelegenheit wird auch der Austausch des schadhaften Bundtrams sowie der durchgetretenen Wartungsstegpfosten empfohlen. Die Hauptkuppel sollte mindestens 1x jährlich einem Inspektions- und Wartungsdurchgang unterzogen werden.

5-6 V - PLANUNG DER BAULICHEN MASSNAHMEN

Der sehr gute Zustand der Hauptkuppel erfordert kaum Sanierungs- oder Ertüchtigungsmaßnahmen. Die wenigen, zutreffenden Reparaturmaßnahmen wie zum Beispiel der Austausch des schadhaften Bundtrams oder die Reparatur der östlichen Traufenrinnenkonstruktion wurden bereits in den zugehörigen Kapiteln eingehend beschrieben und mit entsprechenden Vorschlägen zur Reparatur versehen und sollen an dieser Stelle nicht nochmals wiederholt werden.

Es würde sich anbieten, diese zu treffenden Reparaturmaßnahmen an jene Unternehmer zu vergeben, die mit dem derzeit laufenden Dachausbau des östlichen und westlichen Haupttraktes für die neuen Räumlichkeiten der Fakultät für Architektur betraut sind. Die vorliegende Masterarbeit bietet hierfür eine hervorragende Grundlage für die Inangriffnahme der weiteren Planung dieser baulichen Reparaturmaßnahmen und darf mit Absprache des Verfassers gerne herangezogen werden.

5-7 VI - AUSFÜHRUNG

Die Ausführung der getroffenen Reparaturmaßnahmen sollte von einer fachlich geeigneten Person begleitet und entsprechend kontrolliert werden. Anregungen, wie eine sinnbringende begleitende Kontrolle zu erfolgen hat, wurde bereits sehr ausführlich in Kapitel 3-7 dieser Masterarbeit abgegeben.

5-8 VII - INSTANDHALTUNG

Die gesamte Dachlandschaft der „Alten Technik“ ist bereits sehr gut für eine regelmäßige Inspektion und Wartung des Dachtragwerkes ausgelegt, wie man sie in dieser Form leider nur in den wenigsten historisch wertvollen Dachwerken vorfindet. Beispielsweise sind alle Dachbereiche durch einen gut ausgebauten Wartungssteg mitsamt entsprechenden Aufstiegsanlagen sehr gut zugänglich. Ebenso sind alle Dachabschnitte, mit Ausnahme der kleineren Zierkuppeln über den Eckrisaliten, bereits mit einer elektrischen Beleuchtung ausgestattet, was eine einfache visuelle Inspektion auch weitestgehend ohne zusätzliche Beleuchtungsmittel erlaubt. Als Problematik sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Tragkonstruktion des Mitteltraktes („Bretterbinderkonstruktion“) und die doppelten Hängewerke des derzeit in Ausbau befindlichen Ost- und Westtraktes durch den Neueinbau von Trockenbauverkleidungen und Zwischensparrendämmung nur mehr sehr schwer vollumfänglich zu überprüfen sind. Offensichtlich wurde bei der Planung des neuen Dachgeschoßausbaus diese nicht minder wichtige letzte Stufe eines Instandsetzungsprojektes vollends außer Acht gelassen und es bleibt zu hoffen, dass nachträglich ein Konzept entwickelt wird, auch diese, hinter Trockenbauelementen „versteckten“ originalen Tragkonstruktionen einer regelmäßigen Inspektion und Wartung zuzuführen.

Die Dachlandschaft fordert aufgrund ihrer Größe sicherlich eine Unterteilung in mehrere Inspektions- und Wartungsabschnitte. Ein entsprechender Vorschlag für eine derartige Einteilung wurde bereits mit Abb. 3.13 in Kapitel 3-5.1 vorab abgegeben und sollte an dieser Stelle auch nochmals explizit erwähnt sein.

Um auf die Hauptkuppelkonstruktion zurückzukommen, so sollte dieser Dachlandschaftsabschnitt entsprechend dem Vorschlag in Kapitel 3-8 mindestens einmal jährlich einer „kleinen Inspektion“ unterzogen werden. Bei dieser Inspektion sollen auch die Dacheindeckung und die Traufenrinnenkonstruktion der Kuppel und der Laterne entsprechend mitkontrolliert werden. Die hierfür erforderlichen Wartungsstege und Zutrittsgalerien sind bereits vorhanden. Die zahlreichen, im gesamten Dachraum verlaufenden haustechnischen Lüftungsstränge, Kabelleitungen und Ventilatoren lassen vermuten, dass ohnehin ein Wartungskonzept für diese technischen Anlagen vorliegt. Es erscheint zweckmäßig, dieses vorhandene Wartungskonzept um den Inspektionsumfang für die Kuppeltragkonstruktion zu erweitern und entsprechend zu organisieren. Eine „große Inspektion“ sollte, nicht zuletzt wegen der Bedeutsamkeit des Bauwerks spätestens alle 10 Jahre durch einen entsprechend ausgebildeten Ingenieur in der beschriebenen Art und Weise erfolgen. Diesen Ingenieur zu finden, dürfte im Hinblick auf die Nutzung des Bauwerks als Technische Hochschule allerdings kein Problem darstellen.

KAPITEL 6

STATISCHE MODELLBILDUNG DER HAUPTKUPPEL

6-1 ZIEL DER MODELLBILDUNG

In diesem Kapitel soll das Hauptkuppeltragwerk einer statischen Analyse unterzogen werden. Bei der Modellbildung wird versucht, das tatsächliche mechanische Verhalten der Konstruktion mit Hilfe der Methoden der Baustatik als Modellsystem abzubilden. Jede baustatische Analyse gliedert sich dabei in drei Grundschriffe (vgl. [38]), die auch im Rahmen dieser Masterarbeit erarbeitet werden sollen:

- **Lastaufstellung und Einwirkungskombination**
 - festgelegt in Eurocode 0
 - festgelegt in Eurocode 1
- **Struktur- und Kenngrößenfeststellung**
 - Aufnahme des Baubestandes → Aufmaß,...
 - Probeentnahme → Kernbohrung, Ausbau von Tragwerksteilen,...
 - visuelle Sortierung → Sortierkriterien,...
 - Festigkeitszuordnung → z. B.: in Anlehnung an einschlägige Materialnormen (vgl. [92])
- **Generierung eines statischen Systems**
 - Reduktion → Trennung in Primär-, Sekundär-, Tertiärtragssystem,...
 - Querschnitte → Mittelwertbildung, Berücksichtigung der Konizität,...
 - Degeneration → Konzentration der Stabeigenschaften auf die Querschnittsachse,...
 - Systemabmessung → gemäß Eurocode 0 gilt: 95% Fraktilwerte der Naturmaßmesswerte
 - Stäbe → Biegestäbe, Fachwerkstäbe, Druckstäbe, Zugstäbe,...
 - Verbindungen → gelenkig, starr, nachgiebig, zentrisch, exzentrisch,...
 - Auflager → verschieblich, unverschieblich, eingespannt,...
 - Zerlegung in Teilsysteme → ebene Teilsysteme, räumliche Systeme, Volumenmodelle,...

Die nachfolgende baustatische Analyse der Hauptkuppelkonstruktion setzt sich zum Ziel, das Tragverhalten anhand eines geeigneten statischen Systems bestmöglich darzustellen und qualitative Schnittgrößen zu bestimmen. Die Lastaufstellungen und Einwirkungskombinationen werden auf Basis der aktuell gültigen Normenregelungen des Eurocodes generiert. Somit stellt diese statische Analyse gleichzeitig eine Bewertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mit Bezug zum heutigen Stand der Technik dar und zeigt dabei Stärken und Schwächen der Bestandskonstruktion auf. Aus den gewonnen Erkenntnissen zum Kräfte- und Verformungsverlauf können Detailnachweise an hochbelasteten Anschlussknotenpunkten geführt werden, um diese auf Tragreserven zu untersuchen.

Aufbauend auf den Berechnungsergebnissen der vorliegenden Tragstruktur, können weitere Planungsmaßnahmen hinsichtlich einer Nutzungs- und Tragwerksadaptierung getätigt werden. Laut Absprache mit den Betreuern dieser Masterarbeit soll in den kommenden Semestern im Rahmen einer Lehrveranstaltung an der Technischen Universität Graz ein Konzept erarbeitet werden, wie der derzeit ungenutzte Dachraum unterhalb der Hauptkuppel einer neuen Nutzung zugeführt werden könnte.

Um Instandsetzungsmaßnahmen oder Umbaumaßnahmen effizient und bestandsschonend durchführen zu können, ist die Kenntnis über das vorhandene Tragvermögen der Konstruktion unerlässlich. Erst wenn ein Berechnungsmodell gefunden wurde, das möglichst realitätsnahe Schnittgrößen und Verformungen liefert, kann darauf aufbauend mit einer möglichen Umstrukturierungsplanung des Tragwerks (z. B.: Ausbau von störenden vertikalen Traggliedern wie Stuhlsäulen, Hängesäulen, etc) begonnen werden. Die nachfolgenden Ausführungen dieses Kapitels zielen darauf ab, eben diese Kriterien bestmöglich zu erfüllen und eine verwertbare Grundlage für nachgeschaltete Überlegungen zu liefern.

6-2 BASIS DES BERECHNUNGSMODELLS

6-2.1 FESTLEGUNG DER SYSTEMGEOMETRIE UND QUERSCHNITTABMESSUNGEN

Die Tragwerksgeometrie des vorliegenden doppelten Hängewerks mit darüber angeordnetem „Sprengwerk“ und einer aufgesetzten Pfettendachkonstruktion (Laterne) kann den Planunterlagen im ANHANG B entnommen werden. Diese Planunterlagen wurden auf Grundlage des aufgenommenen Naturmaßes gezeichnet und mit einer entsprechenden Gespärre- und Achsennummerierung versehen. Diese Achsenbezeichnungen sollen zum einfacheren Verständnis auch auf das Berechnungsmodell übertragen werden. Die eingeführten Stabachsen der Bauteile sind dabei als ideal gerade zu verstehen und werden auch für das Berechnungsmodell als Vereinfachung übernommen. Das heißt, geringfügige Schiefstellungen und Abweichungen von der geraden Stabachse durch eingeprägte Verformungen bleiben unberücksichtigt. Da keinerlei größere Verformungen und Schiefstellungen im Kuppeltragwerk vorgefunden wurden, erscheint diese vereinfachte Annahme auch durchaus angebracht. Ebenso werden aufgenommene Schäden (vgl. Kapitel 5-4) in diesem idealisierten Berechnungsmodell vernachlässigt, zumal angenommen werden darf, dass diese Schäden durch geeignete zimmermannsmäßige Sanierungs- und Instandsetzungsmethoden behoben werden. Außerdem ist das Ausmaß der vorgefundenen Schäden vernachlässigbar gering und sie betreffen weitestgehend ohnehin nur Bauteile der Sekundärtragstruktur.

Die „Handhabung“ der geringfügig unterschiedlichen Querschnittsabmessungen gleichartiger Tragwerksteile wurde bereits in Kapitel 5-3.4.1 entsprechend diskutiert. Für das Berechnungsmodell werden demnach die aus den Referenzmessungen gemittelten Querschnitte verwendet. Es erscheint zweckmäßig die in Tab. 5.4 festgelegten Bauteilbezeichnungen auch für die Stabkennzeichnung im Berechnungsmodell zu verwenden. Die einzelnen Anschlussknoten können somit auch einfach über diese einheitliche Bezeichnung angesprochen und im Tragsystem verortet werden. Die Berechnung der Querschnittswerte wird automatisch vom Stabwerksprogramm vorgenommen. Deshalb können die in der Tragwerksberechnung verwendeten Querschnittswerte geringfügig von den in Tab. 5.4 angeführten Werten abweichen. Dies gilt insbesondere für zweiteilige Tragglieder wie Zangenpaare oder Diagonalverstreben. In der Modellbildung bleiben Querschnittsänderungen entlang der Bauteilachse (Konizität) unberücksichtigt. Diese getroffene Vereinfachung stützt sich darauf, dass mit Ausnahme der durchgehenden Hängestuhlsäulen, hier wurden am Stuhlsäulenfuß geringfügig größere Querschnittsabmessungen festgestellt als am Stuhlsäulenkopf, keine ausgeprägte Abholzigkeit an den Konstruktionsgliedern festgestellt wurde. Dies resultiert daraus, dass alle Konstruktionsglieder vierseitig maschinell gesägt wurden. Eine ausgeprägte Konizität findet man häufig in jenen historischen Dachtragwerken, deren Konstruktionsglieder entsprechend dem Stammwachstum „holzsparend“ behackt wurden. Ein Vorschlag, wie ausgeprägt konische Bauteile im Berechnungsmodell berücksichtigt werden können, findet sich beispielsweise in den Masterarbeiten von MEISEL (vgl. [38]) und BUCHHÄUSL (vgl. [36]).

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es in der Regel ausreichend ist, die globale Systemgeometrie auf Dezimeter genau zu erfassen. Viel bedeutsamer für aussagekräftige Berechnungsergebnisse ist die zentimetergenaue Erfassung von exzentrischen Stabanschlüssen und Krafteinleitungsbereichen. Je nach Anschlussdetail können diese Anschluss exzentrizitäten erheblichen Einfluss auf die Schnittgrößenverläufe nehmen. Dies gilt insbesondere für überwiegend normalkraftbeanspruchte Tragwerksteile, die durch den Stabachsenversatz im Kraftübertragungsbereich erhebliche zusätzliche Exzentrizitätsmomente bewirken.

Die baustatische Abbildung derartige Anschlussknoten ist auch gleichzeitig die große Herausforderung in der Modellbildung zimmermannsmäßiger Konstruktionen. Neben der notwendigen Bestimmung der Anschlussnachgiebigkeiten (vgl. Kapitel 6-4 und ANHANG D) kommt auch der richtigen Anordnung der Exzenterstäbe eine große Bedeutung zu. Globale Tragwerksverformungen sollten nach MEISEL (vgl. [39]) im statischen System immer dann berücksichtigt werden, wenn aufgrund der Schiefstellung und Verkrümmung einzelner Tragwerkskomponenten bedeutsame Abtriebskräfte zu erwarten sind.

6-2.2 FESTLEGUNG DER ART DER MODELLBILDUNG

Die Hauptkuppel soll in weiterer Folge als *Stabwerksmodell* berechnet werden. Diese Art der Modellbildung stellt derzeit den Stand der Technik dar und erlaubt mit verhältnismäßig geringem Aufwand eine gute Abbildung der globalen Schnittkräfte. Durch die Reduktion der Volumenkörper auf idealisierte Stäbe ist bei derartigen Modellen allerdings keine detaillierte Feststellung des Kraftflusses innerhalb eines Anschlussbereiches möglich. Demnach können viele nichtlineare Effekte wie Reibungskräfte, Querholzpressungen und Querspannungen zwischen den zimmermannsmäßig verbundenen Konstruktionshölzern in einem Stabmodell nur bedingt als idealisierte Federsteifigkeit erfasst werden. Die Modellbildung als räumliches Volumenmodell würde diesbezüglich Abhilfe schaffen, da es mit diesem möglich ist, das mechanische Tragverhalten von Holz-Holz-Verbindungen nahezu realitätsgetreu zu erfassen. Allerdings ist der Eingabe-, und Auswertungsbedarf derartiger Volumenmodelle mit einem enormen Aufwand verbunden. Außerdem stößt die derzeit verfügbare Rechen- und Speicherkapazität gängiger Computersysteme mit steigender Modellkomplexität schnell an ihre Grenzen. (vgl. [39]).

Für die Modellbildung als Stabwerksmodell unterscheidet man grundsätzlich zwischen räumlicher und ebener Abbildung. Nachfolgend sollen mögliche Modellbildungsvarianten allgemein kurz beschrieben und vorgestellt werden:

6-2.2.1 3D-Stabmodell mit aus Volumen-Modellen ermitteltem Verbindungsverhalten

Nachgiebigkeiten und Exzentrizitäten an Verbindungsknoten werden im Volumenmodell mit Hilfe der Volumen FEM-Methode ausgewertet, um diese parametrisiert in den Knotenpunkten des räumlichen Stabwerksmodells miteinfließen zu lassen.

6-2.2.2 räumliche Abbildung als Stabmodell

Dadurch ist es möglich, räumliche Strukturen realitätsnahe zu berechnen, ohne diese in 2D-Modelle zu extrahieren. Durch die räumliche Konzeptionierung bedarf der Stabwerksknotenmodellierung aufgrund der sechs vorliegenden Freiheitsgrade besonderer Aufmerksamkeit. Oftmals ist die Auswertung solcher Stabwerksmodelle ziemlich zeitraubend, zumal die systemgenerierten Berechnungsergebnisse in jedem Fall auf Plausibilität kontrolliert werden müssen. Beispielsweise ist sicherzustellen, ob das Stabwerksprogramm die maßgebenden Querschnittsnachweise im Verbindungsknotenschnitt zweier Stäbe, die mit zimmermannsmäßigen Zapfenverbindungen gelöst sind, auch tatsächlich mit den aus den Einschnitten resultierenden Nettoquerschnitten geführt hat. Obwohl die hierfür erforderlichen Algorithmen in die Softwarepakete implementiert sind, entscheiden oft Anwenderfehler darüber, wie genau die Bemessungsergebnisse ausfallen.

6-2.2.3 räumliche Abbildung mit ausgewählten Schnittkräften

Zweidimensionale Teilsysteme werden durch Kopplungsparameter miteinander verbunden. Insofern alle Tragwirkungen der Konstruktionselemente in Tragwerkslängsrichtung bekannt sind, können mit dieser Methode mit verhältnismäßig geringem Aufwand zweckdienliche genaue Ergebnisse in der Gespärreebene errechnet werden. Schnittkräfte normal zu der betrachteten Gespärreebene werden allerdings nicht ausgegeben. Wird diese Methode beispielsweise für die Abbildung einer Pfette angewendet, so sind drei zu betrachtende Teilsysteme notwendig, um die Kopplungsparameter zu bestimmen:

- Biegung um die schwache Achse
- Biegung um die starke Achse
- Torsion der Pfette

6-2.2.4 ebene Abbildung mit virtuellen Querschnitten

Durch die Festlegung „virtueller“ Querschnittsbreiten werden die Regelbereiche einfacher räumlicher Tragwerke zu einem ebenen System „zusammengeschoben“. Dieses ebene System wird anschließend entsprechend der Lasteinflussfläche zufolge der Hauptgespärreabstände belastet. Vernachlässigt werden bei dieser Methode allerdings die Auswirkungen auf die Stuhlwände (beim reinen Sparrendach hingegen sind die Ergebnisse sehr brauchbar), die bei dieser Modellbildung als biegesteif angenommen werden. In Ergänzung des Systems mit federsteifen Auflagern können jedoch Nachgiebigkeiten dieser Stuhlwände und Kehlbalckenanschlüsse schätzungsweise simuliert werden.

6-2.2.5 ebene Abbildung mit Federn und Gelenksteifigkeiten

Durch den Einbau von nachgiebigen Auflagern kann die Koppelung der Teiltragwerke annähernd berücksichtigt werden. Diese Koppelungssteifigkeiten müssen allerdings lastfallweise betrachtet werden, was zu einem nichtlinearen Steifigkeitsverlauf führt und die exakte Bestimmung zunehmend erschwert. Oftmals ist daher die Modellbildung von räumlichen Teilsystemen mit mehreren, gleichzeitig mitragenden Konstruktionselementen, vor allem bei großzügig ausgesteiften, räumlichen Tragwerken, nur begrenzt möglich.

6-2.2.6 ebene Abbildung

Dieses Modell, das passable Schnittkraftverläufe liefert, ist aufgrund des geringen Eingabe- und Auswertungsaufwandes sowie der einfachen Nachvollziehbarkeit der Berechnungsergebnisse für einfache Sparren- und Kehlbalckendachsysteme und statisch bestimmte Pfettendachsysteme gut geeignet. Bei komplexen Dachtragwerken mit größtenteils räumlicher Lastabtragung liefert dieses sehr einfache Verfahren jedoch sehr stark abweichende Schnittgrößen und Anschlussresultate.

6-2.3 FESTLEGUNG DES KOORDINATENSYSTEMS

Das festgelegte globale Koordinatensystem für die Systemberechnung wird in der nachfolgenden Illustration dargestellt. Der Ursprung des Koordinatensystems wird dabei im Achsenschnittpunkt 3-C in der Tramlagenebene E0 festgelegt.

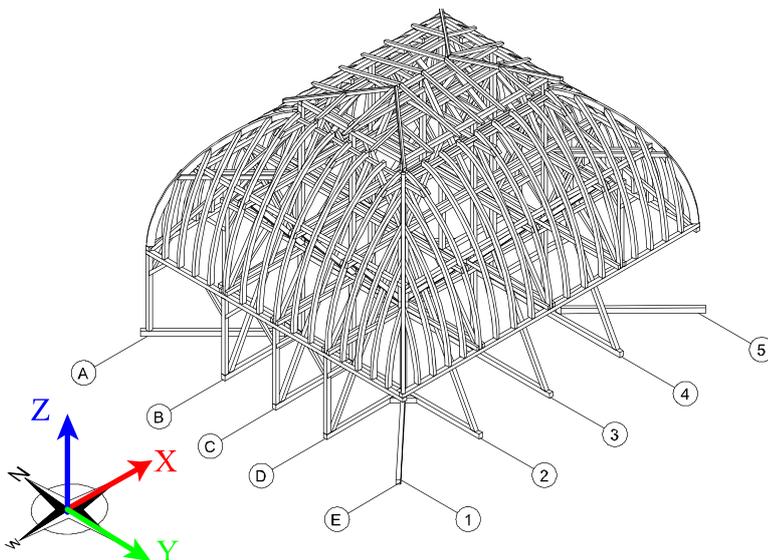


Abb. 6.1: Gewähltes globales Koordinatensystem

Die lokalen Stabachsensysteme sollen in weiterer Folge dem bewährten „Rechtssystem“ folgen und werden dementsprechend direkt im Stabwerksprogramm definiert.

6-2.4 FESTLEGUNG ZUR MODELLBILDUNG ZIMMERMANNSMÄSSIGER VERBINDUNGEN

Alle zimmermannsmäßigen Verbindungen werden, der Empfehlung von MÖNCK (vgl. [16]) folgend, gelenkig ausgebildet, das heißt, die Verbindungen in der Hauptkuppel können nur Normalkräfte (N) und Querkkräfte (V_y, V_z) übertragen. Je nach Verschnitt der Konstruktionshölzer ist auch eine Übertragung von geringen Torsionsmomenten (M_T) möglich (z. B.: Zapfenverbindungen). Eine Weiterleitung von Biegemomenten (M_y, M_z) allerdings ist infolge der oftmals geringen Einspannwirkung der zimmermannmäßigen Verbindungen meistens nicht oder nur in geringem Maß möglich und wird in weiterer Folge vernachlässigt.

Eine Ausnahme von dieser Regel stellen beispielsweise präzise hergestellte Weißschwanzverbindungen mit langen Überblattungen dar, wie diese häufig bei liegenden Stühlen zur Anwendung kommen. Bei derartigen Verbindungen ist eine Berücksichtigung einer nachgiebigen Drehfedersteifigkeit nach der Meinung von MEISEL (vgl. [39]) durchaus gerechtfertigt. Da im vorliegenden Tragwerk allerdings keine vergleichbaren Verbindungen zur Anwendung gekommen sind, werden alle zimmermannsmäßigen Verbindungen als Vollgelenk gepaart mit entsprechenden Federsteifigkeitswerten für die Längs- und Querkraftübertragung modelliert. Die Anschlussnachgiebigkeiten werden durch die Einführung dieser Knotengelenksfedern berücksichtigt, deren Federsteifigkeitswerte in Kapitel 6-4 der vorliegenden Masterarbeit ermittelt werden. Die angesetzten Federsteifigkeiten sind in den Tabellen Tab. 6.6 und Tab. 6.7 zusammengefasst. Die Namensgebung der einzelnen Anschlusssteifigkeiten im Stabwerksmodell folgt dabei den in diesen Tabellen verwendeten Bezeichnungen.



Abb. 6.2: *Nachgiebige Einspannwirkung eines angeblatteten Kopfbandes bei einem liegenden Stuhl [36]*

6-2.5 FESTLEGUNG ZUR MODELLBILDUNG VON ANSCHLUSSEXZENTRIZITÄTEN

Um die Anschlusskonzentritäten erfassen zu können, werden starre Exzenterstäbe (=gewichtlose, biege-, schub- und dehnstarre Koppelstäbe) in der Modellbildung verwendet. Die Exzenterstäbe kommen immer dort zum Einsatz, wo sich die Systemlinien der einzelnen Bauteile nicht in einem Punkt schneiden, diese aber gekoppelt werden müssen. Insbesondere bei zimmermannsmäßigen Verbindungsknoten kommt es häufig vor, dass der Schwerpunkt der Kraftübertragungsfläche nicht mit der Systemlinie des Bauteils zusammenfällt. Je nach Art des Anschlusses können diese Ausmittigkeiten einen bedeutenden Einfluss auf die Schnittgrößen nehmen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die zu übertragenden Normalkräfte und die Anschlusskonzentritäten so groß sind, dass sich daraus große zusätzliche Exzenterbiegemomente ergeben. (vgl. [37]) Die Bedeutung hinsichtlich der Verwendung von Exzenterstäben in der Modellbildung wurde bereits in einer von BUCHHÄUSL (vgl. [36]) an der Technischen Universität Graz eingereichten Masterarbeit am Beispiel des Tragwerks des Stiftes Zwettl (Niederösterreich) gezeigt. Hinsichtlich des Nutzens von Exzentern in der Modellbildung des Tragwerks können zwei Exzenterformen unterschieden werden (vgl. [23]):

Systemlinienexzenter

Diese Exzenterstäbe berücksichtigen einen Sprung in der Systemlinie des Bauteils und werden an beide Systemlinienenden starr angeschlossen. Diese Starrkoppelung erlaubt demzufolge eine schlüssige Kraftweiterleitung zwischen den beiden Stabachsen und bewirkt, je nach Exzenterstablänge und Stabnormalkraft, zusätzliche Exzentermomente in den betroffenen Tragwerksteilen. Als Beispiel, wo die Anwendung von Systemlinienexzentern zweckmäßig ist, können Ausklinkungen in Bauteilen genannt werden. Die Einschnitte eines ausgeklinkten Bauteils verursachen einen Sprung in der Systemlinie im Bereich der Querschnittseinschnitte. Um die Verbindung zwischen diesen abgestuften Systemlinien wiederherzustellen, werden Systemlinienexzenter verwendet.

Kraftübertragungsexzenter

Kraftübertragungsexzenter koppeln zwei Systemlinien miteinander, wobei der Anschluss an Systemlinie 1 starr und der Anschluss an Systemlinie 2 gelenkig erfolgt. Kraftübertragungsexzenter können zusätzlich mit Nichtlinearitäten modelliert werden. Beispielsweise können die Gelenkbedingungen am Anschluss zur Systemlinie 2 so gewählt werden, dass der Exzenter nur Druckkräfte übertragen kann und die Verbindung beim Auftreten einer allfälligen Zugkraft ausfällt. Kraftübertragungsexzenter kommen wesentlich häufiger zur Anwendung als Systemlinienexzenter und werden deshalb häufig einfach nur als „Exzenter“ bezeichnet.

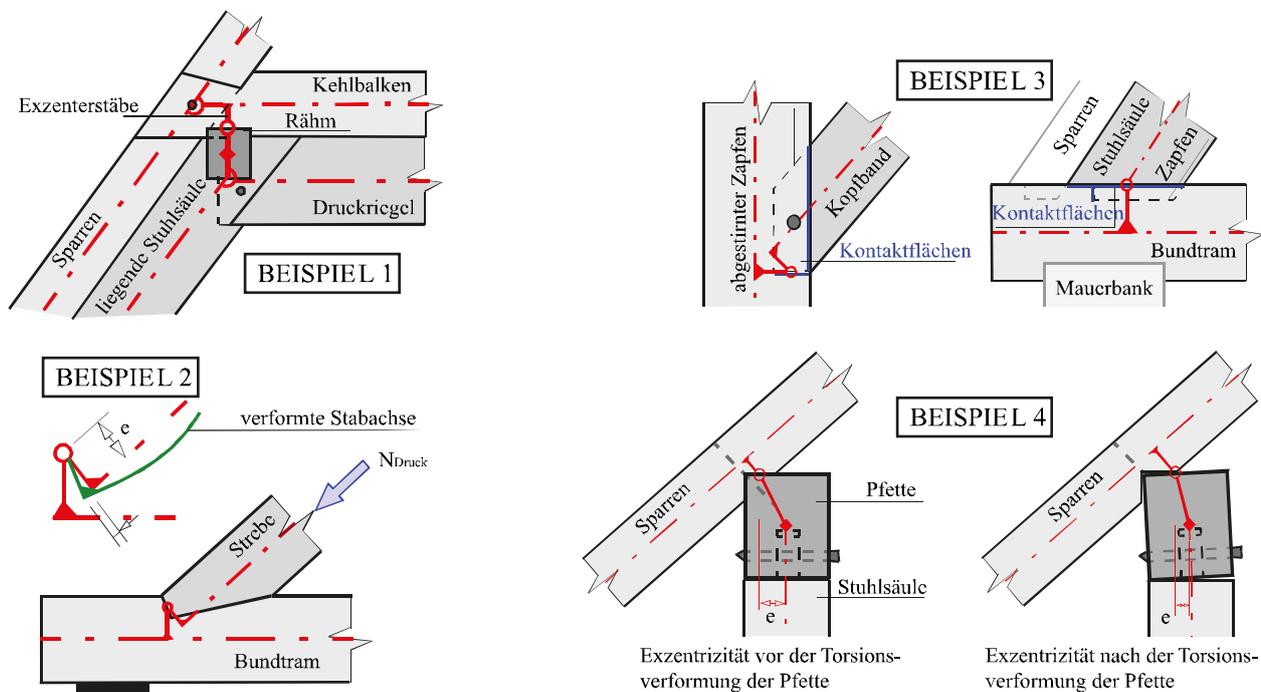


Abb. 6.3: Anwendungsmöglichkeiten und Anordnung von Exzenterstäben [39]

Hinsichtlich der Anordnung und Verwendung von Exzenterstäben sollten einige Grundsätze beachtet werden. Diese Empfehlungen wurden aus den bereits mehrfach zitierten Quellen zusammengetragen.

- **Exzenter sind abhängig vom Anschlussdetail!** Die Lage, Länge und Anordnung des Exzenters ist abhängig von der Anschlussgeometrie und ist für alle Anschlüsse gesondert zu ermitteln. (vgl. Abb. 6.3-Beispiel 1)
- **Exzenter rechtwinklig anschließen!** Grundsätzlich sollten Exzenterstäbe an zumindest eine Stabachse rechtwinklig angeschlossen werden. „Willkürlich“ geneigte Exzenter führen nicht zu den gewünschten Berechnungsergebnissen und erschweren die Nachverfolgung des Kraftflusses. (vgl. Abb. 6.3-Beispiel 2)
- **Achtung bei mehreren Kontaktflächen!** Bei Verbindungen, die über mehrere Krafteinleitungsflächen verfügen (z. B.: abgestirnte Zapfenverbindungen, doppelte Versatzverbindungen,...) ist eine sinnvolle Anordnung von Exzenterstäben nur bedingt möglich. Es wird empfohlen, jeweils einen Exzenter von der Stabachse bis zum Mittelpunkt derjenigen Kontaktfläche zu führen, die die größeren Kräfte überträgt. Die Anordnung weiterer Exzenter zu den verbleibenden Kraftübertragungsmittelflächenmittelpunkten erscheint nicht zuletzt wegen der Unübersichtlichkeit des Kraftflusses wenig sinnvoll. (vgl. Abb. 6.3-Beispiel 3)
- **Mehr als zwei Exzenter innerhalb eines Anschlusses vermeiden!** Durch die Anordnung von mehr als zwei Exzentern pro Anschluss wird die Kontrolle der Ergebnisse erschwert und eine Nachvollziehbarkeit des Kraftflusses ist quasi nicht mehr möglich. Vor allem bei komplexen Anschlussgeometrien stößt die Modellbildung als Stabtragwerk an ihre Grenzen.

- **Achtung bei Anschlüssen mit Druck- und Zugbeanspruchung!** Derartige Verbindungen würden für die korrekte Abbildung für jede Kraftübertragungsfläche zwei Exzenterstäbe pro Bauteil erfordern (siehe auch vorangegangener Punkt). Bei der Exzenteranordnung ist in solchen Fällen unbedingt darauf zu achten, dass durch die Anordnung mehrerer Exzenterstäbe eine „Einspannwirkung“ generiert werden könnte, obwohl der Anschluss gelenkig zu modellieren wäre.
- **Die Lage der Krafteinleitungsflächen kann verformungsabhängig sein!** Die Lage der Krafteinleitungsfläche eines Anschlusses kann sich infolge einer Tragwerksverformung ändern. Beispielsweise erfährt eine Pfette aufgrund der exzentrischen Lasteinleitung durch den aufgeklauten Sparren eine Torsionsbeanspruchung. In Folge dieses Torsionsmoments wird die Pfette zur Sparrenklaue hin verdreht, was wiederum mit einer Verringerung der Exzentrizität einhergeht. (vgl. Abb. 6.3-Beispiel 4)

Exzenterstäbe, die für die Modellierung der Anschlüsse der Hauptkuppelkonstruktion eingeführt wurden, werden nicht explizit anhand von Detailskizzen hervorgehoben, wie dies beispielsweise in den Masterarbeiten von BUCHHÄUSL (vgl. [36]) und KIRCHLER (vgl. [37]) gehandhabt wurde. Die verwendeten Starrstäbe zur Berücksichtigung der Anschluss exzentrizitäten sind in den Ausdrucksprotokollen des verwendeten Stabwerkberechnungsprogrammes als „rote Strichlinien“ erkennbar.

Abschließend sei an dieser Stelle angemerkt, dass die „Stabsteifigkeit“ der Exzenterstäbe nicht zu hoch angesetzt werden darf, da es ansonsten zu numerischen Rechenfehlern und folglich zum Abbruch des Rechenprozesses innerhalb des Programmrechenkernes kommen kann. Nicht alle Stabwerksprogramme verfügen über die Möglichkeit einen, an die Systemsteifigkeit angepassten „Kopplungstyp“ für die starre Koppelung zweier Systemlinien auszuwählen. In derartigen Softwareprogrammen kann diesem Problem beispielsweise so Abhilfe geschafft werden, dass einem eigens generierten „Dummy-Stabquerschnitt“ (z. B.: Rechteckquerschnitt mit 10 mm Seitenlänge) ein gewichtloses (Wichte = 0 kN/m³), um den Faktor 100 steiferes Material als das Tragwerksmaterial zugewiesen wird. Für die angestellten Berechnungen am Hauptkuppeltragwerk der „Alten Technik“ wird das Programmsystem *Dlubal RFEM/RSTAB* in der Programmversion 5.06/8.06 verwendet. Dieses Stabwerks- und Finite-Elemente-Programm erlaubt die Auswahl verschiedener Stabtypen, die mit verschiedenen Eigenschaften behaftet sind. Für die Modellbildung der Exzenterstäbe wurde der Stabtyp „Starrstab“ verwendet, da dieser die größtmögliche Flexibilität (Gelenkfedern und -nichtlinearitäten) hinsichtlich der Koppelungseinstellungen bietet. Natürlich können auch Stäbe vom Typ „Kopplung“, welche quasi dem Typ „Starrstab“ mit vordefinierten Kopplungsbedingungen entsprechen, verwendet werden. Der Vorteil der „Kopplung“ im Vergleich zum „Starrstab“ liegt darin, dass die Steifigkeiten der Kopplungsstäbe modellabhängig berechnet werden und somit kaum numerische Rechenprobleme auftreten. Für den Stabtyp „Starrstab“ werden laut der Bedienungsanleitung zu *Dlubal RFEM/RSTAB* folgende Steifigkeiten angesetzt:

Stabtyp	Kurzbeschreibung
Balkenstab	Biegesteifer Stab, der alle Schnittgrößen übertragen kann
Starrstab	Kopplungsstab mit starrer Steifigkeit
Rippe	Unterzug mit Berücksichtigung der mitwirkenden Plattenbreite
Fachwerkstab	Balkenstab mit Momentengelenken an beiden Enden
Fachwerkstab (nur N)	Stab, der nur die Steifigkeit $E \cdot A$ besitzt
Zugstab	Fachwerkstab (nur N), der bei einer Druckkraft ausfällt
Druckstab	Fachwerkstab (nur N), der bei einer Zugkraft ausfällt
Knickstab	Fachwerkstab (nur N), der bei einer Druckkraft $> N_c$ ausfällt
Seilstab	Stab, der nur Zugkräfte überträgt. Die Berechnung erfolgt nach Theorie III. Ordnung mit großen Verformungen
Seil an Scheiben	Stab auf einer Polylinie, der sich nur in Längsrichtung verschieben kann und nur Zugkräfte aufnimmt (Flaschenzug)
Ergebnisstab	Stab zur Integration von Flächen-, Volumen- oder Stabergebnissen
Steifigkeiten	Stab mit benutzerdefinierten Steifigkeiten
Kopplung Fest-Fest	Starre Kopplung mit beidseits biegesteifen Anschlüssen
Kopplung Fest-Gelenk	Starre Kopplung mit biegesteifem Anschluss am Anfang und gelenkigem Anschluss am Ende
Kopplung Gelenk-Gelenk	Starre Kopplung mit beidseits gelenkigen Anschlüssen (nur Normal- und Querkräfte werden übertragen, keine Momente)
Kopplung Gelenk-Fest	Starre Kopplung mit gelenkigem Anschluss am Anfang und biegesteifem Anschluss am Ende
Feder	Stab mit Federsteifigkeit und definierbaren Wirkungsbereichen und Dämpfungskoeffizienten
Nullstab	Stab, der in der Berechnung nicht berücksichtigt wird

Abb. 6.4: *Auswählbare Stabtypen in Dlubal RFEM [4]*

- Längs- und Torsionssteifigkeit: $EA = G \cdot I_T = 10^{13} \cdot I_{\text{Stab}}$
- Biegesteifigkeit: $EI = 10^{13} \cdot I_{\text{Stab}}^3$
- Schubsteifigkeit: $G_{Ay} = G_{Az} = 10^{16} \cdot I_{\text{Stab}}^3$

I_{Stab} ...Systemlänge des Stabes

6-2.6 FESTLEGUNG ZUR MODELLBILDUNG VON TRAGWERKSAUFLAGERN

Die Bundträme des Hauptkuppeltragwerks lagern in ausgesparten Mauerwerksnischen „frei“ auf. Mit Ausnahme der Kuppelsüdseite lagern die Kuppelsparren auf einer umlaufenden, kopfbandgestützten Fußfette auf, welche die anfallenden Lasten durch Pfettenbiegung aufnimmt. An der südlichen Kuppelseite finden die Kuppelsparren aufgrund des vorhandenen Mauerwerkhochzugs eine kontinuierlich aufgelagerte Mauerbank als Lagerschwelle vor.

Die Kraftabtragung der Bundträme bzw. der Mauerbank in die darunter liegende Ziegelmauerwerkstruktur erfolgt über vertikale Druckkräfte. Infolge dieser Druckkräfte werden Reibungskräfte für die Lastübertragung in horizontaler Richtung aktiviert, deren Größe von der Rauigkeit des Mauersteines und des Holzbauteiles abhängt. Die vertikalen Auflagerfesthaltungen wurden im Stabtragwerksprogramm als „starr“ (=in globaler Z-Richtung) definiert. Eine genaue Untersuchung der horizontalen Bettung, resultierend aus der angesprochenen Mauerwerk-Bundtram-Reibungskomponente und der Steifigkeit des Mauerwerkes wurde im Rahmen dieser Masterarbeit nicht durchgeführt. Vielmehr wurde die horizontale Verschiebungssteifigkeit des Auflagers (in globale X- bzw. Y-Richtung) mithilfe des Stabtragwerkprogrammes iterativ ermittelt. Die horizontale Federsteifigkeit des Auflagers wurde dabei so lange erhöht, bis die resultierende horizontale Kraft aus dem Eigengewichtslastfall (=LF 101 - Konstruktionseigengewicht und Dachaufbau) zu 97% von den Bundträmen aufgenommen wurde. Dieser Ansatz wurde beispielsweise für das Referenzmodell der Forschungsarbeit HOLZ-HOLZ-Verbindungen (vgl. [23]) des Instituts für Holzbau und Holztechnologie als gute Näherungsmethode aufgegriffen. Als max. zulässige Auflagerverschiebung wurde der Grenzwert für diese iterative Federsteifigkeitsermittlung folgendermaßen festgelegt:

$$u_{\text{Bundtramaufleger}} = \frac{b_{\text{Bundtramaufleger}}}{2} - 4 \quad [\text{cm}] \quad (6.1)$$

6-2.7 FESTLEGUNG DER LASTANNAHMEN UND EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN

Die Lastannahmen und Einwirkungskombinationen werden in einem separaten Abschnitt dieser Masterarbeit (vgl. Kapitel 6-2.6) auf Grundlage der aktuell gültigen Bestimmungen des Eurocodes getroffen. Für die Ermittlung der Lasten und insbesondere für die Lastaufstellung der Windbelastung auf das Stabwerksmodell werden einige Vereinfachungen notwendig, die teilweise im Widerspruch zu den Normengrundlagen stehen. Diese getroffenen Annahmen werden in den zugehörigen Kapiteln genauer beschrieben und begründet. Auf eine Untersuchung von außergewöhnlichen Bemessungssituationen wie Erdbeben, Brand, etc. wird im weiteren Verlauf der Masterarbeit nicht eingegangen.

6-2.8 FESTLEGUNG DER MECHANISCHEN MATERIALEIGENSCHAFTEN

Die in Kapitel 5-3.3.4 angestellte visuelle Sortierung des verbauten Konstruktionsholzes in Anlehnung an die ÖNORM DIN 4074-1 (vgl. [92]) hat ergeben, dass das verwendete Bauholz, mit Ausnahme der zu bogenförmigen Kuppelsparren vernagelten Pfostensegmente, der Laternensparren und der Kopfbänder allesamt der Holzgüteklasse C30 zugeordnet werden können. Gemäß ÖNORM EN 338: Tabelle 1 (vgl. [73]) gelten für Konstruktionshölzer der Güte C24 bzw. C30 folgende Materialfestigkeiten:

Tab. 6.1: Mechanische Materialeigenschaften des Konstruktionsholzes der Hauptkuppel

Festigkeitseigenschaften [N/mm ²]		C24	C30		C24	C30	
Biegung	$f_{m,k}$	24,0	30,0	Bemessungswerte zufolge KLED "kurz" und NKL 2	$f_{m,d}$	16,6	20,8
Zug // Faser	$f_{t,0,k}$	14,5	19,0		$f_{t,0,d}$	9,7	12,5
Zug \perp Faser	$f_{t,90,k}$	0,40	0,40		$f_{t,90,d}$	0,3	0,3
Druck // Faser	$f_{c,0,k}$	21,0	24,0		$f_{c,0,d}$	14,5	15,9
Druck \perp Faser	$f_{c,90,k}$	2,50	2,70		$f_{c,90,d}$	1,7	1,9
Schub(lt. NAD EC5)	$f_{v,k}$	2,30	2,30		$f_{v,d}$	1,6	1,6
Steifigkeitseigenschaften [N/mm ²]							
Mittelwert des Elastizitätsmoduls // Faser	$E_{0,mean}$	11000	12000	Bemessungswerte zu: $\gamma_{M,VH} = 1,30$ $X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_{M,VH}}$			
5%-Quantile des Elastizitätsmoduls // Faser	$E_{0,05}$	7400	8000				
Mittelwert des Elastizitätsmoduls \perp Faser	$E_{90,mean}$	370	400				
Mittelwert des Schubmoduls	G_{mean}	690	750				
Rohdichte [kg/m ³]							
Rohdichte	ρ_k	350	380				
Mittelwert der Rohdichte	ρ_{mean}	420	460				

Der Modifikationsbeiwert k_{mod} wurde unter Berücksichtigung des vorliegenden Feuchtegehalts im Dachtragwerk (siehe Kapitel 5-3.6.1) und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer ermittelt. Mit dem Standort Graz liegt das Dachtragwerk deutlich unterhalb von 1000müA. Demnach sind sowohl die anfallenden Schneelasten als auch die statischen Windkräfte gemäß den Bestimmungen des Eurocode 5 (vgl. [84]) als KLED „kurz“ anzusetzen. Aus eben dieser Klasse der Lasteinwirkungsdauer und der festgelegten Nutzungsklasse 2 wird der Modifikationsbeiwert $k_{\text{mod}} = 0,90$ festgelegt. Je nach Lasteinwirkungsdauer der Leiteinwirkung in den Lasteinwirkungskombinationen müsste gemäß den Normenbestimmungen jeweils der zugehörige k_{mod} -Beiwert festgelegt werden. Die bemessungsrelevanten Schnittgrößen am vorliegenden Kuppeldach ergeben sich aus jenen Lastfallkombinationen, in denen entweder „Schnee“ oder „Wind“ als Leiteinwirkung festgelegt wurden. Demnach kann der festgelegte Modifikationsbeiwert gleichwertig auf alle maßgebenden Schnittgrößen angewendet werden.³⁵

³⁵ „Außergewöhnliche Einwirkungen“ wie beispielsweise Erdbebenkräfte würden im vorliegenden Fall einen Modifikationsbeiwert $k_{\text{mod}} = 1,10$ liefern. Da im Rahmen dieser Masterarbeit keine Untersuchungen betreffend der außergewöhnlichen Einwirkung „Erdbeben“ gemäß Eurocode 8 angestellt werden, kann dieser höhere Modifikationsbeiwert unberücksichtigt bleiben.

6-3 LASTEN UND EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN

Die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit des vorliegenden Hauptkuppeltragwerks soll unter Zugrundelegung der anerkannten Regeln der Technik berechnet werden. Demnach gründen die nachfolgenden Lastannahmen und Kombinationsregelungen auf den Bestimmungen des aktuellen Eurocodes und den zugehörigen nationalen Anwendungsdokumenten. Für die Lastaufstellungen und Kombinationsregelungen wurden folgende Normen in der letztgültigen Ausgabe verwendet:

Eurocode 0:

- EN 1990:2013 - Grundlagen der Tragwerksplanung

Eurocode 1:

- EN 1991:2011 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Nutzlasten
- EN 1991:2013 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandfall*
- EN 1991:2016 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten
- EN 1991:2011 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten
- EN 1991:2012 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatur*
- EN 1991:2013 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-6: Allgemeine Einwirkungen - Bauausführung*
- EN 1991:2013 - Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhn.*
- zugehörige nationale Anwendungsdokumente

mit * versehene Normenbestimmungen werden im Rahmen dieser Masterarbeit nicht genauer untersucht.

6-3.1 EIGENGEWICHT UND STÄNDIGE LASTEN

Normengrundlage: ÖNORM EN/B 1991-1-1 (vgl. [80; 81])

Für die **Dacheindeckung der Hauptkuppel** werden folgende Lastannahmen getroffen:
(vgl. ÖNORM B 1991-1-1: Tabelle A13 - Sonstige Deckungen)

$g_{\text{Kuppeldachdeckung,k}}$	0,75 kN/m ² (Naturschiefer auf Schalung, doppelt)
----------------------------------	--

Für die **Dacheindeckung der Laterne** werden folgende Lastannahmen getroffen:
(vgl. ÖNORM B 1991-1-1: Tabelle A10 - Deckungen aus Metall)

$g_{\text{Laternendachdeckung,k}}$	0,30 kN/m ² (Zinkblechdeckung auf Schalung)
------------------------------------	--

Das Eigengewicht der Kuppeltragwerkskonstruktion (Sparren, Pfetten, Stuhlsäulen, Zangenbalken,...) wird im Stabtragwerksprogramm näherungsweise durch die Querschnitts- und Materialzuweisung automatisch berücksichtigt.

Sonstige Einbauten im Kuppeltragwerk, wie beispielsweise die neue Wartungsgalerie an der Kuppelnordseite, der bestehende Wartungsaufstieg zum Laternenfirst und die teils auf die Zangenbalken montierten Ausrüstungen der Haustechnik (Kabel, Lüftungsleitungen,...) bleiben in der Lastaufstellung unberücksichtigt. Diese Einbauten induzieren ein vernachlässigbar kleines Zusatzgewicht und sind durch die getroffenen Annahmen der Dacheindeckungslasten und den angesetzten Nutzlasten für Wartungszwecke des Daches abgedeckt.

6-3.2 NUTZLASTEN

Normengrundlage: ÖNORM EN/B 1991-1-1 (vgl. [80; 81])

Das Kuppeldach ist der *Nutzungskategorie H - Dächer* zuzuordnen. Die angegebenen Lasten beziehen sich auf die Projektionsfläche des betrachteten Daches und sind gemäß ÖNORM EN 1991-1-1: Abschnitt 3.3.2(1) nicht in Kombination mit Schnee und/oder Windlasten anzusetzen.

$q_{k,Kategorie H}$	1,00 kN/m ² (auf einer Fläche von max. 18m ² in ungünstigster Position auf dem Dach)
$Q_{k,Kategorie H}$	1,50 kN

Da die Kuppel ohne zusätzliche Aufstiegs- und Sicherheitshilfen nur auf der Laterne betretbar ist, wird die Nutzlast $q_{k,Kategorie H}$ ausschließlich auf der Laternendachfläche angesetzt.

6-3.3 SCHNEELASTEN

Normengrundlage: ÖNORM EN/B 1991-1-3 (vgl. [79; 78])

Die Schneelasten werden aufgrund der Kuppelform in Anlehnung an die Bestimmungen für Tonnendächer (vgl. ÖNORM EN 1991-1-3: Abschnitt 5.3.5) berücksichtigt. Für den Standort „Graz-Zentrum“ ist der charakteristische Wert der Schnellast s_k im Ortsverzeichnis (vgl. ÖNORM B 1991-1-3: Tabelle A.1) angegeben zu:

Tab. 6.2: Schneelasten für den Standort Graz nach ÖNORM B 1991-1-3 [78]

Ort	Seehöhe [m]	Lastzone [-]	Schneelast s_k [kN/m ²]
Graz - Zentrum	369	2	1,65

Die Formbeiwerte für die Ermittlung der Schneelasten auf Tonnendächern sind wie folgt definiert:

$$\mu_1 = 0,80$$

$$\mu_3 = 0 \quad (\text{für Kuppeldachneigungen } \beta > 60^\circ)$$

$$\mu_3 = 0,20 + 10 h/b \quad (\text{für Kuppeldachneigungen } \beta < 60^\circ)$$

Bei Berücksichtigung des nationalen Anwendungsdokuments entfällt der Formbeiwert μ_3 , zumal es in ÖNORM B 1991-1-3: Abschnitt 9.2.4.3 heißt:

Die asymmetrische Belastung für den Fall (II) ist im Bereich l_s analog zur Regelung für Satteldächer mit Dachneigungen $< 30^\circ$ gemäß ÖNORM EN 1991-1-3 [...] Case (ii) und Case (iii) anzusetzen.

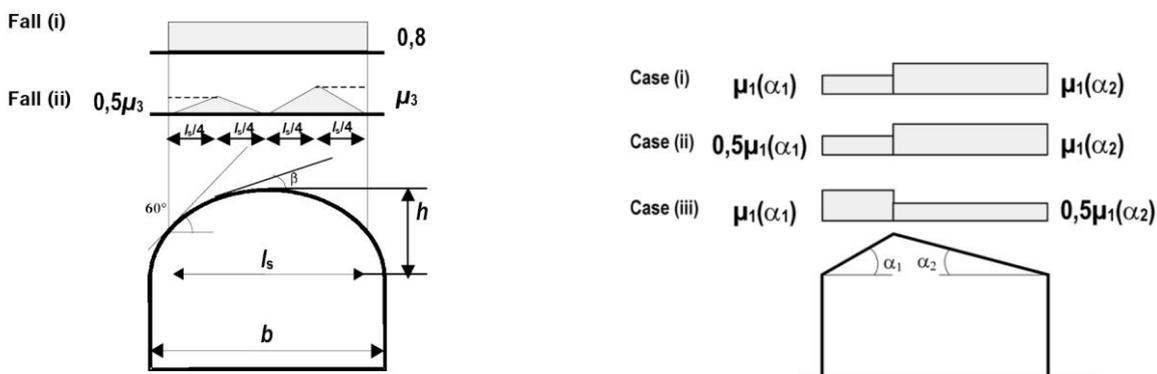


Abb. 6.5: Formbeiwerte für die Ermittlung der Schneelast auf Tonnendächern

Da die Dachflächen der Hauptkuppel mit entsprechenden Schneefangnasen und Schneefanggittern im Traufenbereich ausgestattet sind, muss die Schneelast unter Berücksichtigung der nationalen Normenfestlegung (vgl. ÖNORM B 1991-1-3: Abschnitt 9.2.4.2) über die gesamte Kuppelbreite b anstelle der in Abb. 6.5 ersichtlichen Länge l_s angesetzt werden. Aus diesen Bestimmungen ergeben sich

für die Hauptkuppel der „Alten Technik“ folgende, nach den Himmelsrichtungen orientierte Schneelastfälle:

$$s_{Dach,sym.} = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,80 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,65 = 1,32 \text{ kN/m}^2 \quad (6.2)$$

$$s_{Dach,asym.} = 0,5 \cdot \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,50 \cdot 0,80 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,65 = 0,66 \text{ kN/m}^2 \quad (6.3)$$

mit:

- μ_i Formbeiwert Dach [-]
- C_e Umgebungskoeffizient [-] (=1,00)
- C_t Temperaturkoeffizient [-] (=1,00)
- s_k charakteristischer Wert der Schneelast am Boden [kN/m²]
- s_{Dach} charakteristischer Wert der Schneelast am Dach [kN/m²]

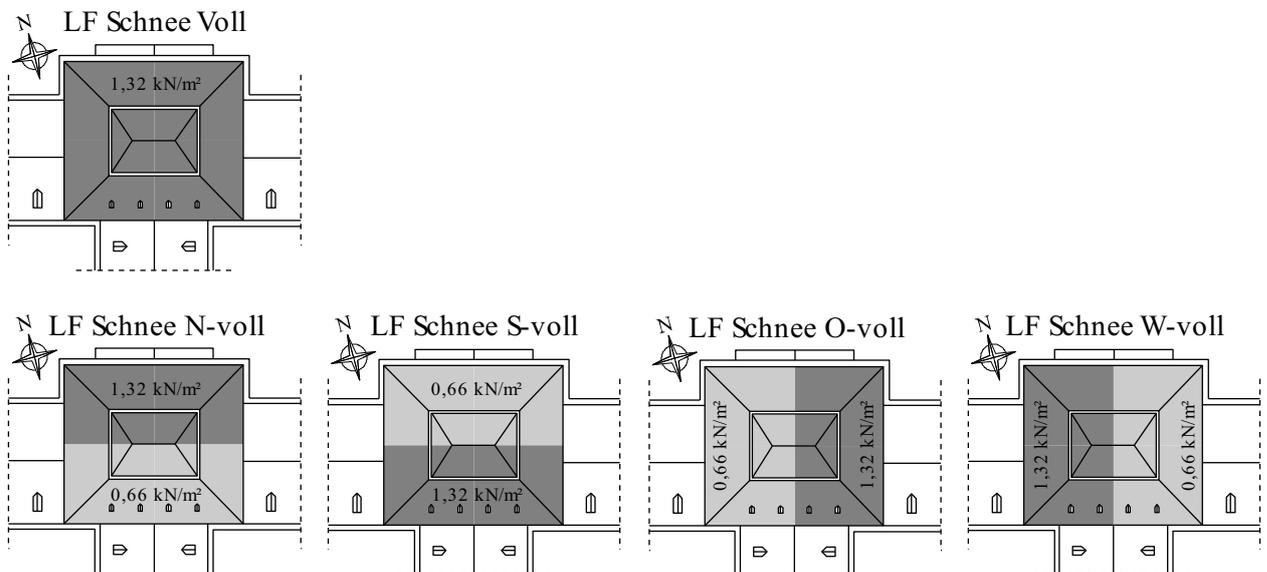


Abb. 6.6: Lastaufstellung der Schneelasten

Die Schneelastfälle sind im Ausdruckprotokoll der Berechnungsergebnisse unter den Lastfallnummern LF 301 bis LF 305 zu finden.

6-3.4 WINDLASTEN

Normengrundlage: ÖNORM EN/B 1991-1-4 (vgl. [82; 83])

Für die Windlastermittlung wird das Kuppeldach in zwei Dachwerkstypen aufgeteilt:

- Kuppeldach (die Berechnung erfolgt als gekrümmtes Dach mit rechteckigem Grundriss)
- Laternendach (die Berechnung erfolgt als flachgeneigtes Walmdach)

Zumal bereits zahlreiche Computerberechnungsprogramme für die verhältnismäßig aufwendige Ermittlung der Windbelastung vorhanden sind, erscheint eine „händische“ Berechnung aller zugehörigen Beiwerte und Kenngrößen im Rahmen dieser Masterarbeit als wenig sinnvoll. Hierfür soll also in weiterer Folge das Programmsystem *ABIS-Windlastberechnung* in der *Version 9.0.0.2* verwendet werden. Dieses Berechnungsprogramm folgt bei der Ermittlung der globalen Windeinwirkungen den Basisformeln der ÖNORM EN/B 1991-1-4. Zum besseren Verständnis der Arbeitsweise des Berechnungsprogramms sollen in weiterer Folge die wesentliche Formelzusammenhänge und die zugehörigen Einflussparameter auszugsweise dargestellt werden.

$$w_k = q_{p(z)} \cdot (c_{pe} - c_{pi}) \quad (6.4)$$

mit:

w_k globale charakteristische Windbelastung [kN/m²]
 $q_{p(z)}$ Böengeschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit zur Bezugshöhe für den Außendruck [kN/m²]
 c_{pe} aerodynamischer Beiwert für den Außendruck [-]
 c_{pi} aerodynamischer Beiwert für den Innendruck [-]

Aufgrund der Lage der „Alten Technik“ innerhalb der Stadt Graz soll die Windbelastung für die Geländekategorie IV („innerstädtischer Bereich“) berechnet werden. Für diese Geländekategorie wird der charakteristische Böengeschwindigkeitsdruck folgendermaßen ermittelt (vgl. ÖNORM B 1994-1-4: Tabelle 1):

$$\frac{q_{p(z)}}{q_{b,0}} = 1,20 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,38} \rightarrow q_{p(z)} = q_{b,0} \cdot 1,20 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,38} \quad (6.5)$$

$q_{b,0}$ Basisgeschwindigkeitsdruck [kN/m²] (für Graz: 0,26 kN/m²)
 z Höhe über Grundniveau [m]

Die Außendruckbeiwerte c_{pe} hängen von der Größe der Lasteinflussfläche und vom Dachtypus ab. Diese aerodynamischen Beiwerte sind in den entsprechenden Normenkapiteln meist in tabellarischer Form angegeben und werden dort für Lasteinflussflächen von 1 m² ($c_{pe,1}$) und 10 m² ($c_{pe,10}$) angegeben.³⁶ Dabei werden stets zwei orthogonale Anströmrichtungen Θ (0° und 90°) in den Tabellen angeführt. Die Tabellenwerte sind im Berechnungsprogramm *ABIS-Windlastberechnung* hinterlegt und werden in Abhängigkeit zur getroffenen Einstellung für die Windlastberechnung mit den Innendruckbeiwerten (c_{pi}) zu den jeweils ungünstigsten Fällen überlagert. Die Außendruckbeiwerte für kuppelförmige Konstruktionen sind in der ÖNORM EN/B 1991-1-4 nicht tabelliert, sondern in Form von Funktionsdiagrammen angegeben. Für die vorliegende Kuppeldachfläche werden vereinfacht jene Normenbestimmungen zugrunde gelegt, die für „gekrümmte Dächer und Kuppeln“ in Abschnitt 7.2.8 der ÖNORM festgelegt sind. Die Kuppeldachflächen werden also in weiterer Folge vereinfacht als gekrümmtes Tonnendach mit rechteckigem Grundriss behandelt. Die Ermittlung der Außendruckbeiwerte für Kuppeldächer erfolgt anhand von Geradengleichungen, die in ÖNORM B 1991-1-4: Abschnitt 9.2.8 angegeben sind. Diese Gleichungen berücksichtigen das Verhältnis des Kuppelstichs zur Kuppelspannweite. Auch das Verhältnis der Traufenhöhe zur Kuppelspannweite fließt mit in die Berechnung der Außendruckbeiwerte c_{pe} ein. Für die Ermittlung der Windbelastung bei parallel zur

³⁶ $c_{pe,1}$ -Werte dienen der Bemessung kleinerer Bauteile und Verankerungen mit einer Lasteinflussfläche < 1,0 m² wie beispielsweise Verkleidungs- und Dachelemente. Die kleineren $c_{pe,10}$ -Werte werden für die Bemessung der Tragstruktur des Gesamttragwerks verwendet.

„Zylinderachse des Daches“ gerichteter Anströmrichtung müssen die Windkräfte analog zu den Bestimmungen bei Satteldächern bestimmt werden. Hierfür muss das Kuppeldach in ein „äquivalentes Satteldach“ umgerechnet werden, wobei der Dachneigungswinkel gegeben ist zu:

$$\alpha_{\text{äquivalentes Satteldach}} = \tan^{-1} \left(\frac{f}{d/2} \right) \quad (6.6)$$

mit:

fKuppelstich [m]
 dKuppelspannweite [m]

Nachfolgend sollen die Geradengleichungen und das zugehörige Berechnungsdiagramm für die Berechnung der Außendruckbeiwerte c_{pe} für zylindrische Dachflächen mit rechteckigem Grundriss als Auszug aus den beiden Normen dargestellt werden:

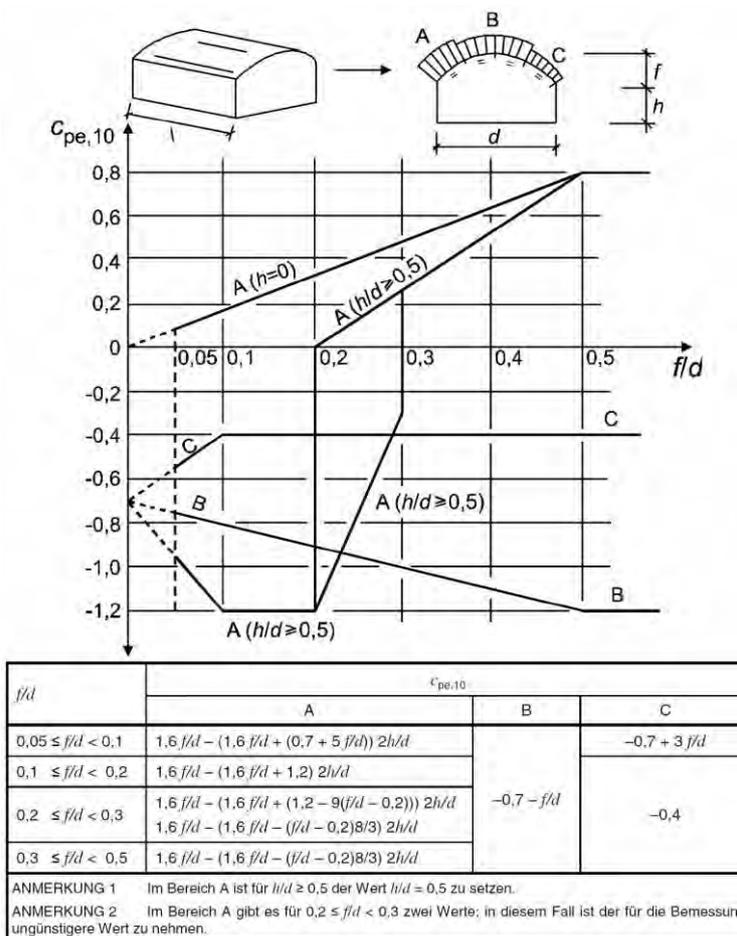


Abb. 6.7: Ermittlung der Außendruckbeiwerte $c_{pe,10}$ für gekrümmte Dächer bei rechteckigem Grundriss gemäß ÖNORM EN/B 1991-1-4 [82; 83]

Die Ermittlung des Außendruckbeiwertes wird durch die entsprechenden Einstellungen des Dachtypus und der Gebäudegeometrie im Programm *ABIS-Windlastberechnung* automatisch vorgenommen. Dabei wird das Kuppeldach als zylindrisches Dach und das Laternendach als Walmdach behandelt.

Der Innendruckbeiwert c_{pi} ist von der Größe und Verteilung der Öffnungen in der Gebäudehülle abhängig. Diese Abhängigkeit fließt mit dem Flächenparameter μ in die Berechnung des Innendruckbeiwertes ein. Dieser Verhältnisparameter ist wie folgt definiert:

$$\mu_{(\Theta)} = \frac{\text{Gesamtfläche der Öffnungen in den leeseitigen und windparallelen Flächen}}{\text{Gesamtfläche aller Öffnungen}} \quad (6.7)$$

Dieser Flächenparameter ist für alle Anströmrichtungen Θ zu bestimmen. Auf der sicheren Seite liegend erlaubt die ÖNORM EN/B 1994-1-4 allerdings eine vereinfachte Annahme des Innendruckbeiwertes mit $c_{pi}=+0,20$ bzw. $c_{pi}=-0,30$, wobei der jeweils ungünstigere dieser beiden Werte bei der Überlagerung der Windlasten anzusetzen ist.

$$\begin{aligned} c_{pi} &= +0,20 && \text{(für Innendruck)} \\ c_{pi} &= -0,30 && \text{(für Innensog)} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Für die Windlastermittlung mittels *ABIS-Windlastberechnung* wurden folgende Standort- und Geometrieparameter eingegeben:

- Standort: Graz
- Seehöhe 369 m (vgl. ÖNORM B 1994-1-4: Tabelle A.1)
- Geländekategorie IV (innerstädtisches Gebiet)
- Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ 20,40 m/s (vgl. ÖNORM B 1994-1-4: Tabelle A.1)
- Basisgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ 0,26 kN/m² (vgl. ÖNORM B 1994-1-4: Tabelle A.1)
- Traufenhöhe Kuppel: +19,50 m
- Firsthöhe Kuppel: +26,00 m
- Traufenhöhe Laterne: +26,00 m
- Firsthöhe Laterne: +26,80 m
- Traufenlänge Kuppel N/S: 17,00 m (=lange Kuppelseite)
- Traufenlänge Kuppel O/W: 14,80 m (=kurze Kuppelseite)
- Traufenlänge Laterne N/S: 8,30 m (=lange Laternenseite)
- Traufenlänge Laterne O/W: 6,10 m (=kurze Laternenseite)
- Firstlänge Laterne: 3,00m

Die Ausdruckprotokolle der Windlastermittlung mittels *ABIS-Windlastbemessung* sind in ANHANG E dieser Masterarbeit abgelegt.

Das Berechnungsprogramm liefert charakteristische Windlasten w_k [kN/m²] für die Bemessung der Dachkonstruktion. Ebenso können Windlasten auf die Wände unter Berücksichtigung von Wandöffnungen ermittelt werden. Diese Programmfunktion ist für diese Masterarbeit allerdings nicht relevant. Die charakteristischen Windlasten werden für die im Eurocode definierten Windlastbereiche (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N) als „mittlere Belastung“ (für die globale Tragwerksbemessung) und als „örtliche Belastung“ (für Detailnachweise z. B.: bei Dachaufbauten) ausgegeben. Die Lage und Größe dieser Windlastbereiche wird anhand von schematischen Skizzen für beide Anströmrichtungen dargestellt. Zu den charakteristischen Windbelastungen w_k wird stets auch der zugehörige Außendruckbeiwert $c_{pe,10}$ bzw. $c_{pe,1}$ angegeben. Der Innendruckbeiwert c_{pi} kann je nach getroffener Einstellung folgendermaßen bei der Überlagerung mit den Außendruckbeiwerten festgelegt werden:

- c_{pi} wird mit 0,20 (Innendruck) bzw. -0,30 (Innensog) angesetzt und ergibt mit c_{pe} ein Maximum
- c_{pi} wird immer mit 0,20 (Innendruck) berücksichtigt
- c_{pi} wird immer mit -0,30 (Innensog) berücksichtigt
- c_{pi} wird vernachlässigt. (Diese Option sollte nur dann gewählt werden, wenn die Grunddichtheit des Gebäudes < 1% beträgt)
- c_{pi} wird in Abhängigkeit zur Größe der Gebäudeöffnungen berechnet.

Im Falle der Hauptkuppel wird die erstgenannte Einstellmöglichkeit ($c_{pi}= 0,20$ oder $c_{pi}= -0,30$) verwendet. Um die Funktionsweise des Berechnungsprogrammes nachvollziehen zu können, sei an dieser Stelle eine kurze Erläuterung anhand eines Auszuges aus dem Ausdruckprotokoll für die Windbelastung des Laternenwalmdaches gezeigt:

Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Laterne

--- Eingabedaten ---

Norm : ÖNORM B 1991-1-4
Rechenverfahren : Berechnung für Geschoßbau
Geländekategorie : IV
Basiswindgeschwindigkeit in m/s : 20.40
(Steiermark, Graz)

--- Ergebnisse ---

Böengeschwindigkeitsdruck q_p : 0.454 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26.80 m)
Innendruckbeiwert c_{pi} ist 0.2 bzw. -0.3

Windbelastung w des Daches

Wind parallel zum First (von vorne) :	Lastfall 1	zugeh. c_{pe}	Lastfall 2	zugeh. c_{pe}
Mittlere Belastung (F) :	-0.48	-0.85	0.24	0.24

Abb. 6.8: Beispiel ABIS-Windlastberechnung

Nachfolgend soll der Berechnungsvorgang aus der ABIS-Windlastberechnung auszugsweise nachvollzogen werden:

$$q_{p(z)} = q_{b,0} \cdot 1,20 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,38} = 0,26 \cdot 1,20 \cdot \left(\frac{26,80}{10}\right)^{0,38} = 0,4538 \approx 0,454 \text{ kN/m}^2 \quad (6.9)$$

Lastfall 1 (Außensog + Innendruck):

$$w_{k,LF1} = q_{p(z)} \cdot (c_{pe} - c_{pi}) = 0,454 \cdot (-0,85 - 0,20) = -0,4767 \approx -0,48 \text{ kN/m}^2 \quad (6.10)$$

Lastfall 2 (Außendruck + Innensog)

$$w_{k,LF2} = q_{p(z)} \cdot (c_{pe} - c_{pi}) = 0,454 \cdot (0,24 - (-0,30)) = +0,24504 \approx +0,24 \text{ kN/m}^2 \quad (6.11)$$

Entsprechend der Vorzeichendefinition der ÖNORM EN 1994-1-4 gilt:

Die Nettodruckbelastung infolge Winddruck auf eine Wand, ein Dach oder ein Bauteil ist die Resultierende von Außen- und Innendruck. Druck auf eine Oberfläche wird positiv angenommen, Sog von der Oberfläche weg als negativ [...].

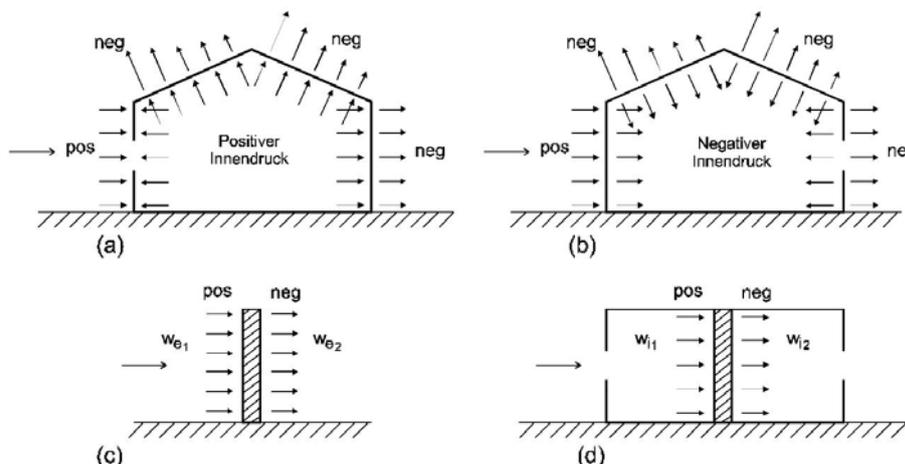


Abb. 6.9: Vorzeichendefinition für Windbelastungen nach ÖNORM EN 1991-1-4 [82]

Gemäß ÖNORM EN 1991-1-4 müssten die gefundenen Windbelastungen der einzelnen Intensitätsbereiche (A, B, C,...) nun in Abhängigkeit zur Anströmrichtung auf das Kuppeldach appliziert werden. Durch die Kuppelgeometrie (gekrümmte Sparren) und durch die aufgesetzte Laternenkonstruktion würde diese Unterteilung des Daches in die Intensitätsbereiche einen immensen Arbeitsaufwand bedeuten, der nach Erachten des Verfassers dieser Masterarbeit in keiner Relation zum Nutzen steht. Daher wird in Anlehnung an MEISEL (vgl. [38]) für jede Dachfläche (Nord, Süd, Ost, West) ein flächengewichteter Mittelwert aus den jeweiligen Intensitätsbereichen innerhalb einer Dachfläche ermittelt.

$$w_{k, \text{gemittelt, Dachfläche}} = \frac{\sum w_{k, \text{Bereich, } i} \cdot A_{\text{proj, Bereich, } i}}{\sum A_{\text{proj, Bereich, } i}} \quad (6.12)$$

mit:

$w_{k, \text{Bereich, } i}$ charakteristische Windlast im Lastintensitätsbereich innerhalb einer Dachfläche [kN/m²]

$A_{\text{proj, Bereich, } i}$ Flächeninhalt der projizierten Windlastintensitätsfläche innerhalb einer Dachfläche [m²]

Diese getroffenen Vereinfachung steht zwar im Widerspruch zu den Bestimmungen der ÖNORM EN 1991-1-4, liefert aber hinreichend genaue Ergebnisse in der Schnittgrößenermittlung. Durch diese Methodik kann die Windbelastung des Daches auf folgende 8 Lastfälle reduziert werden:

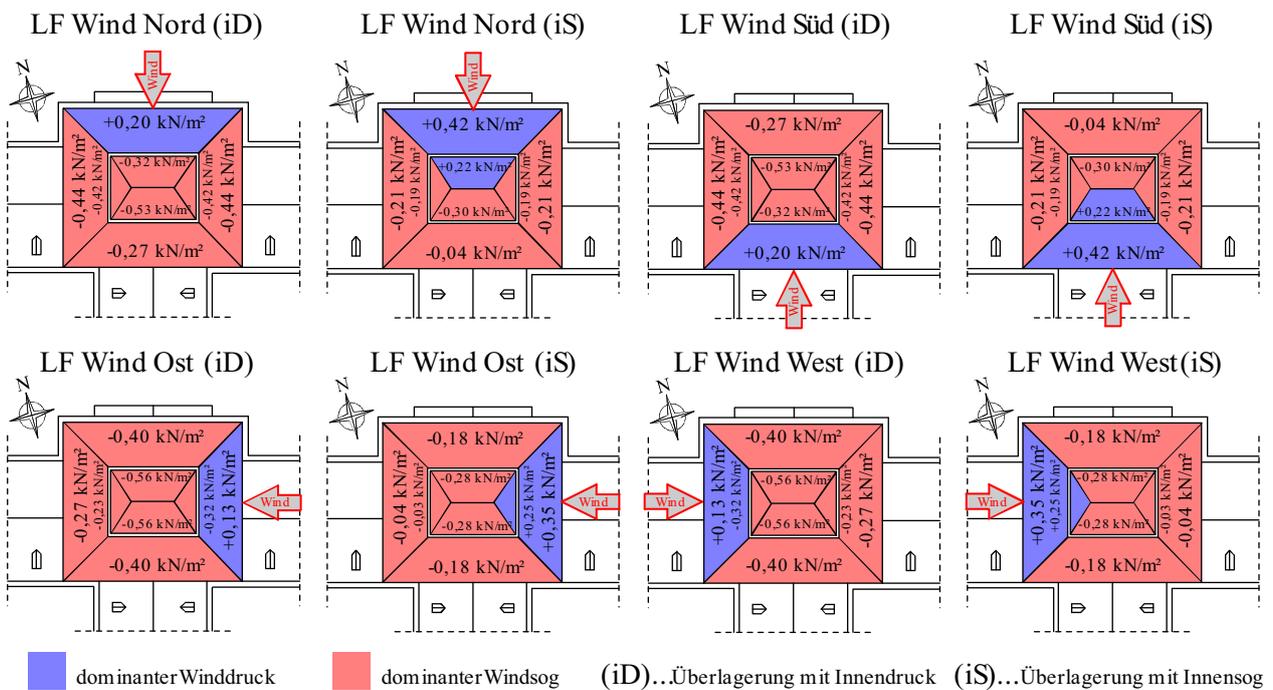


Abb. 6.10: Lastaufstellung der Windlasten

Die Windlastfälle sind im Ausdruckprotokoll der Berechnungsergebnisse unter den Lastfallnummern LF 401 bis LF 408 zu finden.

6-3.5 LASTFALLKOMBINATIONEN

Normengrundlage: ÖNORM EN 1990 & ÖNORM EN/B 1995-1 (vgl. [77; 84; 85])

Tab. 6.3: Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte

Lastfallgruppe	$\gamma_{G,g}$ bzw. $\gamma_{Q,q}$	ψ_0	ψ_1	ψ_2	k_{mod}
Eigengewicht g_k ständige Lasten	1,35	1,0	1,0	1,0	0,60
Nutzlasten q_k Kategorie H	1,50	0	0	0	0,80
Schneelasten s_k <1000 m ü. A.	1,50	0,50	0,20	0	0,90
Windlasten w_k	1,50	0,60	0,20	0	0,90

Tab. 6.4: Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Lastfallkombination ULS	Überlagerung
ULS-Eigengewicht	$E_d = \gamma_G \cdot g_k$ $E_d = 1,35 \cdot g_k$
ULS-Nutzlast, führend	$E_d = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k + \gamma_Q \cdot (\psi_{0,s_k} \cdot s_k + \psi_{0,w_k} \cdot w_k)$ $E_d = 1,35 \cdot g_k + 1,50 \cdot q_k + 1,50 \cdot (0,50 \cdot s_k + 0,60 \cdot w_k)$
ULS-Schnee, führend	$E_d = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot s_k + \gamma_Q \cdot (\psi_{0,q_k} \cdot q_k + \psi_{0,w_k} \cdot w_k)$ $E_d = 1,35 \cdot g_k + 1,50 \cdot s_k + 1,50 \cdot (0 + 0,60 \cdot w_k)$
ULS-Wind, führend	$E_d = \gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot w_k + \gamma_Q \cdot (\psi_{0,q_k} \cdot q_k + \psi_{0,s_k} \cdot s_k)$ $E_d = 1,35 \cdot g_k + 1,50 \cdot w_k + 1,50 \cdot (0 + 0,50 \cdot s_k)$
Anmerkung: Die einzelnen Schnee- und Windlastfälle sind ungünstig zu überlagern.	

Tab. 6.5: Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Lastfallkombination SLS	Überlagerung
SLS char. Kombination	$w_{inst} = w_1 + w_2 \leq \frac{1}{300} \cdot \text{Stützweite}$
SLS häufige Kombination	$w_{fin} = w_2 + (w_1 + w_3) \cdot k_{def} \leq \frac{1}{200} \cdot \text{Stützweite}$
SLS quasi st. Kombination	$w_{net,fin} = (w_1 + w_3) \cdot (1 + k_{def}) - w_{\text{Überhöhung}} \leq \frac{1}{250} \cdot \text{Stützweite}$
Anmerkungen: w...Durchbiegung	w_1 infolge $\sum G_{k,i}$ w_2 infolge $\sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} + Q_{k,Leiteinwirkung}$ w_3 infolge $\sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$ $k_{def} = 0,80$ für Vollholz, NKL 2

6-4 STEIFIGKEITEN DER ANSCHLUSSDETAILS

In diesem Kapitel sollen die für die Anschlusssteifigkeitsermittlung verwendeten Berechnungsgrundlagen und Formeln angegeben und erläutert werden. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln vorweggenommen wurde, liefert eine computergestützte Tragwerksberechnung nur dann realitätsnahe Schnittgrößen, Lagerreaktionen, Spannungen und Verformungen, wenn die Anschlusssteifigkeiten der einzelnen Traggliederanschlüsse sowie die Anschlusssexzentrizitäten entsprechend berücksichtigt werden. Nicht zuletzt wegen der Vielfältigkeit der Anschlussdetails in historischen Dachtragwerken ist es nicht so einfach, „pauschale“ Knotensteifigkeitsansätze zu formulieren, die allgemeine Gültigkeit haben und auf alle zimmermannsmäßigen Tragwerke in gleicher Weise angewendet werden können. Zwar gibt es bereits einige Publikationen, die recht praxistaugliche Größenordnungen für die Federsteifigkeiten zimmermannsmäßiger Holz-Holz-Verbindungen tabellieren (z. B.: [8], [39], [37], [23],...), allerdings wird man als planender Ingenieur immer wieder dazu angehalten sein, möglichst einfache „ingenieurmäßige“ Ansätze zu finden, die das reale Tragverhalten des Berechnungsmodells bestmöglich simulieren. Das nachfolgende Kapitel schlägt hierfür einige mögliche Ansätze zu einigen Anslusstypen - natürlich mit Bezug zur Hauptkuppel der „Alten Technik“ - vor.

Die Anschlussdetails der Hauptkuppel erforderten dabei geringfügige Adaptierungen der Formelansätze, um die Steifigkeiten situationsgerecht abschätzen zu können. Gelegentlich mussten auch Vereinfachungen getroffen werden. Diese werden in den entsprechenden Unterkapiteln genauer beschrieben. Die Steifigkeitsermittlung der einzelnen Anschlussbereiche erfolgte über eigens generierte Tabellenkalkulationsberechnungsblätter. Diese Berechnungsblätter sind in ANHANG D dieser Masterarbeit abgelegt und weisen die für die Stabtragwerksberechnung angesetzten Federsteifigkeiten der Knotenanschlüsse aus.

Der Eurocode 5, auf dessen Basis die Tragfähigkeitsberechnung der Hauptkuppel der „Alten Technik“ angestellt werden soll, (vgl. [84; 85]) fordert für die Ermittlung der Systemschnittgrößen die Berücksichtigung von Anschlusssexzentrizitäten und Steifigkeiten der Bauteile und Anschlüsse. Dieser Vorgabe kann bei neueren Ingenieurholzbauten unter Anwendung der entsprechenden Normenbestimmungen zu den einzelnen ingenieurmäßigen Verbindungstypen (Stabdübel-, Schraub-, Nagelverbindungen,...) durchaus nachgekommen werden. Die Anwendung dieser Normenforderung auf ältere, zimmermannsmäßige Tragwerke gestaltet sich dagegen umso schwieriger, liefert doch der Eurocode 5 für die Steifigkeitsermittlung traditioneller Verbindungsmethoden nur unzureichende Berechnungsbestimmungen. Die Schnittgrößen statisch unbestimmter Systeme ($N_{(x)}$, $V_{y(x)}$, $V_{z(x)}$, $M_{y(x)}$, $M_{z(x)}$, $M_{T(x)}$) stellen sich in Abhängigkeit zu den vorhandenen Steifigkeiten der Bauteile und der Anschlussbereiche ein. Als Steifigkeit wird jener Verformungswiderstand verstanden, den ein Stab/Anschluss der Krafteinwirkung entgegenstellt. Die Steifigkeit des Traggliedes („Stab“), wird dabei durch die Materialparameter „Elastizitätsmodul“ und „Schubmodul“ bestimmt und kann in den meisten Stabwerksprogrammen einfach durch die entsprechende Auswahl des „Stabmaterials“ in die Systemsteifigkeitsmatrix aufgenommen werden. Die Steifigkeiten der Knotenverbindungen („Anschluss“) werden neben den Materialparametern der zu fügenden Konstruktionsteile zusätzlich von den geometrischen Randbedingungen des Anschlussknotens bestimmt (Anschlusswinkel, Faserrichtung, Einschnitttiefen, Lager der Stabachsen,...). Für die Einbindung der Anschlusssteifigkeiten in die Systemsteifigkeitsmatrix stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Generierung von „Dummy-Stäben“, deren Stabsteifigkeiten entsprechend der ermittelten Anschlusssteifigkeiten gewählt und zwischen den Stabachsen der zu fügenden Konstruktionsglieder eingebaut werden. Diese Methode erleichtert die Berücksichtigung von Anschlusssexzentrizitäten („starre Exzenterstäbe“).
- Direkte Stabachsenkopplung, wobei die Kopplungsparameter durch die Eingabe von „Kopplungssteifigkeiten“ zwischen den beiden Stäben entsprechend der Anschlusssteifigkeiten gewählt werden müssen. Diese Methode erschwert eine Berücksichtigung von Anschlusssexzentrizitäten, da die Stabachsen der Konstruktionsglieder direkt gekoppelt werden müssen.

Natürlich können in der Modellbildung beide Varianten zur Simulation der Anschlusssteifigkeiten kombiniert werden. Dabei ist allerdings unbedingt darauf zu achten, dass sich durch die Einführung von „Dummy-Stäben“ (=Federstäbe) die Systemlänge der betroffenen Stäbe nicht verändert (vgl. [38]), da ansonsten im Bereich der Feder sowohl die Steifigkeit des „Konstruktionsstabes“ als auch die Steifigkeit des „Dummy-Stabes“ berücksichtigt wird. Dieser Umstand sei anhand der nachfolgenden Grundgleichung korrekt dargestellt, wobei die Steifigkeit C als Kehrwert der Nachgiebigkeit definiert ist:

$$\frac{1}{C_{Gesamt}} = \frac{1}{C_{Stab}} + \frac{1}{C_{Anschluss}} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{C_{Gesamt}} = \frac{1}{C_{Stab}} + \frac{1}{C_{Anschluss}} \quad (6.13)$$

mit:

- C_{Gesamt} Gesamtsteifigkeit aus Stabsteifigkeit und Anschlusssteifigkeit [N/mm]
- $C_{Stab,quer}$ Stabsteifigkeit berechnet mit der Stablänge [N/mm]
- C_{Stab} Stabsteifigkeit berechnet mit der Systemlänge [N/mm]
- $C_{Anschluss,quer}$ effektive Anschlusssteifigkeit [N/mm]
- $C_{Anschluss}$ Anschlusssteifigkeit [N/mm]

Korrekterweise müsste die Stabsteifigkeit mit der Systemlänge berücksichtigt werden und die Anschlusssteifigkeit entsprechend auf die effektive Anschlusssteifigkeit wie folgt umgerechnet werden:

$$C_{Anschluss} = \frac{C_{Anschluss}}{1 - \frac{C_{Anschluss}}{E \cdot A} \cdot (L_0 - L_1)} \quad (6.14)$$

- L_0 Systemlänge [mm]
- L_1 Stablänge [mm]
- E Elastizitätsmodul des Stabes [N/mm²]
- A Querschnittsfläche des Stabes [N/mm²]

Der Aufwand, sämtliche Anschlusssteifigkeiten auf die effektiven Werte umzurechnen, wird in dieser Masterarbeit nicht weiter verfolgt und die Gesamtsteifigkeit näherungsweise mit C_{Stab} und $C_{Anschluss}$ bestimmt. Angesichts der getroffenen Vereinfachungen bei der Ermittlung der Anschlusssteifigkeiten erscheint der so entstehende Fehler marginal.

In Anlehnung an MEISEL (vgl. [38]) soll die oben angesprochen Systematik anhand eines einfachen Beispiels eines Kontaktdruckanschlusses dargestellt werden. Der in der nachfolgenden Grafik dargestellte Querdruckverteilungswinkel in Faserlängsrichtung beruht auf den Bestimmungen des Eurocode 5 (vgl. [84]) und soll auch in dieser Masterarbeit als erste Näherung zur Bestimmung der Kontaktdrucksteifigkeit aufgegriffen werden.

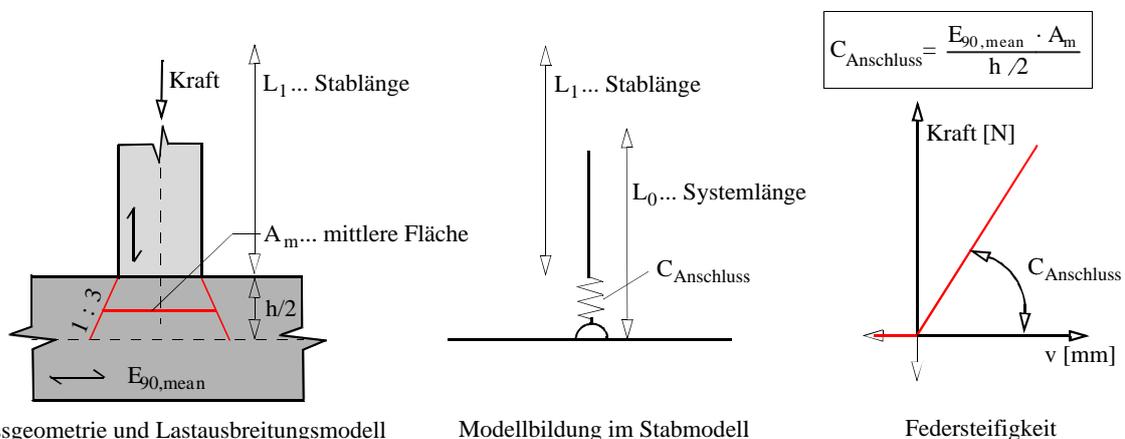


Abb. 6.11: Ingenieurmodell zur Ermittlung der Steifigkeit eines Kontaktdruckanschlusses [38]

6-4.1 ANSCHLUSSSTEIFIGKEIT VON „VERSATZVERBINDUNGEN“

Versatzverbindungen kommen nahezu in jedem älteren Dachtragwerk vor. Daher wurden auch schon mehrere Forschungsarbeiten zu deren Tragverhalten durchgeführt. Versatzverbindungen sind auch heute noch sehr populär, sind sie doch mit geringem Bearbeitungsaufwand der zu verbindenden Hölzer schnell und einfach herzustellen. Auch im österreichischen nationalen Anwendungsdokument zum Eurocode 5, der ÖNORM B 1995-1-1 wurde diesen zimmermannsmäßigen Verbindungen ein eigener normativer Anhang E gewidmet. Darin ist neben der empfohlenen Versatzverbindungsgeometrie auch ein Berechnungsvorschlag für die Tragfähigkeit derartiger Versatzverbindungen angegeben.

Leider „schweigt“ der Eurocode bezüglich der Ermittlung der Anschlusssteifigkeit von Versatzverbindungen. Im Rahmen der Rechercharbeit zu dieser Masterarbeit konnte hierfür ein recht aufschlussreicher Forschungsbericht von HEIMESHOF/KÖHLER (vgl. [8]) ausgehoben werden, in dem ein entsprechender Ansatz für die Ermittlung der Wegfedersteifigkeit in Strebenlängsrichtung angeführt ist. Dieser Ansatz soll nachfolgend kurz vorgestellt werden:

HEIMESHOF/KÖHLER führten an mehreren Prüfungskörpern zerstörende Prüfungen durch und variierten dabei die Versatztiefe t_{Versatz} , die Vorholzlänge l_{Vorholz} und den Anschlusswinkel α (gemessen zwischen dem Schwellenholz und dem Strebenholz). Für die Auswertung der Federsteifigkeiten wurde eine max. zulässige Verformung in strebenparalleler Richtung zugrunde gelegt. Demnach liefert die nachfolgende Formel auch die Federsteifigkeit in axialer Strebenrichtung. Aus den Prüfungsergebnissen wurde folgende Formel entwickelt, wobei die geometrischen Parameter „nicht-einheitenrein“ in Zentimeter einzusetzen sind:

$$C_{\text{Versatz,Strebenaxial}} = \left((45,2 - 42,1 \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \frac{b_{\text{Strebel/Schwelle}}}{12} \cdot \left(1 + \frac{t_{\text{Versatz}} - 2,34}{2,34} \cdot 0,1 \right) \right) \cdot 10^3 \quad (6.15)$$

mit:

- C_{Versatz} Federsteifigkeiten in strebenaxialer Richtung [N/mm]
- α Anschlusswinkel gemessen zwischen Schwellenholz und Strebenholz [°]
- b Breite der mittels Versatzverbindung verbundenen Hölzer³⁷
- t_{Versatz} Versatztiefe

Dieser Steifigkeitsansatz ist allerdings im vorliegenden Kuppeltragwerk nur bedingt einsetzbar, zumal hier ein sehr steil angestellter Fersenversatz zur Anwendung gekommen ist, dessen Fersenstirn nicht rechtwinkelig zur Faserrichtung des Schwellenholzes orientiert ist. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde aus einfachen Überlegungen ein recht zutreffendes Ingenieurmodell entwickelt, das im Wesentlichen auf den max. zulässigen Pressungen im Schwellenholz beruht.³⁸

max. zulässige Holzpressung im Schwellenholz im Bereich der Fersenstirn:

$$f_{c,\text{Schwelle,Ferse},k} = f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k} \cdot f_{c,90,k} \cdot k_{c,90}}{f_{c,0,k} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,90,k} \cdot k_{c,90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (6.16)$$

mit:

- $f_{c,\alpha,k}$ zulässige Holzpressung in einem Winkel α zur Faser [N/mm²]
- $f_{c,0,k}$ zulässige Holzpressung parallel zur Faser [N/mm²]
- $f_{c,90,k}$ zulässige Holzpressung senkrecht zur Faser [N/mm²]
- $k_{c,90}$ Beiwert zur Modifikation der Querdruckfestigkeit [-]
empfohlener Wert für Versatzverbindungen in Vollholz $k_{c,90} = 1,30$ (einseitiges Vorholz)

³⁷ Versatzverbindungen werden üblicherweise über die gesamte Querschnittsbreite ausgebildet. Demnach erscheint es zweckmäßig Strebe- und Schwellenholz in gleicher Querschnittsbreite auszuführen.

³⁸ In diesem Modell wird aufgrund des sehr steil anstehenden Strebenholzes ($\alpha > 60^\circ$) auch der Anteil der Schwellenholzpressung vor der Ferse mitberücksichtigt. Dieses Ingenieurmodell dient einer ersten Abschätzung der tatsächlichen Anschlusssteifigkeit der Fersenversatzverbindung.

max. zulässige Holzpressung im Schwellenholz im Bereich des Fersenvorholzes:

$$f_{c,Schwelle,Vor,k} = f_{c,90,k} \cdot k_{c,90} \quad (6.17)$$

Entsprechend der Fersenversatzverbindungsgeometrie können die max. zulässigen (charakteristischen) Pressungen im Schwellenholz ermittelt werden. Zunächst müssen allerdings noch einige Geometrieparameter bestimmt werden:

$$l_{\text{Projektion}} = \frac{h_{\text{Strebeholz}}}{\cos \alpha} \quad (6.18)$$

$$l_{\text{Ferse}} = t_{\text{Versatz}} \cdot \tan \alpha + t_{\text{Versatz}} \cdot \frac{1}{\tan \alpha} \quad (6.19)$$

$$l_{\text{Vor}} = l_{\text{Projektion}} - l_{\text{Ferse}} \quad (6.20)$$

$$h_{\text{Ferse}} = \frac{t_{\text{Versatz}}}{\cos \alpha} \quad (6.21)$$

Alle Geometrieparameter sind einheitengetreu in Millimeter einzusetzen. Zum besseren Verständnis sollen die Querschnittsparameter anhand einer Prinzipskizze erklärt werden:

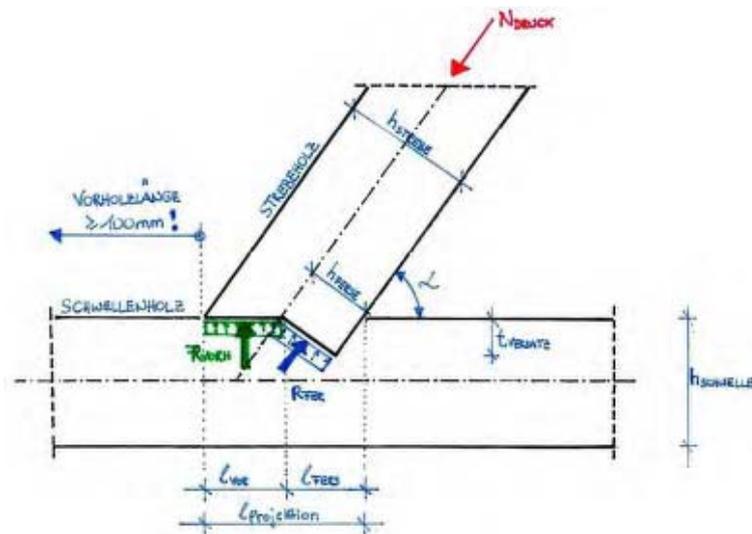


Abb. 6.12: Formelparameter für die Steifigkeitsermittlung eines steil anstehenden Fersenversatzes

Nun können die resultierenden Pressungskräfte [N] im Lagerholz bestimmt werden zu:

$$R_{\text{Schwelle,Ferse},k} = h_{\text{Ferse}} \cdot b_{\text{Schwelle}} \cdot f_{c,Schwelle,Ferse,k} \quad (6.22)$$

$$R_{\text{Schwelle,Vor},k} = l_{\text{Vor}} \cdot b_{\text{Schwelle}} \cdot f_{c,Schwelle,Vor,k} \quad (6.23)$$

Die beiden Resultierenden werden entsprechend deren Wirkungsrichtung zur axialen Strebeholzrichtung umgerechnet und als erste Näherung addiert:

$$R_{\text{Fersenversatz},k} = R_{\text{Schwelle,Ferse},k} + R_{\text{Schwelle,Vor},k} \cdot \cos \alpha \quad (6.24)$$

Damit wäre die charakteristische Tragfähigkeit der Fersenversatzverbindung im Hinblick auf die max. zulässige charakteristische Querholzpressung im Schwellenholz ermittelt. Das allgemeine Federgesetz erlaubt nun eine Ermittlung der Federsteifigkeit unter Annahme einer lokalen Verformung der

Verbindung. Hier sei der von HEIMESHOF/KÖHLER [8] vorgeschlagene Ansatz (1,5 mm lokale Verformung) aufgegriffen und auf das ingenieurmäßige Abschätzmodell angewendet:

$$C_{axial, Fersenversatz} = \frac{R_{Fersenversatz}}{u_{lokal}} \quad (6.25)$$

mit:

$C_{Fersenversatz}$ Federsteifigkeiten in strebenaxialer Richtung [N/mm]

$R_{Versatz}$ Tragfähigkeit des Fersenversatzes aufgrund der max. zulässigen Schwellenpressung [N]

u_{lokal} zulässige lokale Verformung der Versatzverbindung (empfohlener Wert : 1,5 mm)

Dieses Modell wurde für die Steifigkeitsermittlung in ANHANG D verwendet.

6-4.2 ANSCHLUSSSTEIFIGKEIT VON „EINFACHEN GERADEN ZAPFENVERBINDUNGEN“

Zapfenverbindungen zählen zu den ältesten bekannten zimmermannsmäßigen Holzverbindungen und erlauben das verschiebungs- und verdrehungsgesicherte Zusammenschließen zweier Konstruktionshölzer. Nachfolgend sollen gerade Zapfenverbindungen beschrieben werden, die zwischen zwei rechtwinklig zueinander orientierten Konstruktionsteilen verwendet werden. Gerade Zapfenverbindungen sind dadurch gekennzeichnet, dass der Zapfen über die gesamte Querschnittshöhe bzw. Querschnittsbreite des stehenden Holzbauteiles verläuft. Ist der Zapfen kürzer als einer der beiden Querschnittsseiten oder sitzt dieser ausmittig zur Stabachse, so spricht man von zurückversetzten bzw. abgesetzten Zapfenverbindungen. Diese Typen sind zwar optisch schöner anzusehen, da das Zapfenloch vollständig überdeckt wird, kommen aber in Tragwerken aufgrund des Mehraufwandes in der Herstellung eher selten vor. In der Hauptkuppel der „Alten Technik“ kommen gerade Zapfenverbindungen an unterschiedlichsten Tragwerkstellen vor:

- Bundtramebene E0: Ost/West-orientierte Stichbundträme sind in die durchlaufenden Nord/Süd-orientierten Bundträme mittels geraden Zapfen angeschlossen. (siehe auch Anschlussdetail E0-D02 in Kapitel 0)
- Aufhängung der Bundträme an die Stuhlsäule (diese Zapfenverbindung dient hier der Lagesicherung der Stuhlsäule, die Zugkraftübertragung erfolgt über die Eisenschließe)
- Auflagerpunkte der Fußpfetten auf den Stuhlsäulen (Ausnahme: Kuppelsüdseite - hier liegt eine kontinuierlich gelagerte Mauerbank vor)
- Lagesicherung der Kuppelsparrenpfosten auf den Fußpfetten

Die Kraftübertragung von geraden Zapfenverbindungen erfolgt über die Kontaktpressung des Schwellenholzes an der verbleibenden Aufstandsfläche des Steherholzes rund um das Zapfenloch. Da das Zapfenloch im Schwellenholz in der Regel tiefer ausgestemmt bzw. ausgefräst wurde als die Zapfenlänge, darf für diese Kontaktfläche nur die Nettofläche in Rechnung gestellt werden. Zapfenverbindungen können auch geringe Querkräfte übertragen. HINKES (vgl. [9]) liefert in seiner Dissertation diesbezüglich ein sehr umfangreiches Berechnungsmodell, das allerdings an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden soll.

Die Ermittlung der vertikalen Anschlusssteifigkeit des Schwellenholzes erfolgt denkbar einfach zu:

$$C_{V, \text{Schwelle, gerader Zapfen}} = E_{90, \text{mean}} \cdot \frac{A_{\text{netto}}}{\frac{h_{\text{Schwelle}}}{2}} \quad (6.26)$$

$$A_{\text{netto}} = (b_{\text{Schwelle}} - b_{\text{Zapfenloch}}) \cdot h_{\text{Steher}} \quad (6.27)$$

mit:

$C_{v, \text{gerader Zapfen}}$Federsteifigkeiten der Zapfenverbindung senkrecht zum Schwellenholz [N/mm]

$E_{90, \text{mean}}$Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung [N/mm²]

A_{netto}Aufstandsfläche des stehenden Holzes auf dem Schwellenholzes abzüglich des Zapfenloches [mm²]

h_{Schwelle}Querschnittshöhe des Schwellenholzes [mm]

$b_{\text{Zapfenloch}}$Breite des Zapfenloches [mm] (beim Geraden Zapfen ist dieser über die gesamte Querschnittshöhe des Steherholzes ausgeführt)

h_{Steher}Querschnittshöhe des Steherholzes

Ist das Schwellenholz kontinuierlich gelagert, wie dies beispielsweise bei einer satt aufliegenden Mauerbank der Fall ist, kann auch ein Lastausbreitungswinkel von 45° im Schwellenholz für die Ermittlung von A_{netto} angesetzt werden. Wird das Schwellenholz lokal direkt unterhalb der Zapfenverbindung unterstützt, so entfällt die Halbierung der Schwellenhöhe, zumal die „Federlänge“ nicht nur bis zur Querschnittsachse, sondern über die volle Querschnittshöhe anzusetzen ist. Alternativ können bei der Modellbildung auch zwei seriell geschaltete Federn modelliert werden (vgl. Kapitel 6-4.4), die jeweils über die halbe Querschnittshöhe des mittig liegenden Schwellenholzes bestimmt werden. (Feder 1: Schwellenunterkante, Feder 2: Schwellenoberkante)

6-4.3 ANSCHLUSSSTEIFIGKEIT VON „SCHRÄGEN, ABGESTIRNTEN ZAPFENVERBINDUNGEN“

Die Anschlüsse der oberen/unteren liegenden Stuhlsäulen an die Hängestuhlsäule erfolgt jeweils mit einer schrägen, abgestirnten Zapfenverbindung. Nachfolgend soll ein Berechnungsmodell für die Steifigkeitsermittlung derartiger Verbindungen verwendet werden. In Anlehnung an dieses Ingenieurmodell sollen in weiterer Folge die Anschlusssteifigkeiten dieses Zapfenanschlusses in der Hauptkuppel abgeschätzt werden. Dabei kann die mit dem Zapfenloch versehene Hängestuhlsäule als „Schwelle“ und die liegende Stuhlsäule, die den abgestirnten Zapfen aufweist, als „Strebe“ bezeichnet werden.

horizontale Steifigkeit (parallel zur Schwellenachse) [N/mm]:

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right) \quad (6.28)$$

mit:

- t_{Zapfen} Zapfenlänge (Zapfentiefe) [mm]
- b_{zapfen} Zapfenbreite [mm]
- h_{Strebe} Querschnittshöhe des Strebenholzes [mm]
- α Neigungswinkel des Strebenholzes zum Schwellenholz [°]
- E_{α} Elastizitätsmodul im Winkel α zur Faser [N/mm²]

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cdot \cos^3 \alpha} \quad (6.29)$$

- $E_{0,mean}$ Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung [N/mm²]
- $E_{90,mean}$ Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung [N/mm²]

vertikale Steifigkeit (senkrecht zur Schwellenachse) [N/mm]:

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \varphi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \varphi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right) \quad (6.30)$$

mit:

- φ Lastausbreitungswinkel im Schwellenholz [°]
- $h_{Schwelle}$ Querschnittshöhe Schwellenholz [mm]
- $b_{Schwelle}$ Querschnittsbreite Schwellenholz [mm]
- $b_{Zapfenloch}$ Zapfenlochbreite [mm]
- b_{netto} verbleibende Kontaktflächenbreite am Schwellenholz/Strebenholz [mm]

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch} \quad (6.31)$$

k Verhältnis Querschnittshöhe Schwelle / Nettoquerschnittsbreite Schwelle

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}} \quad (6.32)$$

m Verhältniszahl

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \gamma}{b_{netto}} \quad (6.33)$$

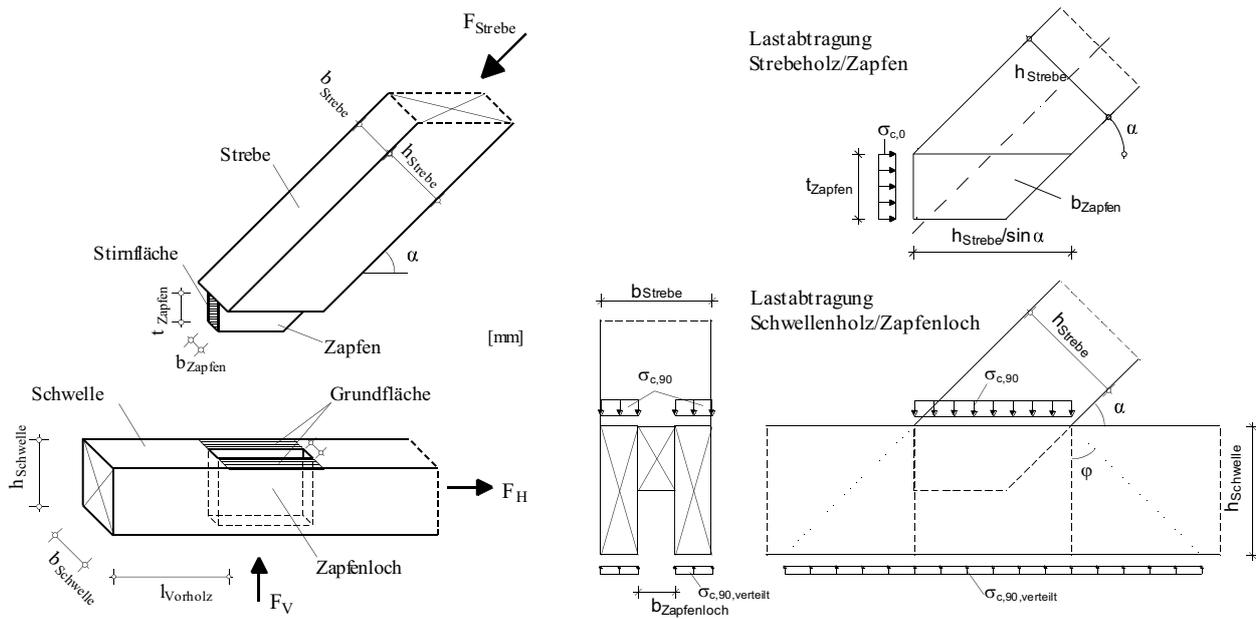


Abb. 6.13: Formelparameter für die Steifigkeitsermittlung abgestrehter Zapfenverbindungen³⁹

Für die Anwendbarkeit des oben genannten Formelapparates wurden im Falle der Hauptkuppel folgende Vereinfachungen getroffen:

- die geringfügigen Flankeneinschnitte der Konstruktionshölzer wurden bei der Ermittlung der Kontaktfläche zwischen den liegenden Stuhlsäulen und der Hängestuhlsäulen vernachlässigt. Diese Flankeneinschnitte an den liegenden Stuhlsäulen sind immer dann erforderlich, wenn die Zangenbalken parallel zu diesen verlaufen und die Zapfenverbindung sozusagen im Bereich des Zangenzwischenraumes zu liegen kommt. (vgl. hierzu auch die textliche Beschreibung zum Anschlussdetail E2-D04 in Kapitel 0).
- Das seitliche Zapfenspiel konnte zufolge der exponierten Lage der Anschlussknoten im Tragwerk nicht immer ermittelt werden. Für die Steifigkeitsermittlung wurde ein beidseitiges Zapfenspiel von 5 mm zugrunde gelegt und auf alle Steifigkeitsberechnungen angewendet.
- Für den Lastausbreitungswinkel φ wird entsprechend der Empfehlung in [23] ein Winkel von 45° im Schwellenholz festgelegt.
- Verlaufen die Zangenbalkenlagen so zur rechtwinkelig abgestirnten Zapfenverbindung, dass eine zusätzliche Hirnholzpressung der liegenden Stuhlsäulen auf den Zangenhölzern möglich wäre, könnte auch diese Kontaktfläche zwischen Zangenbalken und liegender Stuhlsäule in Rechnung gestellt werden. Auf der sicheren Seite liegend, wird die Verbindungssteifigkeit allerdings als „reine Zapfenverbindung“, entsprechend dem obigen Formelapparat bestimmt. Wie bereits in der textlichen Beschreibung des Details E2-D02 in Kapitel 0) vorweggenommen wurde, kann diese Kontaktfläche zwischen liegender Stuhlsäule und Zangenbalken als „verbindungseigene Redundanz“ betrachtet werden, die dann zu tragen kommt, wenn die abgestirnte Zapfenverbindung versagt oder größere Verschiebungen und Verformungen erfährt.
- Der Holznagel, der bei der abgestirnten Zapfenverbindung zwischen der oberen liegenden Stuhlsäule und der Laternenfirstpfette zur Lagesicherung dient (siehe auch VG-C bzw. Anschlussdetail E4-D02) wird in der Steifigkeitsermittlung nicht berücksichtigt. Der vorhandene Holznagel wurde im Berechnungsmodell allerdings insofern berücksichtigt, als dass diese Zapfenverbindung im Falle einer Zugbeanspruchung nicht ausfällt.

³⁹ Dieses Ingenieurmodell wurde von Heiko KOCH im Rahmen seiner 2011 an der Universität Kassel eingereichten Dissertation „Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten historischer Holztragwerke. Der abgestirnte Zapfen“ entwickelt. Auch die Forschungsarbeit HOLZ-HOLZ-Verbindungen des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz stützt sich auf dieses Berechnungsmodell.

6-4.4 ANSCHLUSSSTEIFIGKEIT VON „VOLL-, MITTEL- UND HALBKAMMVERBINDUNGEN“

Alle Zangenbalkenpaare sind mittels Mittelkamm an die Hängestuhlsäule angeschlossen und durch einen mittigen, eisernen Sicherungsbolzen zusammengespannt. Da die Vorspannkraft des Sicherungsbolzens im Rahmen dieser Masterarbeit nicht ermittelt wurde, wird auf den in der Formel angegebenen Reibungsanteil bei der Steifigkeitsermittlung verzichtet ($F_{\text{Auflast}} = 0$). Nachfolgend soll der Formelapparat zur Ermittlung der Steifigkeit einer Mittelkammverbindung, basierend auf dem Vorschlag in [23] angegeben werden:

horizontale Steifigkeit einer Voll-, Mittel-, oder Halbkammverbindung (Erstbelastung) [N/mm]:

$$C_{H,Kamm,1} = 1,58 \cdot F_{\text{Auflast}} \cdot \mu + 416 \cdot \frac{b_{\text{Holz,oben}} \cdot t_{\text{Kamm}}}{b_{\text{Holz,unten}}} \quad (6.34)$$

mit:

- F_{Auflast} Reibungskräfte aktivierende Auflast auf die Kammverbindung (hier Bolzenvorspannkraft)
- μ Reibbeiwert (empfohlener Wert = 0,4)
- $b_{\text{Holz,oben}}$ Querschnittsbreite des oben liegenden Holzes [mm]
- $b_{\text{Holz,unten}}$ Querschnittsbreite des unten liegenden Holzes [mm]
- t_{Kamm} Einschnitttiefe der Kammverbindung [mm]

horizontale Steifigkeit Voll-, Mittel-, oder Halbkammverbindung (Wiederbelastung) [N/mm]:

$$C_{H,Kamm,2} = 1,70 \cdot C_{H,Kamm,1} \quad (6.35)$$

Die Federsteifigkeit von Kammverbindungen in vertikaler Richtung $C_{V,Kamm}$ setzt sich aus zwei seriell wirkenden Federn $C_{V,Holz,oben}$ und $C_{V,Holz,unten}$ zusammen. Ist das unten liegende Holz kontinuierlich gelagert (z. B.: voll aufliegende Mauerbank), so darf für die Steifigkeitsermittlung der unteren Feder ein Lastausbreitungswinkel α berücksichtigt werden. Bei üblichen Holzquerschnittsgeometrien sollte dieser Lastausbreitungswinkel mit 45° angenommen werden. Ist das unten liegende Holz der Kammverbindung nicht kontinuierlich gelagert (z. B.: auf Stuhlsäulen auflagernde Pfette), soll dieser Lastausbreitungswinkel nicht in Rechnung gestellt werden. Zugunsten einer kürzeren Schreibweise der in den Formeln vorkommenden Indizes soll nachfolgend die obere Feder als „A“ und die untere Feder als „B“ bezeichnet werden. Zum besseren Verständnis der einzelnen Geometrieparameter sollen diese anhand eines einfachen Beispiels einer Vollkammverbindung zwischen einem Bundtram (BT=Holz,oben) und einer Mauerbank (MB=Holz,unten) erläutert werden. Das Beispiel wurde dem Forschungsbericht Holz-Holz-Verbindungen [23] entnommen.

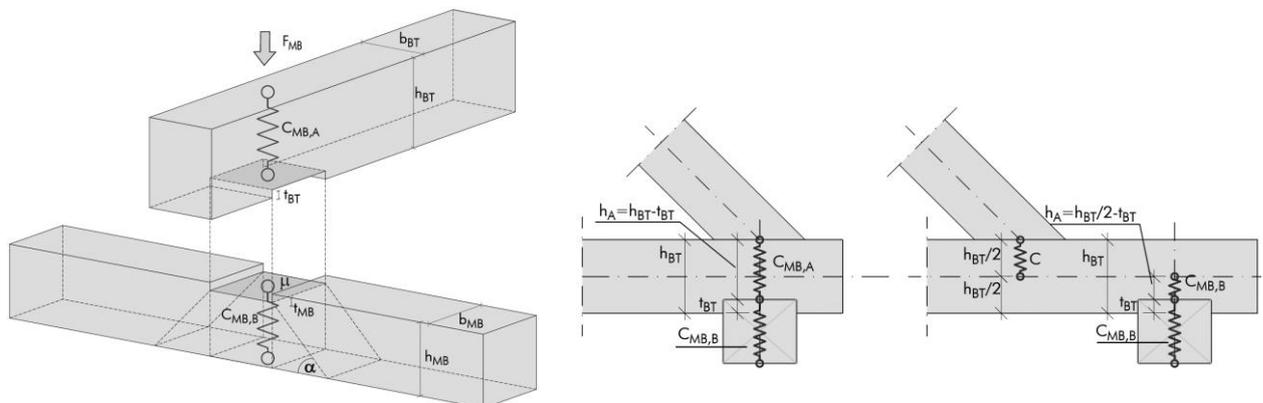


Abb. 6.14: Prinzip zur Ermittlung der vertikalen Federsteifigkeit von Kammverbindungen [23]

Wie man an den beiden Aufrissdarstellungen in Abb. 6.14 erkennt, spielt auch die Lage der vertikalen Lasteinleitung in die Kammverbindung eine entscheidende Rolle. Liegt die Lasteinleitungsfläche direkt über der Verbindung, so ist für die Ermittlung der oberen Feder $C_{V,A}$ die volle Querschnittshöhe des oben liegenden Holzes abzüglich der Einschnitttiefe der Kammverbindung $t_{Kamm,oben}$ anzusetzen. Erfolgt die vertikale Lasteinleitung nicht direkt über der Kammverbindung, ist nur die „Federweglänge“ zwischen der Querschnittsachse des oben liegenden Holzes bis zur Kontaktfläche der Kammverbindung anzusetzen.

Nachfolgend soll der Formelapparat für die Ermittlung der vertikalen Federsteifigkeit für eine „Vollkammverbindung“ angeführt werden:

vertikale Gesamtsteifigkeit der Vollkammverbindung (Erstbelastung) [N/mm]:

Es handelt sich hierbei um ein serielles Federsystem:

$$\frac{1}{C_{V,ges,1}} = \frac{1}{C_{V,A,1}} + \frac{1}{C_{V,B,1}} \quad (6.36)$$

durch Umformung erhält man die vertikale Gesamtfedersteifigkeit der Kammverbindung:

$$C_{V,ges,1} = \frac{C_{V,A,1} \cdot C_{V,B,1}}{C_{V,A,1} + C_{V,B,1}} \quad (6.37)$$

mit:

- $C_{V,ges,1}$ vertikale Federsteifigkeit der gesamten Kammverbindung [N/mm]
- $C_{V,A,1}$ vertikale Federsteifigkeit der oberen seriellen Feder [N/mm]
- $C_{V,B,1}$ vertikale Federsteifigkeit der unteren seriellen Feder [N/mm]

Die vertikale Federsteifigkeit **der oberen seriellen Feder** ergibt sich zu:

Fall I: vertikale Auflasteinleitung direkt über der Kammverbindung (siehe Abb. 6.14 - Mitte)

$$C_{V,A,1,Fall\ I} = E_{90,mean} \cdot \frac{b_{Holz,oben} \cdot b_{Holz,unten}}{h_{Holz,oben} - t_{Kamm,oben}} \quad (6.38)$$

Fall II: vertikale Auflasteinleitung NICHT direkt über der Kammverbindung (siehe Abb. 6.14 - rechts)

$$C_{V,A,1,Fall\ II} = E_{90,mean} \cdot \frac{b_{Holz,oben} \cdot b_{Holz,unten}}{\frac{h_{Holz,oben}}{2} - t_{Kamm,oben}} \quad (6.39)$$

mit:

- $b_{Holz,oben}$ Querschnittsbreite des oben liegenden Holzes [mm]
- $b_{Holz,unten}$ Querschnittsbreite des unten liegenden Holzes [mm]
- $t_{Kamm,oben}$ Einschnitttiefe der Kammverbindung im oberen Holz [mm]
- $E_{90,mean}$ Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung [N/mm²]

Die vertikale Federsteifigkeit **der unteren seriellen Feder** ergibt sich zu:

Fall I: kontinuierliche Lagerung des unteren Holzes (Ansatz eines Lastverteilungswinkels)

$$C_{V,B,1,Fall\ I} = E_{90,mean} \cdot b_{Holz,unten} \frac{2 \cdot \tan \alpha}{\ln \left(2 \cdot \frac{h_{Holz,unten} - t_{Kamm,unten}}{b_{Holz,unten}} \cdot \tan \alpha + 1 \right)} \quad (6.40)$$

Fall II: KEINE kontinuierliche Lagerung des unteren Holzes

$$C_{V,B,1, \text{Fall II}} = E_{90, \text{mean}} \cdot \frac{b_{\text{Holz, oben}} \cdot b_{\text{Holz, unten}}}{h_{\text{Holz, unten}} - t_{\text{Kamm, unten}}} \quad (6.41)$$

vertikale Steifigkeit Voll-, Mittel-, oder Halbkammverbindung (Wiederbelastung) [N/mm]:

$$C_{V, \text{Kamm, 2}} = 1,70 \cdot C_{V, \text{Kamm, 1}} \quad (6.42)$$

Wie bereits erwähnt, gilt dieser oben angeführte Formelapparat zur Ermittlung der vertikalen Federsteifigkeit für einfache Vollkammverbindungen. In Anlehnung an die Empfehlung in [23] können die Formeln allerdings auch entsprechend für die Anwendung auf Halb- und Mittelkämme adaptiert werden. Dabei sollten die Einschnitttiefen der Kammverbindungen auf eine mittlere Höhe, bezogen auf die jeweiligen Flächenanteile der verbleibenden „Kämme“ der beiden Konstruktionshölzer aufgeteilt werden. Konstruktionshölzer, deren Querschnittsform von der Rechteckform abweicht (z. B.: 5-Kant-Sohlschwellen bei liegenden Stühlen), sollten als flächenäquivalenter rechteckiger Ersatzquerschnitt mit einer entsprechenden Ersatzquerschnittshöhe h^* berechnet werden. Auch hierfür liefert die Forschungsarbeit HOLZ-HOLZ-Verbindungen der Technischen Universität Graz (vgl. [23]) ein sehr anschauliches Beispiel:

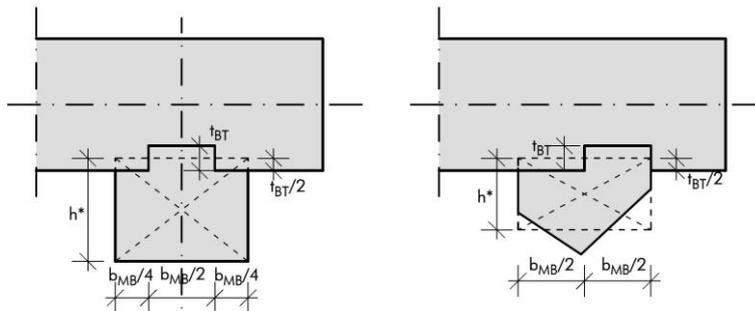


Abb. 6.15: Ersatzquerschnittshöhe bei Halb- und Mittelkammverbindungen und nicht-rechteckigen Holzquerschnitten [23]
links: Mittelkamm Bundtram-Mauerbank;
rechts: Halbkamm eines 5-Kant-Rähmbalkens

Im Falle der Hauptkuppel ist eine Ermittlung der vertikalen Steifigkeit derartig ausgebildeter Mittelkammverbindungen nicht erforderlich. Die Mittelkammverbindungen sind ausschließlich an den Kreuzungspunkten der Hängestuhlsäulen mit den Zangenbalkenpaaren zur Ausführung gekommen und daher erfolgt die Lastabtragung hauptsächlich über die Normalkraftwirkung in den Zangenbalkenpaaren, also in zangenparalleler Richtung. Demnach ist nur die horizontale Federsteifigkeit $C_{H, \text{Mittelkamm, 1}}$ bzw. 2 zu bestimmen. Der Reibungsanteil wird infolge fehlender Kenntnis hinsichtlich der Bolzenspannkraft vernachlässigt. Im vorliegenden Fall ergibt sich die horizontale und damit zangenparallele Federsteifigkeit zu:

Erstbelastung:

$$C_{H, \text{Mittelkamm, 1}} = (\text{Reibungsanteil} = 0) + 416 \cdot \frac{h_{\text{Zangenbalken}} \cdot t_{\text{Kamm}}}{b_{\text{Hängestuhlsäule}}} \cdot 2 \quad (6.43)$$

Die Verdopplung der horizontalen Federsteifigkeit am Ende der Formel rührt daher, dass jeweils zwei Zangenbalken seitlich an die mittig liegende Stuhlsäule angeschlossen sind.

Wiederbelastung:

$$C_{H, \text{Mittelkamm, 2}} = 1,70 \cdot C_{H, \text{Mittelkamm, 1}} \quad (6.44)$$

6-4.5 ANSCHLUSSSTEIFIGKEIT VON „KREUZKAMMVERBINDUNGEN“

Kreuzkammverbindungen kommen in der Hauptkuppel immer dort vor, wo die Zangenbalkenhölzer die oberen/unteren liegenden Stuhlsäulen bzw. Strebebalken kreuzen. Die Zangenbalken umfassen dabei die geneigten Stuhlsäulen/Strebehölzer und sind mit einem ca. 35 mm tiefen Kreuzkamm an die kreuzenden Mittelhölzer angearbeitet. Die Kreuzkämme werden dabei durch einen mittig liegenden Schraubenbolzen zusammengespant und in ihrer Lage gesichert. Da die Spannkraft in der Bolzenverbindung nur sehr schwer zu ermitteln ist, wird auf den Ansatz der Reibungskomponente zwischen den Hölzern verzichtet und die Verbindungssteifigkeit nur anhand der Hirnholzpressung der Kreuzkämme ermittelt. Diese Vernachlässigung der Reibungskomponente lässt sich insofern begründen, als dass der mittig sitzende Bolzen tatsächlich nur der Lagesicherung dient und sich die Hölzer infolge Austrocknung und dem damit einhergehenden Schwindprozess ohnehin der Vorspannkraft der Bolzen entzogen haben. Nachfolgend wird der in [23] aus Laborversuchen empirisch ermittelte Steifigkeitsansatz für Kreuzkämme aufgegriffen und für die Modellbildung der Hauptkuppel verwendet.

horizontale Steifigkeit (parallel zur Stabachse) (Erstbelastung) [N/mm]:

$$C_{H,Kreuzkamm,1} = 530 \cdot t_{Kreuzkamm} \quad (6.45)$$

mit:

$t_{Kreuzkamm}$Einschnitttiefe der Kreuzkammverbindung [mm]

horizontale Steifigkeit (parallel zur Stabachse) (Wiederbelastung) [N/mm]:

$$C_{H,Kreuzkamm,2} = 2,50 \cdot C_{H,Kreuzkamm,1} \quad (6.46)$$

Da in der Hauptkuppel ausschließlich Kreuzkammverbindungen zur Anwendung kommen, die in der Gespärreebene wirken, kann auf die Steifigkeitsermittlung in vertikaler Richtung verzichtet werden. Die Ermittlung des vertikalen Steifigkeitsansatzes ist in [23] angegeben und wird dort beispielsweise für die Ermittlung der senkrechten Anschlusssteifigkeit einer, mittels Kreuzkamm an einen Bundtram angeschlossenen Sohlschwelle vorgestellt. Prinzipiell ist die vertikale Anschlusssteifigkeit von Kreuzkammverbindungen analog zu normalen Voll-, Mittel- oder Halbkammverbindungen zu ermitteln. (vgl. Kapitel 6-4.4)

Um diesen sehr einfachen, empirisch ermittelten Formelansatz verwenden zu können, wurden der Berechnung folgende Vereinfachungen zugrunde gelegt:

- Der Reibungsanteil zwischen den Hölzern wurde aufgrund der nicht bekannten Vorspannkraft des mittigen Ankerbolzens nicht in Rechnung gestellt. Außerdem wurde auch diese Abschätzformel ohne den Einfluss der Reibung ermittelt. (vgl. [23]-Kapitel 5.5)
- Das für den Ankerbolzen erforderliche Loch nimmt keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Kammverbindung. Die Querschnittsreduktion der Kammstirnflächen ist marginal. Vielmehr wirkt der Ankerbolzen in horizontale Richtung steifigkeitserhöhend, zumal dieser als Scher-Lochleibungsverbindung wirksam wird.
- Die empirisch ermittelte Abschätzformel wurde anhand von Bauteilprüfungen ermittelt. Für die Laborprüfungskonfiguration wurden die beiden Konstruktionshölzer orthogonal, also 90° zueinander angeordnet. In der Hauptkuppel allerdings, schneiden die Hölzer einander im Kreuzungswinkel < 90°! Durch diesen Kreuzungswinkel ergeben sich natürlich andere Faserorientierungen in den Hirnholzflanken der Kreuzkammverbindung. Beim rechtwinkeligen Anschluss hingegen stehen die Fasern quasi immer im 45° Winkel zur Kammstirnfläche. Um die Abschätzformel dennoch verwenden zu können, wurde dieser vom rechten Winkel abweichende Verschneidungswinkel der beiden Hölzer ignoriert. Für die genaue Ermittlung der Steifigkeiten bzw. Tragfähigkeit nicht orthogonaler Kreuzkämme fehlen derzeit noch bestätigte Berechnungsansätze und könnten beispielsweise ebenfalls anhand von Laborprüfungen empirisch hergeleitet werden.

6-4.6 ANSCHLUSSSTEIFIGKEIT UND TRAGFÄHIGKEIT VON „HÄNGEEISENVERBINDUNGEN“

Hängeeisen oder auch „Bundtramschließen“ genannt, kommen, wie der Name schon sagt, zur Aufhängung des Bundtrams an die Hängesäulen bei Hängewerken zur Anwendung. Das Hängeeisen kann dabei nur Zugkräfte aus der Hängestuhlsäule in den Bundtram übertragen. Bei Druck-, Moment-, oder Querkraftbeanspruchung leistet diese Hängeeisenverbindung keinen Widerstand und weist somit in diesen Belastungsfällen keine Steifigkeit auf. Die Kraftübertragung des Hängeeisens zwischen den beiden Holzbauteilen wird dabei von drei Faktoren bestimmt:

- Verbindungsmittel, mit dem das Hängeeisen an die Hängestuhlsäule angeschlossen ist. Bei älteren Holzkonstruktionen kamen hierfür im Regelfall eiserne Durchsteckbolzen oder Nägel zum Einsatz.
- Querholzpressung, die das Hängeeisen quer zur Faser an der Unterseite des Bundtrams einträgt.
- Zugfestigkeit des Hängeeisens

Dabei stellt der kleinste Tragwiderstand den bemessungsrelevanten Faktor dar.

In Kapitel 5-3.3.5 wurde bereits darauf hingewiesen, dass alten Eisenbauteilen nur mit gebotener Vorsicht eine äquivalente Stahlzugfestigkeit im Vergleich zu heute eingesetztem Baustahl zugesprochen werden sollte. In diesem Zusammenhang empfiehlt HOLZER (vgl. [11]) als erste Näherung eine um 20% reduzierte Festigkeit des modernen Baustahls S235JR anzunehmen. Nachfolgend werden die drei Faktoren, welche die Tragfähigkeit von Hängeeisenverbindungen bestimmen, mit den zugehörigen Berechnungsformeln beschrieben.⁴⁰

Durchsteckbolzenverbindung Hängestuhlsäule - Eisenaufhängung → Rd(1)

Im Fall der Hauptkuppel wurde das Hängeeisen mit einem mittig liegendem Ankerbolzen an die Hängesäule angeschlossen. Nachfolgend soll der Formelapparat für derartige „zweischmittige Holz-Blech-Verbindungen“ mit außenliegenden dünnen Blechen basierend auf der Johansen-Theorie angeschrieben werden.

$$R_{Johansen,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,50 \cdot f_{h,d} \cdot t \cdot d \\ \sqrt{2 \cdot M_{y,d} \cdot f_{h,d} \cdot d + \Delta R_d} \end{array} \right. \quad (6.47)$$

mit:

- $R_{Johansen,d}$ Tragfähigkeit der zweischmittigen Holz-Blechverbindung (außenl. dünnes Blech) [N]
 $f_{h,d}$ Bemessungswert der Lochleibungsfestigkeit des mittig liegenden Holzbauteils [N/mm²]
 t Querschnittsdicke des mittig liegenden Holzbauteils [mm]
 $M_{y,d}$ Bemessungswert des FlieBmoments des eisernen Durchsteckbolzens [N/mm]
 d Durchmesser des eisernen Durchsteckbolzens [mm]
 ΔR_d Anteil der Seilwirkung.

$$f_{h,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{h,k}}{\gamma_{M,VH}} \quad (6.48)$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_l \quad (6.49)$$

- k_{mod} Modifikationsbeiwert in Abhängigkeit zur Nutzungsklasse und Lasteinwirkungsdauer [-]
 $\gamma_{M,VH}$ Materialteilsicherheitsbeiwert [-] (für Vollholz = 1,30)
 $f_{h,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit des mittig liegenden Holzbauteils [N/mm²]
 ρ_l Rohdichte des verwendeten Konstruktionsholzes [kg/m³]

⁴⁰ Die nachfolgenden Formeln wurden in Anlehnung an die „Formelsammlung Holzbau“, zur Verfügung gestellt vom Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz, für die Anwendbarkeit auf ältere Eisenaufhängungen adaptiert.

$$M_{y,k} = 0,30 \cdot f_{u,k,Eisen} \cdot d^{2,6} \quad (6.50)$$

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{\gamma_{M,Eisen}} \quad (6.51)$$

$M_{y,k}$ charakteristisches Fließmoment des eisernen Durchsteckbolzens [N/mm]
 $f_{u,k,Eisen}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des eisernen Verbindungsmittel [N/mm²]
 Gemäß HOLZER (vgl. [11]) kann für eine erste Abschätzung eine um 20% reduzierte Festigkeit des modernen Baustahl S235JR verwendet werden:

$$f_{u,k,Eisen} = 80\% \cdot f_{u,k,S235JR} \quad (6.52)$$

$\gamma_{M,Eisen}$ Materialteilsicherheitsbeiwert [-] (empfohlener Wert für altes Gusseisen = 1,25)

$$\Delta R_d = \min \begin{cases} \alpha_1 \cdot R_d \\ \alpha_2 \cdot R_{ax,d} \end{cases} \quad (6.53)$$

R_d Grundanteil der Seilwirkung nach der Johansen-Theorie [N]
 $R_{ax,d}$ axiale Tragfähigkeit des Verbindungsmittels [N]
 α_1, α_2 Beiwert zur Ermittlung der Seilwirkung [-] (für Bolzenverbindungen gilt $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,25$)

Querholzpressung Bundtram → Rd(2)

Die unterhalb des Bundtrams durchgeführte Eisenaufhängung bewirkt im Falle einer Zugkraft in der Hängesäule eine Querholzpressung an der Unterseite des Bundtrams. Die Tragfähigkeit $R_{c,Bundtram,90,d}$ [N] kann entsprechend über die max. zulässige Querholzpressung wie folgt bestimmt werden:

$$R_{c,Bundtram,90,d} = A_{Press} \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} \quad (6.54)$$

mit:

A_{Press} Anpressfläche der Eisenschließe an der Unterseite des Bundtrams

$$A_{Press} = b_{Bundtram} \cdot b_{Eisenschließe} \quad (6.55)$$

$f_{c,90,d}$ Bemessungswert der zulässigen Holzpressung senkrecht zur Faser [N/mm²]

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_{M,VH}} \quad (6.56)$$

$k_{c,90}$ Beiwert zur Modifikation der Querdruckfestigkeit [-]. Im Falle einer Eisenaufhängung liegt der Fall „beidseitiges Vorholz“ vor - dementsprechend gilt $k_{c,90} = 1,50$

Zugfestigkeit des Hängeeisens Bundtram → Rd(3)

Die Zugfestigkeit des Hängeeisens kann am einfachsten über einen einfachen Zugfestigkeitsnachweis im Gewindequerschnitt der Bolzenaufhängung geführt werden.⁴¹

⁴¹ Achtung: Wird ein sehr dünnes Eisenband verwendet, bzw. ist dieses durch Kerben deutlich geschwächt, kann auch dieser „Nettoquerschnitt“ des Flacheisens flächenmäßig kleiner als der Gewindedurchmesser des Schraubenbolzens sein!

$$R_{Zug,Eisen,d} = \frac{f_{u,k,Eisen}}{\gamma_{M,Eisen}} \cdot \min(A_{Gewindequerschnitt}; A_{Eisenband,netto}) \quad (6.57)$$

Der resultierende Wert der Bemessungstragfähigkeit der Eisenaufhängung mit Durchsteckbolzenverbindung ergibt sich folglich aus der kleinsten Tragfähigkeit der oben angeführten „Versagensmechanismen“ zu:

$$R_{Eisenaufhängung,d} = \min \begin{cases} R_{d,(1)} = R_{Johansen,d} \\ R_{d,(2)} = R_{c,Bundtram,90,d} \\ R_{d,(3)} = R_{Zug,Eisen,d} \end{cases} \quad (6.58)$$

Ein ausführliches Rechenbeispiel für die Ermittlung des Bemessungswertes der Tragfähigkeit derartiger Eisenaufhängungen wurde für die Bundtramaufhängung in der Hauptkuppel geführt und ist in ANHANG D dieser Masterarbeit abgelegt.

Das allgemeine Federgesetz erlaubt nun eine Ermittlung der Federsteifigkeit unter Annahme einer lokalen Verformung der Verbindung. Hierfür wird die charakteristische Tragfähigkeit für die Ermittlung der Zugfedersteifigkeit herangezogen (ermittelt ohne Materialteilsicherheitsbeiwerte). Hier sei der von HOLZER (vgl. [11]) vorgeschlagene Ansatz für die zulässige Verformung/Anschlussseite ($u_{\text{lokal}} = 1,5$ bis 2 mm/Anschlussseite) aufgegriffen und auf das Abschätzmodell angewendet:

$$C_{Eisenaufhängung,axial} = \frac{R_{Eisenaufhängung,k}}{u_{\text{lokal}}} \quad (6.59)$$

mit:

- $C_{Eisenaufhängung}$ Federsteifigkeiten der Eisenaufhängung auf Zug [N/mm]
- $R_{Eisenaufhängung,k}$... charakteristische Tragfähigkeit der Eisenaufhängung [N]
- u_{lokal} zulässige lokale Verformung der Eisenaufhängung/Anschlussseite
(empfohlener Wert : $2,0$ mm/Anschlussseite)

Je nach Belastungsszenario kann es natürlich auch vorkommen, dass die Hängestuhlsäule einer Drucknormalkraft ausgesetzt ist (z. B.: starke einseitige Belastung des Hängewerks (Wind, halbseitige Schneelast,...)). Die Zugfeder der Eisenaufhängung fällt natürlich in diesem Belastungsfall aus, die Aufhängungsbleche übernehmen nur mehr eine lagesichernde Funktion und die Hängestuhlsäule stützt sich auf die Bundtramoberkante ab. Meist sind die Hängestuhlsäulen in die Bundträme eingezapft - auch im Falle der Hauptkuppelkonstruktion - um den Verbindungsknoten bei einer anfallenden Druckbelastung in seiner Lage zu sichern. Im Berechnungsmodell kann diese Besonderheit beispielsweise so erfasst werden, dass sowohl eine Zugfeder (Eisenaufhängung) als auch eine Druckfeder (Querdruck Bundtram) modelliert werden, die in Abhängigkeit zur wirkenden Normalkraft (Zug/Druck) in der Hängestuhlsäule wirksam sind. Für die Ermittlung der Federsteifigkeit im Druckfall gilt das in Kapitel 6-4.2 vorgestellte Berechnungsmodell.

6-4.7 ERGEBNISSE DER ANSCHLUSSTEIFIGKEITSERMITTLUNGEN

Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse der in ANHANG D in tabellarischer Form durchgeführten Nachgiebigkeitsberechnungen zusammengefasst. Diese Anschlusssteifigkeiten wurden für die Modellberechnung des Hauptkuppeltragsystems herangezogen. Zusätzlich sollen zwei Übersichtsdarstellungen (Abb. 6.16 und Abb. 6.17) die Lage der einzelnen Anschlusssteifigkeiten im Tragwerk verdeutlichen. Zugunsten der Übersichtlichkeit wurden in diesen Abbildungen, insbesondere bei den mehrfach vorkommenden Anschlussknotensteifigkeiten (Kreuzkamm, Mittelkamm, gerader Zapfen,...) jeweils nur eine Anschlussstelle markiert. In den Darstellungen sind zwei Kennzeichnungsarten zu unterscheiden:

- in diesen Anschlussbereichen wurden die Anschlusssteifigkeiten explizit rechnerisch ermittelt und entsprechend im Berechnungsmodell angewendet. Die berechneten Steifigkeitsgrößen sind in den zugehörigen Tabellen Tab. 6.6 und Tab. 6.7 angegeben.
- Koppelungsbereiche, für die keine Anschlusssteifigkeiten ermittelt wurden. Diese Bereiche wurden als einfache Momentengelenke bzw. Scherengelenke berücksichtigt. Um die exzentrischen Lastenleitungen im Berechnungsmodell zu erfassen, wurden entsprechende Koppelstäbe als Exzenterstäbe verwendet (z. B.: Anschluss Kuppelsparren-Mittelpfette-Zangenbalkenlage E2, stumpfe Stöße, Sparrenaufklauungen,...). Für diese Bereiche sind in den Tabellen Tab. 6.6 und Tab. 6.7 keine Steifigkeitsgrößen angegeben.

6-4.7.1 Anschlusssteifigkeiten in den Nord/Süd-orientierten Gespärren

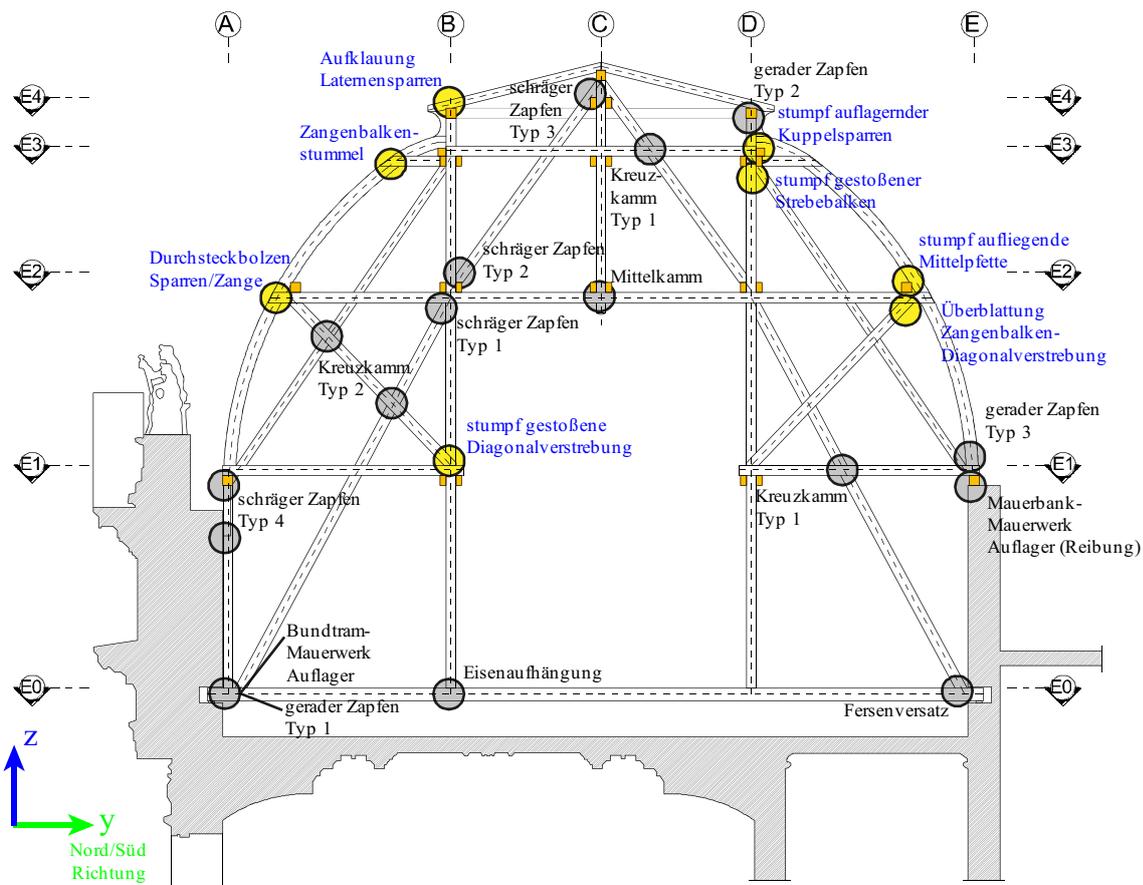


Abb. 6.16: Übersicht der Lage der Anschlusssteifigkeiten in Nord-Südrichtung am Beispiel VG-3

Tab. 6.6: Anschlusssteifigkeiten in den Nord-Süd orientierten Hauptgespärren

Knoten	Verbindungstyp	Wirkungsrichtung / Art	Anschlusssteifigkeit [N/mm]	
			Erstbelastung	Wiederbelastung
Nord/Süd orientierte Gespärre				
Bundtram-Mauerwerk	auf Mauerwerk aufgelegt	z-Richtung / Druck	starr	-
		y-Richtung / Reibung	iterativ ermittelt (vgl. Kapitel 6-2.6)	-
Mauerbank-Mauerwerk	auf Mauerwerk aufgelegt	z-Richtung / Druck	starr	-
		y-Richtung / Reibung	iterativ ermittelt (vgl. Kapitel 6-2.6)	-
Bundtram-Stuhlsäule	gerader Zapfen Typ 1_N/S	z-Richtung / Druck	73000	-
Bundtram-liegende Stuhlsäule	Fersenversatz	axial / Druck	12500	-
Bundtram-Hänge-stuhlsäule (Zug)	Eisenaufhängung	z-Richtung / Zug	3400	-
Bundtram-Hänge-stuhlsäule (Druck)	gerader Zapfen Typ 1_N/S	z-Richtung / Druck	73000	-
Stuhlsäule-Fußpfette (Kuppel/Laterne)	Gerader Zapfen Typ 2_N/S	z-Richtung / Druck	98800	-
Sparrenfuß-Fußpfette	Gerader Zapfen Typ 3_N/S	z-Richtung / Druck	46800	-
Zangenbalken-Hängestuhlsäulen	Mittelkamm	Scherengelenk y-Richtung / Druck-Zug	30700	52200
Zangenbalken-liegende Stuhlsäulen	Kreuzkamm Typ 1_N/S	Scherengelenk y-Richtung / Druck-Zug	37100	92800
Diagonalzangen-liegende Stuhlsäulen/Strebe-balken	Kreuzkamm Typ 2_N/S	Scherengelenk axial / Druck-Zug	37100	92800
liegende Stuhlsäule unten-Hängestuhlsäule	schräger Zapfen Typ 1_N/S	y-Richtung / Druck	78100	-
		z-Richtung / Druck	137700	-
liegende Stuhlsäule oben-Hängestuhlsäule	schräger Zapfen Typ 2_N/S	y-Richtung / Druck	66300	-
		z-Richtung / Druck	86900	-
liegende Stuhlsäule oben-Hängestuhlsäule	schräger Zapfen Typ 3_N/S	y-Richtung / Druck	65800	-
		z-Richtung / Druck	100400	-
Kopfbandanschluss oben/unten	schräger Zapfen Typ 4_N/S	// Schwelle / Druck	54000	-
		⊥ -Schwelle / Druck	29900	-

6-4.7.2 Anschlusssteifigkeiten in den Ost/West-orientierten Gespärren

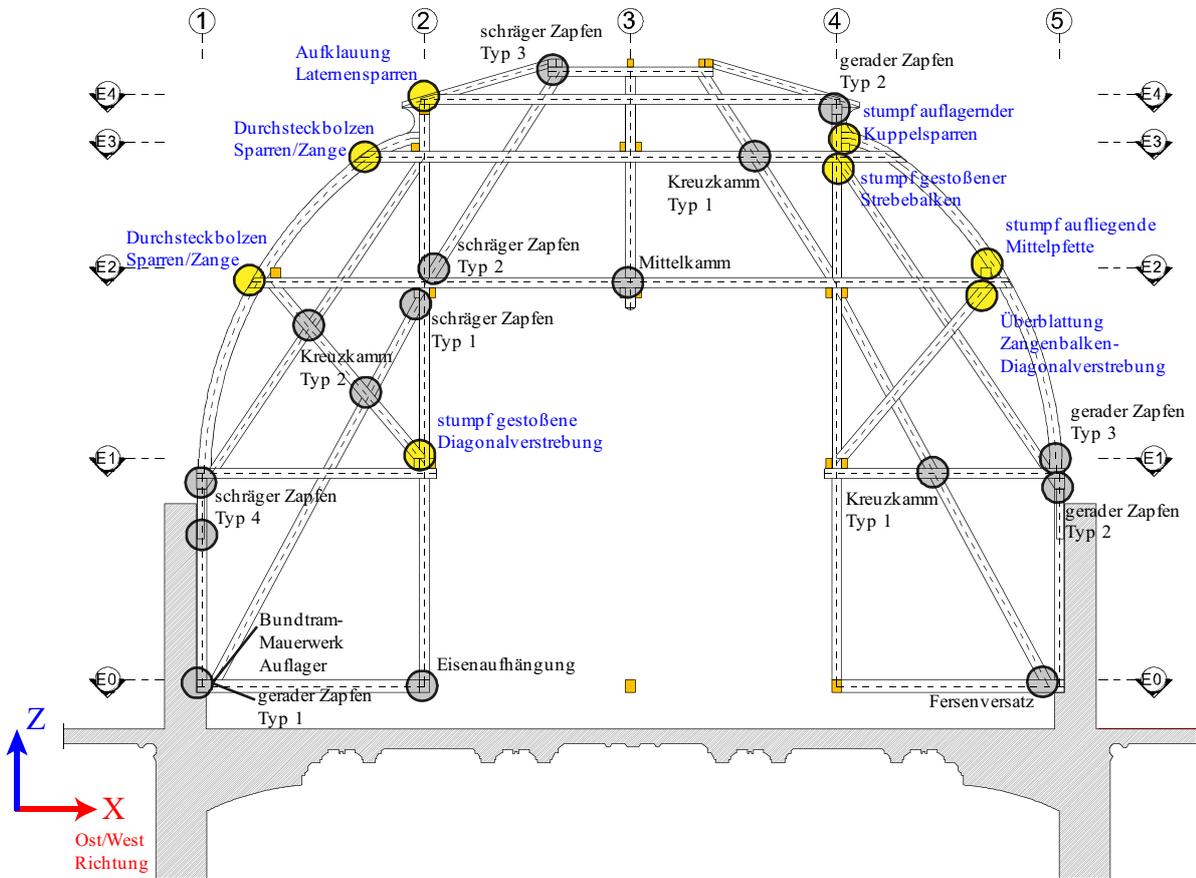


Abb. 6.17: Übersicht der Anschlusssteifigkeiten in Ost-Westrichtung am Beispiel VG-C

Tab. 6.7: Anschlusssteifigkeiten in den Ost-West orientierten Hauptgespärre

Knoten	Verbindungstyp	Wirkungsrichtung / Art	Anschlusssteifigkeit [N/mm]	
			Erstbelastung	Wiederbelastung
Ost/West orientierte Gespärre				
Bundtram-Mauerwerk	auf Mauerwerk aufgelegt	z-Richtung / Druck	starr	-
		x-Richtung / Reibung	iterativ ermittelt (vgl. Kapitel 6-2.6)	-
Bundtram-Stuhlsäule	gerader Zapfen Typ 1_O/W	z-Richtung / Druck	73000	-
Bundtram-liegende Stuhlsäule	Fersenversatz	axial / Druck	12500	-
Bundtram-Hänge- stuhlsäule (Zug)	Eisenaufhängung	z-Richtung / Zug	3400	-
Bundtram-Hänge- stuhlsäule (Druck)	gerader Zapfen Typ 1_O/W	z-Richtung / Druck	73000	-
Stuhlsäule-Fußpfette (Kuppel/Laterne)	Gerader Zapfen Typ 2_O/W	z-Richtung / Druck	98800	-
Sparrenfuß-Fußpfette	Gerader Zapfen Typ 3_O/W	z-Richtung / Druck	46800	-
Zangenbalken- Hängestuhlsäulen	Mittelkamm	Scherengelenk x-Richtung / Druck-Zug	30700	52200
Zangenbalken-liegende Stuhlsäulen	Kreuzkamm Typ 1_O/W	Scherengelenk x-Richtung / Druck-Zug	37100	92800
Diagonalzangen- liegende Stuhlsäulen/Strebe- balken	Kreuzkamm Typ 2_O/W	Scherengelenk axial / Druck-Zug	37100	92800
liegende Stuhlsäule unten-Hängestuhlsäule	schräger Zapfen Typ 1_O/W	x-Richtung / Druck	78100	-
		z-Richtung / Druck	137700	-
liegende Stuhlsäule oben-Hängestuhlsäule	schräger Zapfen Typ 2_O/W	x-Richtung / Druck	71400	-
		z-Richtung / Druck	108300	-
liegende Stuhlsäule oben-Firstpfette Laterne	schräger Zapfen mit Holznagel Typ 3_O/W	x-Richtung / Druck	44500	-
		z-Richtung / Druck	51600	-
Kopfbandanschluss oben/unten	schräger Zapfen Typ 4_O/W	// Schwelle / Druck	54000	-
		⊥ -Schwelle / Druck	29900	-

6-5 MODELLBILDUNG

Das Hauptkuppeldachtragwerk wird mit dem Finite-Elemente- und Stabtragwerksprogramm *Dlubal RFEM* in der Programmversion 5.06 durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse werden anhand der mittig im Tragwerk liegenden Hauptgespärre VG-3 und VG-C gezeigt (siehe ANHANG F).

6-5.1 ALLGEMEINE ANMERKUNGEN ZUR MODELLBILDUNG

6-5.1.1 Theorie I. Ordnung

Die Gleichgewichtsgleichungen des statischen Systems werden am unverformten System bestimmt. Die Schnittkräfte werden nach Theorie I. Ordnung berechnet.

6-5.1.2 Nichtlinearität

Nichtlinearität bedeutet, dass das statische System von der Art und Größe der Belastung abhängig ist. Es können zwei Arten von Nichtlinearität unterschieden werden (vgl. [36]):

- werkstoffbedingte Nichtlinearität
- strukturbedingte Nichtlinearität

Da die Schnittgrößenermittlung am Hauptkuppeldachtragwerk nach Theorie I. Ordnung vorgenommen wird, nimmt die strukturbedingte Nichtlinearität keinen Einfluss auf die Größe der Schnittkräfte. Die werkstoffbedingte Nichtlinearität hingegen hat insbesondere bei hölzernen Tragwerken mit zimmermannsmäßigen Holz-Holz-Verbindungen große Bedeutung, da diese Verbindungen meist ein ausgeprägtes nichtlineares Tragverhalten aufweisen. Die werkstoffbedingte Nichtlinearität wird im Berechnungsprogramm durch die Modellierung von Anschlussnichtlinearitäten (z. B.: Ausfall ungesicherter Zapfenverbindungen bei Zugbeanspruchung) und durch die Eingabe von nichtlinearen Federn berücksichtigt (z. B.: eiserne Aufhängung des Bundtrams an die Hängestuhlsäule).

6-5.1.3 Lastfall- und Ergebniskombinationen

siehe Kapitel 6-3

Das Stabwerksmodell wird nichtlinear berechnet, das heißt, das Superpositionsprinzip der einzelnen Lastfälle gilt nicht mehr. Somit müssen sämtliche Lastfallkombinationen in Gruppen eingeteilt werden, um die Ergebnisse dieser Lastfallgruppen miteinander kombinieren zu können. Aus diesen Kombinationen werden die maximalen Schnittkräfte für jeden Tragwerksteil ermittelt (vgl. [36]). Die Lastfallkombinationen werden automationsunterstützt mit dem berechnungsprogramminternen Lastfallüberlagerungsgenerator „*RF-Kombi*“ erstellt, wobei die Kombinationsregeln und Kombinationsbeiwerte (ψ_0 , ψ_1) auf Basis des Eurocodes 0 festgelegt werden (siehe Kapitel 6-3.5). Um die Anzahl der möglichen Lastfallkombinationen zu reduzieren, wird durch die entsprechenden Einstellungen im Berechnungsprogramm eine maximale Anzahl der relevantesten Lastfälle mit $n=2$ (plus die Lastfälle aus den ständigen Lasten) festgelegt. Außerdem werden die Lasten entsprechend ihres Typs als „gleichzeitig wirkend“ (z. B.: ständige Last), „alternativ wirkend“ (z. B.: Windlast in Abhängigkeit zur Anströmrichtung) oder „unterschiedlich wirkend“ (z. B.: halbseitige Schneelast) definiert, um differenzierte Beziehungen zwischen den Lastfällen in den Lastfallgruppen festzulegen. Die überlagerten Lastfallkombinationen (LK) werden am Ende der Lastfallkombinationsberchnung in Ergebniskombinationen (EK) zusammengefasst und mit den Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt. Für die angestellten Berechnungen am Hauptkuppeltragwerk wurden 125 Lastfallkombinationen (siehe ANHANG F - LK1 bis LK 125) und 4 Ergebniskombinationen (siehe ANHANG F - EK1 bis EK 4) untersucht.

6-5.1.4 Exzenter

siehe Kapitel 6-2.5

Die angeordneten Systemlinienexzenter und Kraftübertragungsexzenter sind im Ausdruckprotokoll (siehe ANHANG F) und den nachfolgenden Abbildungen als rote Strichlinie dargestellt und wurden je nach Anschlussgeometrie angeordnet.

6-5.1.5 Auflager

siehe Kapitel 6-2.6

Die Auflager der Bundträme wurden in vertikaler Richtung vereinfacht als „starr“ und in horizontaler Richtung als „nachgiebig“ mit iterativ ermittelter Federsteifigkeit festgelegt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der horizontalen Lagersteifigkeit wurde bereits in Kapitel 6-2.6 erläutert. Hierfür wurden eigene Lastfallkombinationen, die sich auf die Überlagerung der ständigen Lasten mit den Windlasten beschränken, generiert und die horizontale Lagersteifigkeit in mehreren Berechnungsdurchläufen auf Basis dieser Überlagerungslastfälle iterativ eingestellt.

6-5.1.6 Anschlusssteifigkeiten und Anschlussnichtlinearitäten

siehe Kapitel 6-4

6-5.2 ÜBERSICHT DER BERECHNUNGSMODELLE

Die Berechnungen werden anhand der extrahierten Teilsysteme der mittig im Tragwerk liegenden Vollgespärre VG-3 und VG-C gezeigt. In den nachfolgenden Darstellungen sind auch die Lage und Orientierung des gewählten Koordinatensystems in Tragwerksmitte (siehe Kapitel 6-2.3) sowie das eingeführte Achsensystem ersichtlich.

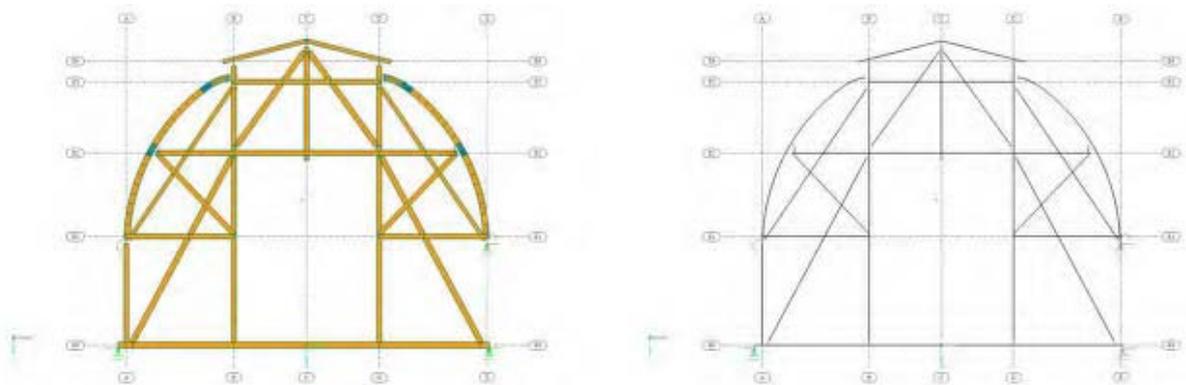


Abb. 6.18: Berechnungsmodell des Vollgespärres VG-3
 links: Darstellung als Volumenmodell, rechts: Darstellung auf Stabachsen reduziert

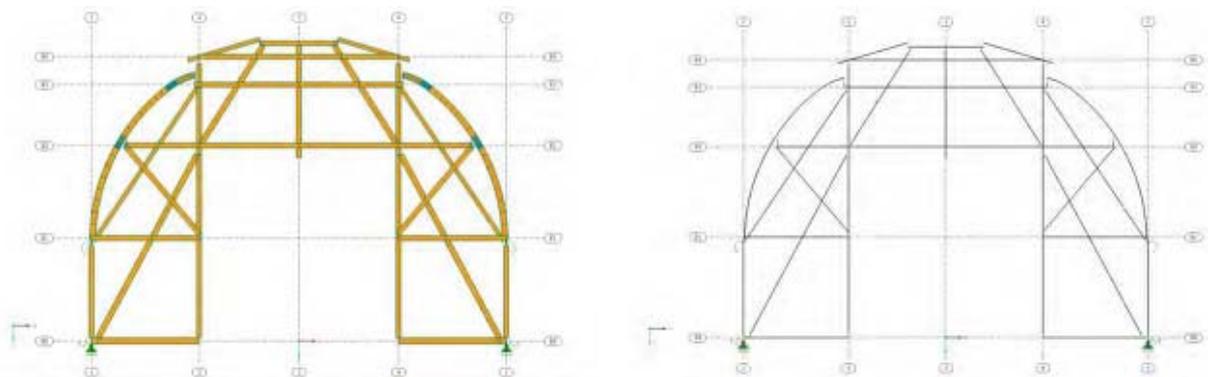


Abb. 6.19: Berechnungsmodell des Vollgespärres VG-C
 links: Darstellung als Volumenmodell, rechts: Darstellung auf Stabachsen reduziert

6-5.3 BESONDERHEITEN BEI DER MODELLIERUNG DER STABENDGELENKE UND ANSCHLÜSSE

Die ausgeprägt räumliche Tragstruktur der Hauptkuppelkonstruktion und die Anschlussausbildung der Konstruktionshölzer erfordert eine unterschiedliche Modellierung der Stabendgelenke. In den meisten Fällen sind die Stabendgelenke an starre Kraftübertragungsexzenter angeschlossen, die die Systemlinien der einzelnen Tragwerksteile je nach Anschlusssituation koppeln. Der überwiegende Teil der horizontalen Strukturelemente ist zweiteilig als Zangenbalkenpaar ausgebildet. Diese Zangenpaare laufen seitlich an den vertikalen bzw. geneigten Stuhlsäulen vorbei und sind an diese mittels bolzengesicherter Kammverbindung angeschlossen. Diese Konstruktionsform verlangt die Einführung sogenannter Scherengelenke, deren Implementierung in das Berechnungsmodell eigene Scherengelenkstypen erfordert. Derartige Gelenke werden in der Modellierung immer dann verwendet, wenn ein Stab Biegemomente in seiner Durchlaufrichtung weiterleiten, jedoch keine Biegemomente auf den kreuzenden Stab übertragen soll. Im Anschlussknoten werden demnach nur Normal- und Querkräfte übertragen. Bei der Gelenkdefinition derartiger Scherengelenke ist besonderes Augenmerk auf die Wahl des Achsensystems der Bezugsachse zu legen, da ansonsten die eingegebenen Anschlusssteifigkeitsparameter von *Dlubal RFEM* fehlinterpretiert werden könnten⁴². Dies gilt vor allem dann, wenn der in RFEM implementierte Scherengelenktyp auf nicht im rechten Winkel kreuzende Stäbe angewendet werden soll (siehe Abb. 6.20 - links). Um die Anschlusssteifigkeiten der Kreuzkammverbindung situationsgerecht zu berücksichtigen, kann alternativ auch ein Entkoppelungspunkt, bestehend aus kurzen Starrstäben und Starrstabendgelenken modelliert werden (siehe Abb. 6.20 - rechts). Der Anschluss an die Zangenbalkenstabachse erfolgt dabei mit einem sehr kurzen Exzenterstarrstab. Diese Variante bietet flexiblere Eingabemöglichkeiten der Anschlusssteifigkeiten, da an den Starrstabendgelenken zusätzliche Gelenkeinstellungen vorgenommen werden können. Außerdem ist diese Variante bei Bedarf auch noch erweiterbar, indem die Starrstäbe durch Federstäbe ersetzt werden, um so die Längssteifigkeit der Verbindung zu berücksichtigen.

RFEM-Scherengelenktyp (programmintern)



individueller-Scherengelenktyp (eigener)

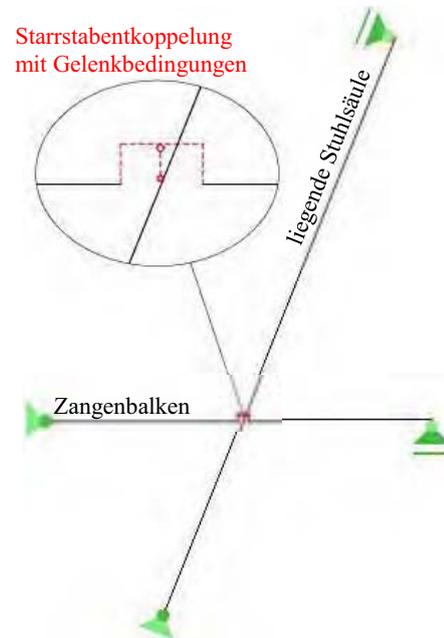


Abb. 6.20: Vorschlag für die Scherengelenkmodellierung

⁴² Die richtige Definition des Bezugsachsensystems des programminternen Scherengelenktyps ist entscheidend für die Berechnung in *Dlubal RFEM*. Kreuzen die Konstruktionshölzer in einem beliebigen Winkel, empfiehlt sich die Wahl eines benutzerdefinierten Achsensystems, das ident zu den außen liegenden Zangenbalkenstäben orientiert ist.

Nachfolgend sollen drei repräsentative Ausschnitte des Tragwerks gezeigt werden, um die Komplexität hinsichtlich der Modellbildung zu veranschaulichen.

6-5.3.1 Modellbildung Bundtramaufleger

Die Bundträme lagern in einer Mauerwerksnische bzw. auf einem vorgemauerten Sockel auf dem Mauerwerk auf. Durch die vertikale Auflast werden Reibungskräfte zwischen Bundtram und Mauerwerk aktiviert, die durch die horizontal wirksame Lagersteifigkeitsfeder berücksichtigt werden. Die Federsteifigkeit dieser Lagerfeder wurde iterativ ermittelt und beträgt für jedes Vollgespärre etwa 50000 bis 75000 N/m (siehe Kapitel 6-2.6). Auf dem Bundtram wird die Stuhlsäule aufgestellt und mittels gerader Zapfenverbindung gegen Verschiebung gesichert. Diese Verbindung kann nur Druckkräfte übertragen und wird mit der entsprechenden Anschlusssteifigkeit in vertikaler Richtung (siehe Tab. 6.6 bzw. Tab. 6.7) über die Gelenkbedingung berücksichtigt. Da dieser Anschlussbereich in allen Lastfallkombinationen stets durch das Eigengewicht der Konstruktion überdrückt wird, kann auf eine nichtlineare Gelenkmodellierung (Ausfall auf Zug) verzichtet werden. Die steil anstehende liegende Stuhlsäule (Winkel $> 60^\circ$) ist mit einem Fersenversatz an den Bundtram angeschlossen. Das dargestellte Gelenk liegt genau im Schwerpunkt der Kraftübertragungsfläche der Ferse, die die größten Druckkräfte in den Bundtram einleitet. Die Stabachsenexzentrizität wird mit starren Exzenterstäben berücksichtigt.

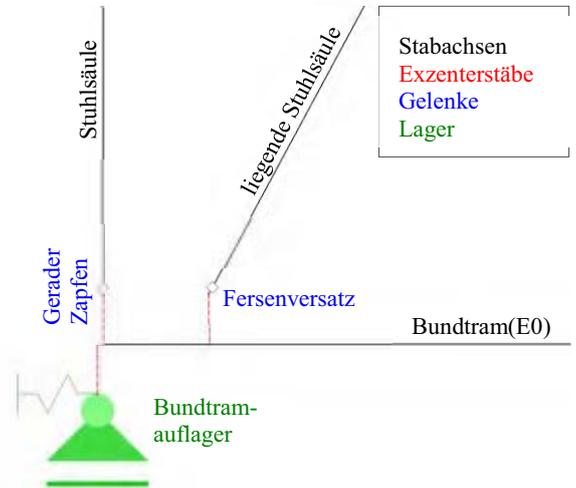


Abb. 6.21: Modellbildung Bundtramaufleger

6-5.3.2 Modellbildung Fußpfettenaufleger

Die Fußpfette lagert auf den Stuhlsäulen auf und wird von eingezapften Kopfbändern unterstützt. Die zu gekrümmten Sparren vernagelten Pfosten sind im Traufenbereich mittels abgesetzter Zapfenverbindung an die Fußpfette angeschlossen. Der geneigte Strebebalken ist auf die Fußpfette aufgeklaut und wird von den seitlich vorbeilaufenden Zangenbalken gegen eine Verschiebung aus der Gespärreebene gehalten. Die Zangenbalken liegen auf der Fußpfette auf und sind im Auflagerbereich ausgeklinkt. Der Kräfteinleitungspunkt der Sparrendruckkraft in die Fußpfette liegt im äußeren Drittel der Fußpfettenbreite und bewirkt durch die Exzentrizität zur Fußpfettenstabachse ein geringes Torsionsmoment in der Fußpfette. Dieses Torsionsmoment wird durch die ebenfalls exzentrisch aufgeklauten Strebebalken und die aufliegenden Zangenbalkenpaare jedoch soweit reduziert, dass die Fußpfette keine nennenswerte Verdrehung nach außen hin erfährt. Diese Torsionsfedersteifigkeit der Fußpfette wird im Berechnungsmodell mittels einer Torsionslagerfeder berücksichtigt.

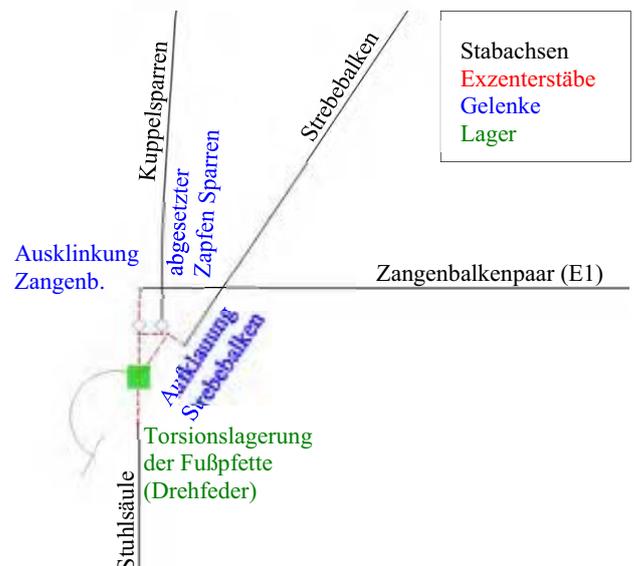


Abb. 6.22: Modellbildung Fußpfettenaufleger

6-5.3.3 Modellbildung Mittelpfettenaufleger

Die Mittelpfette liegt auf den auskragenden Zangebalkenlagen der Tramlagenebene E2 auf. Dieses einfache Auflegen der Mittelpfette ist durch die immer noch sehr steile Dachneigung, bedingt durch die geringe Kuppelkrümmung in diesem Bereich, möglich. Die einzelnen Pfostenstücke des Kuppelsparrens sind so angeordnet, dass diese ein großzügiges Auflager auf den Mittelpfetten finden. Im Berechnungsmodell wird die Mittelpfette mit rechtwinklig zur Sparrenstabachse angeordneten Exzenterstäben mit den Kuppelsparren verbunden. Der Kontaktpunkt wird dabei genau in halber Breite der Mittelpfettenoberkante festgelegt und als gelenkig definiert. Die kreuzenden Zangenbalken sind allesamt als Kreuzkammverbindung ausgeführt und nach dem zuvor beschriebenen Prinzip als Scherengelenk modelliert. Die Durchsteckbolzenverbindung der Zangenbalken mit den Kuppelsparren in den voll ausgebauten Gespärren wurde bei der Modellbildung nicht berücksichtigt. Dadurch erfolgt die Krafteinleitung in die Hängewerkskonstruktion ausschließlich über die Mittelpfetten.



Abb. 6.23: Modellbildung Mittelpfettenaufleger

6-5.3.4 Übersicht der Stabendgelenktypen

Abschließend soll die Anordnung der unterschiedlichen Stabgelenktypen im Tragwerk anhand des Vollgespärres VG-3 farblich dargestellt werden. Die Stabenden sind je nach Gelenktyp farblich markiert.

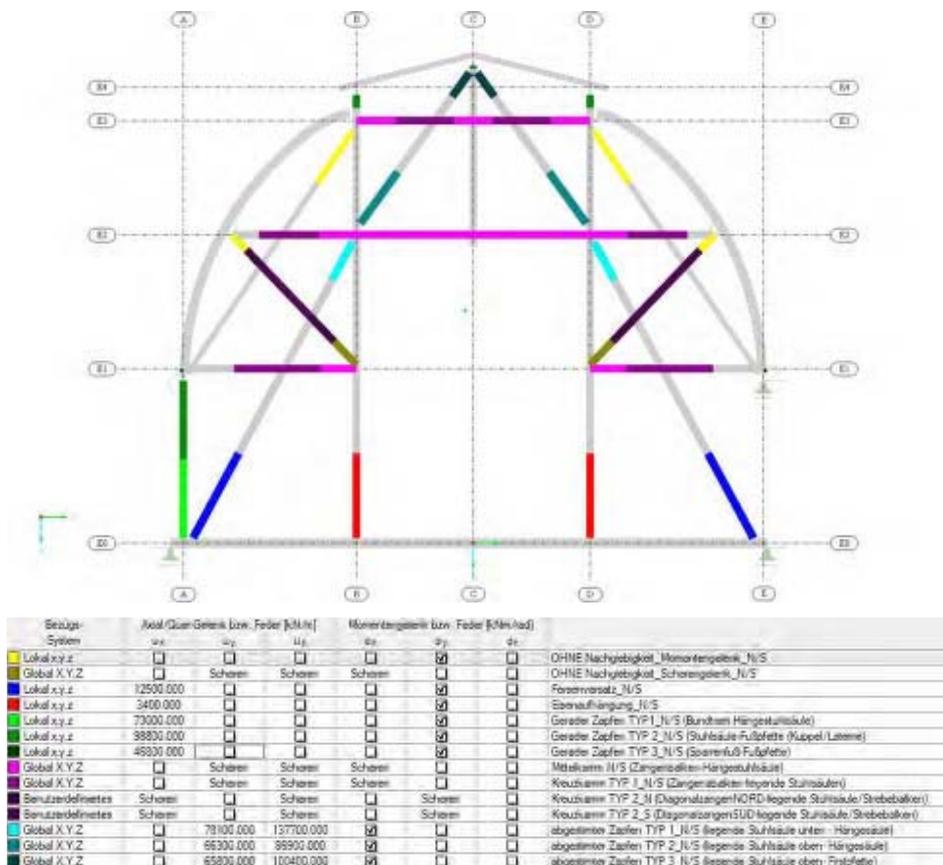


Abb. 6.24: Stabgelenktypen zur Berücksichtigung der Anschlusssteifigkeit der Verbindungen

6-5.4 BERECHNUNGSERGEBNISSE

Die detaillierten Berechnungsergebnisse können in ANHANG F eingesehen werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden hierzu einige Anmerkungen abgegeben.

6-5.4.1 Lastabtragungskonzept

In diesem Abschnitt soll das in Kapitel 5-3.4.3 beschriebene Tragsystem der Hauptkuppel anhand der berechneten Normalkraftverläufe nochmals verdeutlicht werden. Die nachfolgenden Darstellungen zeigen die maßgebenden Schnittkraftverläufe im Grenzzustand der Tragfähigkeit (EK1 - ULS). Dabei wird die „Umhüllende der Schnittkräfte“, also die jeweils max. positive und min. negative Schnittreaktion in einer Schnittkraftlinie dargestellt. Diese Darstellungsform bietet sich insofern gut für die folgende Beschreibung an, weil sie all jene Tragwerksteile erkennen lässt, deren Schnittgrößen unter bestimmten Laststellungen das Vorzeichen wechseln (z. B.: Zug/Druck Stäbe). Dabei werden positive Schnittkräfte „blau“ (Zugnormalkräfte) und negative Schnittkräfte „rot“ (Drucknormalkräfte) dargestellt:

Anhand des Normalkraftverlaufes des Vollgespärres VG-3 kann man das Tragsystem des doppelten Hängewerks deutlich erkennen. Die liegenden Stuhlsäulen bilden gemeinsam mit den Zangenbalken in der Tramlage E2 einen Druckbogen, dessen horizontaler Schub durch den als Zugband wirkenden Bundtram abgefangen wird. Der Bundtram wird, wie bei doppelten Hängewerken üblich, mittels zugbelasteter Hängestuhlsäulen an diesen Druckbogen nach oben gehängt. Bei genauer Betrachtung des Normalkraftverlaufes erkennt man, dass der Spannriegel (=Zangenbalkenlage E2) des Hängewerks nahezu normalkraftfrei oder sogar unter leichtem Zug steht.

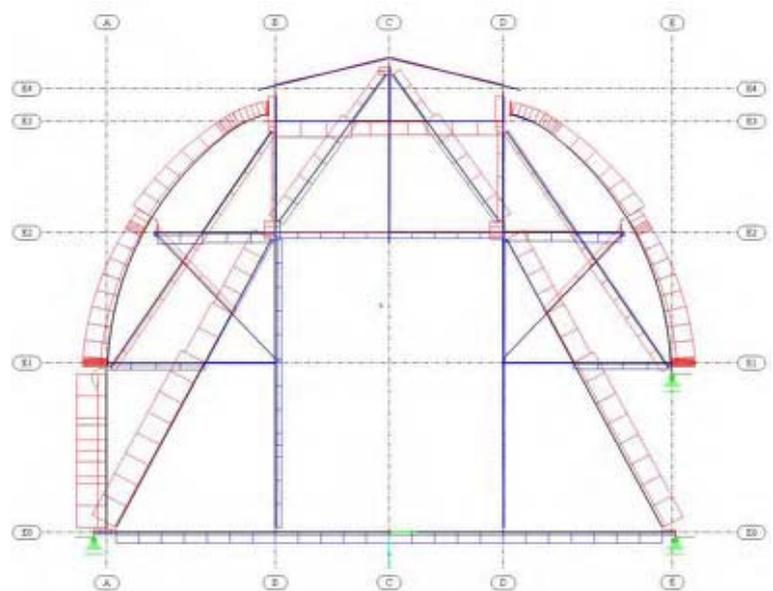


Abb. 6.25: Normalkraftverlauf des Vollgespärres VG-3

Dies liegt an dem bereits erwähnten aufgesetzten „Sprengwerk“ (siehe Abb. 5.64) für die Laternenkonstruktion, dessen horizontaler Strebenschub so dominant ist, dass die Drucknormalkraft im Spannriegel aufgehoben wird. Die Strebebalken bilden gemeinsam mit der Zangenbalkenlage E3 einen weiteren Druckbogen, der ebenfalls als Hängewerksbogen wirksam ist. Allerdings fehlt diesem Hängewerk das durchlaufende Zugband, da die Zangenbalkenlage in der Tramlageebene E1 in Tragwerksmitte abgetrennt ist. Durch die bolzengesicherte Mittelverkämmung mit der Hängestuhlsäule wird dieser Hängewerksbogenschub über die Biegetragwirkung der Hängestuhlsäule abgetragen. Die vernagelten Kuppelsparrenpfosten leiten die anfallenden Drucknormalkräfte in die Fußpfette bzw. Mauerbank ein. Durch die steile Kuppeldachneigung treten infolge vertikaler Auflasten kaum Sparrenschubkräfte in horizontaler Richtung auf. Das Laternendach funktioniert als einfaches Pfettendach mit Fuß- und Firstpfette. Die Laternendachsparren sind daher normalkraftfrei und erfahren durch die Dachauflast eine Biegebeanspruchung. Die vertikalen und horizontalen Auflagerkräfte dieses Laternendaches werden über die durchlaufenden Hängestuhlsäulen in das darunterliegende Haupttragwerk eingeleitet.

Die Tragwirkung des Hängewerks ist in den Ost/West-orientierten Vollgespärren durch den abgetrennten Bundtram gestört. Der Bundtram dieser Gespärre endet nämlich an den Achsen 2 und 4 und ist dort mittels gerader Zapfenverbindung an die Bundträmme der durchlaufenden Vollgespärre VG-2 und VG-4 angeschlossen.

Diese Zapfenverbindung ist zwar durch den diagonal liegenden, zur Mauerwerksecke geführten Bundtram und dem Wechseltram entsprechend ausgesteift, kann allerdings kaum Zugkräfte aufnehmen. Somit fehlt den Hängewerken dieser Vollgespärre der Zugband und der anfallende Strebenschub muss überwiegend vom Mauerwerk aufgenommen werden.

Das fehlende Zugband äußert sich auch in der Verformungsfigur dieser Vollgespärre. Neben der deutlich größeren horizontalen Lagerverschiebung im Vergleich zu den Nord/Süd-orientierten Gespärren erfährt auch die Hängestuhlsäule eine merkbar größer Biegeverformung in der Gespärreebene. Auch die geringe positive Normalkraft (Zugkraft) in den auf Druck ausgelegten Strebebalkenanschlüssen ist ein Indiz dafür, dass diesem Hängewerkstragsystem die unterste Zugbandebene fehlt. Diese abgetrennte Bundtramlage kann als Schwachstelle des sonst sehr robusten räumlichen Tragsystems angesehen werden. Besser wäre gewesen, das Prinzip der höhenversetzten gekreuzten Zangenbalkenlagen (E2 und E3) auch auf die Bundtramebene (E0) zu übertragen. Dadurch könnte auch dieser Hängewerksdruckbogen mit einem durchlaufenden Bundtram als Zugband komplettiert werden.

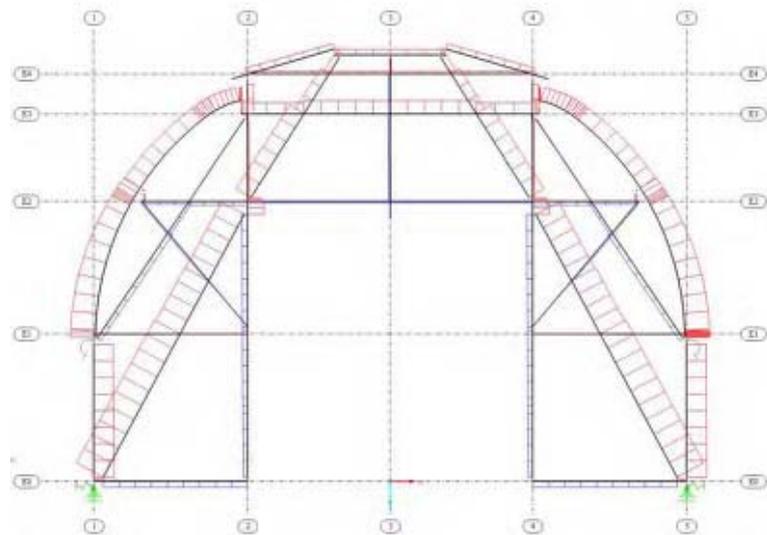


Abb. 6.26: Normalkraftverlauf des Vollgespärres VG-C

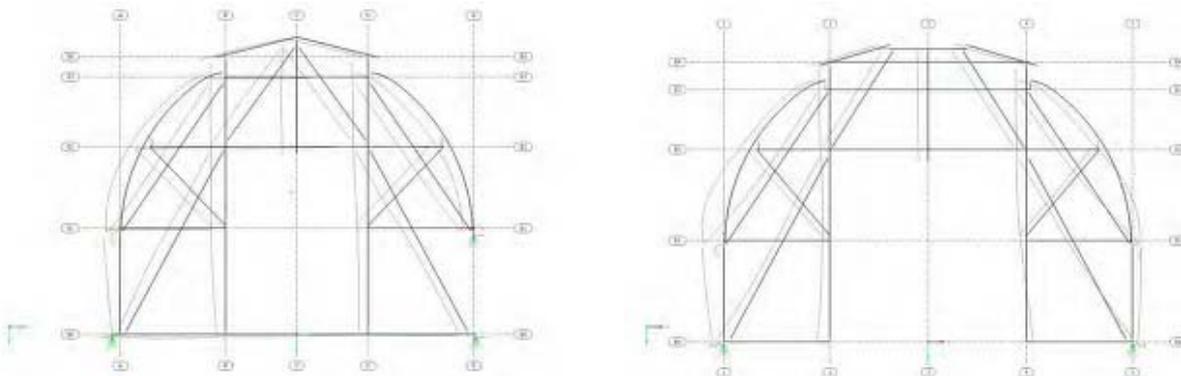


Abb. 6.27: Überzeichnet dargestellte Verformungsfiguren der Vollgespärre (grün)
links: Vollgespärre VG-3, rechts: Vollgespärre VG-C

6-5.4.2 Schnittgrößen

Die berechneten Schnittgrößen können dem Ausdrucksprotokoll in ANHANG F für die maßgebende Ergebniskombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit (EK1: ULS-Grenzzustand der Tragfähigkeit) entnommen werden. Die lokalen Spitzen in den Biegemoment- und Querkraftverläufen resultieren aus den modellbedingten Krafteinleitungspunkten im Bereich der Anschlussdetails. Die in den Exzentern wirksamen Schnittgrößen werden zugunsten der Übersichtlichkeit ausgeblendet.

6-5.4.3 Bauteil- und Stabilitätsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

In *Dlubal RFEM 5.06* ist es mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich, Bauteilnachweise auf Basis des Eurocode 5 [84; 85] zu führen. Das Softwarezusatzmodul *RF-Holz Pro* bietet hierfür zahlreiche Einstellmöglichkeiten für die Bemessung von Holzstäben, auf deren Umfang in dieser Masterarbeit nicht weiter eingegangen wird. Um die Übersichtlichkeit im Ausdruckprotokoll zu bewahren, werden Stabsätze⁴³ definiert, an denen Querschnittsnachweise und Stabilitätsnachweise mit den Schnittgrößen der Ergebniskombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit (EK 1) durchgeführt werden. Einige Schubnachweise zufolge Querkraftbeanspruchung liegen dabei geringfügig über 100% Ausnutzung⁴⁴. Diese vermeintliche Überbeanspruchung kann zum einen durch die bereits erwähnten, modellbedingten Spannungsspitzen in den Kräfteinleitungspunkten (z. B.: Anschluss liegende Stuhlsäule - Bundtram) und zum anderen durch die sehr vereinfachte Annahme der Knicklängen erklärt werden. Die Knicklängen der Stäbe werden als erste Näherung als der jeweils längste, ungestützte Stababschnitt innerhalb eines Stabsatzes definiert. Diese Betrachtungsweise wurde sowohl für die Knicklängendefinition in und aus der Ebene gewählt. Detailnachweise zu den einzelnen Anschlussknotenbereichen werden im Rahmen dieser Masterarbeit nicht geführt.

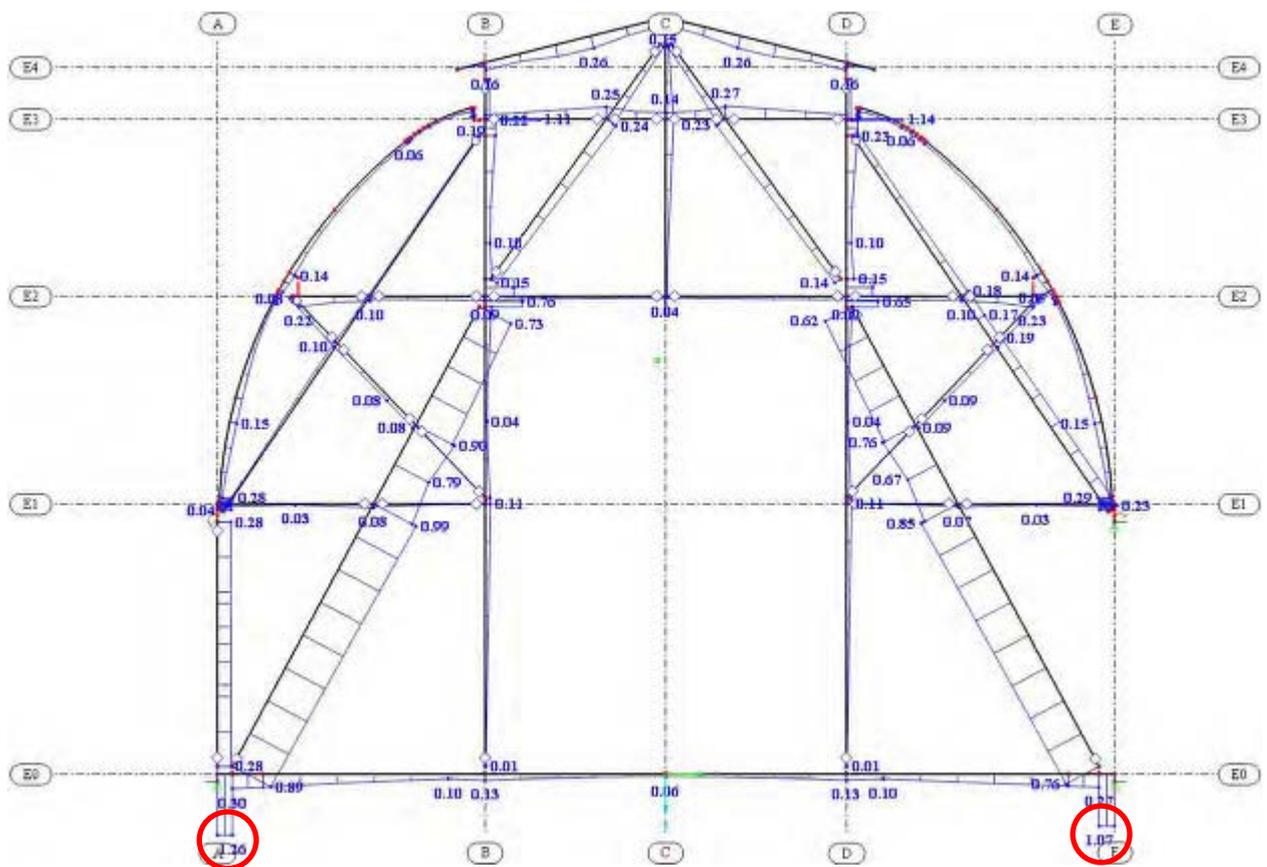
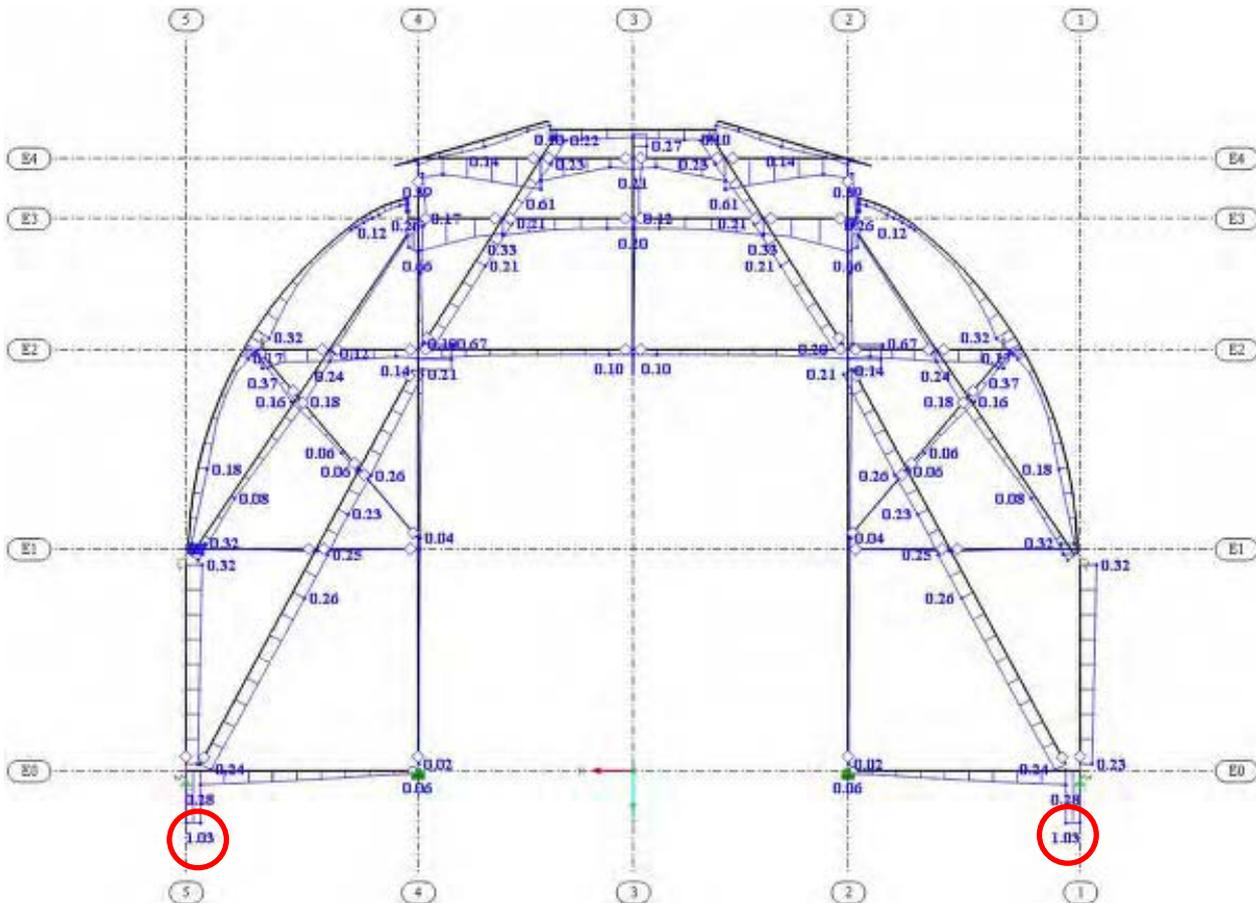


Abb. 6.28: ULS- Bemessungsergebnis des Vollgespärres VG-3
 max. Ausnutzungsgrad zufolge Querkraft im Bundtramauflegerbereich
 linkes Auflager $\eta=1,26$; rechtes Auflager $\eta=1,07$

⁴³ *Dlubal RFEM* bietet die Möglichkeit, mehrere Stabsegmente mit gekoppelten Stabachsen und gleicher Staborientierung in Stabsätze zusammenzufassen. Stabsätze erhöhen nicht nur die Übersichtlichkeit in der Berechnung, sondern können auch für die einfachere Definition von Bezugsängen für Stabilitätsnachweise, Verformungsnachweisen etc. verwendet werden.

⁴⁴ Jene Nachweise, deren Ausnutzungsgrad $> 1,0$ ausfällt, werden im Berechnungsprotokoll in roter Farbe gekennzeichnet. Diese hohen Ausnutzungsgrade resultieren aus den im Fließtext genannten Gründen.



**Abb. 6.29: ULS-Bemessungsergebnis des Vollgespärres VG-C
max. Ausnutzungsgrad zufolge Querkraftschub im Bundtramauflegerbereich
linkes Auflager $\eta=1,03$; rechtes Auflager $\eta=1,03$**

Anhand der in *RF-Holz Pro* berechneten Ausnutzungsgrade ist zu erkennen, dass es im Auflagerbereich zu einer Überbeanspruchung infolge Querkraft kommt. Die große Querkraft V_z im Bundtram resultiert aus der im Auflagerbereich angeschlossenen liegenden Stuhlsäule. Gemäß ÖNORM B 1995-1-1-Abschnitt 6.1.7 (3) (vgl. [85]) darf die aus auflagnahen Einzellasten resultierende Querkraft für den Schubspannungsnachweis wie folgt abgemindert werden:

$$V_{z,red} = \frac{V_z \cdot e}{2 \cdot h} \quad (6.60)$$

mit:

- $V_{z,red}$reduzierte Querkraft im Bereich des Bundtramauflegers[kN]
- V_zQuerkraft resultierend aus einer auflagnahen Einzellast [kN]
- eAbstand der auflagnahen Einzellast zum Auflager [cm]
- hQuerschnittshöhe des Bundtrams [cm]

Die Abminderung der Querkraft für den Schubspannungsnachweis ist allerdings nur zulässig wenn die auflagnahen Einzellast auf der Oberseite des Bundtrams angreift, dieser keine auflagerseitige Ausklinkung aufweist und folgende Bedingung gilt:

$$0 < e \leq 2 \cdot h \quad (6.61)$$

Diese normative Festlegung im nationalen Anwendungsdokument zum Eurocode 5 (vgl. [85]) basiert auf der Annahme, dass die Schubspannungen infolge auflagnaher Einzellasten kleiner sind als die nach der elastischen Biegebalkentheorie berechneten Schubspannungswerte. Diese Hypothese wurde bereits in mehreren Forschungsprojekten untersucht und bestätigt (vgl. [45]).

Aufgrund der Anschlussgeometrie der liegenden Stuhlsäule und der Auflagerausbildung des Bundtrams kann eine Reduktion der Querkraft vorgenommen werden. Die Anschlussgeometrie kann in Kapitel 5-3.5.2 - Detail E0-D01 bzw. ANHANG C nachgeschlagen werden.

Nachfolgend wird der Nachweis mit der reduzierten Querkraft geführt. Der mit *RF-Holz Pro* berechnete max. Ausnutzungsgrad $\eta=1,26$ resultiert aus einer (nicht reduzierten) Querkraft $V_{z,d}=63,37$ kN im Bereich des Bundtramaufagers. Diese Querkraft wird gemäß den zuvor erläuterten Bestimmungen des nationalen Anwendungsdokuments ÖNORM B 1995-1-1 -Abschnitt 6.1.7 (3) wie folgt reduziert:

$$V_{z,red} = \frac{V_z \cdot e}{2 \cdot h} = \frac{63,37 \cdot 35}{2 \cdot 25} = 44,36 \text{ kN} \quad (6.62)$$

Die Schubspannung im rechteckigen Bundtramquerschnitt ist:

$$\tau_{v,d} = 1,50 \cdot \frac{V_{z,red}}{b \cdot h} = 1,50 \cdot \frac{44,36}{19 \cdot 25} = 0,14 \text{ kN/cm}^2 \quad (6.63)$$

Für den Nachweis wird die vorhandene reduzierte Schubspannung dem Bemessungswert der Schubfestigkeit von Vollholz der Güte C30 (siehe Tab. 6.1) gegenübergestellt:

$$\eta = \frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0,14}{0,16} = 0,875 \quad (6.64)$$

Durch die durchaus legitime Reduktion der Schubspannung im unmittelbaren Auflagerbereich ist der Schubspannungsnachweis im Bundtramauflegerbereich erfüllt. An dieser Stelle sei nochmals explizit darauf hingewiesen, dass die in Kapitel 6-3 festgelegten Lasten auf Basis des aktuell gültigen Eurocodes festgelegt wurden. Da im Rahmen der Bestandserfassung des Kuppeltragwerks keine Schädigungen an den Bundtramauflagern der Vollgespärre festgestellt wurden, kann die Tragfähigkeit dieses Anschlussbereiches bestätigt werden. Außerdem ist aufgrund des Alters der Konstruktion davon auszugehen, dass die bemessungsbestimmenden Lasten bereits aufgetreten und die Bauteile der Tragkonstruktion ausreichend dimensioniert sind (vgl. Vertrauensgrundsatz der ONR 24009 [75]).

6-5.4.4 Verformungsnachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Zusätzlich werden mithilfe des Softwarezusatzmoduls *RF-Holz Pro* Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geführt. Hierfür werden die Tragwerksverformungen folgender Ergebnislastfallkombinationen berücksichtigt:

- EK 2: SLS - charakteristische Kombination
- EK 3: SLS - häufige Kombination
- EK 4: SLS - quasi-ständige Kombination

Die Referenzlängen für die Festlegung der zulässigen Grensverformungen werden anhand der Stabsätze und deren Lage im Tragsystem im Berechnungszusatzmodul eingestellt und mit den rechnerisch auftretenden Verformungen verglichen. Dabei kommt es in keinem Fall zu einer Überschreitung der Verformungsgrenzwerte. Für die charakteristische Lastkombinationen (EK 2) beträgt der max. Ausnutzungsgrad eines Kuppelsparrens des Vollgespärres VG-C $\eta=0,52$. Das Tragwerk erfüllt demnach die derzeit gültigen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit.

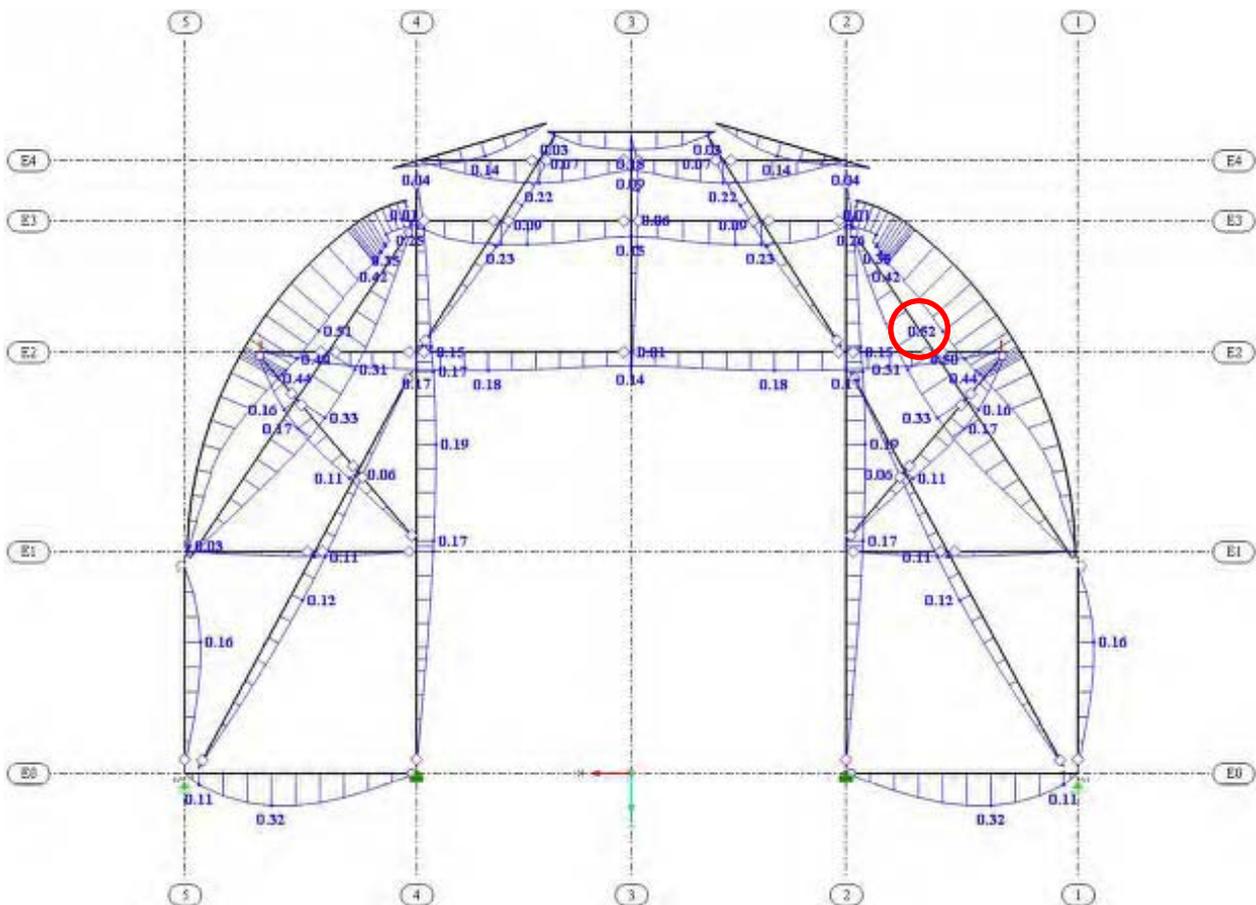


Abb. 6.30: SLS-Bemessungsergebnis des Vollgespärres VG-C
max. Ausnutzungsgrad eines Kuppelsparrens $\eta=0,52$

KAPITEL 7 RESÜMEE UND AUSBLICK

Abseits der planerisch konstruktiven Aufgabenstellungen unterliegen zahlreiche historische Dachtragwerke den gesetzlichen Bestimmungen des Denkmalschutzes. Dachausbauten denkmalgeschützter Dachräume, die mit einer Veränderung des äußeren Erscheinungsbildes einhergehen, sind demnach, wenn überhaupt, nur in sehr eingeschränkter gestalterischer Formfreiheit möglich. Häufig sind die denkmalenschutzrechtlichen Auflagen so streng geregelt (z. B.: Grazer Altstadt Erhaltungsgesetz GAEG [65]), dass nur sogenannte „Dacheinbauten“ genehmigungsfähig sind. Derartige Einbauten sind vollständig von der schützenswerten Tragstruktur entkoppelt und werden als eigenständiger, statisch und bauphysikalisch unabhängiger Baukörper im Inneren des Dachtragwerkes eingebaut. Dabei bleibt die ursprüngliche Bausubstanz ohne jegliche Veränderungen im Originalzustand erhalten. In Kapitel 2 wurden einige der wichtigsten Bestimmungen der Basisdokumente des Denkmalschutzes zusammengetragen und einige Grundwerte zum Umgang mit schützenswerten Bestandsbaubauobjekten diskutiert.

Die vielseitigen Dachkonstruktionen geben unserem baulichen Umfeld ein individuelles Erscheinungsbild und sind unverzichtbar für die architektonische Gestaltung eines Bauwerkes. Der Kenntnis traditioneller Dachformen und deren zugrunde liegenden Konstruktionen kommt immer dann große Bedeutung zu, wenn diese im Zuge eines Dachgeschoßausbaues für andere Nutzungszwecke adaptiert werden sollen. Allerdings bieten sich nicht alle Dachtragwerke gleichermaßen für einen entsprechenden Dachgeschoßausbau an. Das wahllose Entfernen von Bundträmen, Stuhlsäulen oder Spannriegeln bei unzureichendem Umbau des Tragwerkes kann massive Verformungen bis hin zum Kollaps der Konstruktion zur Folge haben. Um dies zu vermeiden, sind notwendige Umbaumaßnahmen zu setzen, welche die ursprüngliche Tragstruktur dahingehend abändern, dass diese den neu gestellten Anforderungen gerecht werden kann. Auch die Beschaffenheit des vorliegenden Tragsystems entscheidet häufig über die kosten- und aufwandsgerechte Machbarkeit des vorgesehenen Umbauprojektes. Oftmals können notwendige Ertüchtigungs- und Ergänzungsmaßnahmen ein Ausmaß annehmen, die weder den Vorstellungen des Bauherrn noch dem vorgesehenen Projektziel entsprechen. Um derartige Problemstellungen frühzeitig, also bereits in der Planungsphase des Umbauprojektes zu erkennen, wurde in Kapitel 3 eine Methodik zur Zustandsbeurteilung und Instandsetzung von älteren Holztragwerken vorgestellt.

Dachgeschoßausbauprojekte werden insbesondere im urbanen Bereich zunehmend populär. Dem steigenden Bedarf an Wohn- und Arbeitsraum in bereits vollständig verbauten, innerstädtischen Gebieten kann nur nachgekommen werden, wenn bereits vorhandene Bausubstanz adaptiert, also ausgebaut wird. Dieses „Bauen im Bestand“ entwickelte sich in den letzten Jahren zu einer eigenen, sehr vielseitigen Bauaufgabe, deren Anteil am gesamten Bauvolumen nach MEISEL (vgl. [39]) bereits 60% beträgt. Diese Entwicklung macht auch vor dem Hauptgebäude der Technischen Universität Graz nicht halt. Wie bereits im einführenden Kapitel dieser Masterarbeit erwähnt, finden gegenwärtig umfangreiche Um- und Ausbauarbeiten in der „Alten Technik“ statt. In den Ost- und West-orientierten Gebädetrakten stehen rund 1000 m² neu geschaffene Nutzfläche für die Architekturfakultät unmittelbar vor der Fertigstellung und sollen noch im Herbst dieses Jahres den Studierenden und Lehrenden zur Verfügung gestellt werden. Dennoch verbleiben ungenutzte freie Dachräume in der Dachlandschaft des Hauptgebäudes, die sich geradezu anbieten, ebenfalls ausgebaut zu werden. Einer dieser derzeit ungenutzten Räume ist der freie Dachraum unterhalb der Hauptkuppel.

Mit dieser Masterarbeit wurde ein Grundlagendokument erarbeitet, das die derzeit vorliegende Tragstruktur des Hauptkuppeldaches vollumfänglich dokumentiert. Die Zustandserfassung des Baubestandes mitsamt den vorliegenden Schäden und Detailausbildungen der Konstruktion wird durch

die nach dem Naturmaß gezeichneten Pläne komplettiert. Auf dieser Masterarbeit aufbauend, soll im Rahmen der Lehrveranstaltung des Instituts für Holzbau und Holztechnologie - „Konstruktionen in Holz“ - ein mögliches Dachausbaukonzept für die Hauptkuppel der „Alten Technik“ seitens der Studierenden ausgearbeitet werden. Begleitet werden die konstruktiven Überlegungen in dieser Lehrveranstaltung von zwei Architekturbüros, die bereits mit der Erstellung entsprechender Entwurfspläne beauftragt wurden.

Ob die ausgearbeiteten Projekte als Ergebnis dieser Lehrveranstaltung tatsächlich zu konkreten Ausbauüberlegungen der Hauptkuppel führen werden, bleibt abzuwarten. Die ersten, wichtigen Schritte hinsichtlich der Bestandsaufnahme und Dokumentation des Baubestandes wurden mit der vorliegenden Masterarbeit jedenfalls gesetzt und warten auf eine weitere Bearbeitung...

ANHANG A VERZEICHNISSE

A-1 Literaturverzeichnis

Dieses Literaturverzeichnis wurde entsprechend den Regeln der DIN 1505 Teil 2 unter Verwendung des Literaturdatenverwaltungsprogramms CITAVI 5.5.0.1 automationsunterstützt erstellt. Alle nicht in diesem Literaturverzeichnis angegebenen verwendeten Quellen sind entsprechend gekennzeichnet und in Fußnoten angegeben.

Fachliteratur (Monographie)

- [1] ANSORGE, Dieter (2008): Historische Holzbauwerke und Fachwerke. Instandsetzen - Erhalten. Stuttgart: Verl. Fraunhofer IRB.
- [2] BALAK, Michael; PECH, Anton (2008): Mauerwerkstroekenlegung. Von den Grundlagen zur praktischen Anwendung. 2. aktualisierte Auflage. Wien: Verl. Springer Vienna.
- [3] BLASS, Hans Joachim; FRESE Mattias (2006): Schadensanalyse, Schadensursachen und Bewertung der Standsicherheit bestehender Holzkonstruktionen. Forschungsbericht. Karlsruhe: Verl. Fraunhofer IRB.
- [4] DLUBAL, Software GmbH (2016): Programm RFEM 5. Räumliche Tragwerke nach der Finiten Elemente Methode. Programmbeschreibung. o.O.: Internetveröffentlichung.
- [5] ERLER, Klaus (2004): Alte Holzbauwerke. Beurteilen und Sanieren. 3. neuverfasste Auflage. Berlin: Verl. Huss-Medien f. d. Bauwesen.
- [6] FRICK, Otto; KNÖLL, Karl (2013): Baukonstruktionslehre. 34. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Verl. Springer Vieweg.
- [7] GÖRLACHER, Rainer (1999): Historische Holztragwerke. Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen. Unter Mitarbeit von Volker Claus FALK und Hannes ECKERT. Karlsruhe: Verl. der Univ. Karlsruhe.
- [8] HEIMESHOFF, Bodo; KÖHLER, Niklas (1989): Untersuchung über das Tragverhalten von zimmermannsmäßigen Holzverbindungen. T 2189. Forschungsbericht. Stuttgart: Verl. Fraunhofer IRB.
- [9] HINKES, Franz-Josef (1988): Experimentelle und rechnerische Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Zapfenverbindungen. Düsseldorf: Verl. VDI.
- [10] HOLZER, Stefan M. (2015): Statische Beurteilung historischer Tragwerke. Band 1: Mauerwerkskonstruktionen. 1. korrigierter Nachdruck. Berlin: Verl. Ernst & Sohn.
- [11] HOLZER, Stefan M. (2015): Statische Beurteilung historischer Tragwerke. Band 2: Holzkonstruktionen. Berlin: Verl. Ernst & Sohn.
- [12] KOLBITSCH, Andreas (1989): Altbaukonstruktionen. Charakteristika, Rechenwerte, Sanierungsansätze. Wien: Verl. Springer Vienna.
- [13] LISSNER, Karin; RUG, Wolfgang (2000): Holzbausanierung. Grundlagen und Praxis der sicheren Ausführung. Berlin, Heidelberg: Verl. Springer Vieweg.
- [14] MAIER, Josef (2012): Handbuch Historisches Mauerwerk. Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren. 2. Auflage. Berlin: Verl. Springer Vieweg.
- [15] MÖNCK, Willi; ERLER, Klaus (2004): Schäden an Holzkonstruktionen. Das Standardwerk für Sanierung + Denkmalpflege. 4. stark bearbeitete Auflage. Berlin: Verl. Huss-Medien f. d. Bauwesen.
- [16] MÖNCK, Willi; RUG, Wolfgang (2015): Holzbau. Bemessung und Konstruktion. 16. vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Verl. Beuth.
- [17] PECH, Anton; HOLLINSKY, Karlheinz (2005): Baukonstruktionen. Band 7: Dachstühle. 1. Auflage. Wien: Verl. Springer Vienna.
- [18] RAABE, Christian (2015): Denkmalpflege. Schnelleinstieg für Architekten und Bauingenieure. 1. Auflage. Wiesbaden: Verl. Springer Vieweg.
- [19] REISMANN, Bernhard (2013): 125 Jahre Alte Technik. 1888 bis 2013. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz.

- [20] STAHR, Michael (2016): Sanierung von Natursteinen. Erfassen - Sanieren - Recht. Wiesbaden: Verl. Springer Vieweg.
- [21] STAHR, Michael; RADERMACHER, Klaus-Peter (2013): Sanierung von Metallbauteilen. Verfahren und rechtliche Aspekte. Wiesbaden: Verl. Springer Vieweg.
- [22] TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ, Institut für Holzbau und Holztechnologie (2011): D(N)achhaltigkeit Graz. Forschungsbericht. Konzepte zur Bestands- und Zustandserfassung historischer Dachtragwerke der Grazer Altstadt (UNESCO WKE) im Hinblick auf deren Instandhaltung, Umnutzung und effizienten Umgang mit Energie. Unter Mitarbeit von Andreas MEISEL, Gregor SILLY und Gerhard SCHICKHOFER. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz.
- [23] TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ, Institut für Holzbau und Holztechnologie (2014): Mechanisches Verhalten von Holz-Holz-Verbindungen in historischen und modernen Holztragwerken. Holz-Holz-Verbindungen. Forschungsbericht. Unter Mitarbeit von HOLZ.BAU, Forschungs-GmbH. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz.
- [24] WARTH, Otto (1900, Reprint: 1982): Allgemeine Baukonstruktionslehre mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen. Ein Handbuch zu Vorlesungen und zum Selbststudium. Band 2: Die Konstruktion in Holz. Leipzig, Reprint: Hannover: Verl. J.W. Gebhard's, Reprint: Verl. Th. Schäfer.
- [25] WIRTH, Hermann (1997): Werte und Bewertung baulich-räumlicher Strukturen. Axiologie der baulich-räumlichen Umwelt. Weimar: Verl. VDG.

Fachliteratur (Sammelwerk)

- [26] WENZEL, Fritz (Hg.) (1999): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke - Empfehlungen für die Praxis. Bauefuge, Konstruktionen, Werkstoffe. Gesamtwerk. Karlsruhe: Verl. d. Sonderforschungsbereich 315.

Beiträge in Fachliteratur

- [27] DIMITRIOU, Sokratis (1978): Die Technische Universität Graz. In: Wilhelm STEINBÖCK (Hg.): 850 Jahre Graz. 1128 - 1978 ; Festschrift. Graz: Verl. Styria.
- [28] ECKERT, Hannes (1995): Kalk und Kalkmörtel in historischen Quellen. In: Sonderforschungsbereich 315 (Hg.): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Bauefuge, Konstruktionen, Werkstoffe. Jahrbuch 1993. Berlin: Verl. Ernst & Sohn.
- [29] EHLBECK, Jürgen; GÖRLACHER, Rainer (1988): Erste Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an altem Konstruktionsholz. In: Sonderforschungsbereich 315 (Hg.): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Bauefuge, Konstruktionen, Werkstoffe. Jahrbuch 1987. Berlin: Verl. Ernst & Sohn, S. 235–247.
- [30] RIEGL, Alois (1995): Der Moderne Denkmalkultus - sein Wesen und seine Entstehung. In: Alois RIEGL und Wolfgang KEMP (Hg.): Gesammelte Aufsätze. Berlin: Verl. Gebr. Mann.
- [31] SCHICKHOFER, Gerhard; BRANDNER, Reinhard (2011): H - Alterung und (Rest) Tragfähigkeit von Bauholz. In: HOLZ.BAU, Forschungs-GmbH (Hg.): Historisch wertvolle Dachwerke in UNESCO-Weltkulturerbe-Zonen. 2. Grazer Holzbau-Sonderfachtagung, 2. GraHSoFT '11 ; Tagungsband ; Graz, 20. Mai 2011. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz, H1-H14.
- [32] SCHICKHOFER, Gerhard; FLATSCHER, Georg; RINGHOFER, Andreas (2009): A - Dauerhafte Holzkonstruktionen durch Bestandserfassung, -analyse und Instandhaltung. In: HOLZ.BAU, Forschungs-GmbH (Hg.): Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen. 8. Grazer Holzbau-Fachtagung ; 8. GraHFT0 9; Tagungsband ; Graz, am 25. September 2009. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz, A1-A38.
- [33] ZEHTGRUBER, Johann (2009): I - Von der Bestandserfassung bis zur ingenieurmäßigen Ertüchtigung. In: HOLZ.BAU, Forschungs-GmbH (Hg.): Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen. 8. Grazer Holzbau-Fachtagung ; 8. GraHFT0 9; Tagungsband ; Graz, am 25. September 2009. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz, I1-I18.

Hochschulschriften

- [34] BARON, Thomas (2009): Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Fakultät für Maschinenwesen.
- [35] BLIEM, Christoph (1995): Möglichkeiten zur Sanierung historisch wertvoller Holzsubstanz aus Sicht des konstruktiven Ingenieurbaus. Masterarbeit. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innsbruck. Institut für Stahl- und Holzbau.
- [36] BUCHHÄUSL, Bertram (2010): Bestandserfassung, Modellbildung und Tragverhalten historischer Dachstühle am Beispiel des Stiftes Zwettl. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [37] KIRCHLER, Markus (2009): Modellierung eines historischen Dachstuhls. Vergleich von Stab- und FE-Berechnungen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.

- [38] MEISEL, Andreas (2009): Historische Dachstühle. Tragsysteme, Bestandserfassung, statische Analyse und Sanierung mit flächenhaften Holzwerkstoffen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [39] MEISEL, Andreas (2015): Historische Dachwerke. Beurteilung, Realitätsnahe statische Analyse und Instandsetzung. Dissertation. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [40] NIER, Joachim (1994): Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an alten Bauhölzern und daraus abgeleitete Erkenntnisse zur Tragfähigkeitsbeurteilung. Dissertation. Technische Hochschule Leipzig, Leipzig. Fakultät für Bauwesen.
- [41] ORTNER, Jerome (2014): Instandsetzungshandbuch für historische Dachwerke und deren Verbindungen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Holzbau und Holztechnologie.

Foliensätze / LV-Unterlagen

- [42] ALSHEIMER, Berthold (2013): Merkblatt: Bögen, Gewölbe, Kappendecken. Teil 1: Tragverhalten und Hinweise zur Rissbildung - eine Einführung. Themengebiet 1.2.
- [43] MEISEL, Andreas (2016): Lektion 1 - Einführung. Vorlesungsunterlage zur Lehrveranstaltung Bestandsanalyse und Instandsetzung von Holzkonstruktionen.
- [44] SCHICKHOFER, Gerhard (2006): Holzbau. Der Roh- und Werkstoff Holz. Vorlesungsunterlage zur Lehrveranstaltung Holzbau Grundlagen.
- [45] SCHICKHOFER, Gerhard (2009): Holzbau. Nachweisführung für Konstruktionen aus Holz. Vorlesungsunterlage zur Lehrveranstaltung Holzbau 1.

Zeitungsartikel

- [46] HOLZFORSCHUNG AUSTRIA (2015): Hölzernes Kulturgut. Interview mit der Präsidentin des Österreichischen Bundesdenkmalamtes Barbara Neubauer. In: *Holzforschung Austria. Magazin für den Holzbereich* 13, 01.05.2015.
- [47] N.N (1885): Grazer Notizen. Neubau k.k Technische Hochschule. In: *Grazer Tagespost* 18, 25.08.1885 (192).
- [48] N.N (1888): Graz. Neue Technische Hochschule. In: *Der Bautechniker. Centralorgan für das österreichische Bauwesen*. VIII, 31.08.1888 (35), S. 507.
- [49] WIST, Johann (1889): Bau der k.k. Technischen Hochschule in Graz. In: *Der Bautechniker. Centralorgan für das österreichische Bauwesen*. IX, 01.03.1889 (9), 99–101.

Zeitschriftenaufsätze

- [50] DEINHARD, Martin (1963): Die Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen. In: *Bauen mit Holz*.
- [51] EHLBECK, Jürgen; GÖRLACHER, Rainer (1990): Zur Problematik bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. In: *Bauen mit Holz*, S. 117–121.
- [52] FRECH, Peter (1987): Beurteilungskriterien für Rissbildungen bei Bauholz im konstruktiven Holzbau. In: *Bauen mit Holz*.
- [53] GÖRLACHER, Rainer (1990): Untersuchung von altem Konstruktionsholz. Die Bohrwiderstandsmessung. In: *Bauen mit Holz*, S. 455–459.
- [54] GÖRLACHER, Rainer (1991): Untersuchung von altem Konstruktionsholz. Bestimmung des Elastizitätsmoduls. In: *Bauen mit Holz*, S. 582–587.
- [55] GRAF, Erwin; MEILI Markus (2001): Holzzerstörende Pilze und Insekten. Analyse, Prognose, Bekämpfung. In: *Lignatec - Die technischen Holzinformationen der Lignum* (14).

Archivgut

- [56] DE COLLE, Johann (04.06.1885): Schriftverkehr betreffend Verlängerung der Gewährleistung für die erbrachten Zimmermannsarbeiten. Archiv d. Techn. Univ. Graz. Loseblattsammlung kurrenthandschriftlicher Dokumente.
- [57] N.N (um 1885): Arbeitsverzeichnis für die Zimmermannsarbeiten für den Neubau des Hauptgebäudes der k.k. Technischen Hochschule in Graz. Archiv d. Techn. Univ. Graz. Loseblattsammlung kurrenthandschriftlicher Dokumente.

- [58] OHMEYER, Carl (27.04.1885): Arbeitsverzeichnis und Offert für die Zimmermannsarbeiten für den Neubau des Hauptgebäudes der k.k. Technischen Hochschule in Graz. Archiv d. Techn. Univ. Graz. Loseblattsammlung kurrenthandschriftlicher Dokumente.
- [59] WIST, Johann (um 1887): ausgewählte Blaupausen der Planunterlagen und Entwurfsskizzen über die Hauptkuppel. Archiv d. Techn. Univ. Graz. Gebundenes Abrechnungsbuch für die Abrechnung der gefertigten Pläne zum Neubau der k.k. Technischen Hochschule in Graz.
- [60] WIST, Johann (um 1887): Endbericht über die Zimmermannsarbeiten. Technische Universität Graz. Loseblattsammlung kurrenthandschriftlicher Dokumente.

Gesetze / Verordnungen

- [61] INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES (ICOMOS) (31.05.1964): Charta von Venedig. Internationales Abkommen über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche), vom 31.05.1964.
- [62] INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES (ICOMOS) (01.10.1979): Charta von Burra. Internationales Abkommen über den denkmalpflegerischen Umgang mit Objekten von kultureller Bedeutung (Denkmalwert), vom 01.10.2013.
- [63] LAND STEIERMARK (28.06.1977): Gesetz zur Erhaltung des Ortsbildes von Gemeinden. Ortsbildgesetz 1977, vom 16.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrStmk&Gesetzesnummer=20000161>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [64] LAND STEIERMARK (04.04.1995): Gesetz mit den Bauvorschriften für das Land Steiermark. Stmk. BauG, vom 16.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrStmk&Gesetzesnummer=20000070>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [65] LAND STEIERMARK (01.12.2008): Grazer Altstadterhaltungsgesetz. GAEG 2008, vom 16.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrStmk&Gesetzesnummer=20000162>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [66] REPUBLIK ÖSTERREICH (01.07.1999): Bundesgesetz über die Koordination bei Bauarbeiten (Bauarbeitenkoordinationsgesetz). BauKG, vom 05.04.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009146>, zuletzt geprüft am 05.04.2017.
- [67] REPUBLIK ÖSTERREICH (09.08.2002): Bundesgesetz über die Organisation der Universitäten und ihre Studien (Universitätsgesetz 2002). UG, vom 10.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002128>, zuletzt geprüft am 10.03.2017.
- [68] REPUBLIK ÖSTERREICH (01.07.2005): Bundesgesetz über die Universität für Weiterbildung Krems. DUK-Gesetz, vom 10.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20003259>, zuletzt geprüft am 10.03.2017.
- [69] REPUBLIK ÖSTERREICH (01.01.2014): Bundesgesetz betreffend den Schutz von Denkmälern wegen ihrer geschichtlichen, künstlerischen oder sonstigen kulturellen Bedeutung. DMSG, vom 13.03.2017. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009184>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [70] UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO) (14.05.1954): Hague convention. Final act of the intergovernmental conference on the protection of cultural property in the event of armed conflict. den Haag, 1954, vom 14.05.1954. Online verfügbar unter <http://unesdoc.unesco.org/images/0008/000824/082464mb.pdf>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.

Normen / Richtlinien

- [71] RICHTLINIE RVS 13.03.11, 01.08.2009: Arbeitspapier Nr. 12 : Objekts- und Bauteilbewertung bei Brückenprüfungen, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr.
- [72] NORM ÖNORM A 6250-2, 15.03.2015: Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen. Teil 2: Bestands- und Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten.
- [73] NORM ÖNORM EN 338, 01.06.2016: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen.

- [74] NORM SIA 462, 01.06.1994: Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke.
- [75] RICHTLINIE ONR 24009, 01.05.2013: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Hochbauten.
- [76] NORM SIA 469, 01.08.1997: Erhaltung von Bauwerken.
- [77] NORM ÖNORM EN 1990, 15.03.2013: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [78] NORM ÖNORM B 1991-1-3, 01.09.2013: Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten - Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.
- [79] NORM ÖNORM EN 1991-1-3, 15.01.2016: Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten.
- [80] NORM ÖNORM EN 1991-1-1, 01.09.2011: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau.
- [81] NORM ÖNORM B 1991-1-1, 01.02.2017: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau - Nationale Festlegungen und nationale Ergänzungen.
- [82] NORM ÖNORM EN 1991-1-4, 15.05.2011: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.
- [83] NORM ÖNORM B 1991-1-4, 01.05.2013: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten - Nationale Festlegungen und nationale Ergänzungen.
- [84] NORM ÖNORM EN 1995-1-1, 16.08.2016: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [85] NORM ÖNORM B 1995-1-1, 15.06.2015: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.
- [86] NORM ÖNORM EN 1996-1-1, 01.01.2013: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten -Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.
- [87] NORM SIA 269, 01.01.2011: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken.
- [88] NORM DIN 31051, 01.09.2012: Grundlagen der Instandhaltung.
- [89] NORM ÖNORM B4100-2, 01.03.2004 (Zurückziehung: 01.07.2009): Holzbau - Holztragwerke - Teil 2: Berechnung und Ausführung.
- [90] NORM ÖNORM EN 13306, 01.10.2010: Instandhaltung. Begriffe der Instandhaltung.
- [91] MERKBLATT SIA 2017, 01.06.2000: Merkblatt SIA 2017. Erhaltungswert von Bauwerke.
- [92] NORM ÖNORM DIN 4074-1, 01.09.2012: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1: Nadelschnittholz.

Internetquellen

- [93] BUNDESDENKMALAMT (bda) (o.J. [2017]): Denkmalliste. Online verfügbar unter <http://www.bda.at/downloads/1928/Denkmalliste>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [94] BUNDESMINISTERIUM F. WISSENSCHAFT, FORSCHUNG U. WIRTSCHAFT (bmwfw) (o.J. [2017]): Öffentliche Universitäten, Privatschulen und Fachhochschulen. Online verfügbar unter <https://wissenschaft.bmwfw.gv.at/bmwfw/studium/studieren-in-oesterreich/unis-privatunis-fhs-uebersicht/>, zuletzt geprüft am 10.03.2017.
- [95] GEOINFORMATIONSSYSTEM STEIERMARK (GIS) (o.J. [2017]): Arbeitskarten. Stadtbezirke Graz. Online verfügbar unter <http://www.gis.steiermark.at/cms/ziel/115194667/DE/>, zuletzt geprüft am 17.03.2017.
- [96] GEOINFORMATIONSSYSTEM STEIERMARK (GIS) (o.J. [2017]): Digitaler Atlas der Steiermark. Online verfügbar unter <http://www.gis.steiermark.at/cms/ziel/73679/DE/>, zuletzt geprüft am 01.03.2017.
- [97] LAUKHARDT, Peter (o.J. [2017]): Baugeschichte. Schutzzonen nach GAEG. Bauerbe Graz. Online verfügbar unter http://www.grazerbe.at/Schutzzonen_nach_GAEG, zuletzt geprüft am 17.03.2017.
- [98] ÖSTERREICHISCHE NATIONALBANK (OeNB) (o.J. [2017]): Währungsrechner. Die Kaufkraft von alten österreichischen Währungen seit dem Jahr 1820 kann mit diesem Onlinerechner mit der heutigen Kaufkraft in EUR verglichen werden. Online verfügbar unter <https://www.oenb.at/docroot/inflationscockpit/waehrungsrechner.html>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.

- [99] STADTBAUDIREKTION GRAZ (o.J. [2017]): Altstadtsschutz. Gesetzliche Grundlagen. Online verfügbar unter <http://www.stadtentwicklung.graz.at/cms/beitrag/10136173/2858094>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [100] STADTVERMESSUNGSAMT GRAZ (o.J. [2017]): Schutzzonen gemäß GEAG. Onlinekartographie. Online verfügbar unter <https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?project=schutzzonen&client=core>, zuletzt geprüft am 16.03.2017.
- [101] STATISTIK AUSTRIA (o.J. [2017]): Bildung und Kultur. Universitäten, Studium. Online verfügbar unter https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bildung_und_kultur/formales_bildungswesen/universitaeten_studium/index.html, zuletzt geprüft am 04.03.2017.
- [102] TU-GRAZ (o.J. [2017]): Homepage der Technischen Universität Graz. Geschichte. Online verfügbar unter <https://www.tugraz.at/tu-graz/universitaet/geschichte/>, zuletzt geprüft am 10.03.2017.
- [103] UNIVERSITÄT HEIDELBERG (o.J. [2017]): Homepage der Universität Heidelberg. Zukunft seit 1386. Online verfügbar unter <http://www.ub.uni-heidelberg.de/helios/fachinfo/www/math/txt/koenigsberger/ann.htm>, zuletzt geprüft am 04.03.2017.
- [104] WIKIPEDIA (N.N) (o.J. [2017]): Bohrwiderstandsmessung. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Bohrwiderstandsmessung>, zuletzt geprüft am 28.03.2017.
- [105] WIKIPEDIA (N.N) (o.J. [2017]): Liste der Universitäten in Österreich. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Universit%C3%A4ten_in_%C3%96sterreich, zuletzt geprüft am 10.03.2017.
- [106] ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (ZAMG): Messwerte für KW 6/7 (2017). Wetterstation Graz-Universität. Online verfügbar unter https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/tawes-verlaufsgraphiken/graz_universitaet/temperatur/?mode=geo&druckang=red., zuletzt geprüft am 17.02.2017.

A-2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Vier Grundmaßnahmen der Instandhaltung [43].....	8
Abb. 2.2:	Unterteilung des Grazer Stadtgebietes in Schutzzonen [100]	11
Abb. 3.1:	Ablaufstrukturbaum bei Instandsetzungs- und Sanierungsprojekten [39].....	15
Abb. 3.2:	Wesentliche Inhalte einer Zielanalyse.....	16
Abb. 3.3:	Komplexität beim Bauen im Bestand [13].....	17
Abb. 3.4:	Projektbeteiligte bei Instandsetzungsaufgaben.....	18
Abb. 3.5:	Erste Kernaufgabe der Bestandserfassung: Die Bestandsuntersuchung.....	19
Abb. 3.6:	Zweite Kernaufgabe der Bestandserfassung: Die Bestandsaufnahme	19
Abb. 3.7:	Empfohlenes Ablaufschema bei der Bestandserfassung [38].....	20
Abb. 3.8:	Schadensklassifizierung nach dem Erscheinungsbild [15].....	25
Abb. 3.9:	Schadensklassifizierung nach der Ursache [41], [13]	25
Abb. 3.10:	Beispiel einer möglichen Schadenskartierung einer Fachwerkfassade [1].....	27
Abb. 3.11:	Musterresistographie eines gesunden Holzquerschnittes [104].....	31
Abb. 3.12:	Musterresistographie eines geschädigten Holzquerschnittes [104].....	32
Abb. 3.13:	Mögliche Variante zur Festlegung der Beurteilungsabschnitte	35
Abb. 3.14:	Notensystem der Zustandsbeurteilung mit Empfehlung des jeweiligen Ertüchtigungszeitraums [39].....	36
Abb. 3.15:	Punktebasiertes Zustandsbeurteilungsschema zur Bewertung historischer Tragstrukturen [39]	38
Abb. 3.16:	Kriterien bei der Planung der baulichen Maßnahmen	42
Abb. 3.17:	Übersicht der zur Verfügung stehenden Instandsetzungsmethoden [15].....	45
Abb. 3.18:	Mögliche Gliederung der Instandsetzungsmethoden [39].....	46
Abb. 4.1:	Hochschulstandorte Österreichs [101]	53
Abb. 4.2:	Planskizze über die Erweiterungsbauten im Lesliehof [19]	54
Abb. 4.3:	Planskizze über den nie umgesetzten westlichen Anbau an den Lesliehof [19].....	56
Abb. 4.4:	Ansichtskarte der Technischen Hochschule Aachen (heute: RWTH Aachen) [19]	57
Abb. 4.5:	Fassadenentwürfe nach dem Vorbild der Technischen Hochschule Aachen [19]	58
Abb. 4.6:	Standorte des Joanneums zum Zeitpunkt der Überführung als k.k. Technische Hochschule [19]	59
Abb. 4.7:	Das Polytechnikum Dresden als Musterbeispiel für den Neubau auf den Mandellgründen [103]	60
Abb. 4.8:	Requisiten der Spatenstichfeier im Jahr 1884	61
Abb. 4.9:	Entwurf der nordseitigen Hauptfassade zur Rechbauerstraße [19].....	63
Abb. 4.10:	Entwurf der westseitigen Fassade zur Lessingstraße [19].....	63
Abb. 4.11:	Parterregrundrissplan der k.k. Techn. Hochschule Graz von J. Wist [49].....	64
Abb. 4.12:	Vestibül.....	65
Abb. 4.13:	Hauptstiege	65
Abb. 4.14:	Aquarell des Aulafestsaaales um 1900 [19].....	66
Abb. 5.1:	Dachlandschaft „Alte Technik“	67
Abb. 5.2:	Vogelperspektive „Alte Technik“ [96]	67
Abb. 5.3:	Doppeltes Hängewerk (Seitentrakt)	68
Abb. 5.4:	Bretterbinder (Mitteltrakt) [38].....	68
Abb. 5.5:	„Bundtramstern“ der Zierkuppel.....	69
Abb. 5.6:	Firstbereich der Zierkuppel.....	69

Abb. 5.7:	Originale Plandarstellung des Dachbodens, rot: geplante Wartungsstege [59].....	70
Abb. 5.8:	Von Schwindrissen durchtrennte Abbundzeichen [38].....	70
Abb. 5.9:	Blick in den derzeit in Ausbau befindlichen Westtrakt	71
Abb. 5.10:	Große Dachfenster mit auf den Sparren verschraubten stählernen Halteprofilen	71
Abb. 5.11:	Fragwürdige Verschraubung eines mit Holznagel gesicherten Kopfbandes.....	71
Abb. 5.12:	Notwendige Verstärkung des hölzernen Hängewerkdruckgurtes mittels U-Profil	71
Abb. 5.13:	„Alte Technik“ - Ansicht NW	74
Abb. 5.14:	Hauptkuppel - Ansicht NW	74
Abb. 5.15:	Währungsrechner für historische Österreichische Zahlungsmittel [98].....	75
Abb. 5.16:	Eingeschlagene Abbundzeichen an einem Kopfband im Westtrakt	77
Abb. 5.17:	Aufgestempelte Kennzeichnungen an den Konstruktionshölzern der Hauptkuppel	77
Abb. 5.18:	Ebene Arbeitsfläche über der Bundtramlage für Montagezwecke.....	79
Abb. 5.19:	Noch vorhandener, handbetriebener Lastenaufzug im Dachraum über der Hauptstiege	79
Abb. 5.20:	Vorgang beim Längssägen eines Stammes [11]	80
Abb. 5.21:	Im Arbeitsverzeichnis geforderte Deckenkonstruktionen über den Regeltrakten.....	82
Abb. 5.22:	Mit Pflasterklinker bekleidete Dippelbaum-Eisentraversendecke über dem Aulafestsaal	83
Abb. 5.23:	Mauerwerk als vereinfachtes Dreistoffsystem.....	84
Abb. 5.24:	Schematische Darstellung des bei der „Alten Technik“ angewandten Mauerwerkverbandes [2].....	86
Abb. 5.25:	Freiliegendes Mauerwerk an der Nordseite	86
Abb. 5.26:	Mauerwerkshochzug unterhalb des Vollgespärre VG-D	86
Abb. 5.27:	Verankerung der Zierstatuen außen.....	87
Abb. 5.28:	Rückverankerung der Zierstatuen an einen quer zu den Sparren liegenden Ankerbalken innen	87
Abb. 5.29:	Zierbalustrade ohne Abdeckung an der Ostseite der großen Kuppel.....	87
Abb. 5.30:	Zierbalustrade mit Abdeckung an der kleineren nordwestlichen Zierkuppel.....	87
Abb. 5.31:	Original geplante Entwässerung der Hauptkuppeldachfläche mittels Kastenrinne [59]	88
Abb. 5.32:	Rinnenausbildung mit angelötetem Abfallrohr an der Ostseite der Hauptkuppel	88
Abb. 5.33:	Typische Schwindrisse an „halbtrocken“ verzimmertem Holz in der Hauptkuppel	89
Abb. 5.34:	Auswahl von Kuppelbauteilen, an denen Baumkanten aufgefunden wurden	94
Abb. 5.35:	Geringe Anzahl von Ästen	94
Abb. 5.36:	Faserneigung	95
Abb. 5.37:	Feuchteschlieren.....	95
Abb. 5.38:	Eiserne Aufhängung eines Bundtrams an eine Stuhlsäule. Vollgespärre VG-2.....	97
Abb. 5.39:	Schieferplattendeckung der Hauptkuppel	98
Abb. 5.40:	Ausbildung der Dacheindeckung im Gratbereich der Hauptkuppel	98
Abb. 5.41:	Trägerleistenkonstruktion für den verblechten Übergangsbereich Kuppel-Laterne	98
Abb. 5.42:	Blecherne Dachhaut der Laterne mit Ausblick zum Grazer Schlossberg	98
Abb. 5.43:	Originale Planunterlagen von Johann Wist als Blaupause [59]	99
Abb. 5.44:	Tramebene E0 (Bundtramlage)	99
Abb. 5.45:	Tramebene E1 (erste Zangenbalkenlage)	99
Abb. 5.46:	Tramebene E2 (zweite Zangenbalkenlage).....	100
Abb. 5.47:	Tramebene E3 (dritte Zangenbalkenlage).....	100
Abb. 5.48:	Tramebene 4 (Fußpfette Laterne)	100

Abb. 5.49:	Sparrenlage Kuppel.....	100
Abb. 5.50:	Sparrenlage Laterne	100
Abb. 5.51:	Vollgespärre VG-1 (Blickrichtung West)	101
Abb. 5.52:	Vollgespärre VG-2 (Blickrichtung Ost).....	101
Abb. 5.53:	Vollgespärre VG-3 (Blickrichtung Ost).....	101
Abb. 5.54:	Vollgespärre VG-4 (Blickrichtung Ost).....	101
Abb. 5.55:	Vollgespärre VG-5 (Blickrichtung Ost).....	101
Abb. 5.56:	Vollgespärre VG-A (Blickrichtung Nord)	102
Abb. 5.57:	Vollgespärre VG-B (Blickrichtung Nord).....	102
Abb. 5.58:	Vollgespärre VG-C (Blickrichtung Nord).....	102
Abb. 5.59:	Vollgespärre VG-D (Blickrichtung Nord)	102
Abb. 5.60:	Vollgespärre VG-E (Blickrichtung Süd).....	102
Abb. 5.61:	Bauteilbezeichnungen anhand des Vollgespärres VG-3	103
Abb. 5.62:	Fotografische Impressionen des Hauptkuppeltragwerks	106
Abb. 5.63:	links: Prinzip einfaches Hängewerk; rechts: Prinzip einfaches Sprengwerk [38]	107
Abb. 5.64:	Grundlegendes räumliches Tragsystem der Hauptkuppel	108
Abb. 5.65:	Tragwerk bis zur Bundtramebene (E0)	109
Abb. 5.66:	Tragwerk bis zur ersten Zangenbalkenebene (E1)	109
Abb. 5.67:	Tragwerk bis zur zweiten Zangenbalkenebene (E2)	109
Abb. 5.68:	Tragwerk bis zur dritten Zangenbalkenebene (E3)	110
Abb. 5.69:	Tragwerk bis zur vierten Zangenbalkenebene (E4).....	110
Abb. 5.70:	Fertiges Tragwerk mitsamt Sparrenlagen.....	110
Abb. 5.71:	Übersicht der zimmermannsmäßigen Verbindungen und deren typische Lage im Tragwerk [38; 41]	114
Abb. 5.72:	Anschlussknoten E0-D01.....	116
Abb. 5.73:	Anschlussknoten E0-D02.....	117
Abb. 5.74:	Anschlussknoten E1-D01.....	118
Abb. 5.75:	Anschlussknoten E1-D02.....	119
Abb. 5.76:	Anschlussknoten E1-D03.....	120
Abb. 5.77:	Anschlussknoten E1-D04.....	121
Abb. 5.78:	Anschlussknoten E1-D05.....	122
Abb. 5.79:	Anschlussknoten E1-D06.....	123
Abb. 5.80:	Anschlussknoten E2-D01.....	124
Abb. 5.81:	Anschlussknoten E2-D02.....	125
Abb. 5.82:	Anschlussknoten E2-D03.....	126
Abb. 5.83:	Anschlussknoten E2-D04.....	127
Abb. 5.84:	Anschlussknoten E2-D05.....	128
Abb. 5.85:	Anschlussknoten E3-D01.....	129
Abb. 5.86:	Anschlussknoten E3-D02.....	130
Abb. 5.87:	Anschlussknoten E3-D03.....	131
Abb. 5.88:	Anschlussknoten E4-D01.....	132
Abb. 5.89:	Anschlussknoten E4-D02.....	133
Abb. 5.90:	Fotografische Impressionen der Verbindungstechnik	134

Abb. 5.91:	Lage der durchgeführten Holzfeuchte- und Bohrwiderstandsmessungen im Hauptkuppeltragwerk	135
Abb. 5.92:	Wetterdaten im 7-Tagesverlauf vor den durchgeführten Holzfeuchtemessungen [106]	137
Abb. 5.93:	Verwendetes Holzfeuchtemessgerät GANN M4050 mit Rammelektrode M18	138
Abb. 5.94:	Verwendetes Bohrwiderstandsmessgerät IML Resi F300	140
Abb. 5.95:	Messstreifendiagramm RES 01a-1 und RES 01a-2	141
Abb. 5.96:	Messstreifendiagramm RES 02	142
Abb. 5.97:	Vermeintlich intakter Bundtram im Achskreuzungspunkt (A-1).....	142
Abb. 5.98:	Vollständig zerstörter Auflagerbereich des Bundtrams	142
Abb. 5.99:	Messstreifendiagramm RES 01b	142
Abb. 5.100:	Messstreifendiagramm RES 03	143
Abb. 5.101:	Messstreifendiagramm RES 04	143
Abb. 5.102:	Lage der Messung RES 03 zur Ermittlung der Zapfenlochtiefe des Stuhlsäulen-anschlusses.....	143
Abb. 5.103:	Lage der Messung RES 04 zur Ermittlung der Zapfenlochbreite des Stuhlsäulen-anschlusses.....	143
Abb. 5.104:	Messstreifendiagramm RES 05	144
Abb. 5.105:	Lage der Messung RES 05	144
Abb. 5.106:	Draufsicht auf Fußpfette der Kuppel	144
Abb. 5.107:	Messstreifendiagramm RES 08	145
Abb. 5.108:	vollständig zerstörtes Bundtramaufleger	147
Abb. 5.109:	Durchsteckbolzen einer Eisenaufhängung durch die Hängestuhlsäule	148
Abb. 5.110:	Deutlich erkennbare Kantenpressung am hochgehängten Bundtram.....	148
Abb. 5.111:	Wartungstreppe zum Aufstieg auf die neuere, nördliche Wartungsgalerie.....	149
Abb. 5.112:	Abgeklungener Insektenbefall am Lagerbalken der Wartungstreppe	149
Abb. 5.113:	Erkennbarer Wasserschaden am Brettverschlag im östlichen Traufenbereich der Hauptkuppel.....	149
Abb. 5.114:	Untersicht der Rinnenkonstruktion.....	149
Abb. 5.115:	Wiederverwerteter Sparrenverschnitt als Kopfbandkonstruktion der Hauptkuppel.....	150
Abb. 5.116:	Sinnlos eingebaute, einseitige Diagonalverstrebung am Vollgespärre VG-3	150
Abb. 5.117:	Vermutete Schadstelle an der Blecheindeckung der Laterne.....	151
Abb. 5.118:	Verschmutzungen und tierische Exkrememente im Hauptkuppeltragwerk der „Alten Technik“	152
Abb. 5.119:	Kartierung und Zuordnung der dokumentierten Schäden in der Bundtramlage (E0)	153
Abb. 5.120:	Kartierung und Zuordnung der dokumentierten Schäden in der ersten Zangenbalkenlage (E1)	154
Abb. 6.1:	Gewähltes globales Koordinatensystem	162
Abb. 6.2:	Nachgiebige Einspannwirkung.....	163
Abb. 6.3:	Anwendungsmöglichkeiten und Anordnung von Exzenterstäben [39].....	164
Abb. 6.4:	Auswählbare Stabtypen in Dlubal RFEM [4].....	165
Abb. 6.5:	Formbeiwerte für die Ermittlung der Schneelast auf Tonnen- und Satteldächern	170
Abb. 6.6:	Lastaufstellung der Schneelasten.....	171
Abb. 6.7:	Ermittlung der Außendruckbeiwerte $c_{pe,10}$ für gekrümmte Dächer	173
Abb. 6.8:	Beispiel ABIS-Windlastberechnung.....	175
Abb. 6.9:	Vorzeichendefinition für Windbelastungen nach ÖNORM EN 1991-1-4 [82]	175
Abb. 6.10:	Lastaufstellung der Windlasten	176
Abb. 6.11:	Ingenieurmodell zur Ermittlung der Steifigkeit eines Kontaktdruckanschlusses [38]	180
Abb. 6.12:	Formelparameter für die Steifigkeitsermittlung eines steil anstehenden Fersenversatzes	182

Abb. 6.13:	Formelparameter für die Steifigkeitsermittlung abgestrebter Zapfenverbindungen	186
Abb. 6.14:	Prinzip zur Ermittlung der vertikalen Federsteifigkeit von Kammverbindungen [23]	187
Abb. 6.15:	Ersatzquerschnittshöhe bei Halb- und Mittelkammverbindungen.....	189
Abb. 6.16:	Übersicht der Lage der Anschlusssteifigkeiten in Nord-Südrichtung am Beispiel VG-3.....	194
Abb. 6.17:	Übersicht der Anschlusssteifigkeiten in Ost-Westrichtung am Beispiel VG-C.....	196
Abb. 6.18:	Berechnungsmodell des Vollgespärres VG-3	199
Abb. 6.19:	Berechnungsmodell des Vollgespärres VG-C.....	199
Abb. 6.20:	Vorschlag für die Scherengelenkmodellierung	200
Abb. 6.21:	Modellbildung Bundtramaufleger	201
Abb. 6.22:	Modellbildung Fußpfettenaufleger.....	201
Abb. 6.23:	Modellbildung Mittelpfettenaufleger	202
Abb. 6.24:	Stabgelenktypen zur Berücksichtigung der Anschlusssteifigkeit der Verbindungen	202
Abb. 6.25:	Normalkraftverlauf des Vollgespärres VG-3	203
Abb. 6.26:	Normalkraftverlauf des Vollgespärres VG-C.....	204
Abb. 6.27:	Überzeichnet dargestellte Verformungsfiguren der Vollgespärre (grün)	204
Abb. 6.28:	ULS- Bemessungsergebnis des Vollgespärres VG-3	205
Abb. 6.29:	ULS-Bemessungsergebnis des Vollgespärres VG-C	206
Abb. 6.30:	SLS-Bemessungsergebnis des Vollgespärres VG-C	208

A-3 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Unbewegliche Denkmäler in Österreich mit dem Stichtag 01.01.2017 [93]	5
Tab. 4.1:	Staatliche Universitäten in Österreich.....	51
Tab. 4.2:	Akkreditierte Privatuniversitäten in Österreich.....	52
Tab. 4.3:	Fachhochschulen in Österreich	52
Tab. 4.4:	Belegte Studien in Österreich (per Stichtag 05.01.2017)	52
Tab. 5.1:	Originalabschrift des ausgepreisten Arbeitsverzeichnisses (auszugsweise) [57; 58]	75
Tab. 5.2:	Zeitliche Einteilung unterschiedlicher Abbundzeichen [11]	78
Tab. 5.3:	Sortierkriterien für Kanthölzer bei visueller Sortierung nach ÖNORM DIN 4074-1 [92].....	93
Tab. 5.4:	Querschnittsgeometrie der Tragwerksglieder.....	104
Tab. 5.5:	Messprotokoll der durchgeführten Holzfeuchtemessungen	138
Tab. 5.6:	Zustandsbeurteilung der Hauptkuppel der „Alten Technik“	155
Tab. 6.1:	Mechanische Materialeigenschaften des Konstruktionsholzes der Hauptkuppel	167
Tab. 6.2:	Schneelasten für den Standort Graz nach ÖNORM B 1991-1-3 [78]	170
Tab. 6.3:	Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte.....	177
Tab. 6.4:	Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).....	177
Tab. 6.5:	Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	178
Tab. 6.6:	Anschlusssteifigkeiten in den Nord-Süd orientierten Hauptgespärren.....	195
Tab. 6.7:	Anschlusssteifigkeiten in den Ost-West orientierten Hauptgespärre.....	197

ANHANG B BESTANDSPLÄNE NACH NATURMASS

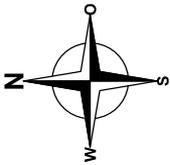
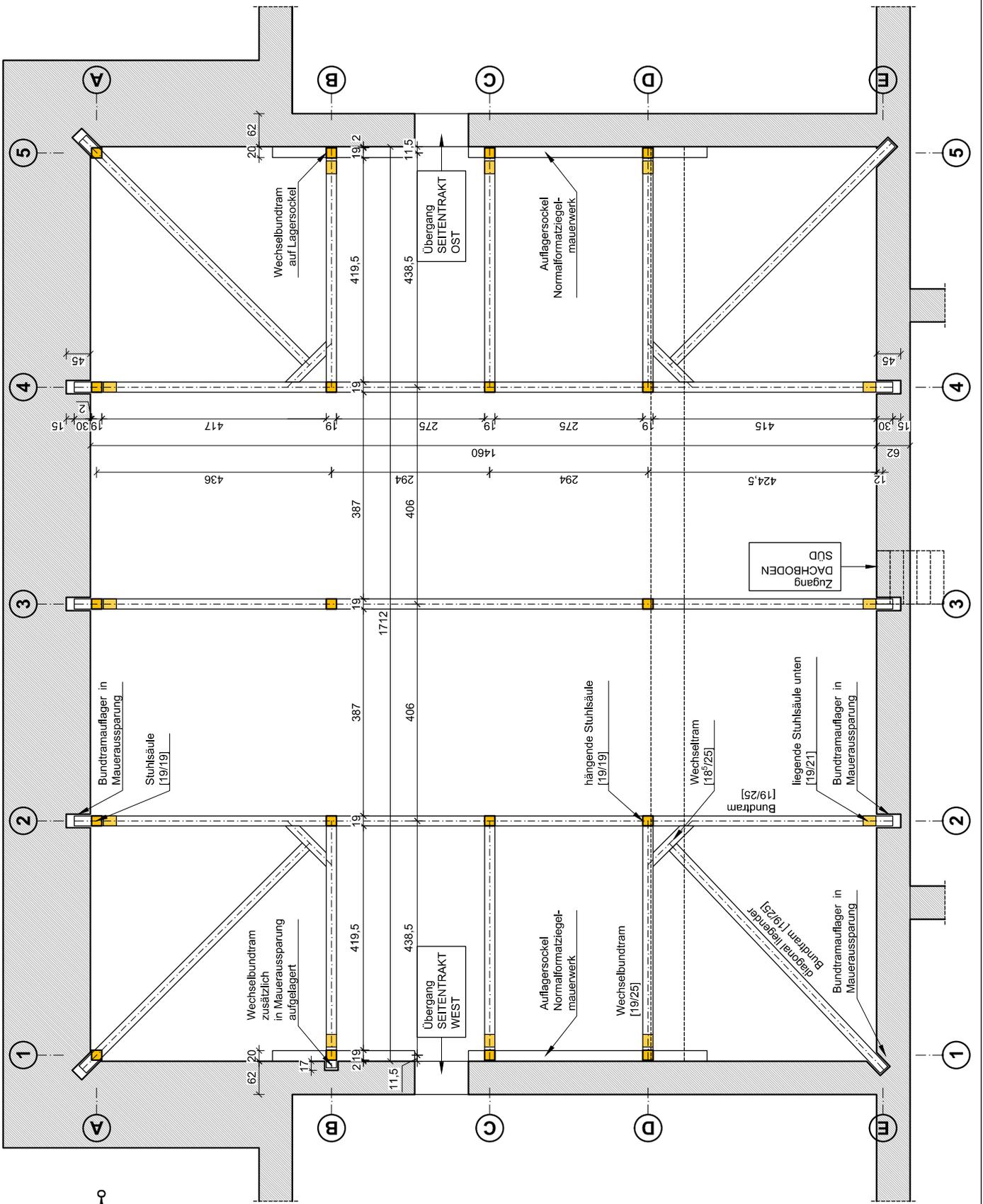
Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde das Hauptkuppeldachtragwerk der „Alten Technik“ der Technischen Universität Graz (Rechbauerstraße 12, 8010 Graz) am Naturmaß aufgemessen und daraus Bestandspläne erstellt. Die nachfolgenden Plandarstellungen zeigen die einzelnen Tramlagen (Bundtram- bzw. Zangenbalkenlagen) und die Vollgespärre der Tragwerkskonstruktion. Zugunsten der Übersichtlichkeit wurde ein Achsrastersystem eingeführt⁴⁴. Dieses gewählte Achsensystem wird gleichermaßen für die Verortung der Anschlussdetails (vgl. Kapitel 5-3.5) und der vorgefundenen Schäden (vgl. Kapitel 5-4) sowie als Grundlage für die statische Modellbildung (vgl. Kapitel 6) verwendet. Sämtliche Planunterlagen dieses Anhangs liegen am Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz im DWG-Format auf und wurden mit dem Programmsystem *Autodesk AutoCAD 2013* erstellt.

Alle Grundriss- und Gespärrepläne sind im Maßstab 1:100 angelegt, wobei die Massivbaustruktur des Mauerwerks- und der Deckenkonstruktionen nur schematisch dargestellt sind. Selbiges gilt für die Zierelemente entlang der Nordfassade und der Auladecke. Die Anschlüsse der einzelnen Konstruktionshölzer können im Detail in ANHANG C eingesehen werden.

Tab.B.1: Planliste ANHANG B

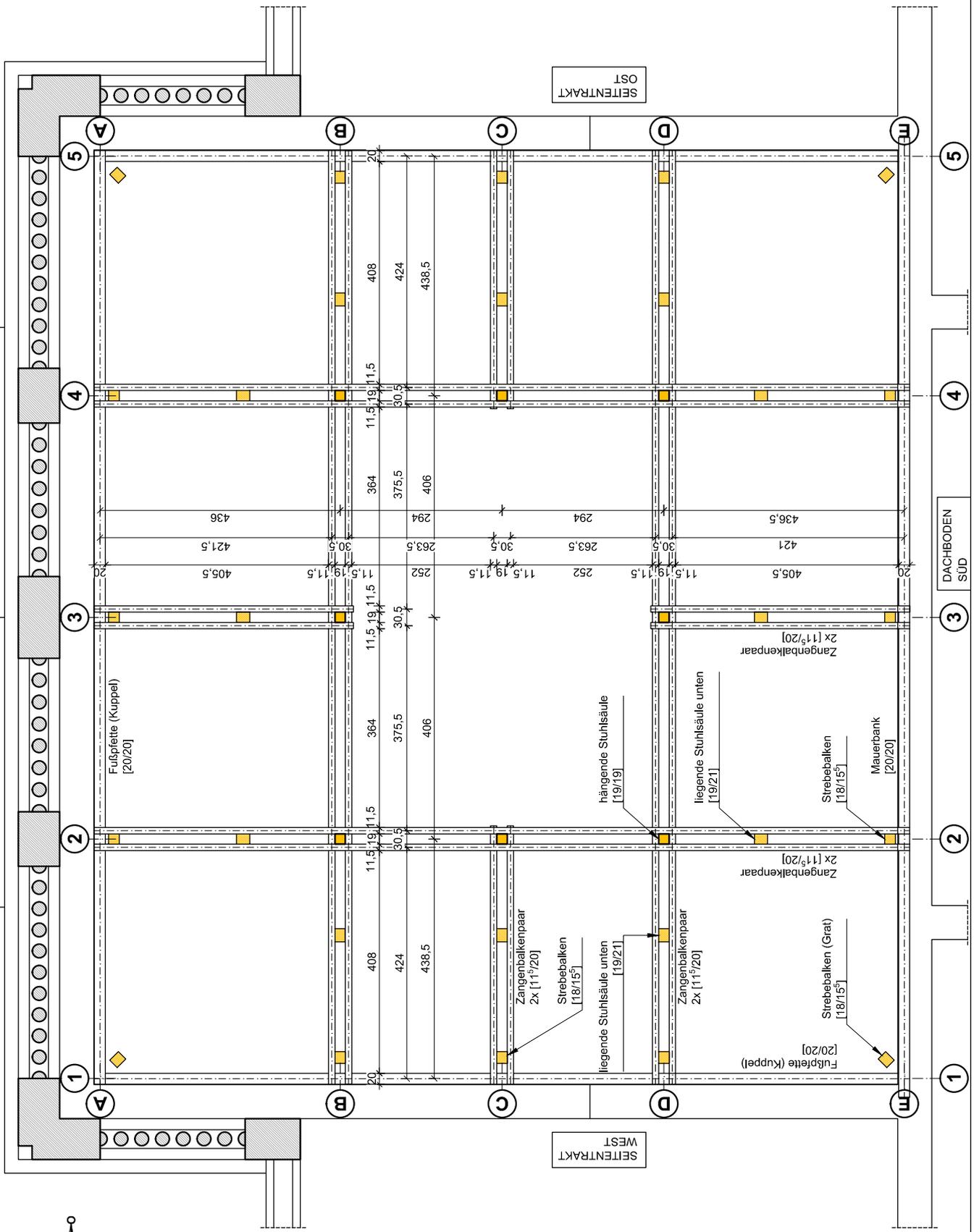
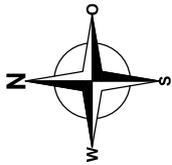
Plannummer	Planinhalt
2016/2017_001-001-001-00	Tramebene 0 - Bundtramlage Kuppel
2016/2017_001-001-002-00	Tramebene 1 - Mauerbank/Fußpfette/Zangenbalken Kuppel
2016/2017_001-001-003-00	Tramebene 2 - Rähm/Zangenbalken Kuppel
2016/2017_001-001-004-00	Tramebene 3 - Firstpfette/Zangebalken Kuppel
2016/2017_001-001-005-00	Tramebene 4 - Fußpfette/Zangelbalken Laterne
2016/2017_001-001-006-00	Sparrenlage Kuppel - Draufsicht
2016/2017_001-001-007-00	Sparrenlage Laterne - Draufsicht
2016/2017_001-001-008-00	Vollgespärre 1 - Blickrichtung West
2016/2017_001-001-009-00	Vollgespärre 2 - Blickrichtung Ost
2016/2017_001-001-010-00	Vollgespärre 3 - Blickrichtung Ost
2016/2017_001-001-011-00	Vollgespärre 4 - Blickrichtung Ost
2016/2017_001-001-012-00	Vollgespärre 5 - Blickrichtung Ost
2016/2017_001-001-013-00	Vollgespärre A - Blickrichtung Nord
2016/2017_001-001-014-00	Vollgespärre B - Blickrichtung Nord
2016/2017_001-001-015-00	Vollgespärre C - Blickrichtung Nord
2016/2017_001-001-016-00	Vollgespärre D - Blickrichtung Nord
2016/2017_001-001-017-00	Vollgespärre E - Blickrichtung Süd

⁴⁴ ACHTUNG: Die Nummerierung des Achsrasters in den Planunterlagen ist NICHT ident mit den im Tragwerk vorhandenen, gestempelten Abbundzeichen sondern wurde eigens für diese Masterarbeit neu angelegt.



index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

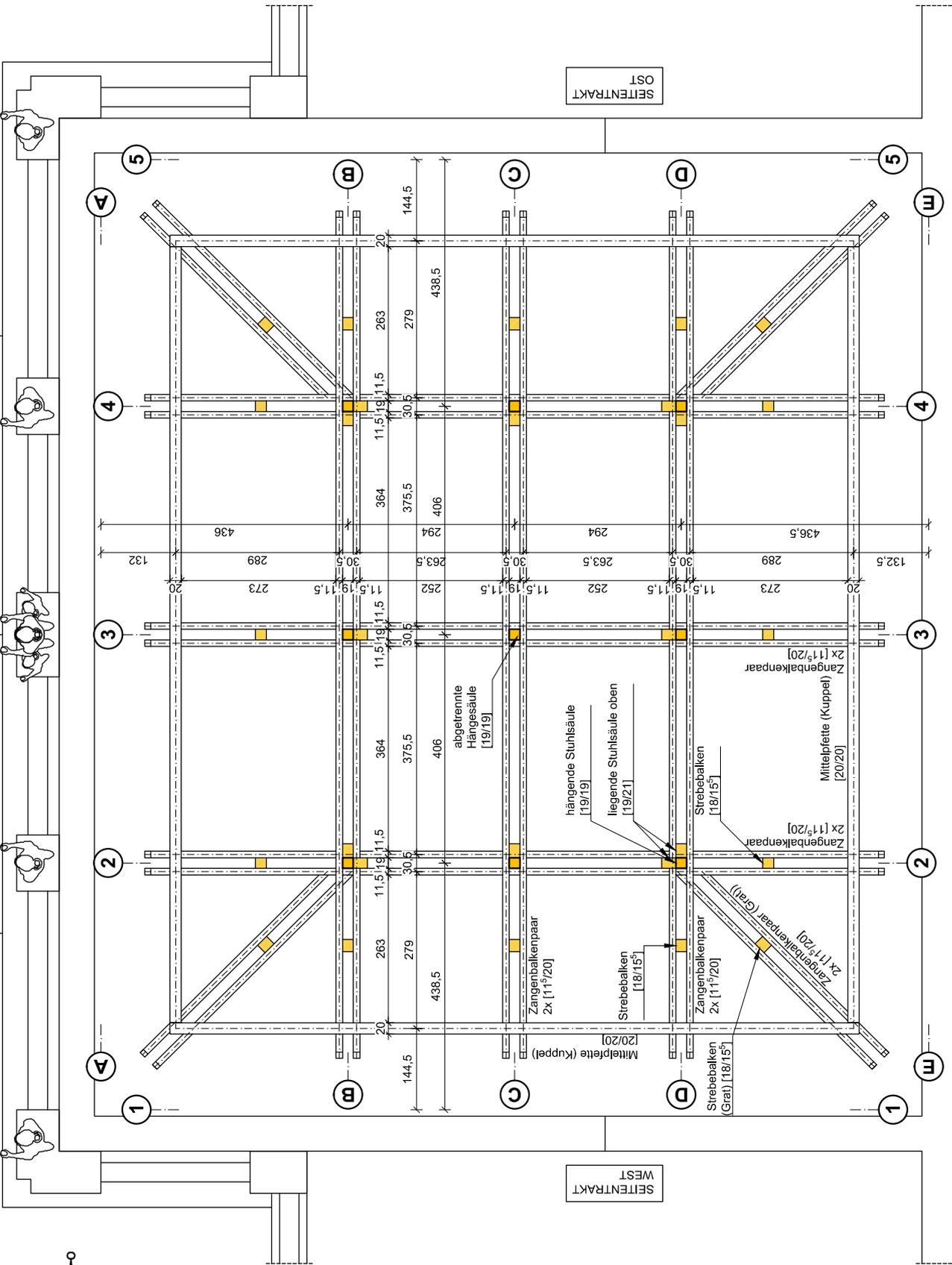
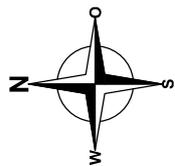
Jahr:		Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17		001	001
Lfg.-Nr.:		Index:	
001		00	



index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17	001	001
	002	00

zugeh. Pläne

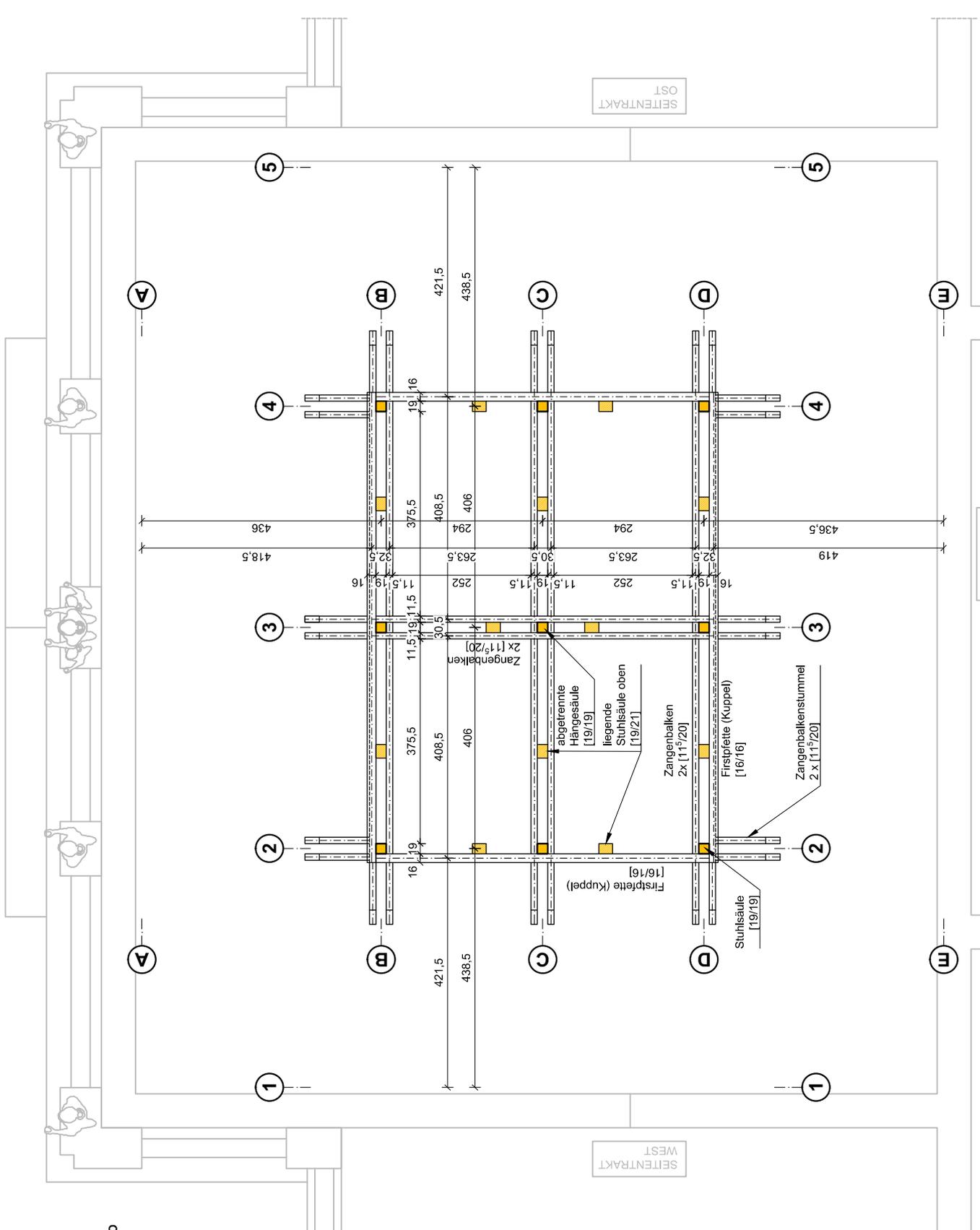
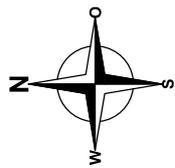


DACHBODEN
SÜD

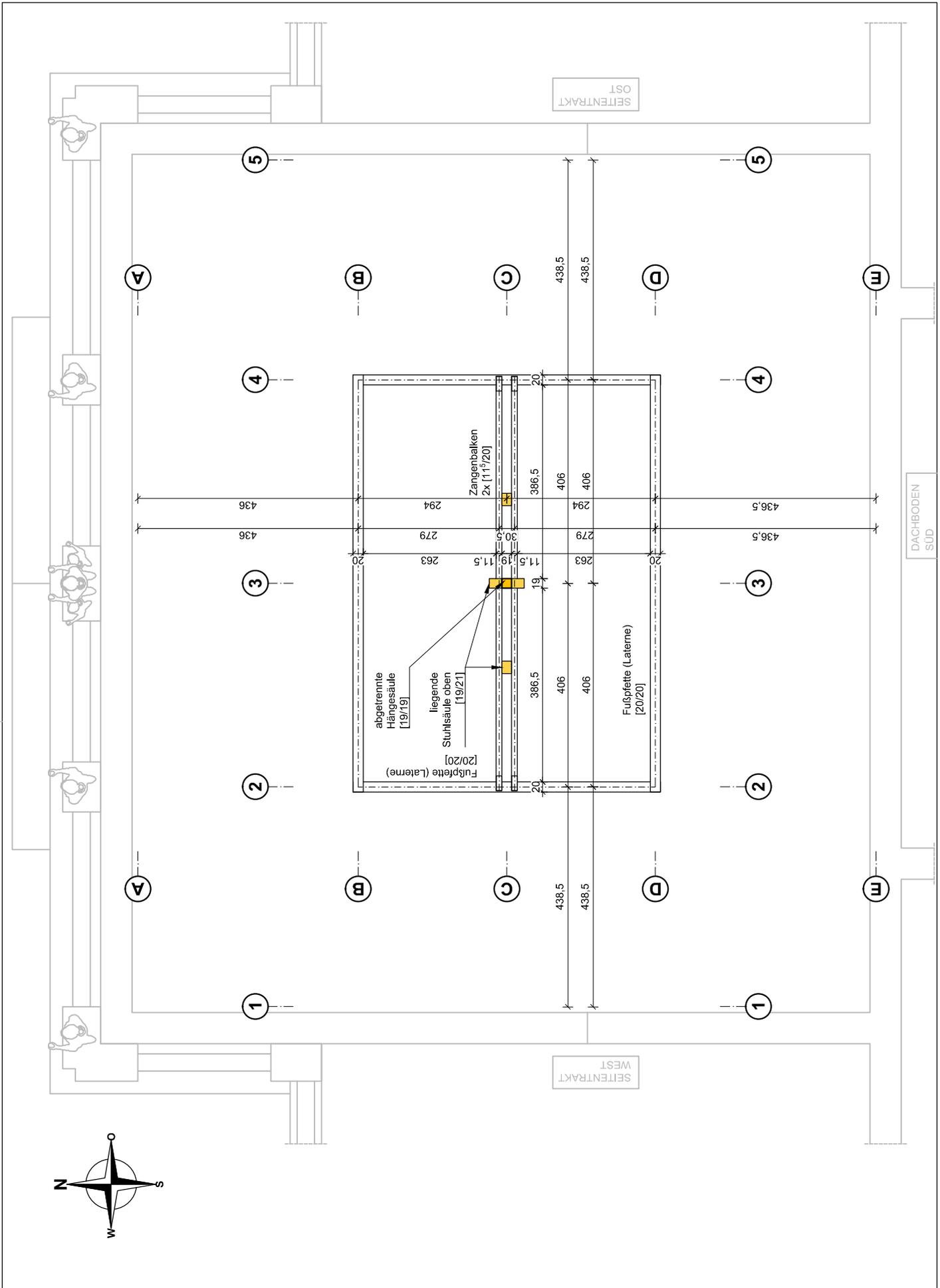
index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Zugehör. Pläne

Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17	001	001
	003	00



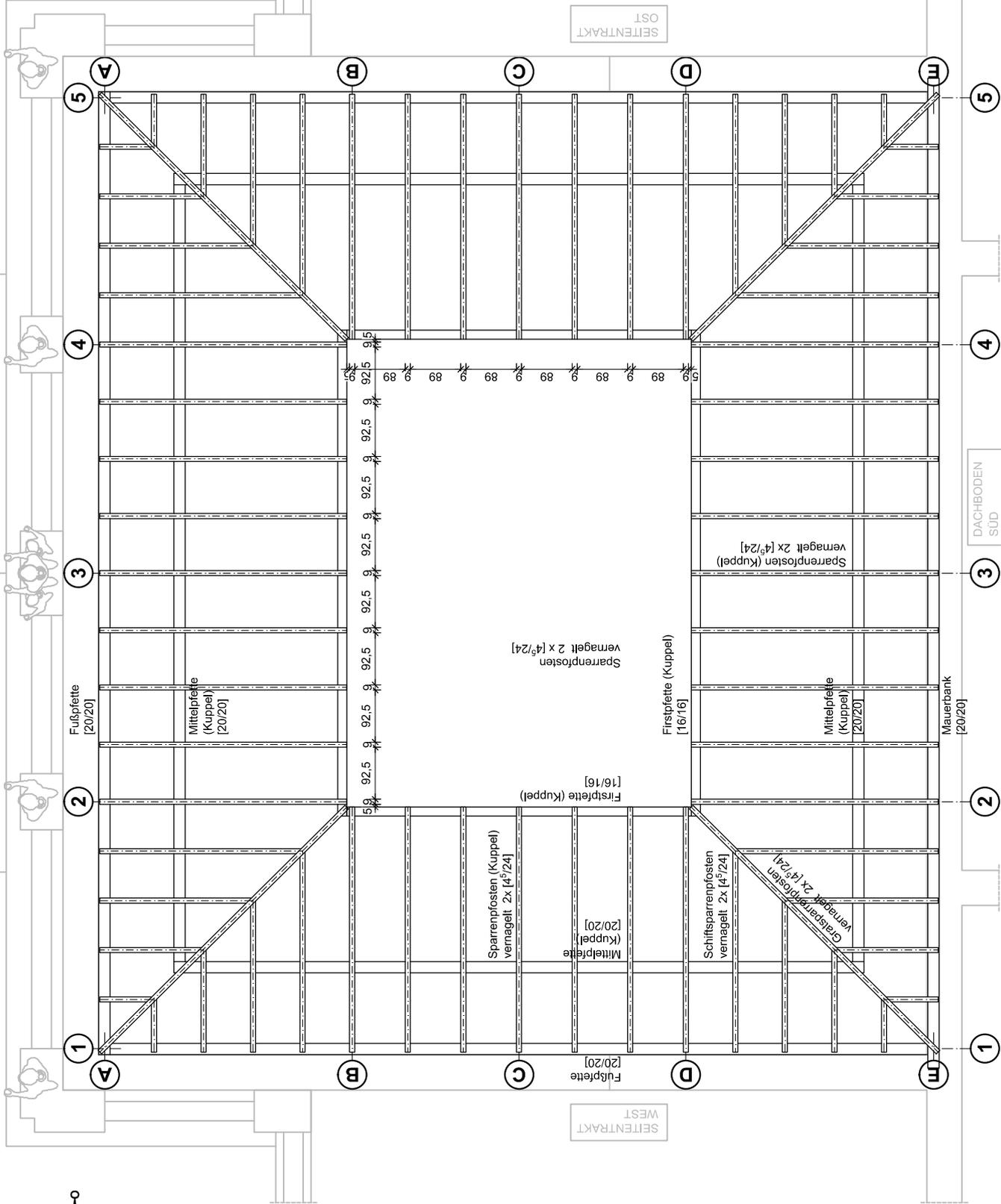
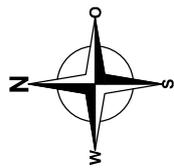
Index	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	



Index	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
	01.02.2017	JoHa	M 1:100
a	Geändert am:	durch:	
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

Jahr	Proj. Nr.	Proj. Teilnr.	Index
2016/17	001	001	00
	001	005	00

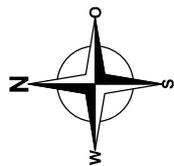
zugeh. Pläne



index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17	001	001
	006	00

zugeh. Plane



Projekt: **Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL**

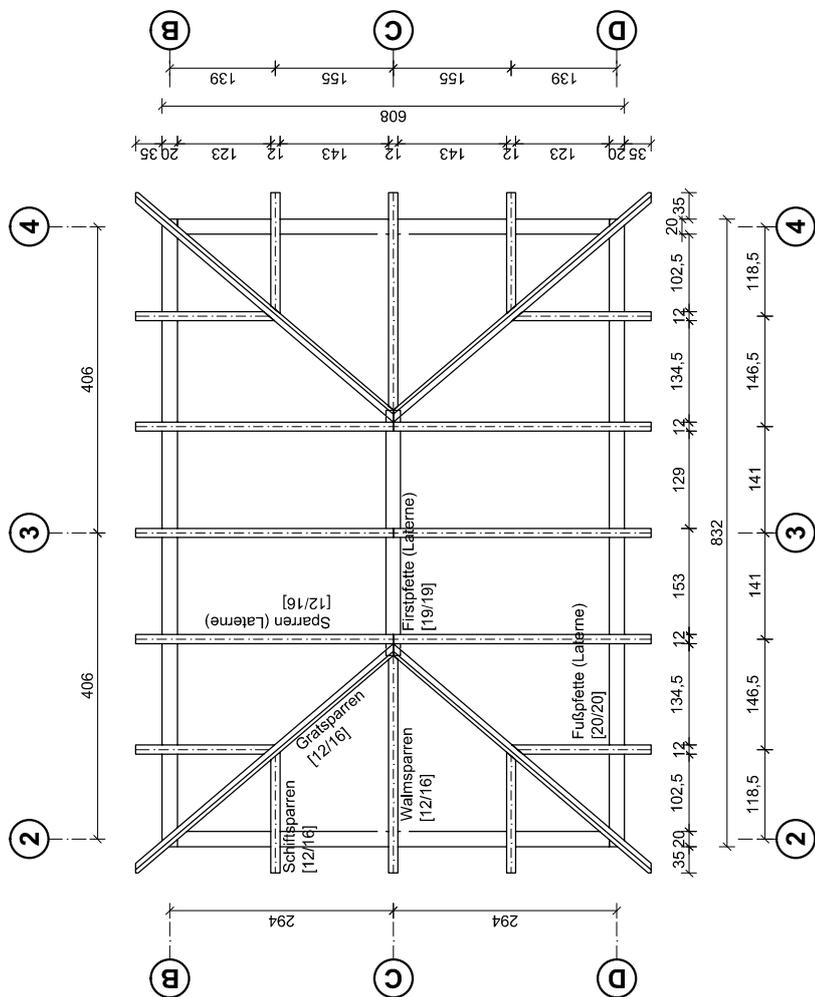
Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Objektteil: **Sparrenlage Laterne**
 Draufsicht

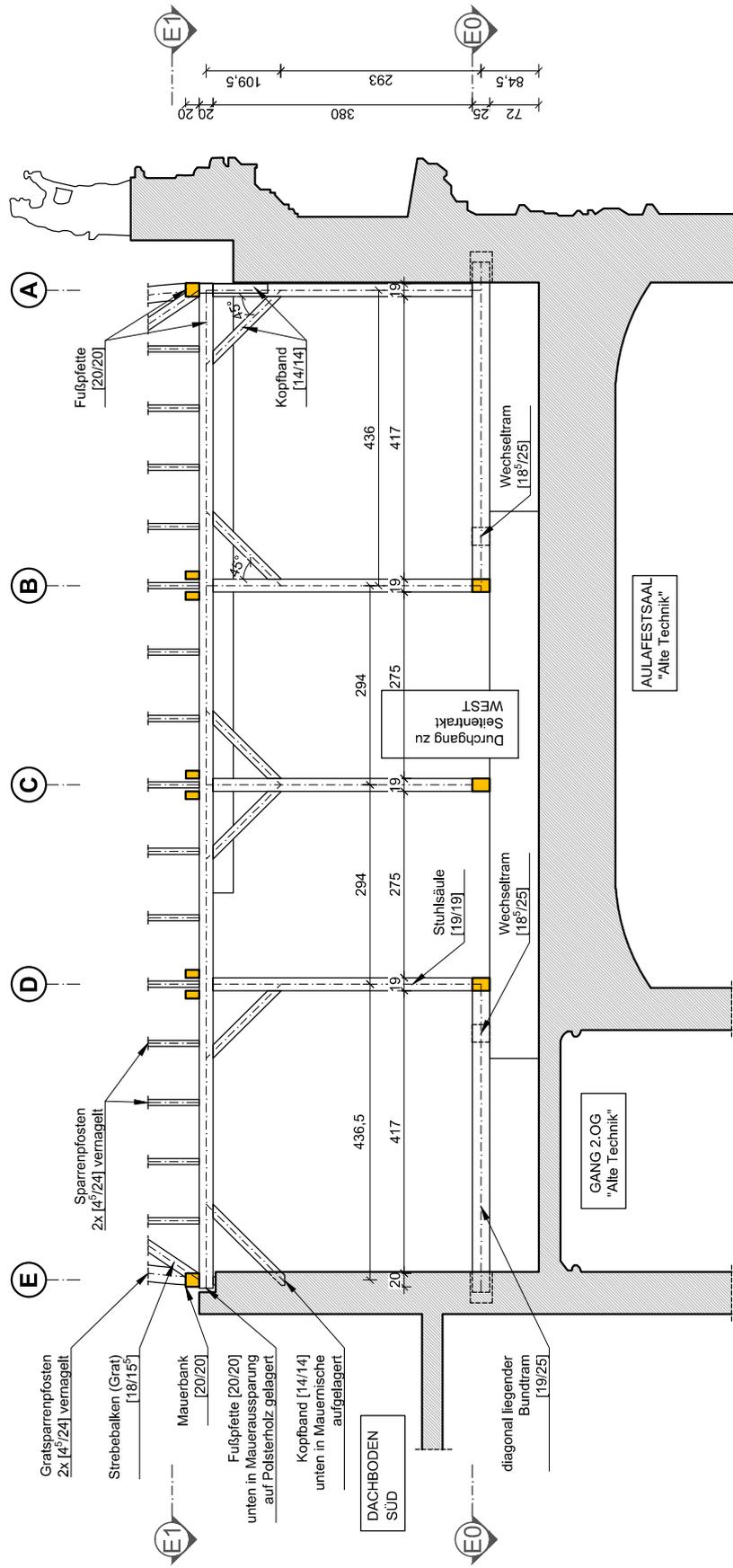
SEITENRAKT
OST

SEITENRAKT
WEST

DACHBODEN
SÜD

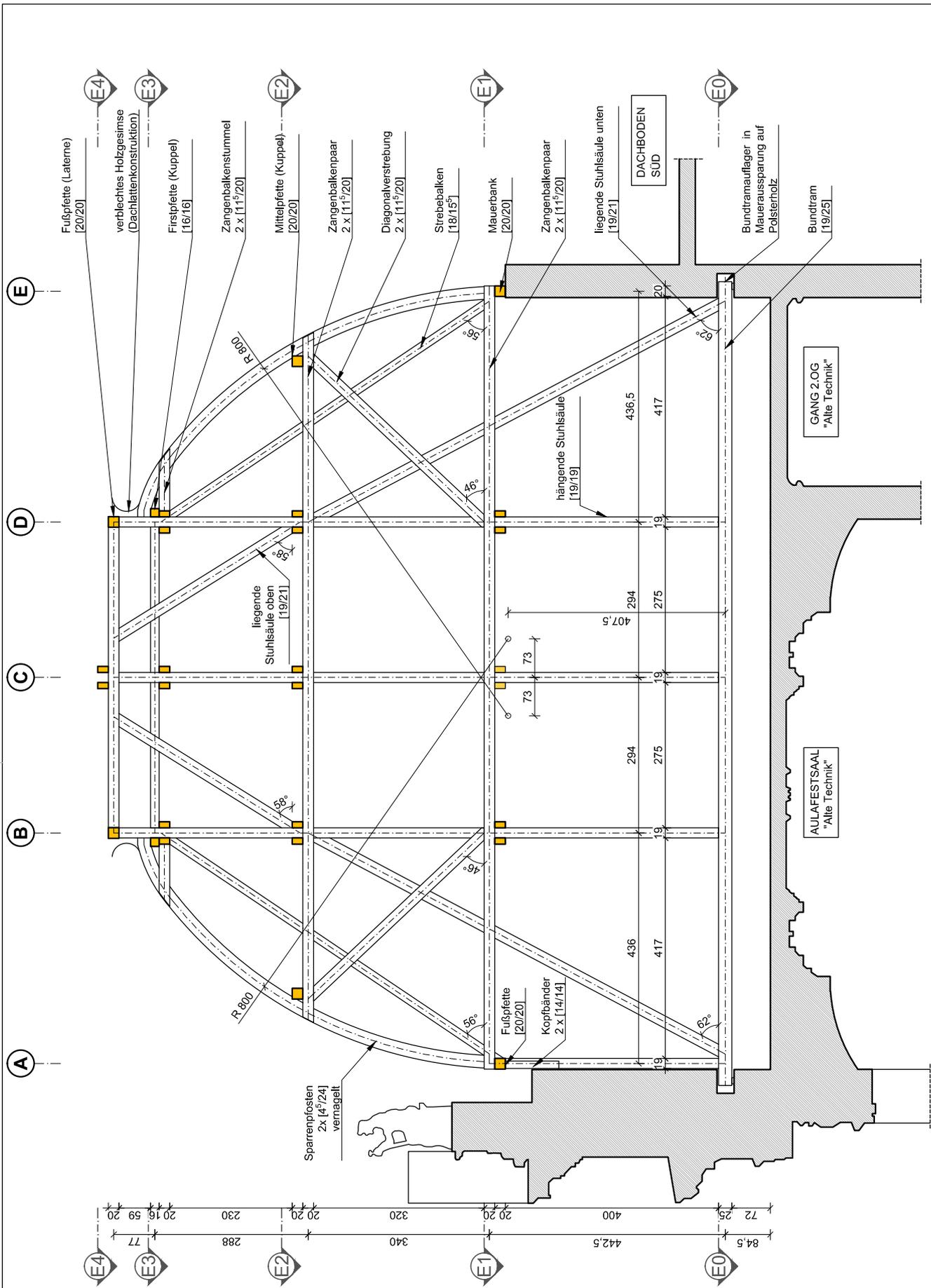


Index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	
zugeh. Pläne			
Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:	Index:
2016/17	001	001	00
			007

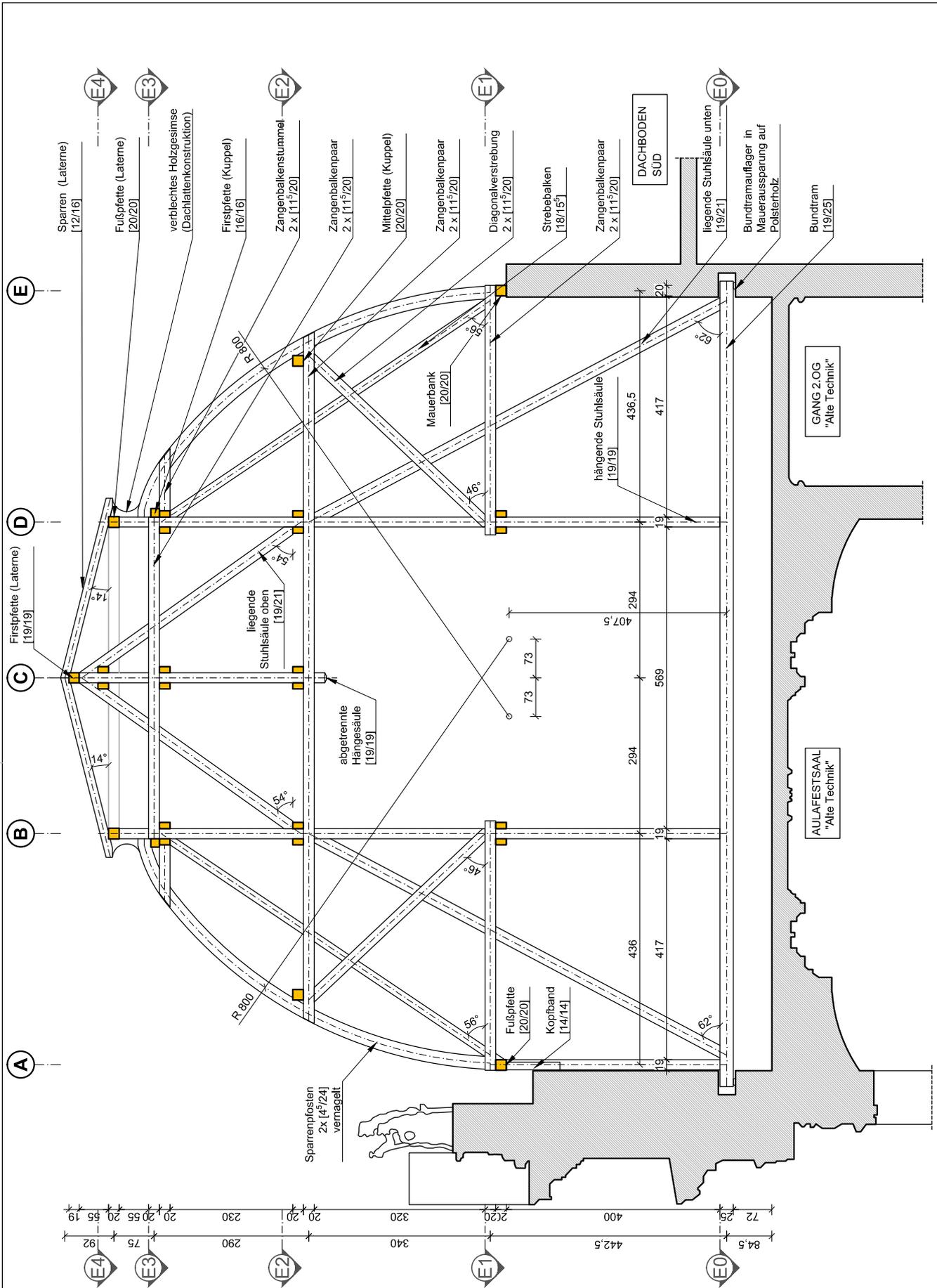


index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

zugeh. Pläne		Proj. Teiln.-	001	00
Jahr:	2016/17	Proj. Nr.:	001	008
		Leg.-Nr.:		
		Index:		

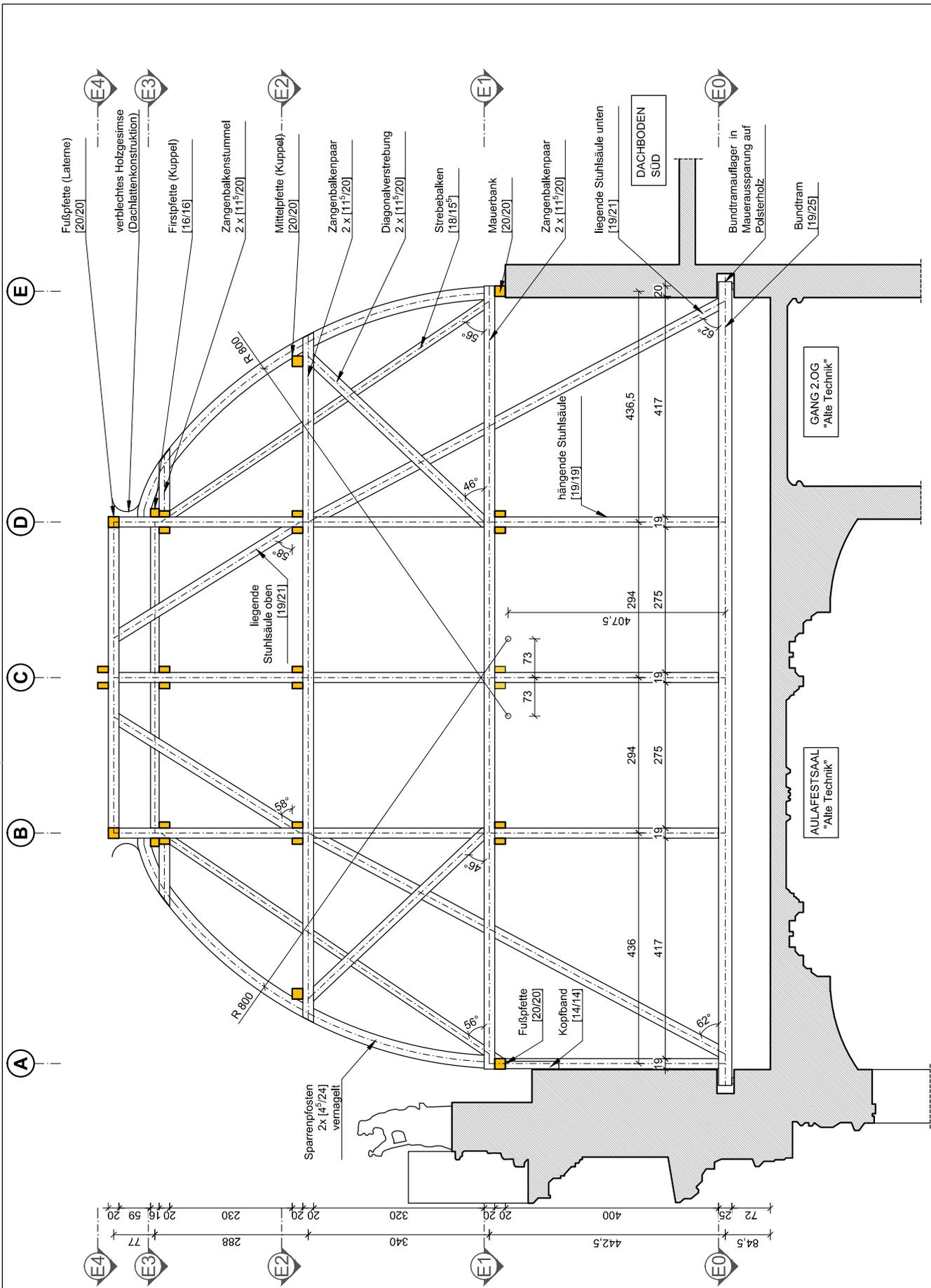


 Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:100	Zuggeh. - Ebene Jahr: 2016/17 Proj. Nr.: 001 Lfg.-Nr.: 009 Proj. Teilnr.: 001 Index: 00	
	Objektteil: Vollgespärre 2 Blickrichtung Ost	a Geändert am: durch:	b Geändert am: durch:	c Geändert am: durch:		Anmerkungen:
	d Freigabe am: durch:	d Geändert am: durch:	d Geändert am: durch:	d Geändert am: durch:		

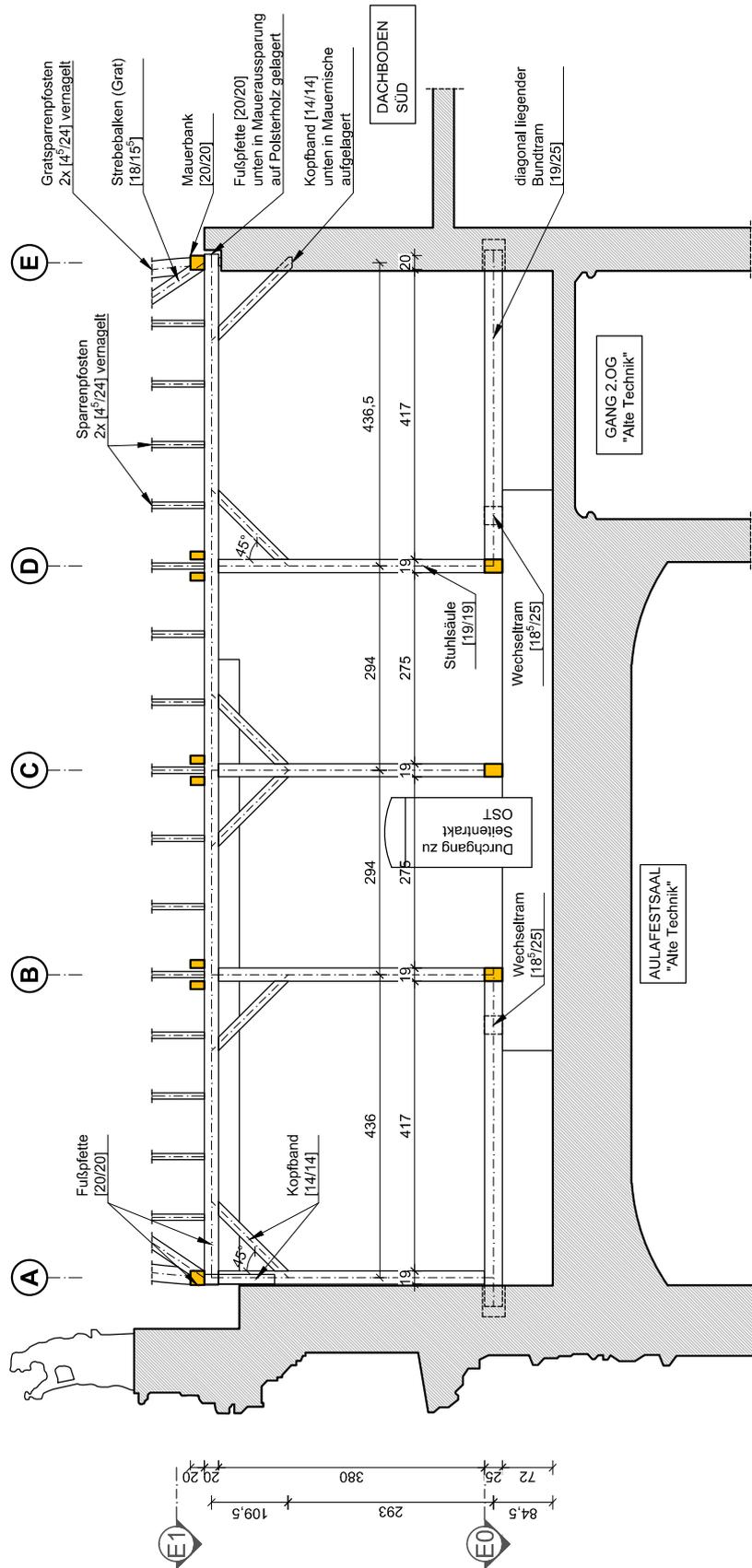


index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Jahr:		Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17		001	001
Blatt-Nr.:		Blatt-Nr.:	
010		010	00



 lignum research engineering	Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:100
		Objektteil: Vollgespärre 4 Blickrichtung Ost	a Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
		b Geändert am:	durch:		
		c Geändert am:	durch:		
d Freigabe am:	durch:				
Zuggeh. Plane		Jahr: 2016/17	Proj. Nr.: 001 Lfg.-Nr.: 011	Proj. Teiln.-Nr.: 001 Index: 00	Blatt: 00



lignum
research engineering

Masterarbeiten

Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL

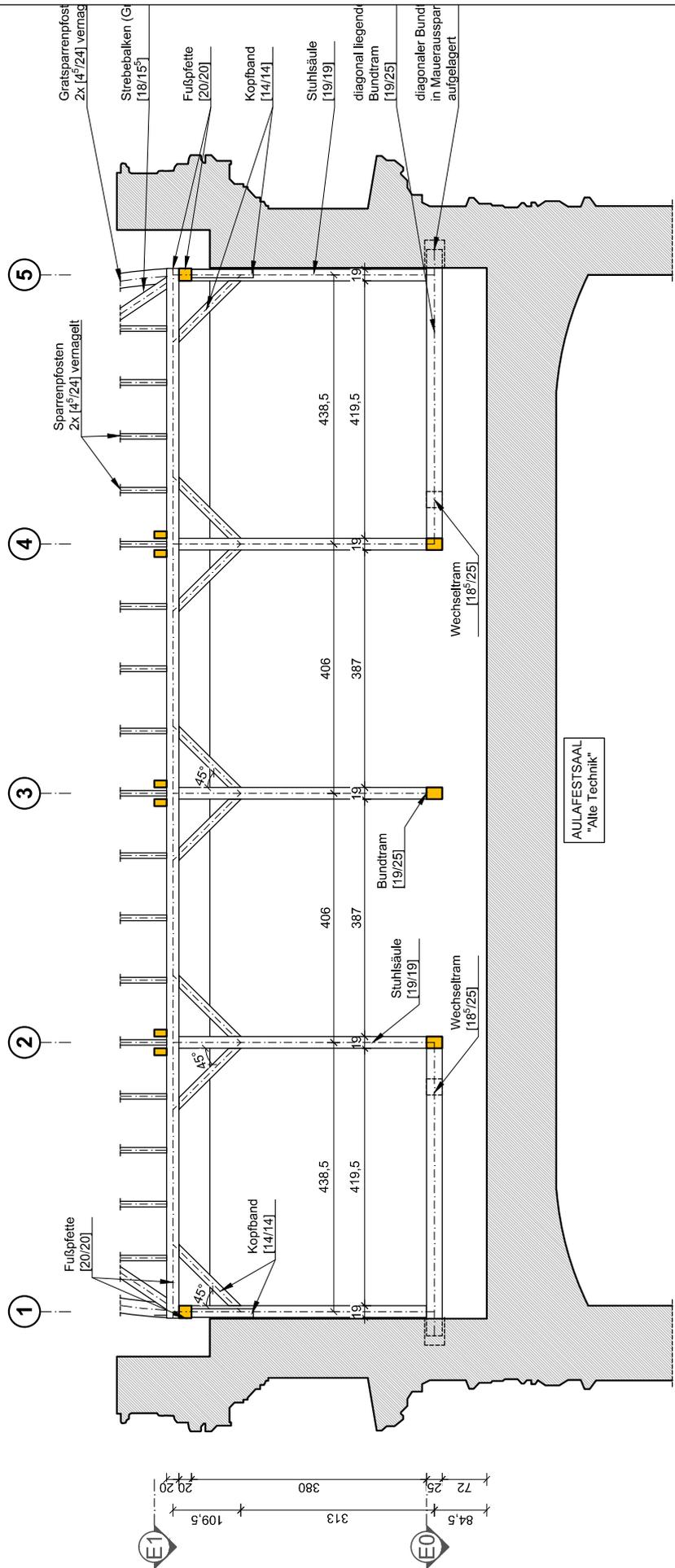
Alte Technik - Technische Universität Graz
Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Objektteil:
Vollgespärre 5
Blickrichtung Ost

index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Zugeh. Pläne

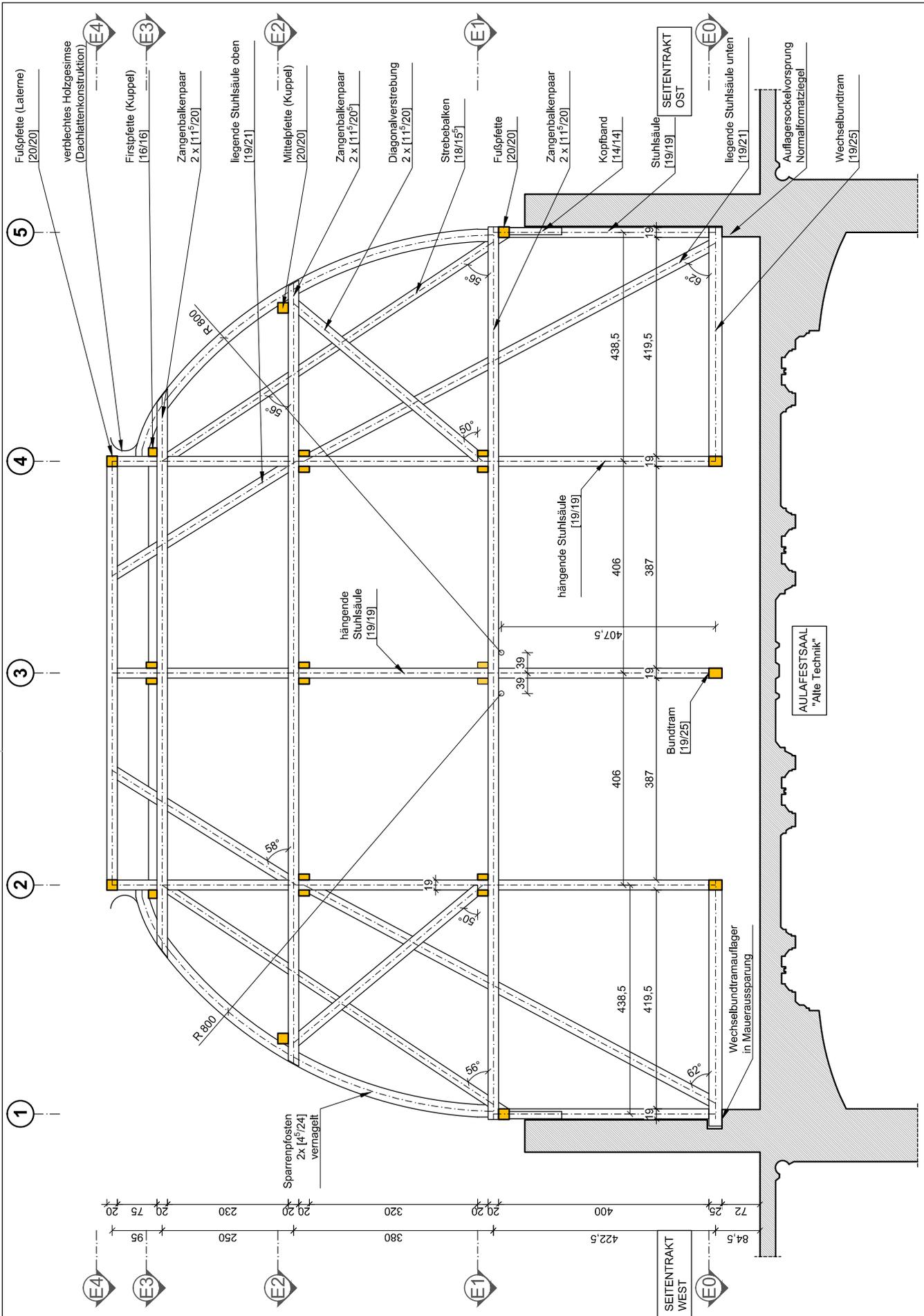
Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17	001	001
	Lfg.-Nr.:	Index:
	012	00



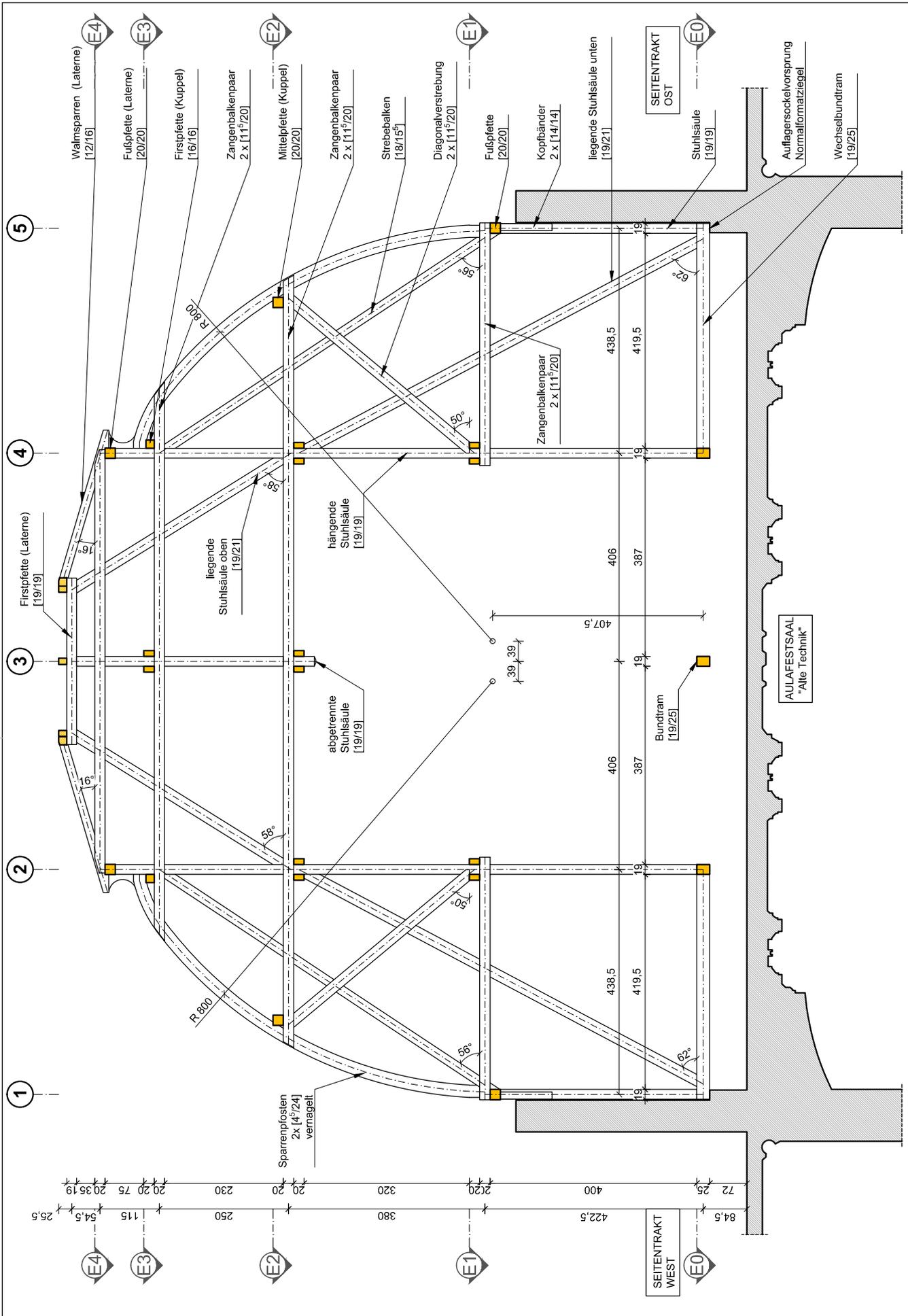
Projekt: **Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL**
 Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
 Objektteil: **Vollgespärre A**
 Blickrichtung Nord

index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

zugeh. Pläne		Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
		001	001
Jahr:	2016/17	Leg. Nr.:	Index:
		013	00



 lignum study research engineering	Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:100	Zuggeh. Plane	Jahr: 2016/17	Proj. Nr.: 001 Lfg.-Nr.: 014	Proj. Teilnr.: 001 Index: 00	
		Objektteil: Vollgespärre B Blickrichtung Nord	a Geändert am: durch:	b Geändert am: durch:						Anmerkungen:
		c Geändert am: durch:	d Geändert am: durch:	d Freigabe am: durch:						





lignum
study research engineering

Masterarbeiten

Projekt: **Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL**
 Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Objektteil: **Vollgespärre C**
 Blickrichtung Nord

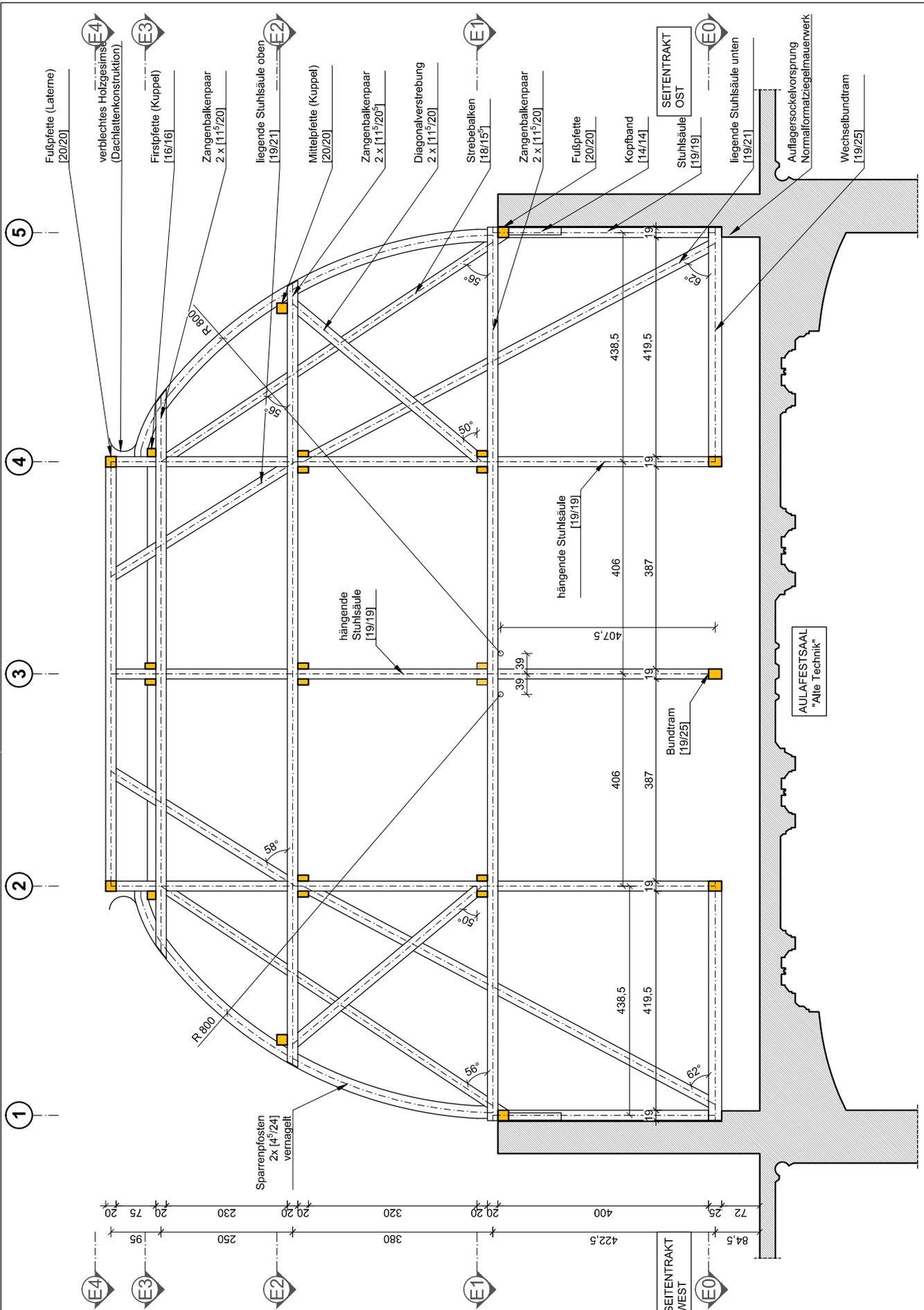
Index	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e)
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Jahr: 2016/17

Proj. Nr.: 001

Libr. Nr.: 015

Index: 00



lignum research engineering

Masterarbeiten

Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL

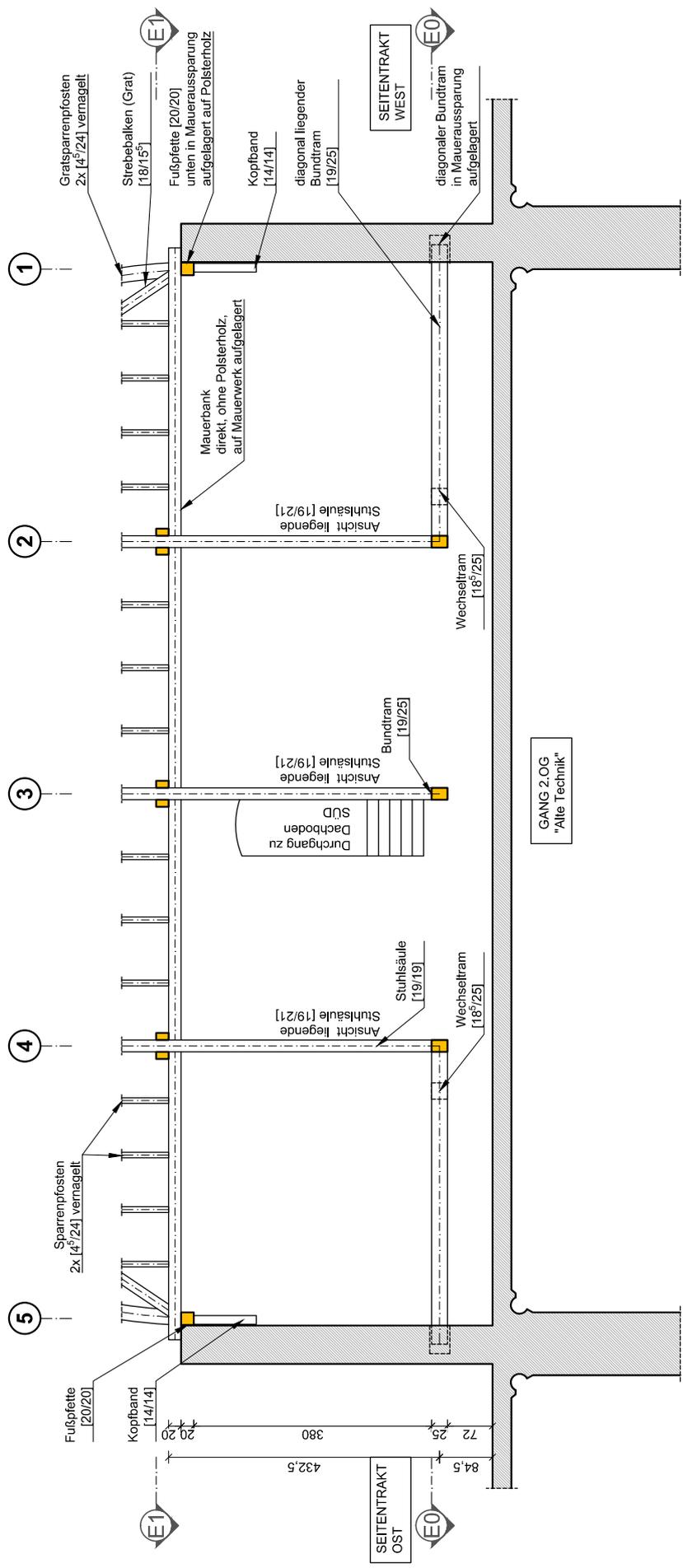
Alte Technik - Technische Universität Graz
Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Objektteil: **Vollgespärre D**
Blickrichtung Nord

index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

zugeh. Pläne

Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:	Index:
2016/17	001	001	00
	001	016	00



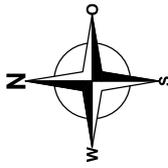
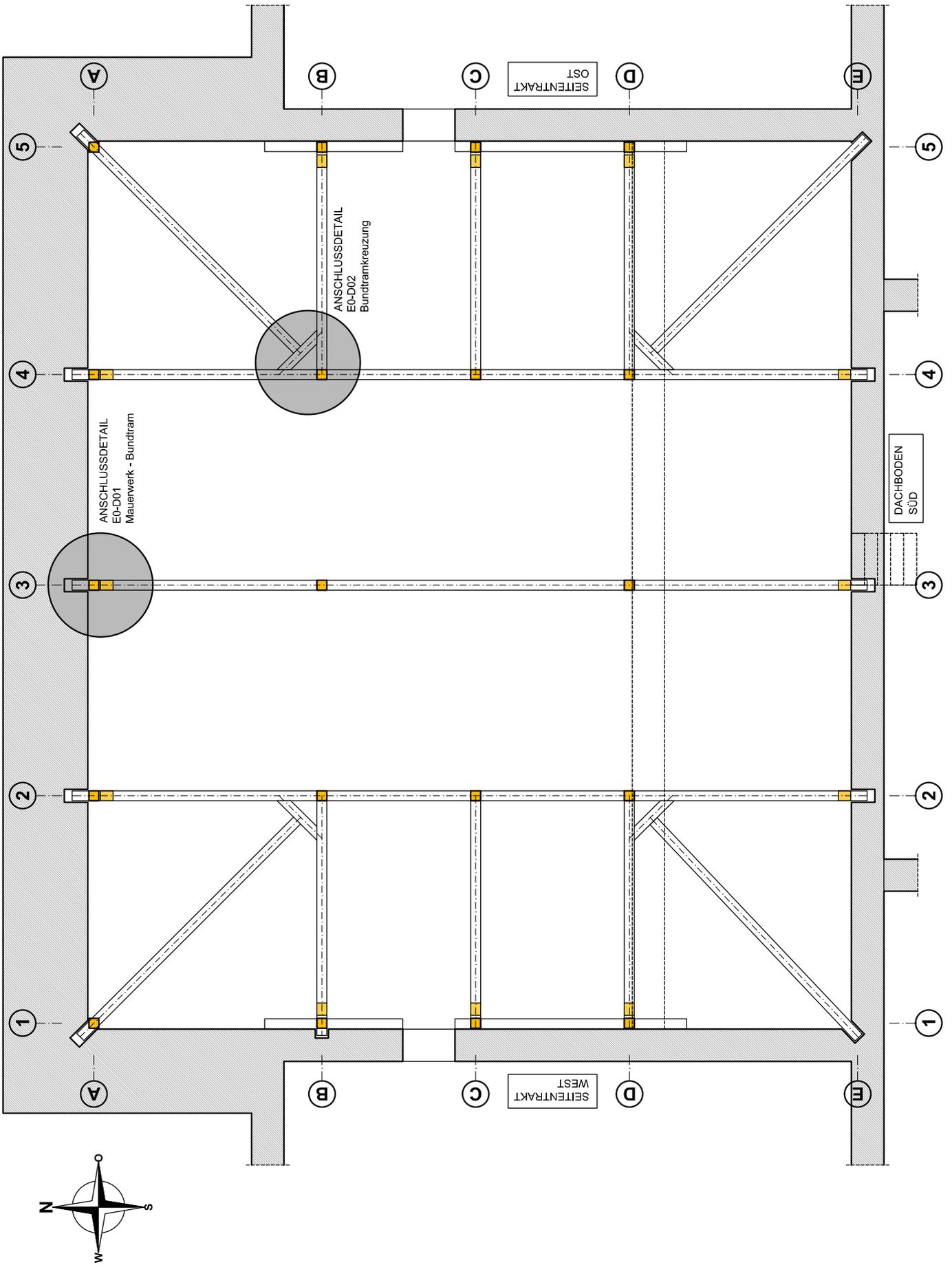
Index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Jahr:	Proj. Nr.:	Proj. Teilnr.:
2016/17	001	001
	Leg. Nr.:	Index:
	017	00

ANHANG C DETAILBLÄTTER DER VERBINDUNGEN

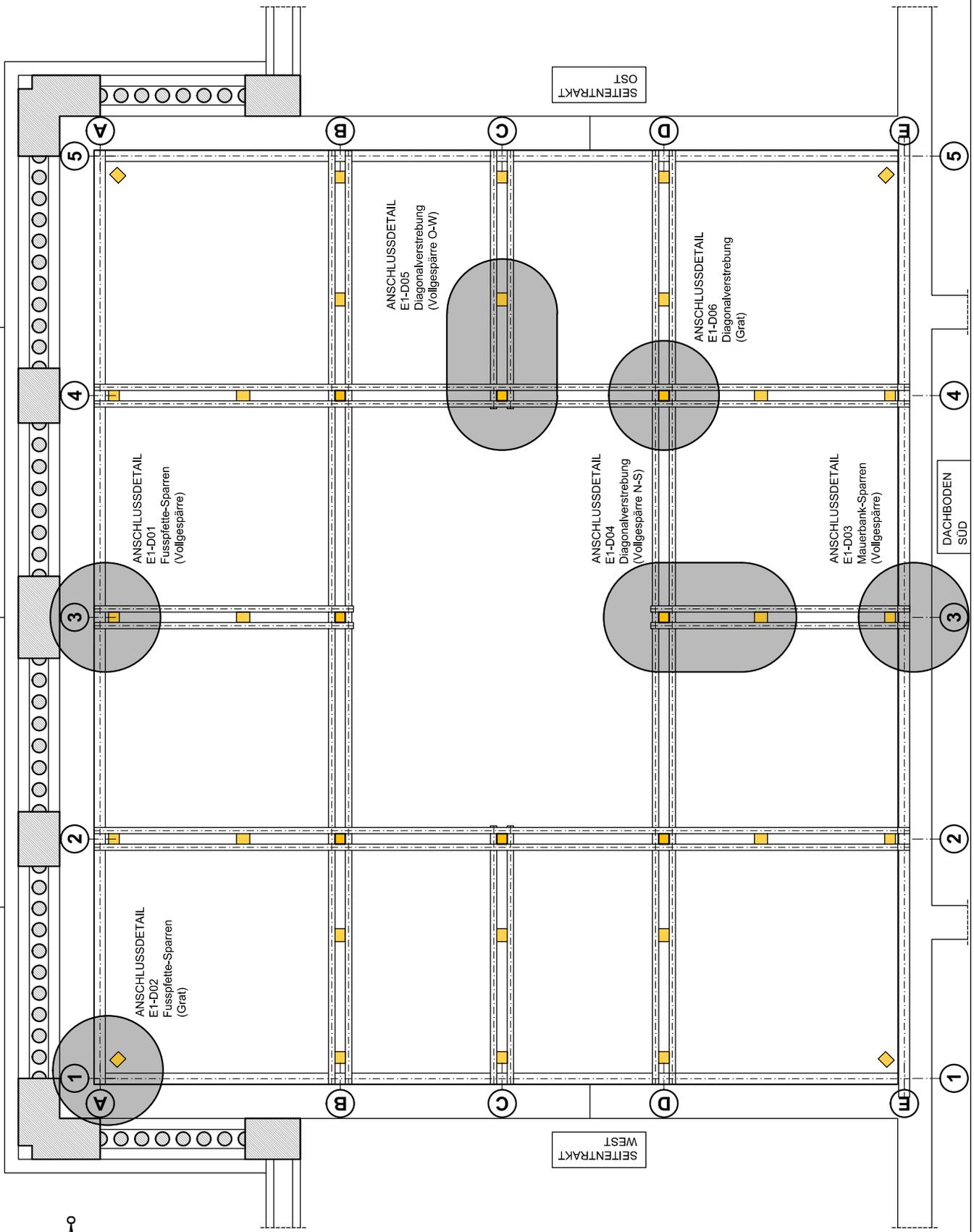
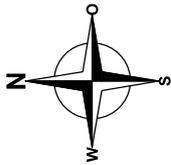
Tab.C.1: Planliste ANHANG C

Plannummer	Planinhalt
2016/2017 001-002-001-00	Anschlussdetails - Übersicht Tramebene 0
2016/2017 001-002-002-00	Anschlussdetails - Übersicht Tramebene 1
2016/2017 001-002-003-00	Anschlussdetails - Übersicht Tramebene 2
2016/2017 001-002-004-00	Anschlussdetails - Übersicht Tramebene 3
2016/2017 001-002-005-00	Anschlussdetails - Übersicht Tramebene 4
2016/2017_001-002-006-00	Anschlussdetails - E0 - D01_Anschluss Mauerwerk-Bundtram-Stuhlsäulen
2016/2017_001-002-007-00	Anschlussdetails - E0 - D02_Anschluss Bundtramkreuzung
2016/2017_001-002-008-00	Anschlussdetails - E1 - D01_Anschluss Fußpfette-Sparren-Strebebalken-Zangenbalken (Vollgespärre)
2016/2017_001-002-009-00	Anschlussdetails - E1 - D02_Anschluss Fußpfette-Sparren-Strebebalken-Zangenbalken (Grat)
2016/2017_001-002-010-00	Anschlussdetails - E1 - D03_Anschluss Mauerbank-Sparren-Strebebalken-Zangenbalken
2016/2017_001-002-011-00	Anschlussdetails - E1 - D04_Anschluss Stuhlsäule-Zangenbalken-Diagonalverstrebung-Strebebalken (Nord-Süd)
2016/2017_001-002-012-00	Anschlussdetails - E1 - D05_Anschluss Stuhlsäule-Zangenbalken-Diagonalverstrebung-Strebebalken (Ost-West)
2016/2017_001-002-013-00	Anschlussdetails - E1 - D06_Anschluss Stuhlsäule-Zangenbalken-Diagonalverstrebung (Grat)
2016/2017 001-002-014-00	Anschlussdetails - E2 - D01_Anschluss Rähm-Sparren (Vollgespärre)
2016/2017_001-002-015-00	Anschlussdetails - E2 - D02_Anschluss liegende Stuhlsäule unten-liegende Stuhlsäule oben (Nord-Süd)
2016/2017_001-002-016-00	Anschlussdetails - E2 - D03_Anschluss liegende Stuhlsäule unten-liegende Stuhlsäule oben (Ost-West)
2016/2017_001-002-017-00	Anschlussdetails - E2 - D04_Anschluss liegende Stuhlsäule unten-liegende Stuhlsäule oben (Grat)
2016/2017 001-002-018-00	Anschlussdetails - E2 - D05_Anschluss Rähm-Sparren (Grat)
2016/2017_001-002-019-00	Anschlussdetails - E3 - D01_Anschluss Firstpfette-Sparren (Grat) (Übergang Kuppel-Laterne)
2016/2017_001-002-020-00	Anschlussdetails - E3 - D02_Anschluss Firstpfette-Sparren (Ost-West) (Übergang Kuppel-Laterne)
2016/2017_001-002-021-00	Anschlussdetails - E3 - D03_Anschluss Firstpfette-Sparren (Nord-Süd) (Übergang Kuppel-Laterne)
2016/2017 001-002-022-00	Anschlussdetails - E4 - D01_Anschluss Firstpfette Laterne
2016/2017 001-002-023-00	Anschlussdetails - E4 - D02_Anschluss Walm Laterne



Index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

Zugehör. Plans:	2016/17_001-002-006
bis	2016/17_001-002-007
Jahr:	2016/17
Proj.Nr.:	001
Proj.Nr.:	002
Libr.Nr.:	001
Libr.Nr.:	00



Projekt: **Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL**

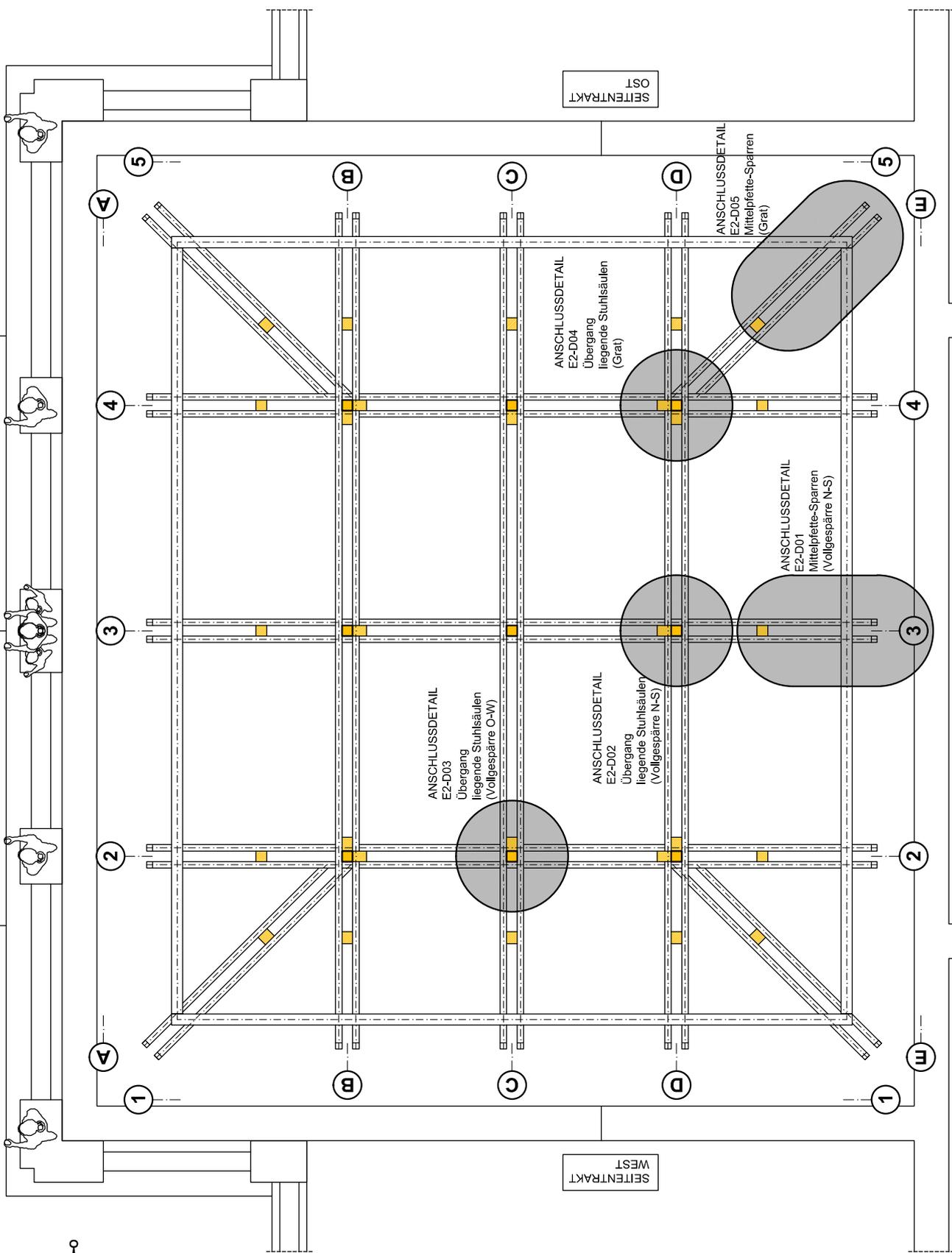
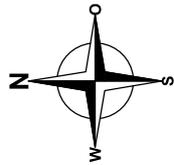
Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Objektteil: **Anschlusdetails**

Übersichtsplan
 Tramebene E1

Index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

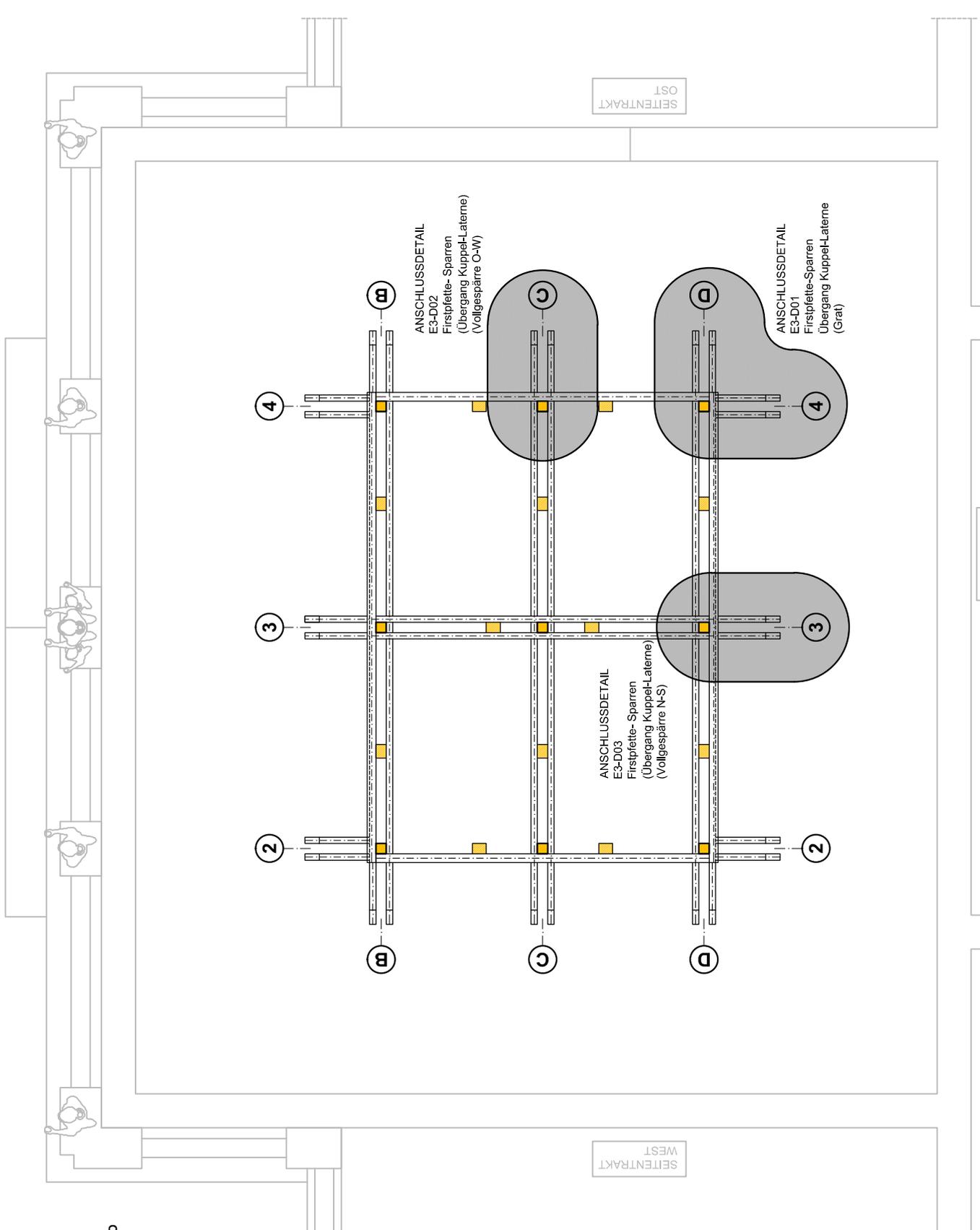
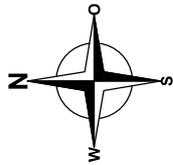
Zugeh. Pläne:	2016/17_001-002-008 bis 2016/17_001-002-013
Jahr:	2016/17
Proj.Nr.:	001
Uz.Nr.:	002
Index:	00



DACHBODEN
SÜD

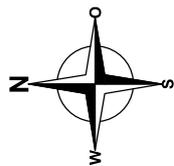
Index	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

Zeich.-Platz	Proj.-Nr.	Blatt-Nr.	Blatt-Nr.
2016/17_001-002-014	001	002	00
bis	001	002	00
2016/17_001-002-018	003	003	00
2016/17			



Index	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

Zeichn. Nr.	Proj. Nr.	Blatt-Nr.	Blattanz.
2016/17_001-002-019	2016/17_001-002-021	001	002
2016/17_001-002-021	2016/17_001-002-021	004	00

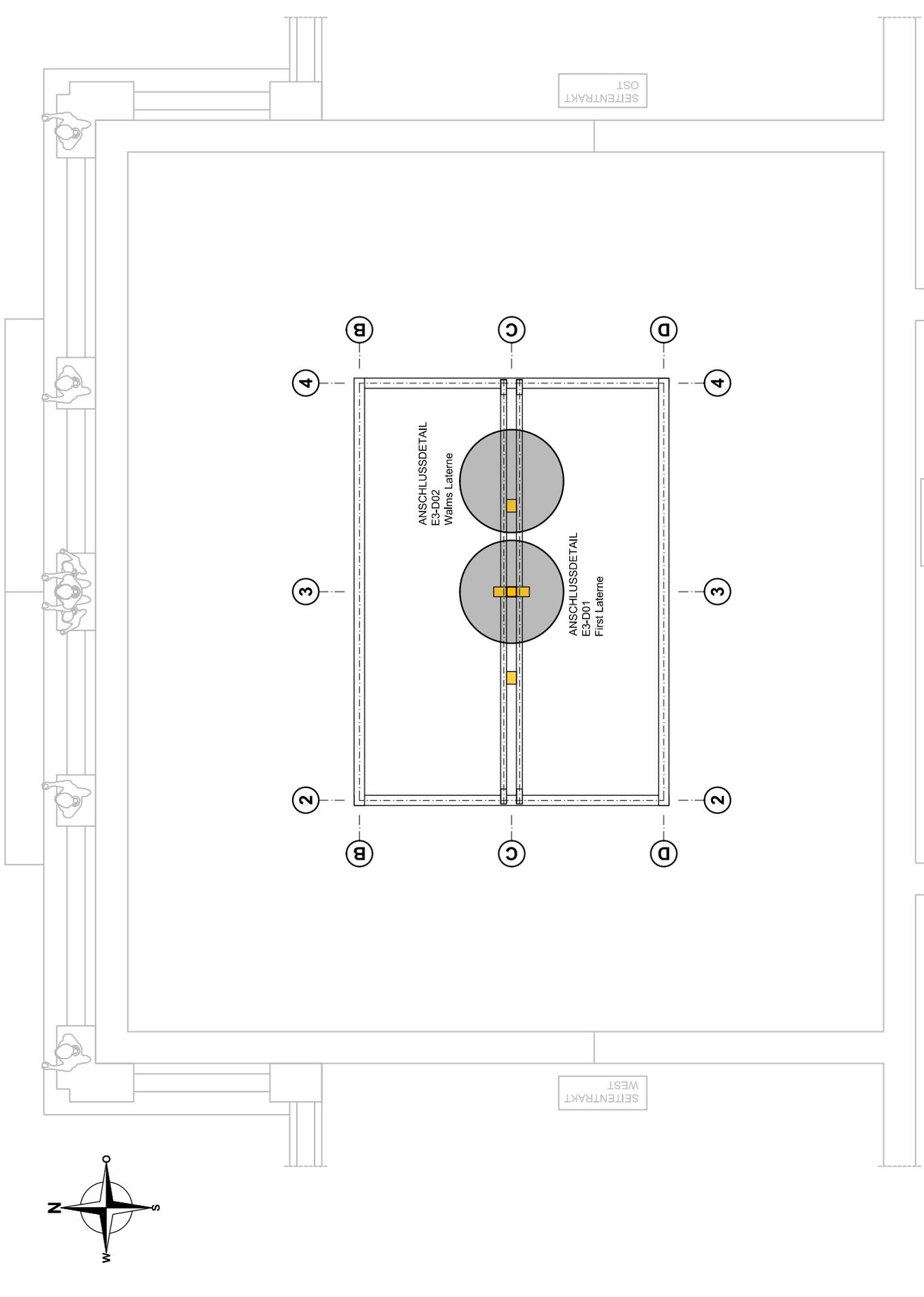


Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL

Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Anschlussdetails

Übersichtsplan
 Tramebene E4



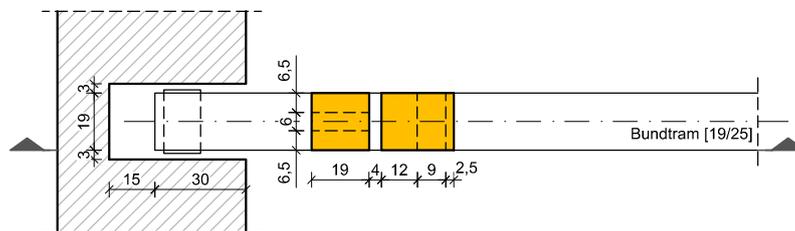
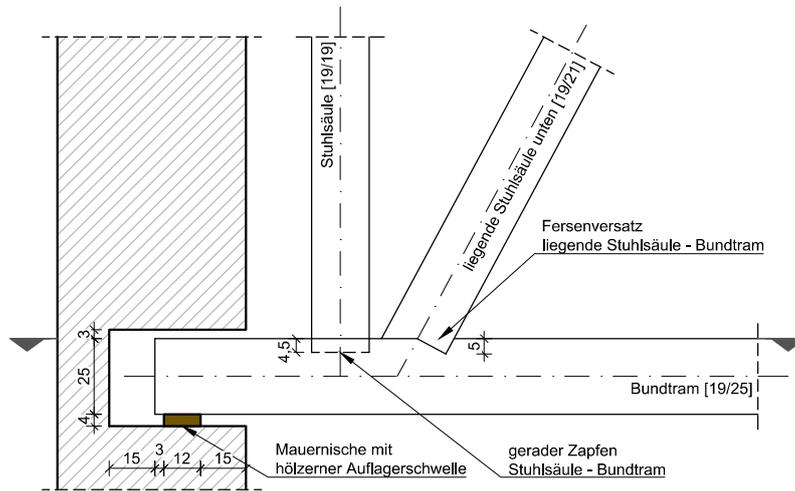
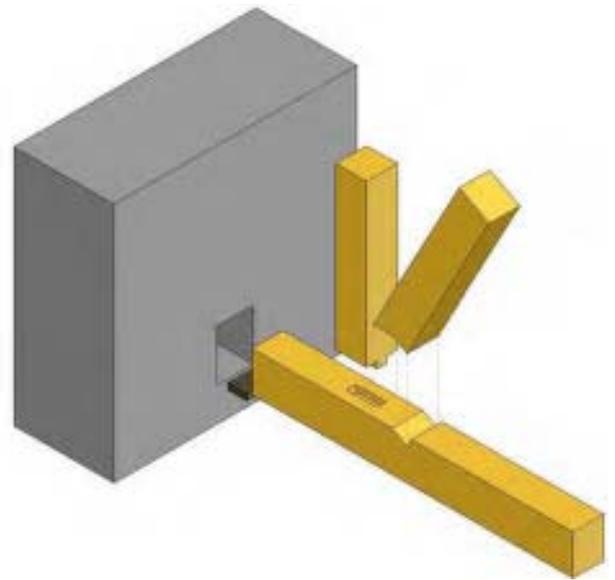
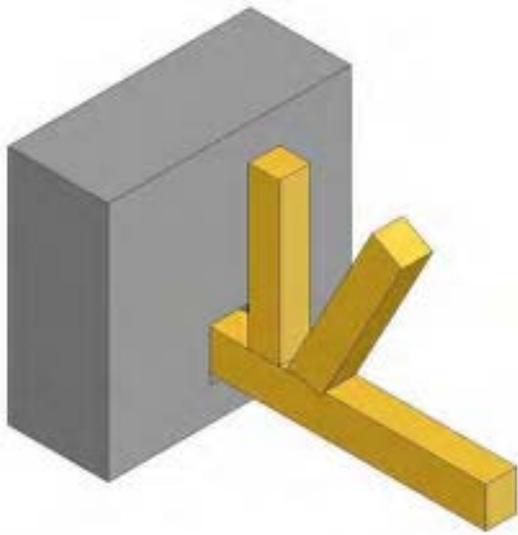
DACHBODEN SÜD

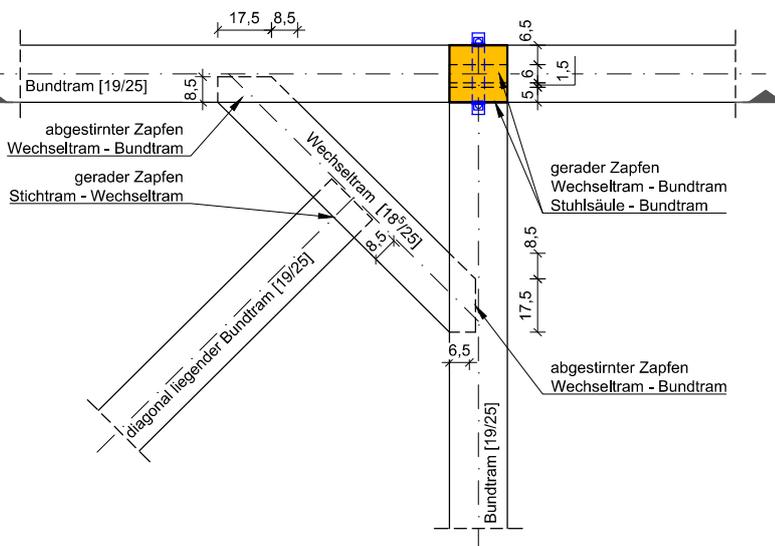
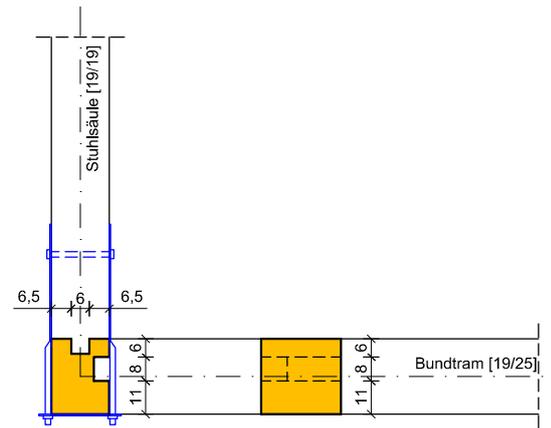
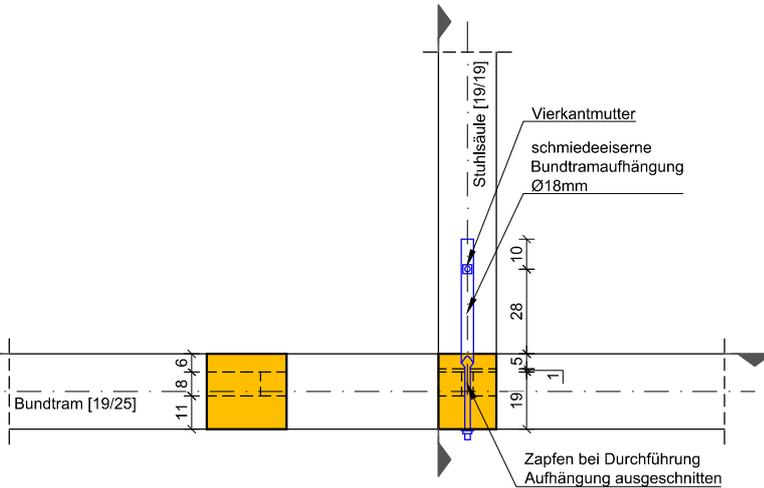
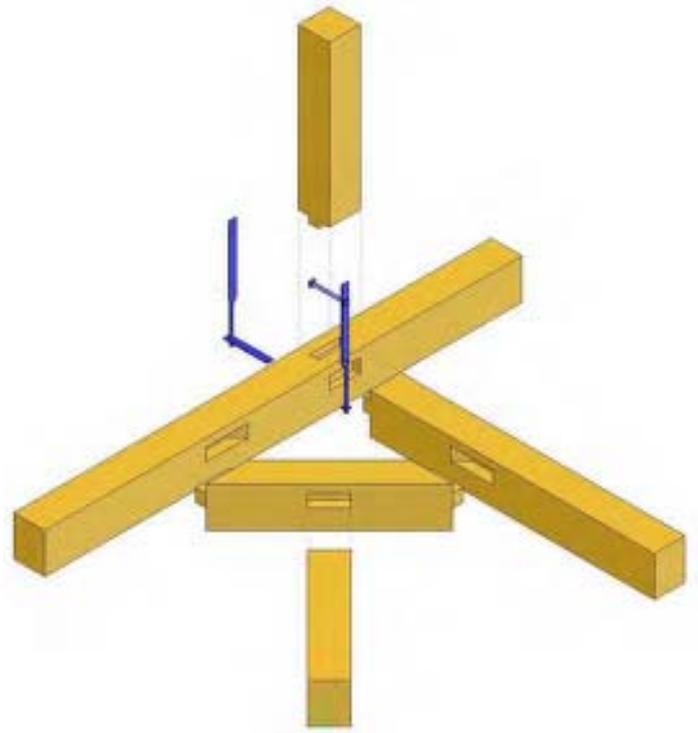
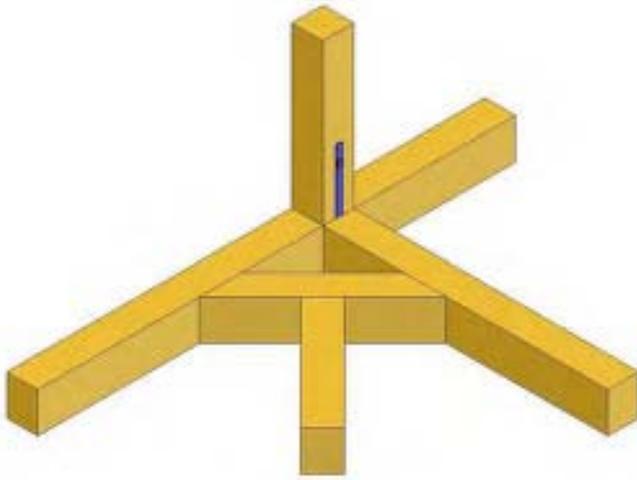
SEITENRAKT WEST

SEITENRAKT OST

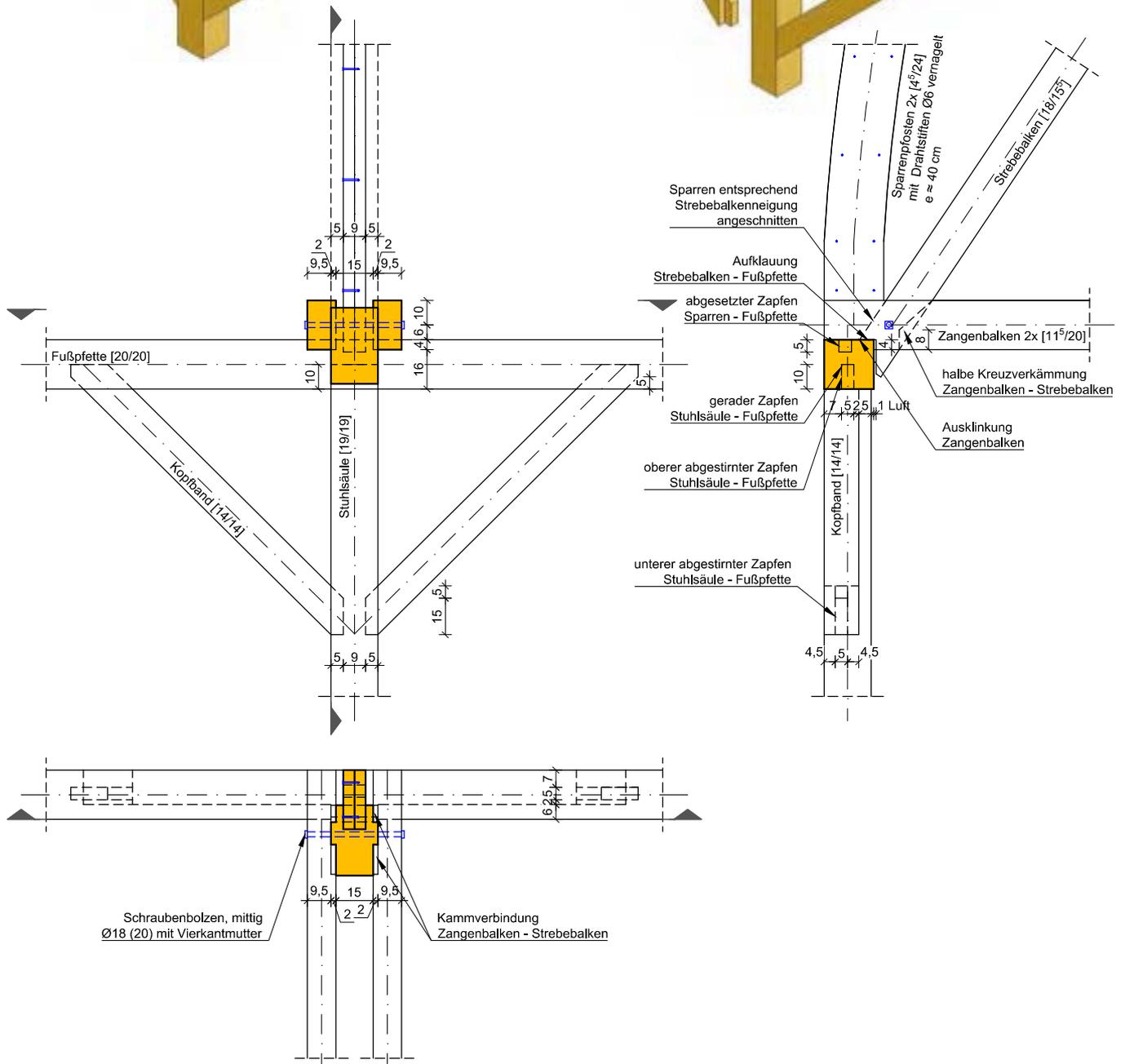
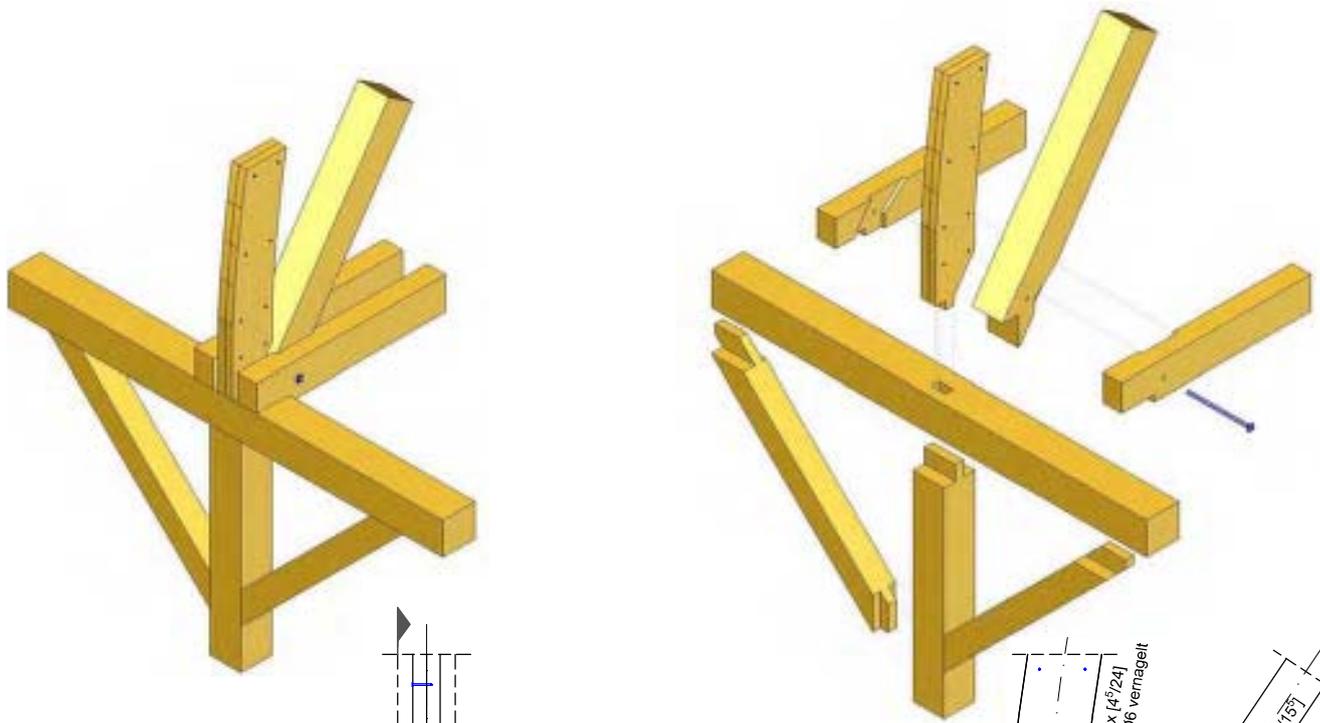
index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:100
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

Zugeh. Plans:	2016/17_001-002-022
bis	2016/17_001-002-023
Jahr:	2016/17
Proj.Nr.:	001
Libr.Nr.:	002
Index:	005
	00

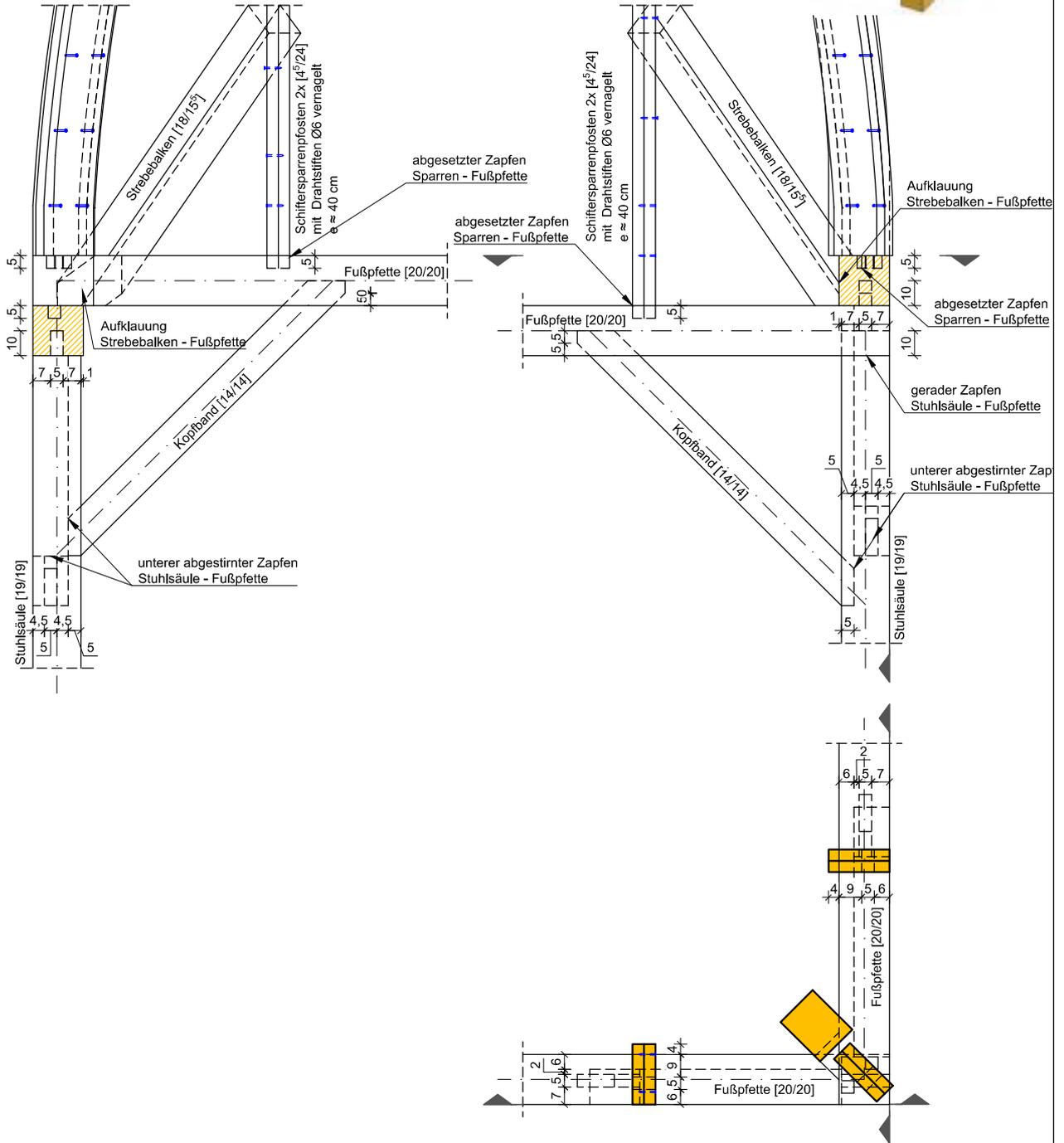
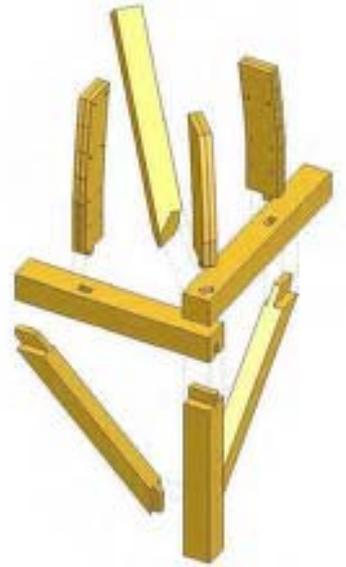
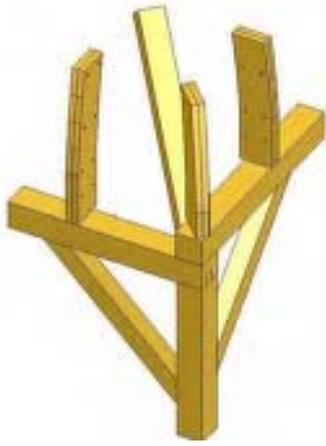




  	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:33	Zuegeh. Pläne: 2016/17_001-002-001 Jahr: 2016/17 Prof.Nr.: 001 Prof.Nr.: 002 Lfz.Nr.: 007 Index: 00
	Objektteil: Anschlussdetails Detail E0 - D02 Anschluss Bundtramkreuzung	Index: Geändert am: a Geändert am:	durch: b durch:	Anmerkungen:	
	Index: Geändert am: c Geändert am:	durch: c durch:			
	Index: Geändert am: d Geändert am:	durch: d durch:			



  Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	Durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:33	Zeichn. Plane 2016/17_001-002-002 Jahr: 2016/17 Prof. Nr.: 001 Prof. Titelnr.: 002 UeBz. Nr.: 008 Index: 00
	Objektteil: Anschlussdetails Detail E1 - D01 Anschluss Fußpfette-Sparren-Streibalken-Zangenbalken	a Geändert am:	durch:	Anmerkungen:	
	b Geändert am:	durch:			
	c Geändert am:	durch:			
	d Freigabe am:	durch:			

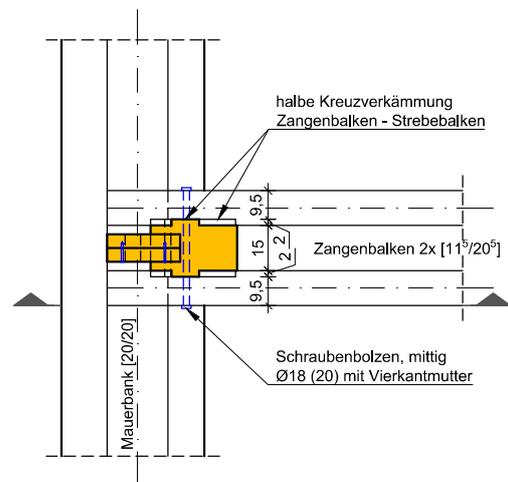
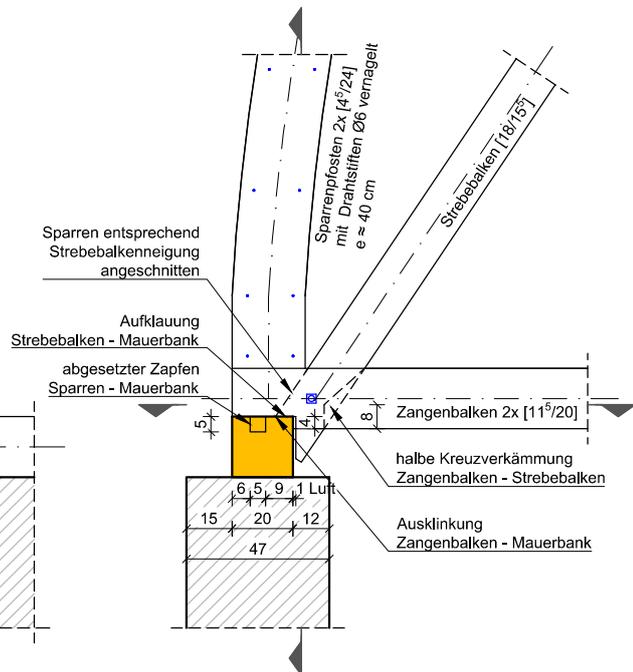
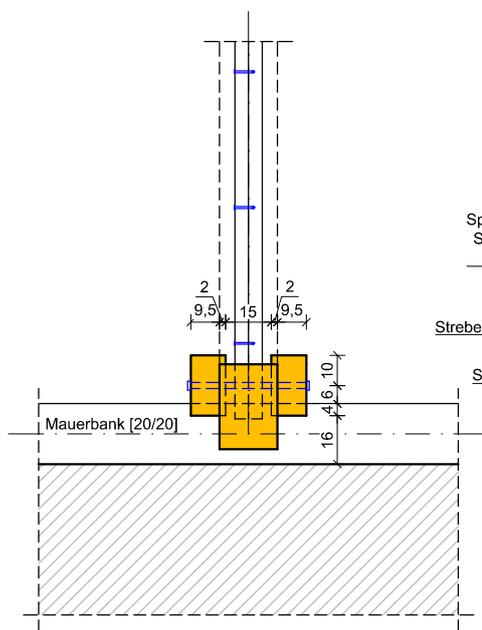
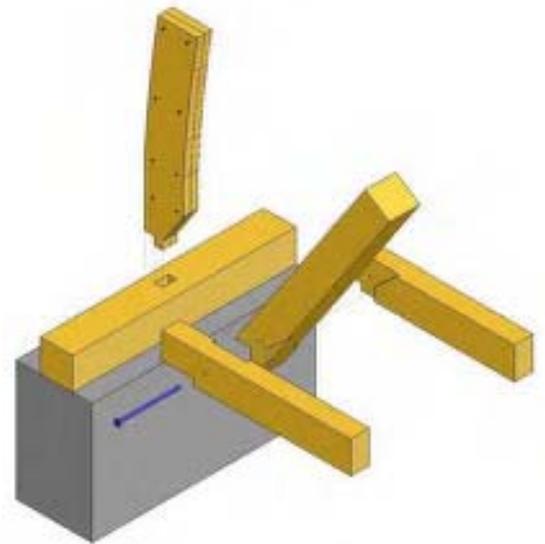
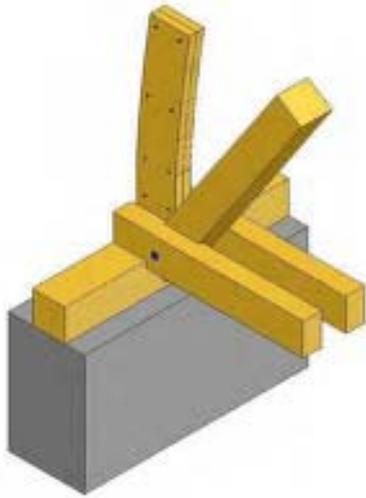


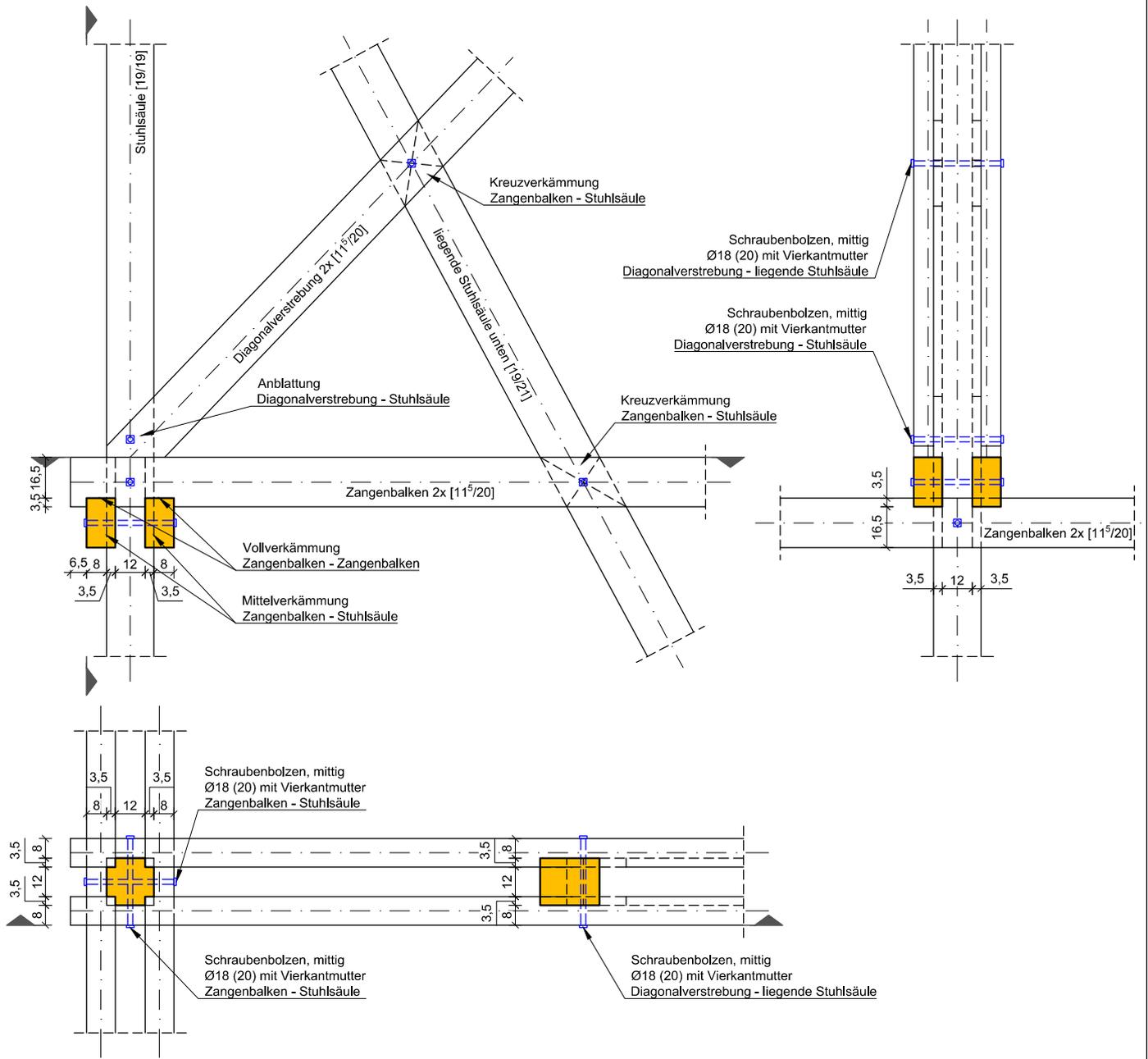
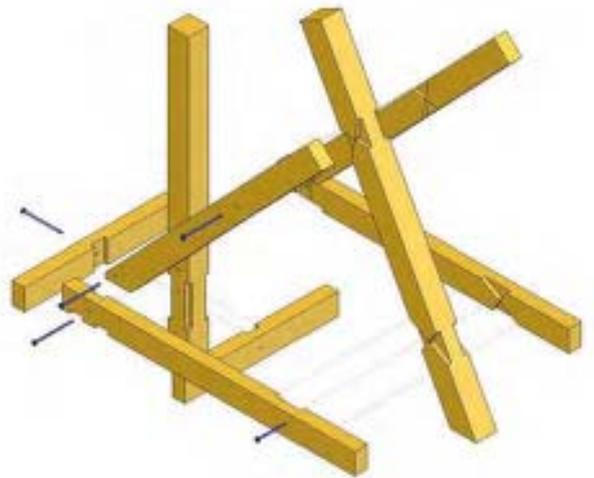
Projekt: **Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL**
 Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
 Objektteil: **Anschlussdetails**
 Detail E1 - D02
 Anschluss Fußpfette-Sparren-Strebebecken-Zangenbecken

index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:25
b	Geändert am:	durch:	Isometrie:
c	Geändert am:	durch:	M 1:50
d	Freigabe am:	durch:	Anmerkungen:

Jahr:	Proj.Nr.:	Proj.Teilnr.:
	2016/17	001
Zeich.Nr.:	Index:	
	2016/17	009

Zeich. Platte:
 2016/17_001-002-002

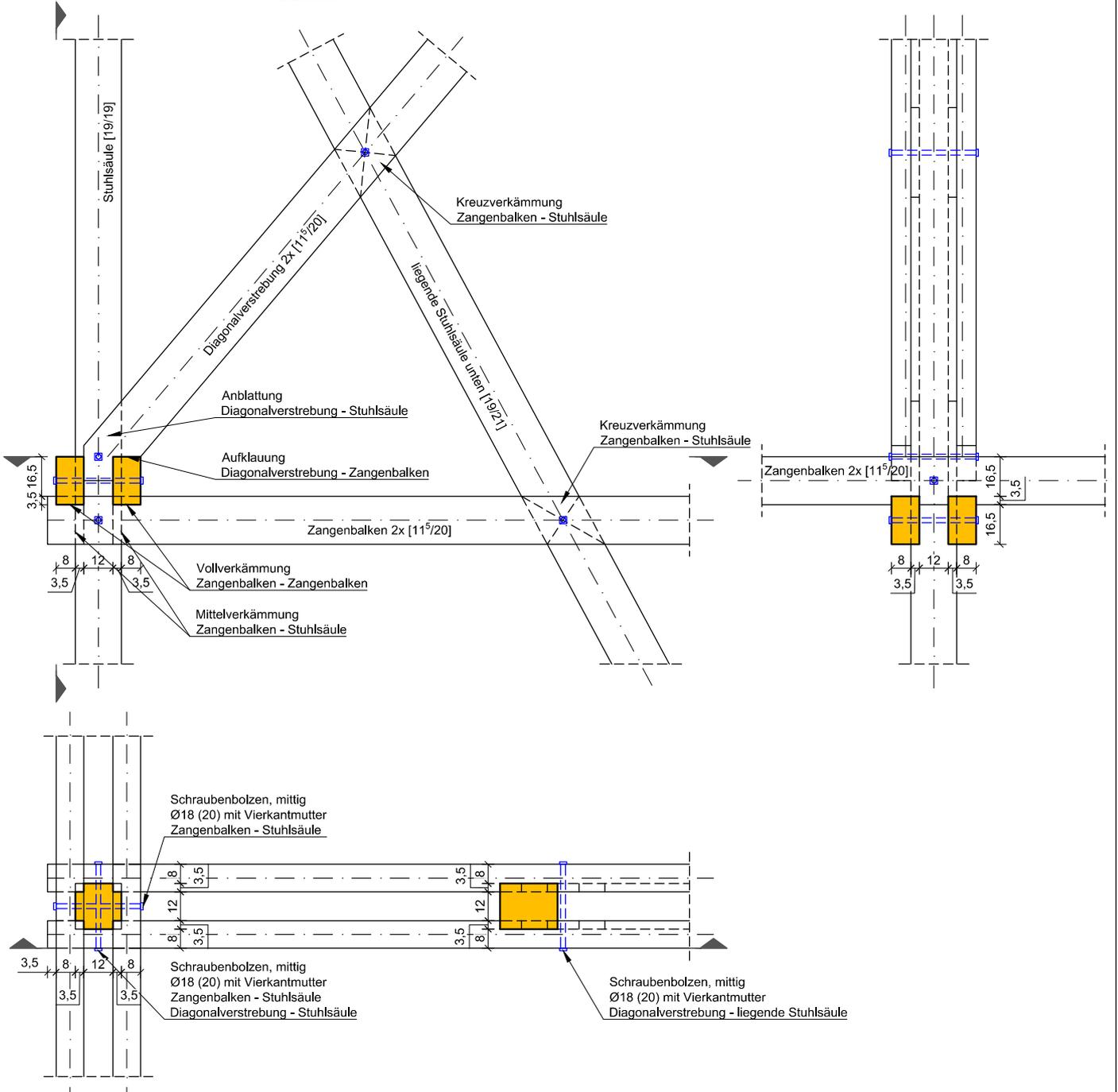
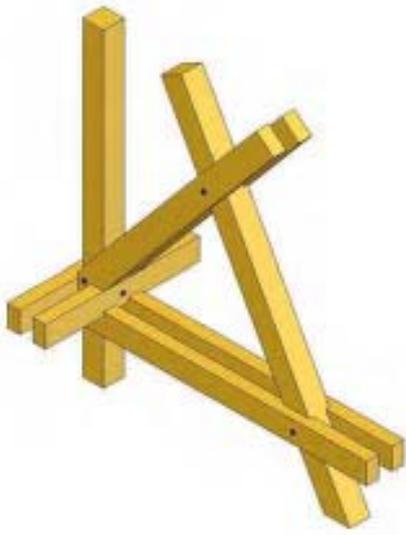




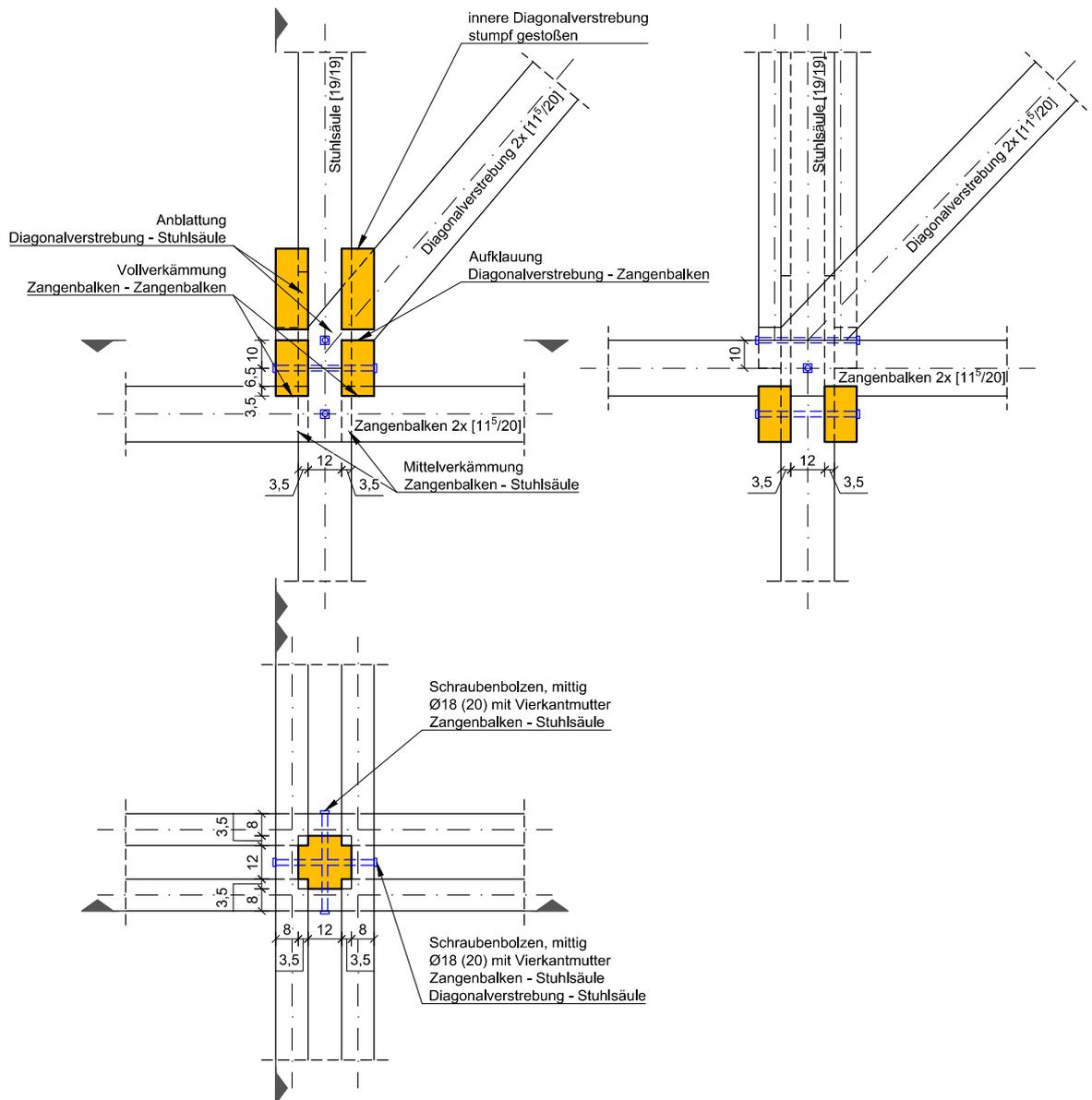
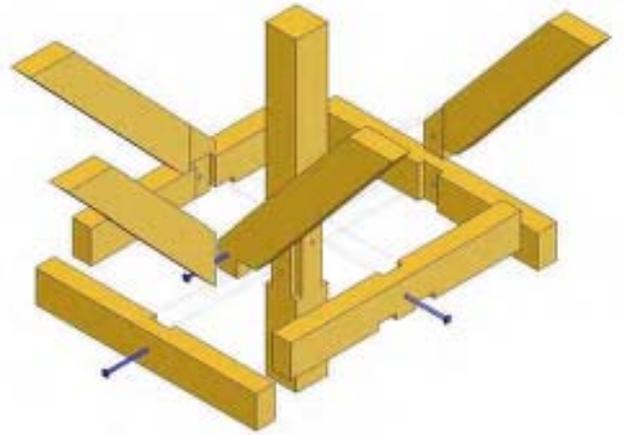
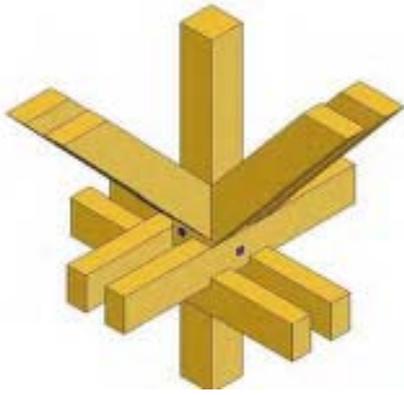
Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL
 Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
 Objektteil: Anschlussdetails
 Detail E1 - D04
 Anschluss Stuhlsäule-Zangen-Diagonalverstr.-Strebebalken (N-S)

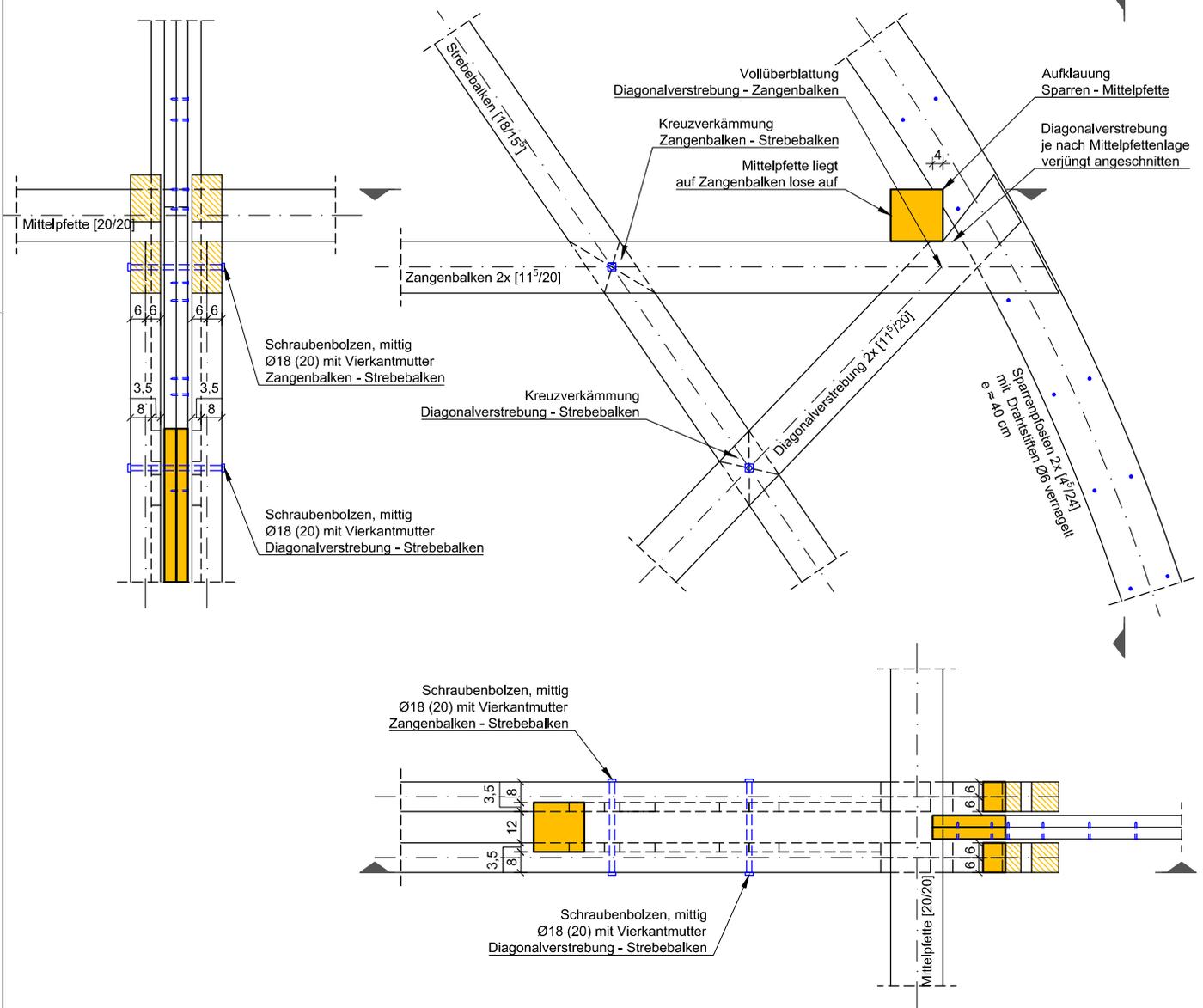
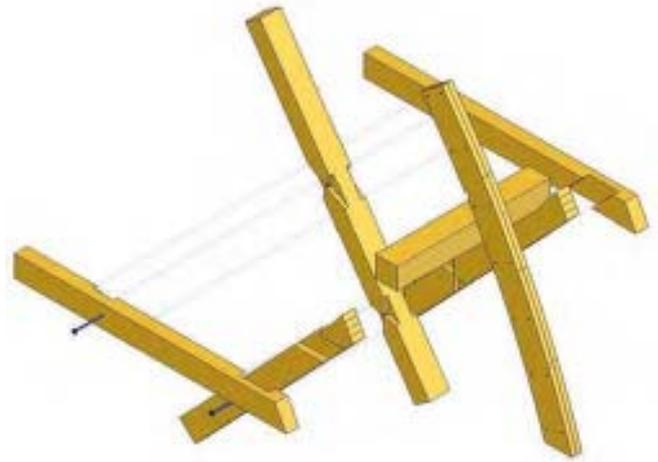
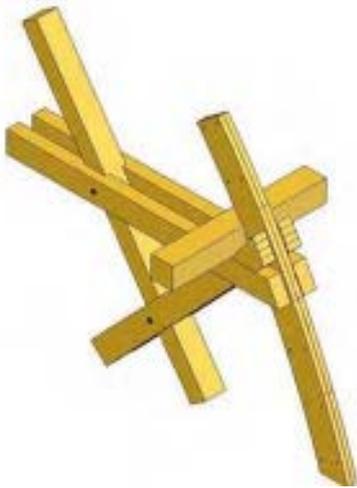
index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:25
b	Geändert am:	durch:	Isometrie: M 1:50
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

Zeich.-Platz-Nr.	2016/17_001-002-002
Jahr	2016/17
Proj.Nr.	001
Proj.Fachr.	002
Index	011
	00

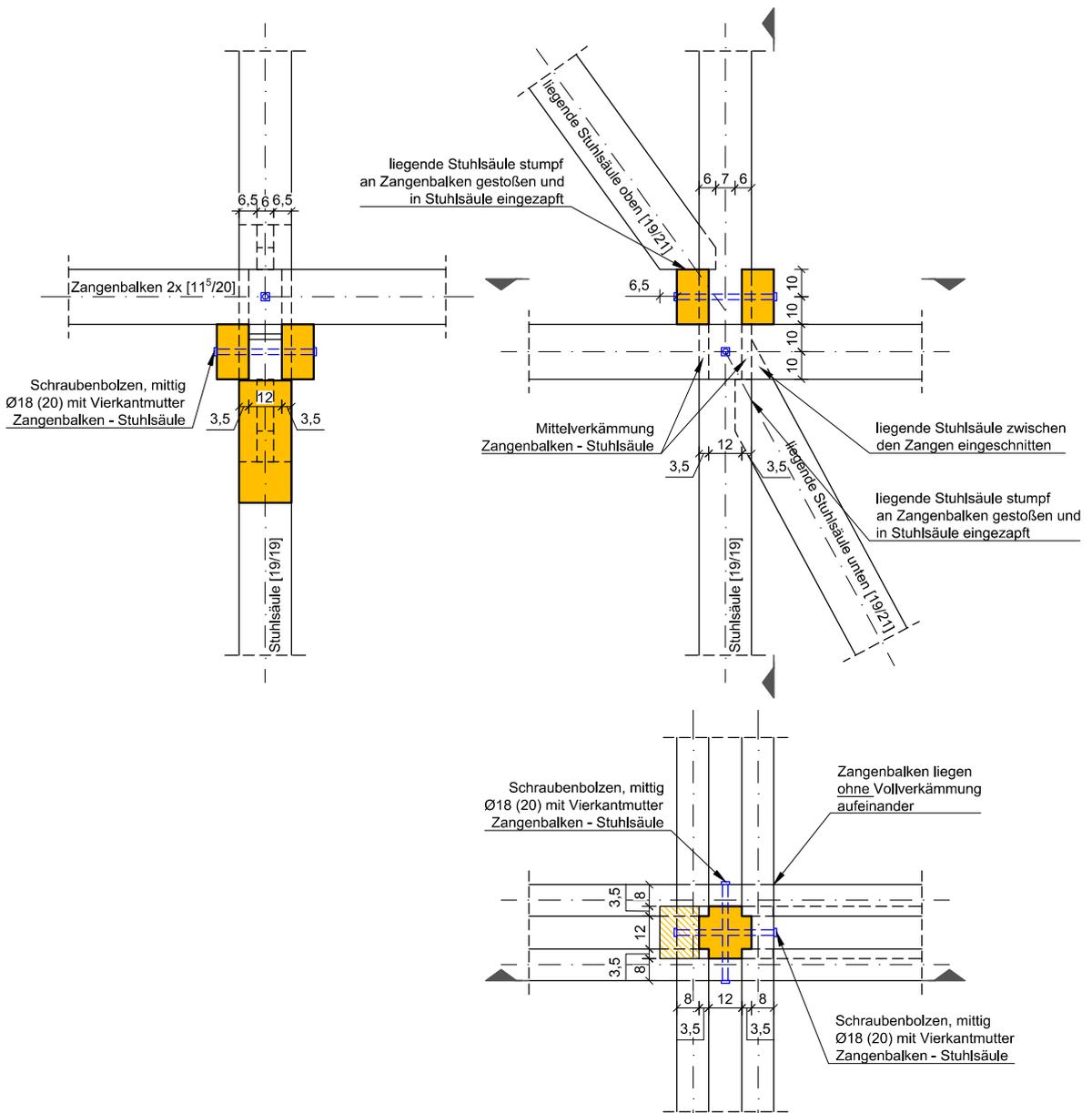
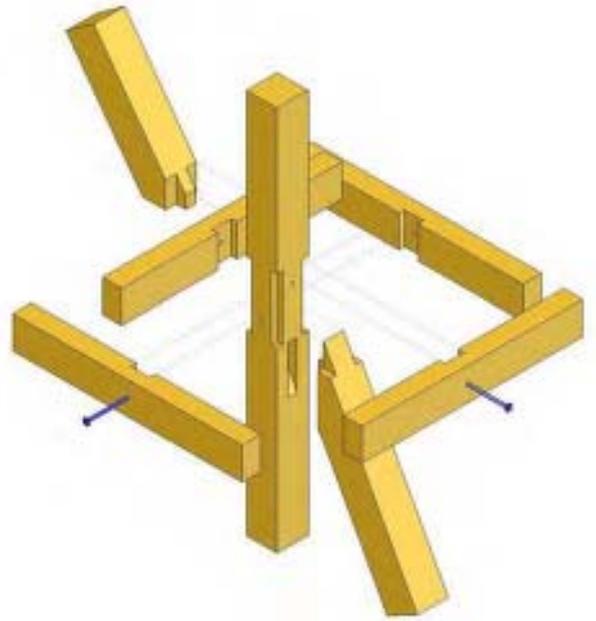
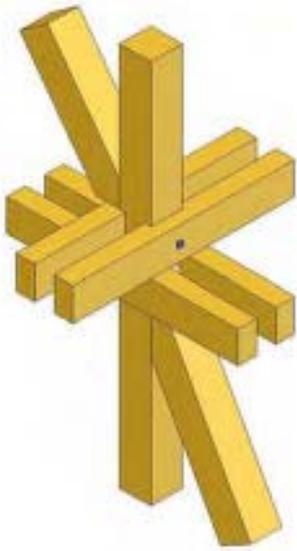


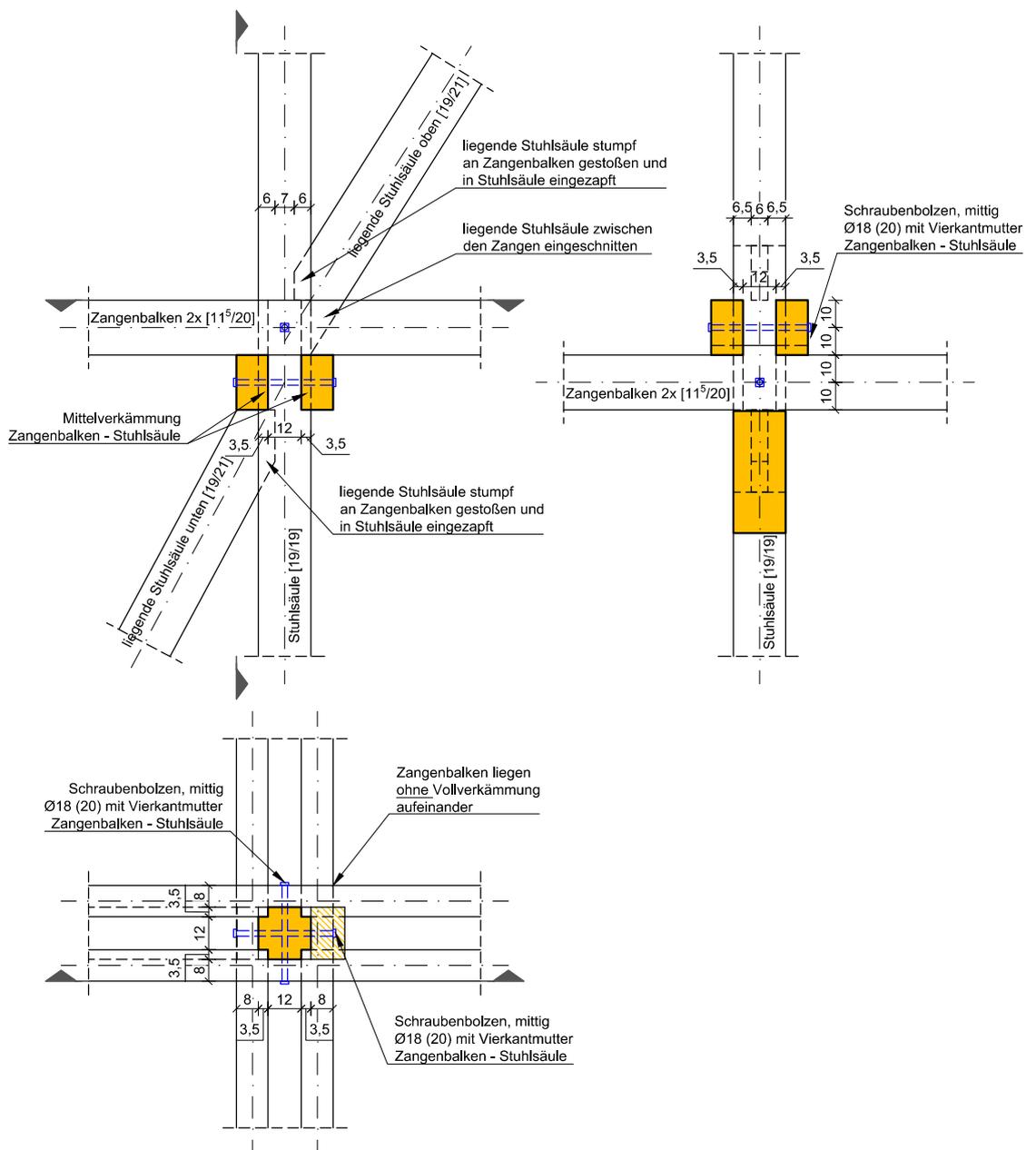
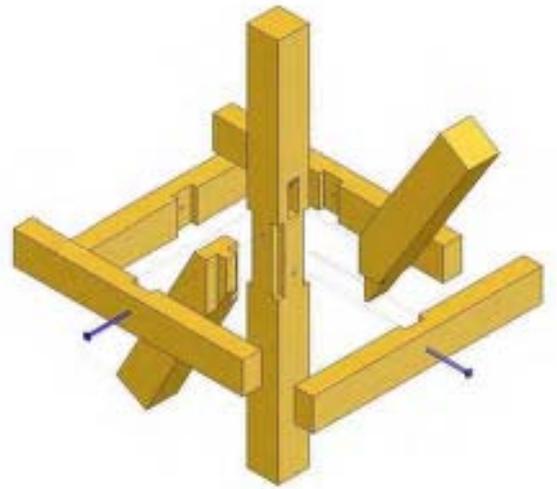
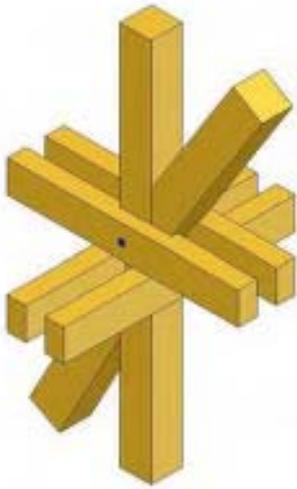
  	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:50	Zeich.-Platz: 2016/17_001-002-002	Prof.Nr.: 001 002 012 00
	Objektteil: Anschlussdetails Detail E1 - D05 Anschluss Stuhlsäule-Zangen-Diagonalverstr.-Strebebalken (O-W)	a Geändert am:	durch:	Anmerkungen:		
	b Geändert am:	durch:				
	c Geändert am:	durch:				
d Freigabe am:	durch:					



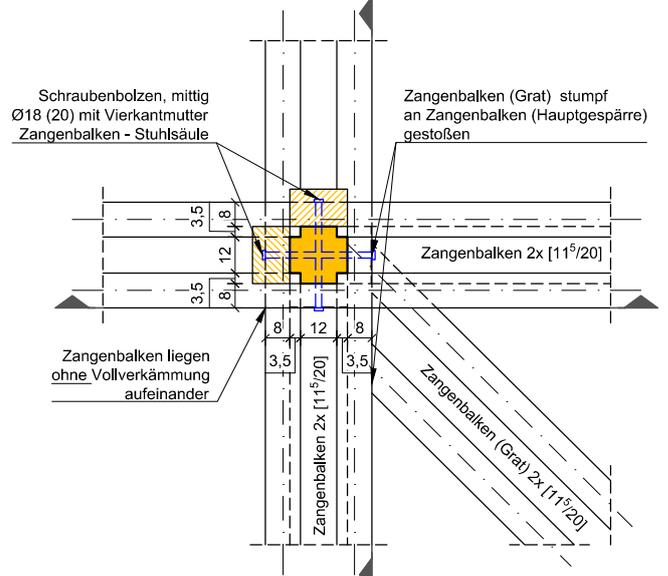
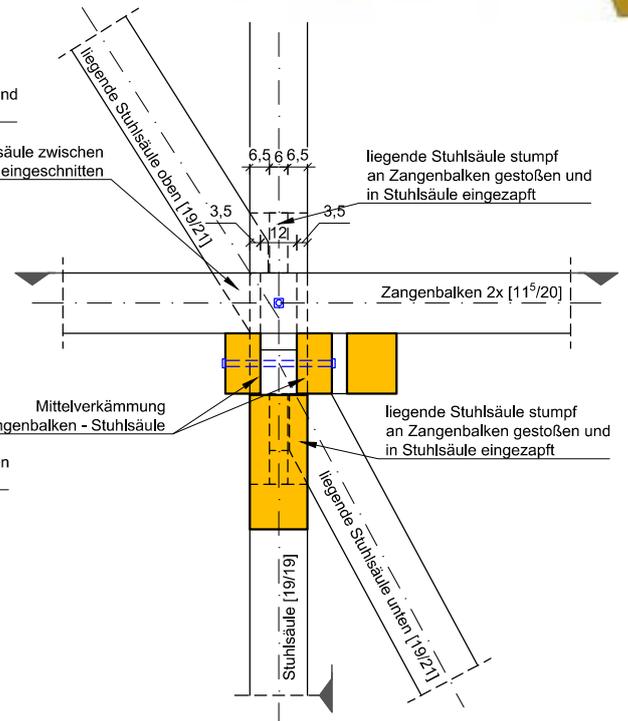
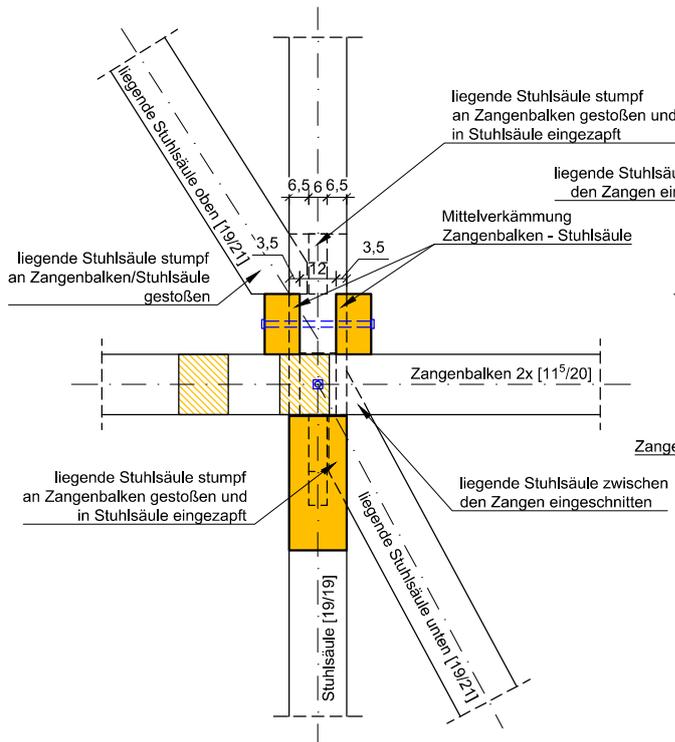
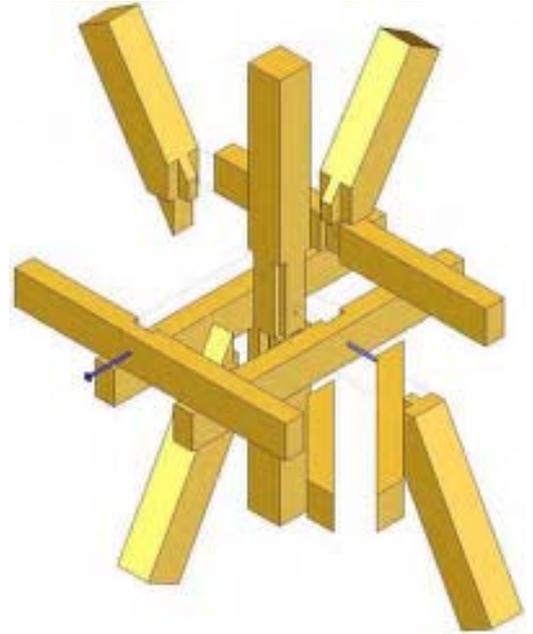
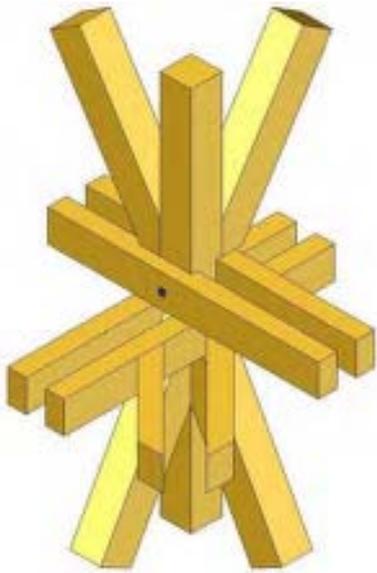


 lignum research engineering	Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	Durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:50	2016/17_001-002-003 2016/17	Prof.Nr.: 002 001 014 00
		Objektteil: Anschlussdetails Detail E2 - D01 Anschluss Rähm-Sparren (Vollgespärre)	a Geändert am:	durch:	Anmerkungen:		
		b Geändert am:	durch:				
		c Geändert am:	durch:				
d Freigabe am:	durch:						



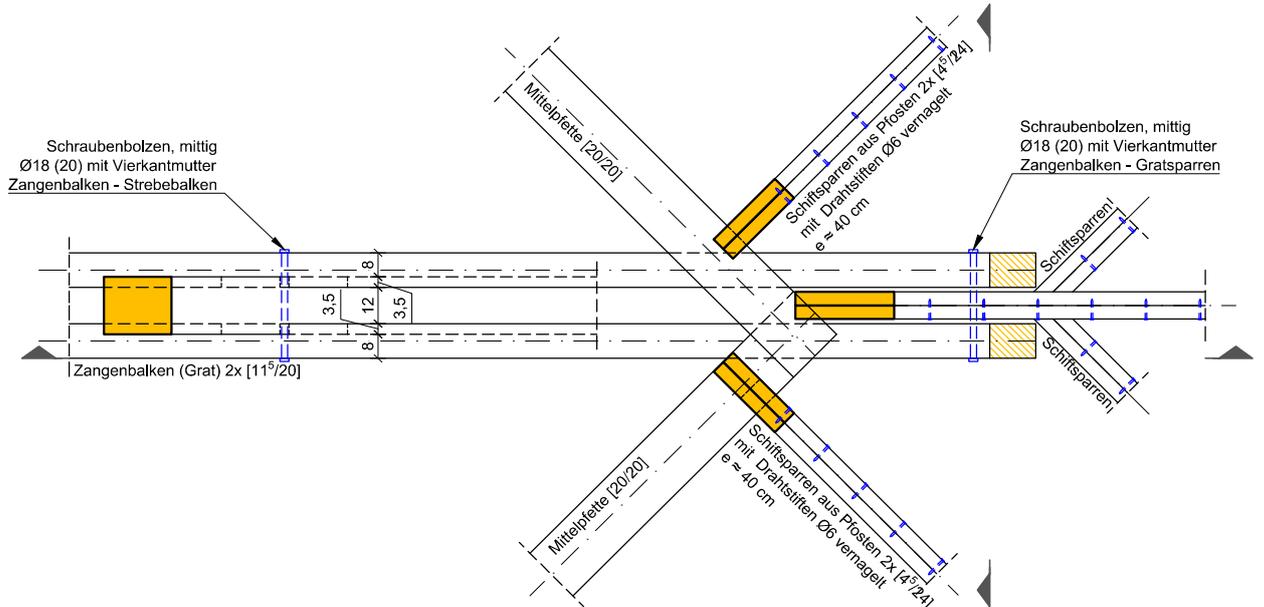
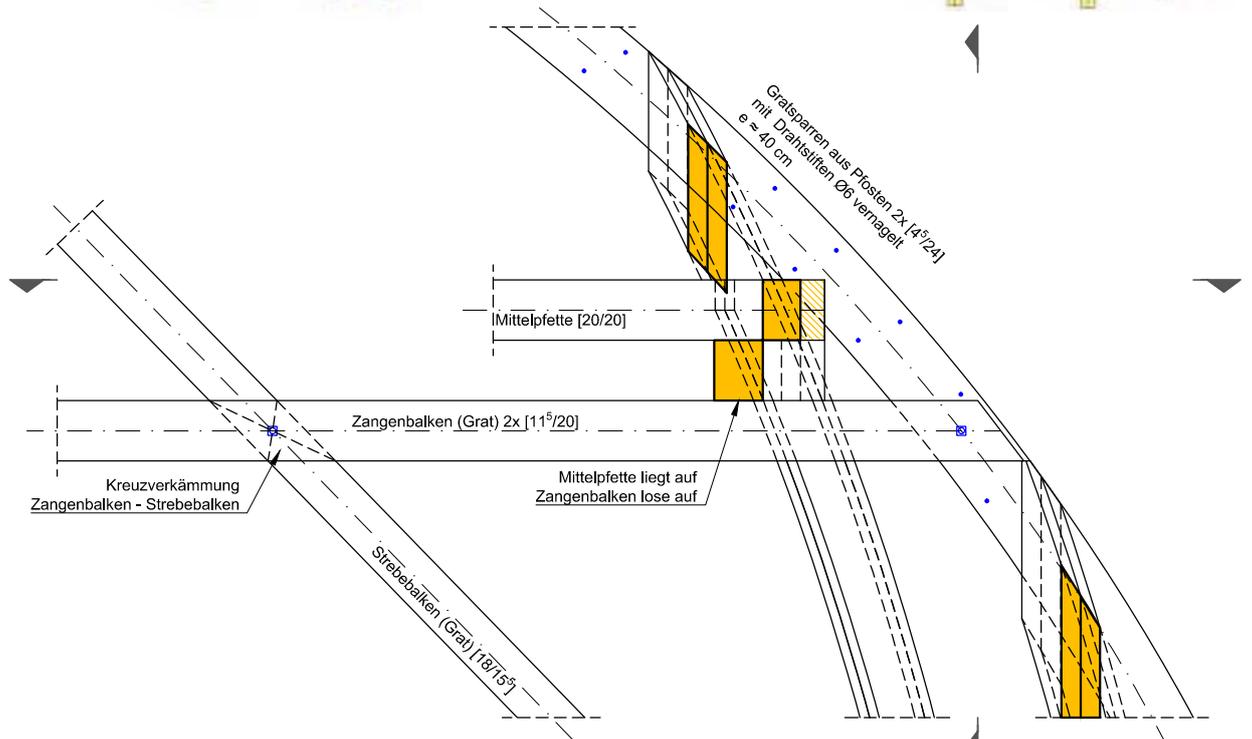
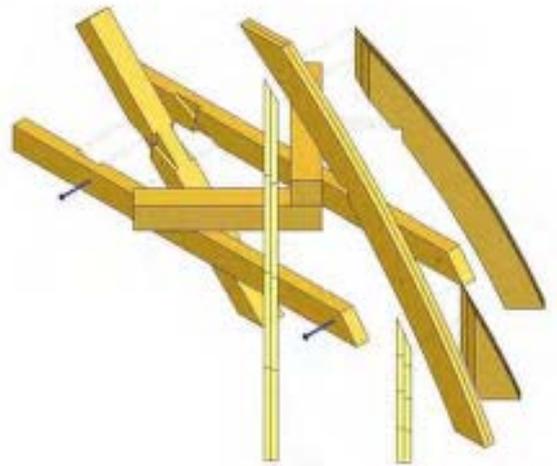
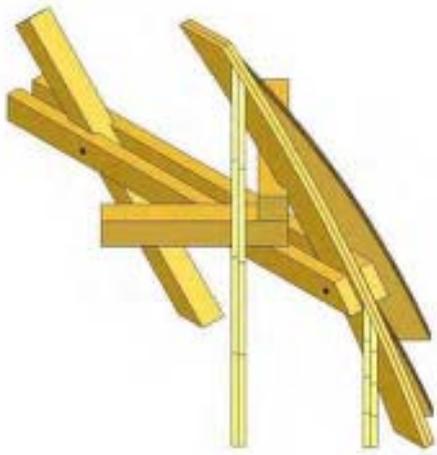


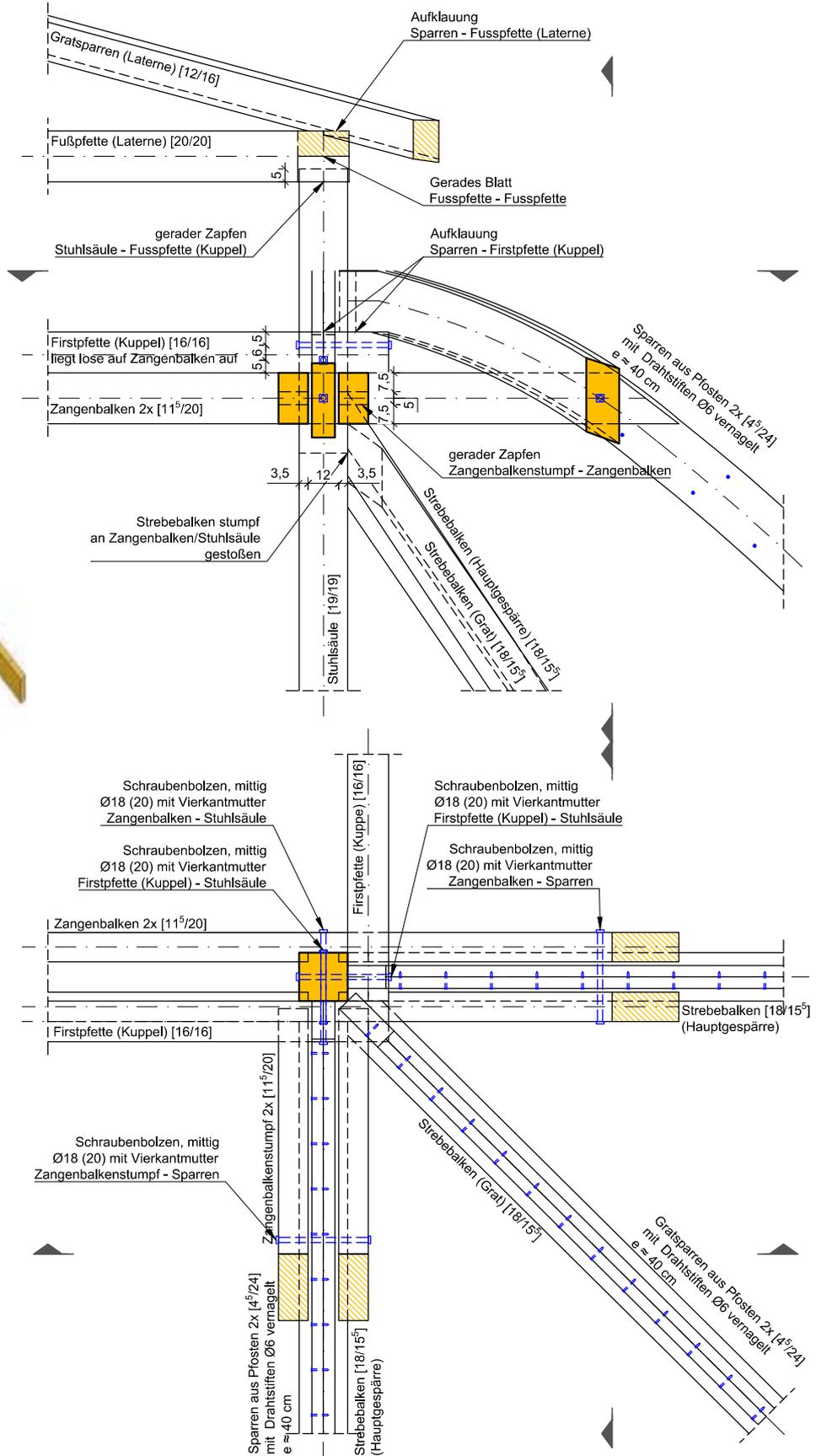
  Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:33	Zeich. Plane 2016/17_001-002-003	Jahr: 2016/17 Prof.Nr.: 001 Lfz.Nr.: 002 Index: 00
	Objektteil: Anschlussdetails Detail E2 - D03 Anschluss liegende Stuhlsäule unten-liegende Stuhlsäule oben (O-W)	a Geändert am:	durch:	Anmerkungen:		
	b Geändert am:	durch:				
	c Geändert am:	durch:				
d Freigabe am:	durch:					



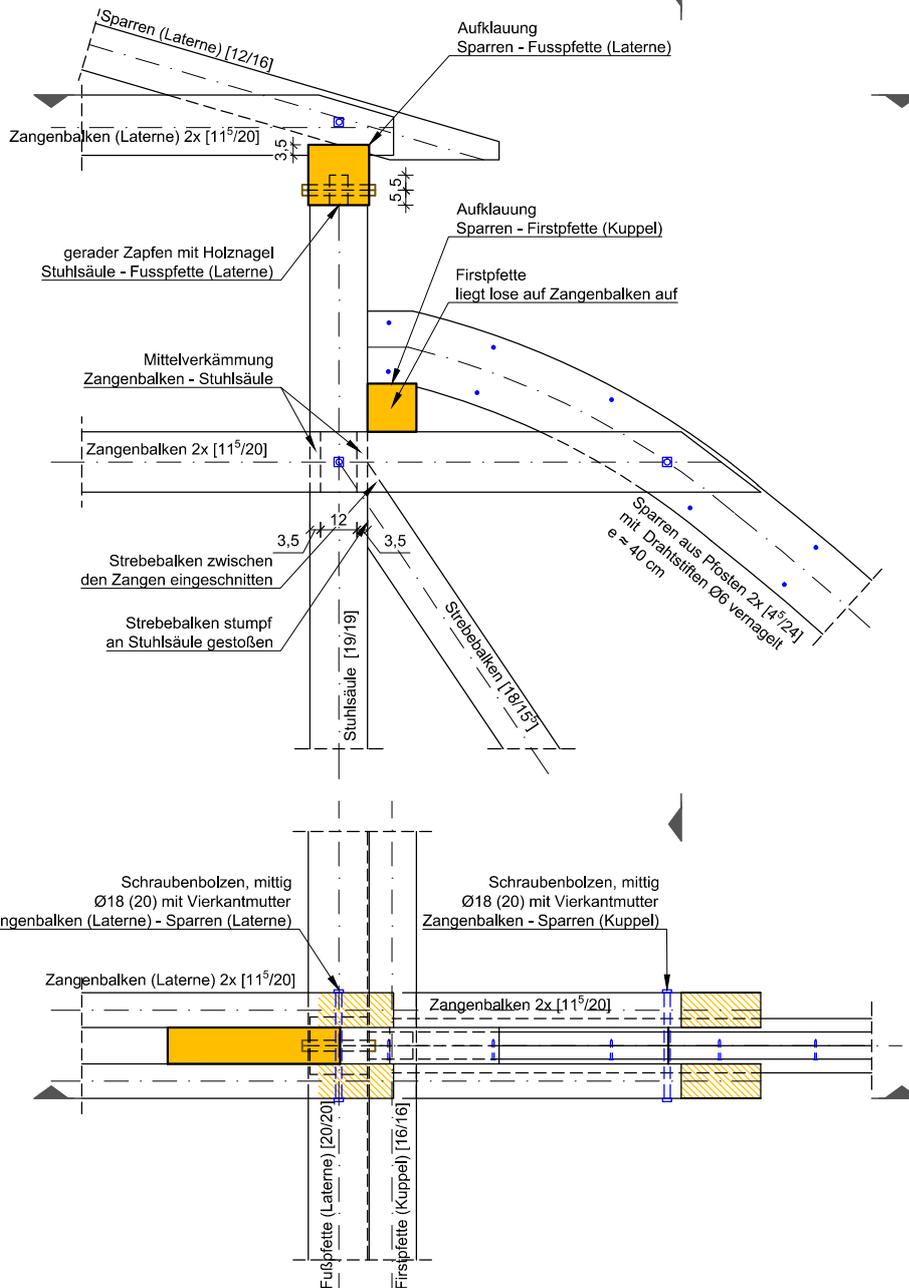
index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:25
b	Geändert am:	durch:	Isometrie: M 1:33
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

2016/17_001-002-003	
Jahr:	2016/17
Proj.Nr.:	001
Proj.Fachr.:	002
Index:	017
	00





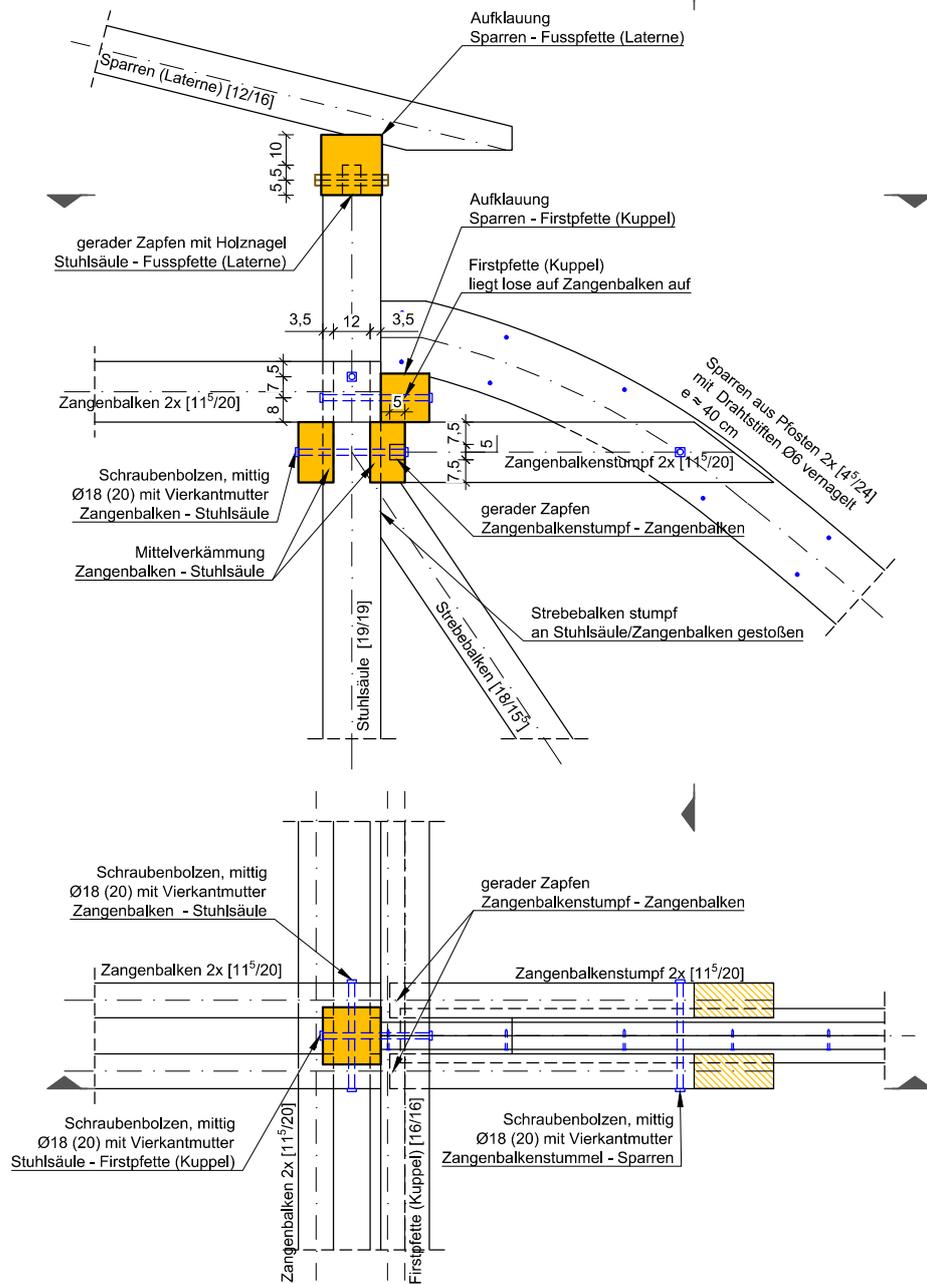
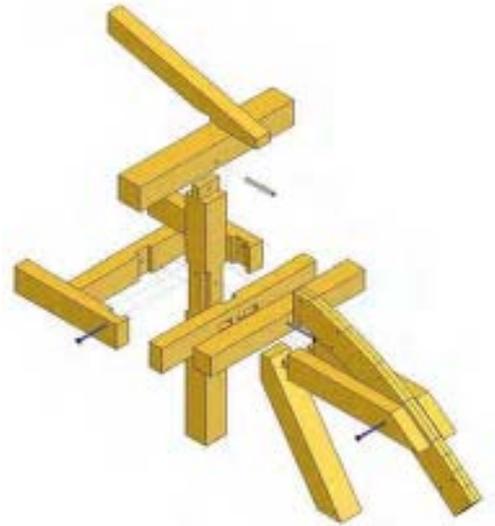
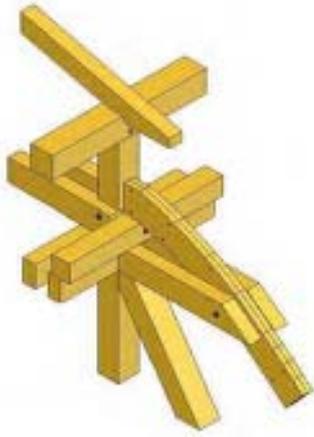
  Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:75	2016/17_001-002-004 2016/17	002 019 00	
	Objektteil: Anschlussdetails Detail E3 - D01 Anschluss Firstpfette-Sparren (Grat) (Übergang Kuppel-Laterne)	a Geändert am: durch:	b Geändert am: durch:	c Geändert am: durch:			Anmerkungen:
	d Freigabe am: durch:	d	d	d			d
	2016/17	001	002	019			00



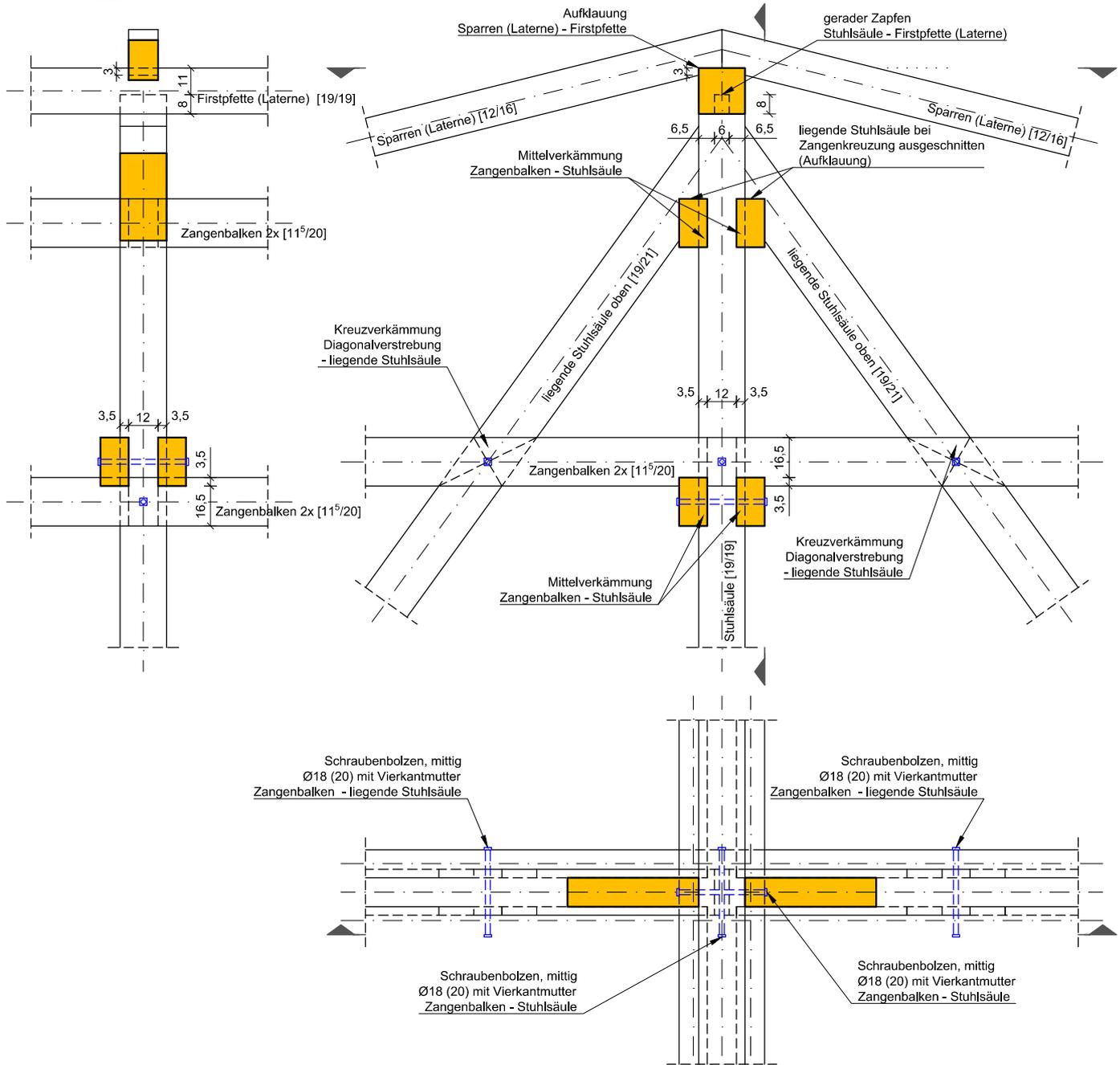
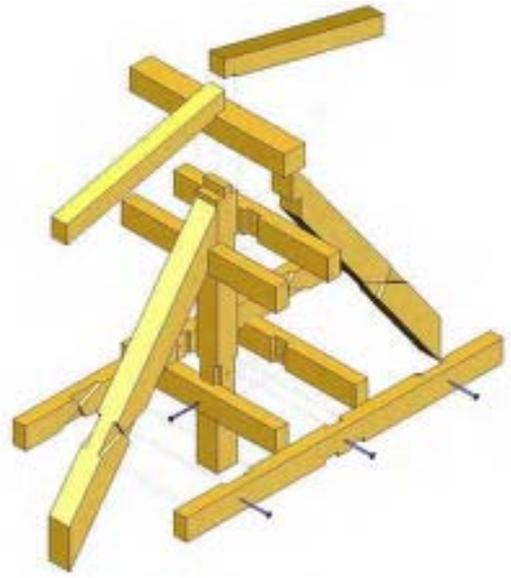
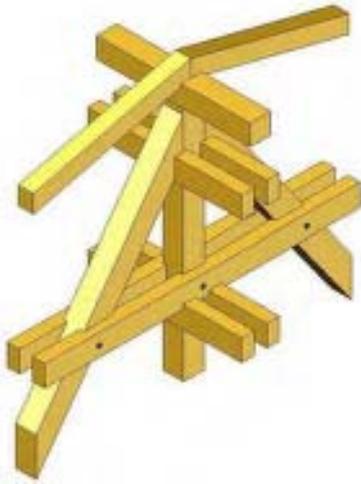
Projekt:
Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL
 Alte Technik - Technische Universität Graz
 Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Objekttitel:
Anschlussdetails
 Detail E3 - D02
 Anschluss Firstpfette-Sparren (O-W) (Übergang Kuppel-Laterne)

index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
a	01.02.2017	JoHa	M 1:25
b	Geändert am:	durch:	Isometrie: M 1:50
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Freigabe am:	durch:	

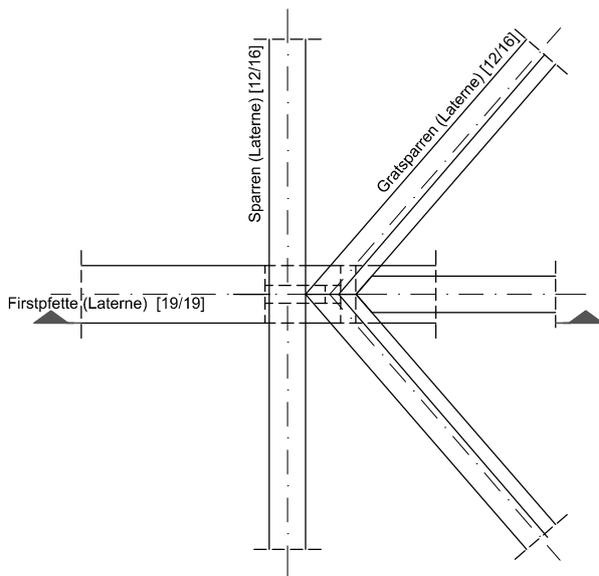
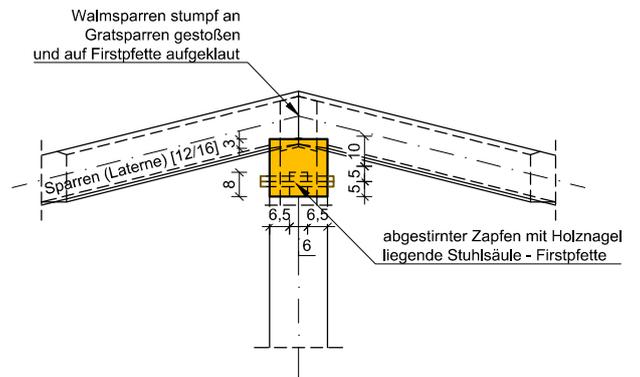
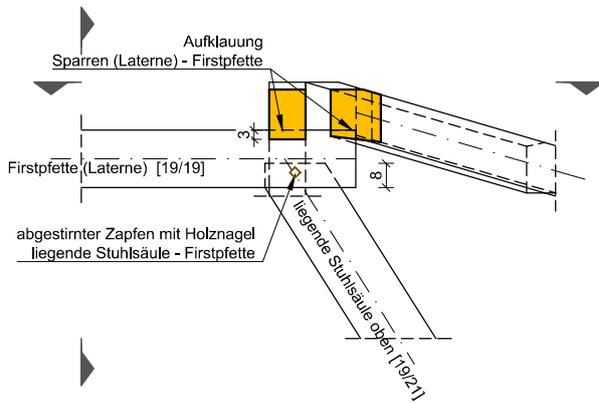
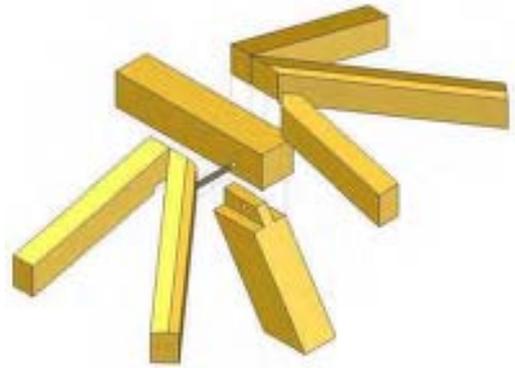
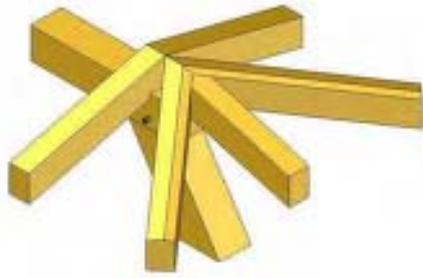
Zugehör. Plans:		Proj.Nr.:	Index:
2016/17_001-002-004		001	002
Jahr:		001	020
2016/17			00



 Masterarbeiten	Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	durch: JoHa durch:	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:50	2016/17_001-002-004 Prof.Nr.: 001 Index: 002 2016/17 Index: 021 00
	Anschlussdetails Detail E3 - D03 Anschluss Firstpfette-Sparren (N-S) (Übergang Kuppel-Laterne)	a Geändert am: durch:	b Geändert am: durch:	Anmerkungen:	
	c Geändert am: durch:	d Geändert am: durch:	Freigabe am: durch:		
	TU Graz lignum research engineering Masterarbeiten				



 Masterarbeiten	Projekt: Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL Alte Technik - Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12, 8010 Graz	Index: Gezeichnet am: 01.02.2017 Geändert am:	Durch: JoHa	Maßstab(e): M 1:25 Isometrie: M 1:50	2016/17_001-002-005 Prof.Nr.: 001 Prof.Nr.: 002 Jahr: 2016/17 Index: 022 00
	Objektteil: Anschlussdetails Detail E4 - D01 Anschluss Firstpfette Laterne	a Geändert am:	durch:	Anmerkungen:	
	b Geändert am:	durch:			
	c Geändert am:	durch:			
d Freigabe am:	durch:				



lignum research engineering
Masterarbeiten

Projekt: **Bestandsaufnahme HAUPTKUPPEL**

Alte Technik - Technische Universität Graz
Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Objektteil: **Anschlussdetails**

Detail E4 - D02
Anschluss Walm Laterne

index:	Gezeichnet am:	durch:	Maßstab(e):
	01.02.2017	JoHa	M 1:25
a	Geändert am:	durch:	Isometrie: M 1:33
b	Geändert am:	durch:	
c	Geändert am:	durch:	Anmerkungen:
d	Geändert am:	durch:	
	Freigabe am:	durch:	

Zugehör. Plans:		2016/17_001-002-005
2016/17_001-002-005		
Jahr:	Proj.Nr.:	Proj.Teilnr.:
2016/17	001	002
	Leg.Nr.:	Index:
	023	00

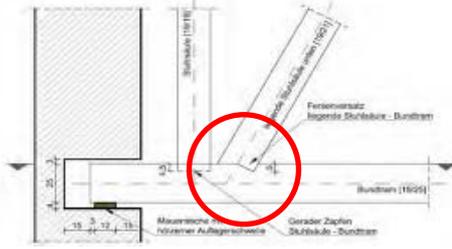
ANHANG D ANSCHLUSSSTEIFIGKEITEN

Die Schnittgrößenermittlung an älteren hölzernen Dachtragwerken erweist sich wesentlich schwieriger als bei heutigen modernen Ingenieurholzbauten, deren Anschlussnachgiebigkeiten aufgrund des definierten Kraftflusses in den üblichen ingenieurmäßigen Holz-Holz- bzw. Holz-Stahlblechverbindungen verhältnismäßig einfach bestimmbar sind und in die statische Modellbildung einfließen können. Die Anschlusssteifigkeiten von zimmermannsmäßigen Kontaktanschlüssen zu bestimmen, gestaltet sich dahingehend wesentlich schwieriger, liegen doch je nach Schnitttechnik der Verbindung gleich mehrere Kontaktflächen vor, an denen eine Kraftübertragung stattfinden kann (z.B.: abgestirnte Zapfenverbindungen). Wie anhand von Vergleichsrechnungen verschiedener Berechnungsmodelle in Forschungsarbeiten (vgl. [23], [7], [8],...) und einige Masterarbeiten gezeigt wurde (vgl. [36], [37], [38]...), beeinflussen die gewählten Anschlussnachgiebigkeiten den Kraftfluss und damit die Schnittgrößen und Verformungen im statischen Berechnungsmodell ganz erheblich. Je nach Dachtragwerkstyp ergeben sich im Vergleich zu „rein gelenkig“ ausgebildeten statischen Systemen deutlich anderen Schnittkraft- und Verformungsfiguren. Der Einfluss von Anschluss exzentrizitäten und Nachgiebigkeiten auf die Schnittgrößen kann folglich nicht vernachlässigt und sollte auch gemäß den Bestimmungen des Eurocode 5 (vgl. [84]) berücksichtigt werden. Leider ist die Bestimmung der Anschlussnachgiebigkeiten von zimmermannsmäßigen Holz-Holz-Verbindungen auf Basis des Eurocode 5 nicht zufriedenstellend gelöst. Daher muss in vielen Fällen auf Ingenieurmodelle und/oder Forschungsergebnisse zurückgegriffen werden. Die Berechnung der Anschlusssteifigkeiten der zimmermannsmäßigen Anschlussknoten nach diesen „ingenieurmäßigen Ansätzen“ kann keinesfalls mit den analytisch exakten Berechnungsmethoden, wie diese für Verbindungen des modernen Ingenieurholzbaus existieren, verglichen werden. Daher sollten die berechneten Ergebnisgrößen der statischen Modellbildung vom planenden Ingenieur stets kritisch betrachtet werden. Folglich können aus den Berechnungen am statischen Modell qualitative, jedoch keine quantitativ „exakten“ Erkenntnisse über die tatsächliche Verformungs- und Schnittgrößenverteilung abgeleitet werden.

Auf den nachfolgenden Seiten dieses Anhangs wird die Anschlusssteifigkeitsermittlung für die wesentlichen Verbindungsknoten des Hauptkuppeldachtragwerkes zusammengestellt. In den Tabellenkalkulationsblättern sind die wesentlichen Formeln sowie eine Detailskizze des jeweiligen Anschlussknotens dargestellt. Die verwendeten Berechnungsansätze, die für diese Tabellenberechnungsblätter aufgegriffen wurden, sind in Kapitel 6-4 der vorliegenden Masterarbeit dokumentiert. Die berechneten Anschlusssteifigkeiten wurden im Stabwerksberechnungsprogramm stets als „Erstbelastungssteifigkeit“ berücksichtigt und sind im Ausdrucksprotokoll in ANHANG F ebenso ersichtlich wie in den zusammenfassenden Tabellen Tab. 6.6 und Tab. 6.7 des Kapitels 6-4.7.

NORD/SÜD_Steifigkeit Fersenversatz

Anschluss Bundtram - liegende Stuhlsäule unten



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

Die Formeln erfordern, die Geometrieparameter in cm

$b_{Schwelle/Strebe}$ 190 mm → 19 cm
 $t_{Versatz}$ 50 mm → 5 cm
 Strebenneigung α 62°

Steifigkeiten in Zangenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{axial,Versatz,1}$ 21800 N/mm (\pm kN/m)

$$C_{Versatz,Strebenaxial} = \left((45,2 - 42,1 \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \frac{b_{Strebe/Schwelle}}{12} \cdot \left(1 + \frac{t_{Versatz} - 2,34}{2,34} \cdot 0,1 \right) \right) \cdot 10^3$$

Achtung! Diese Formel ist im vorliegenden Fall **nicht** anwendbar, weil es sich nicht um einen Fersenversatz handelt, dessen Fersenstirn rechtwinkelig zur Faserrichtung des Schwellenholzes angeordnet ist.

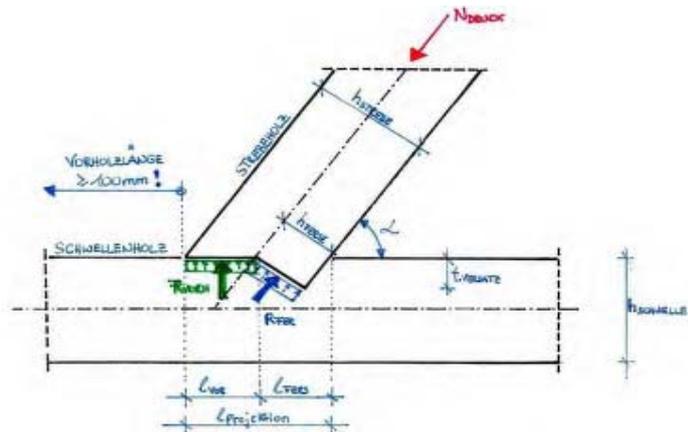
Vielmehr handelt es sich hierbei um einen klassischen Fersenversatz. Die Drucknormalkraft ist aufgrund der steilen Strebenneigung ebenfalls sehr steil zur Faserrichtung des liegenden Schwellenholzes orientiert. Nachfolgend soll ein Ingenieurmodell vorgestellt werden, dass im Wesentlichen auf den zulässigen Holzpressungen am Schwellenholz beruht. Die Federsteifigkeit wurde mit charakteristischen Materialfestigkeiten ermittelt und ist in die axiale Strebenholzrichtung anzusetzen.

Festigkeitseigenschaften

$f_{c,0,k}$ 18 N/mm²
 $f_{c,90,k}$ 0,4 N/mm²
 $k_{c,90}$ 1,3 N/mm²
 $f_{c,\alpha}$ 0,66 N/mm²

Geometrieparameter

Strebenneigung α 62°
 $b_{Schwelle/Strebe}$ 190 mm
 h_{Strebe} 210 mm
 $t_{Versatz}$ 50 mm
 $l_{Projektion}$ 238 mm
 l_{Ferse} 121 mm
 l_{Vor} 117 mm
 h_{Ferse} 107 mm



max. Kraftübertragung über die Versatzverbindung

$R_{Schwelle,Ferse,k}$ 13388 N
 $R_{Schwelle,Vor,k}$ 11581 N
 $R_{Fersenversatz,k}$ 18825 N

$$R_{Fersenversatz,k} = R_{Schwelle,Ferse,k} + R_{Schwelle,Vor,k} \cdot \cos \alpha$$

axiale Federsteifigkeit (Druck)

zul. Verformung 1,5 mm

Federsteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{axial,Fersenversatz}$ 12500 N/mm (\pm kN/m)

$$C_{axial,Fersenversatz} = \frac{R_{Fersenversatz}}{u_{lokal}}$$

Der so ermittelte axiale Federsteifigkeitswert entspricht in etwa 55% des oberen Ansatzes.

NORD/SÜD_Steifigkeit und Tragfähigkeit Eisenaufhängung Anschluss Bundtram - Hängesäule



Bemessungswert der Tragfähigkeit der Bundtramaufhängung

Materialeigenschaften Holz

ρ_{Holz}	380 kg/m ³
$f_{c,90,k}$	2,7 N/mm ²

Materialeigenschaften Eisen

reduzierte Zugfestigkeit von modernem Baustahl

$f_{u,k,S235RJ}$	360 N/mm ²
Reduktion auf	80 %
$f_{u,k,Eisen}$	288 N/mm ²

Geometrieparameter des Anschlusses

b_{Buntram}	190 mm
$t_{\text{Hängesäule}}$	190 mm
$b_{\text{Eisenaufhängung}}$	45 mm
$t_{\text{Eisenaufhängung}}$	8 mm
$d_{\text{Bolzen,Schaft}}$	18 mm
$d_{\text{Bolzen,Gewinde}}$	16 mm
Lochspiel	2 mm

Materialsicherheitsbeiwerte

$\gamma_{M,VH}$	1,3 -
$\gamma_{M,Eisen}$	1,25 -

sonstige Beiwerte für die Berechnung

k_{mod}	0,8 -
$k_{c,90}$	1,5 -
α_1	0,25 - (Seileffekt)
α_2	0,25 - (Seileffekt)

$A_{\text{Eisenband}}$	200,00 mm ²
$A_{\text{Bolzen,Schaft}}$	254,47 mm ²
$A_{\text{Bolzen,Gewinde}}$	201,06 mm ²

Festigkeitseigenschaften

$f_{h,d}$	15,72 N/mm ²
$M_{y,d}$	126856 Nmm
Seileffekt ΔR_d	2118 N
$R_d,(1)$	10592 N

$$R_{\text{Johansen},d} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,50 \cdot f_{h,d} \cdot t \cdot d \\ \sqrt{2 \cdot M_{y,d} \cdot f_{h,d} \cdot d} + \Delta R_d \end{array} \right.$$

(2) Tragfähigkeit infolge der Querholzpressung an der Bundtramunterseite

$f_{c,90,d}$	1,66 N/mm ²
A_{press}	8550 mm ²
$R_d,(2)$	21309 N

$$R_{c,\text{Bundtram},90,d} = A_{\text{press}} \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

(3) Tragfähigkeit infolge der Zugtragfähigkeit des Hängeeisens

$f_{u,d,Eisen}$	230,4 N/mm ²
A_{min}	400,00 mm ²
$R_d,(3)$	92160 N

$$R_{\text{Zug},\text{Eisen},d} = \frac{f_{u,k,\text{Eisen}}}{\gamma_{M,\text{Eisen}}} \cdot \min \left(A_{\text{Gewindequerschnitt}} ; A_{\text{Eisenband,netto}} \right)$$

Die Tragfähigkeit der eisernen Bundtramaufhängung ergibt sich aus dem Minimum (1),(2),(3):

$R_{d,\text{Eisenaufhängung}}$	10592 N
--------------------------------	----------------

Steifigkeitsermittlung der Bundtramaufhängung

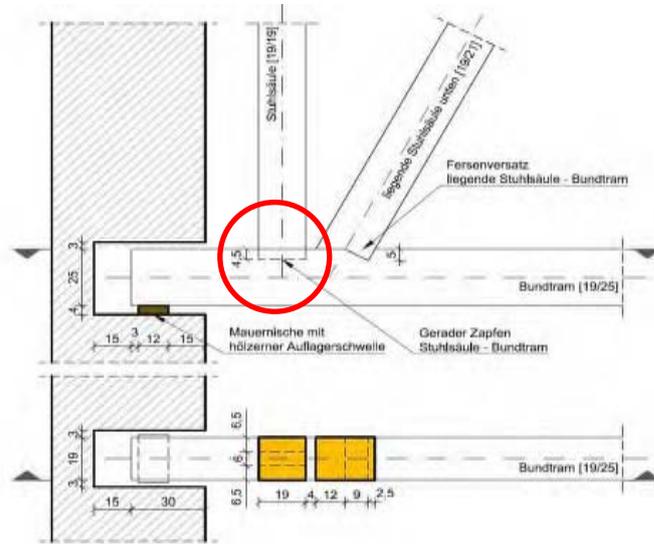
Axiale Federsteifigkeit (Zug)

$R_{k,\text{Eisenaufhängung}}^*$	13503 N
zul. Verformung	2 mm/Anschlussseite
Federsteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)	
$C_{V,\text{Eisenaufhängung}}$	3400 N/mm (\cong kN/m)

*Anmerkung: für die Steifigkeitsermittlung wird die Tragfähigkeit der Eisenaufhängung OHNE Teilsicherheitsbeiwerte herangezogen!
($\gamma_{M,VH} = \gamma_{M,Eisen} = 1,0$)

NORD/SÜD_Steifigkeit gerader Zapfen (TYP 1)

Anschluss Bundtram - Stuhlsäule


Emoduln
 $E_{90,mean} = 400 \text{ N/mm}^2$
Geometrieparameter des Anschlusses
 $b_{Schwelle} = 190 \text{ mm}$
 $h_{Schwelle} = 250 \text{ mm}$
 $b_{Steher} = 190 \text{ mm}$
 $h_{Steher} = 190 \text{ mm}$
 $b_{Zapfenloch} = 70 \text{ mm}$
 $A_{netto} = 22800 \text{ mm}^2$

inkl. 5mm beidseitliches Zapfenspiel

$$A_{netto} = (b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}) \cdot h_{Steher}$$

Steifigkeiten senkrecht zum Schwellenholz

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

 $C_{V,Schwelle,gerader Zapfen} = 73000 \text{ N/mm} (\cong \text{kN/m})$

$$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen} = E_{90,mean} \cdot \frac{A_{netto}}{\frac{h_{Schwelle}}{2}}$$

NORD/SÜD_Steifigkeit gerader Zapfen (TYP 2)
Anschluss Stuhlsäule - Firstpfette Laterne & Fußpfette Kuppel



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$b_{Schwelle}$ 200 mm

$h_{Schwelle}$ 200 mm

b_{Steher} 190 mm

h_{Steher} 190 mm

$b_{Zapfenloch}$ 70 mm

A_{netto} 24700 mm²

inkl. 5mm beidseitliches Zapfenspiel

$$A_{netto} = (b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}) \cdot h_{Steher}$$

Steifigkeiten senkrecht zum Schwellenholz

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

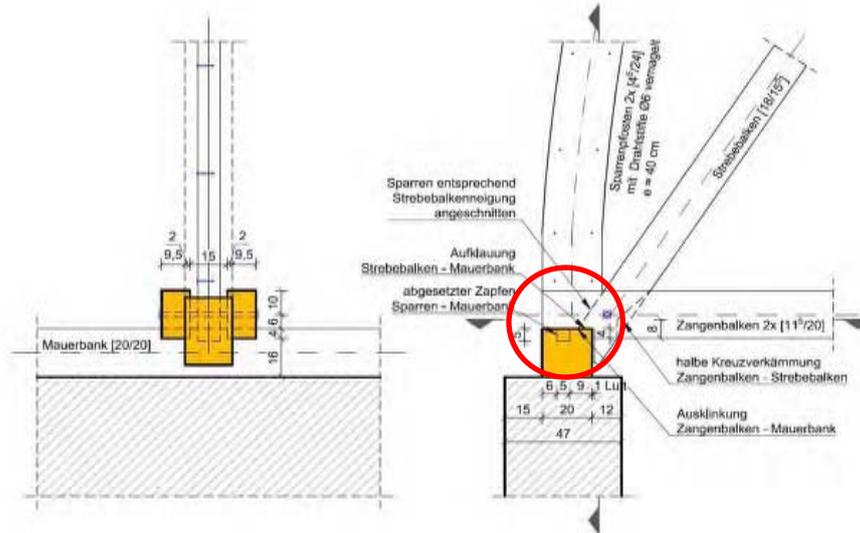
$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen}$ 98800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen} = E_{90,mean} \cdot \frac{A_{netto}}{\frac{h_{Schwelle}}{2}}$$

Anmerkungen: Der Holznagel dient nur der Lagesicherung und wurde bei der Ermittlung der Anschlusssteifigkeit vernachlässigt.

NORD/SÜD_Steifigkeit gerader, abgesetzter Zapfen (TYP 3)

Anschluss Sparrenpfosten - Fußpfette/Mauerbank Kuppel



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$b_{Schwelle}$ 200 mm

$h_{Schwelle}$ 200 mm

$b_{Stecher}$ 90 mm

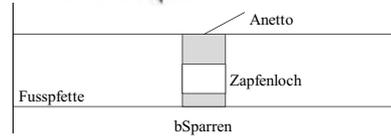
$h_{Stecher}$ 240 mm

$b_{Zapfenloch}$ 70 mm

$l_{Zapfenloch}$ 90 mm²

$A_{Zapfenloch}$ 6300 mm²

A_{netto} 11700 mm²



Sparrenpfostenbreite 2x45mm

inkl. 5mm beidseitliches Zapfenspiel

Sparrenbreite

Grundfläche des Zapfenloches

Sparrenaufstandsfläche abzügl. Zapfenloch

Steifigkeiten senkrecht zum Schwellenholz

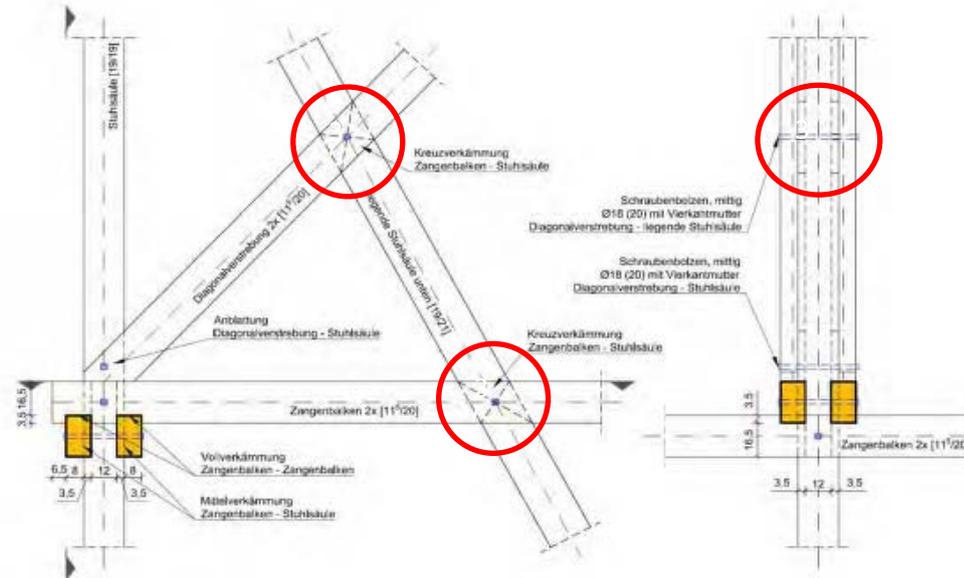
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Schwelle,abges. Zapfen}$ 46800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Schwelle,abgesetzterZapfen} = E_{90,mean} \cdot \frac{A_{netto}}{\frac{h_{Schwelle}}{2}}$$

NORD/SÜD_Steifigkeit Kreuzkamm

Anschluss Zangenbalken/Diagonalverstrebung - liegende Stuhlsäule/Strebebalken



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$n_{Kreuzkamm}$ 2 Anzahl

$t_{Kreuzkamm}$ 35 mm

h_{Zange} 200 mm

b_{Zange} 115 mm

$h_{Mittelholz}$ 190 mm

$b_{Mittelholz}$ 190 mm

Es handelt sich hierbei sozusagen um eine zwei-schnittige Kreuzkammverbindung

Steifigkeiten in Zangenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Kreuzkamm,1}$ 37100 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{H,Kreuzkamm,1} = 530 \cdot t_{Kreuzkamm}$$

Wiederbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Kreuzkamm,2}$ 92800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{H,Kreuzkamm,2} = 2,50 \cdot C_{H,Kreuzkamm,1}$$

Steifigkeiten aus der Gespärreebene

Die Berechnung erfolgt unter Vernachlässigung des Lastausbreitungswinkels (keine kontinuierliche Lagerung)

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Kreuzkamm,1}$ 43400 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Kreuzkamm,1} = E_{90,mean} \cdot \frac{h_{Zange} \cdot h_{Mittelholz}}{2 \cdot (b_{Zange} - t_{Kreuzkamm}) + b_{Mittelholz}}$$

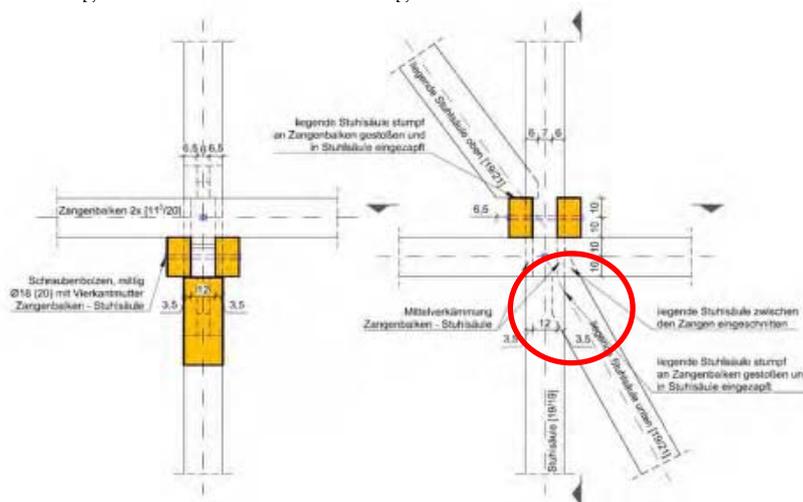
Wiederbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Kreuzkamm,2}$ 108500 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Kreuzkamm,2} = 2,50 \cdot C_{V,Kreuzkamm,1}$$

Anmerkung: die Steifigkeit aus der Gespärreebene wird für die Modellbildung nicht benötigt!

NORD/SÜD_Steifigkeit schräger, abgestirnter Zapfen (TYP 1)
Anschluss liegende Stuhlsäule unten - Hängestuhlsäule



Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	3164 N/mm ²

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cos^3 \alpha}$$

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	70 mm
b_{netto}	120 mm

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

Strebeholz

b_{Strebe}	190 mm
h_{Strebe}	210 mm
b_{Zapfen}	60 mm
t_{Zapfen}	60 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	28 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	1,583 -
m	3,728 -

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Zapfen}$	137700 N/mm (\cong kN/m)
----------------	-----------------------------

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

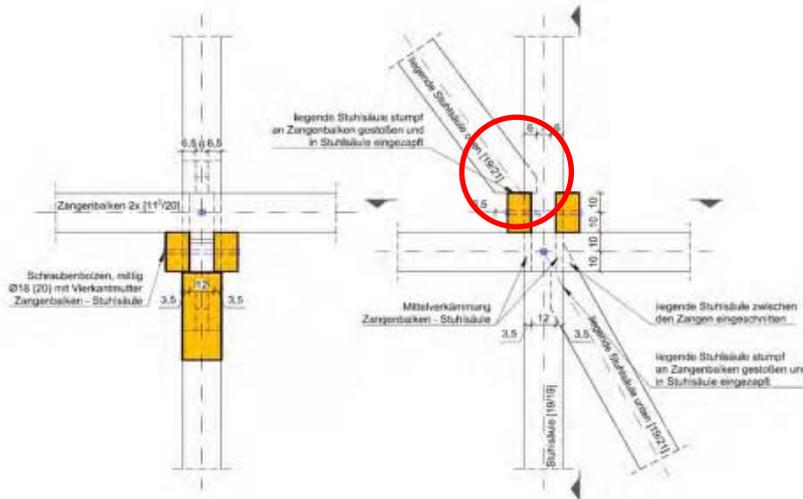
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Zapfen}$	78100 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

NORD/SÜD_Steifigkeit schräger, abgestirnter Zapfen (TYP 2)

Anschluss liegende Stuhlsäule oben - Hängestuhlsäule



Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	1812 N/mm ²

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cdot \cos^3 \alpha}$$

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	70 mm
b_{netto}	120 mm

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

Strebeholz

b_{Strebe}	190 mm
h_{Strebe}	210 mm
b_{Zapfen}	60 mm
t_{Zapfen}	60 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	36 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	1,583 -
m	2,977 -

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Zapfen}$	86900 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Zapfen}$	66300 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

NORD/SÜD_Steifigkeit schräger, abgestirnter Zapfen (TYP 3)

Anschluss liegende Stuhlsäule oben - Hängestuhlsäule (Bereich Firstpfette Laterne)



Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	2063 N/mm ²

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	75 mm
b_{netto}	115 mm

Strebeholz

b_{Strebe}	190 mm
h_{Strebe}	210 mm
b_{Zapfen}	60 mm
t_{Zapfen}	65 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	34 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	1,652 -
m	3,266 -

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cdot \cos^3 \alpha}$$

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Zapfen}$	100400 N/mm (\cong kN/m)
----------------	-----------------------------

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

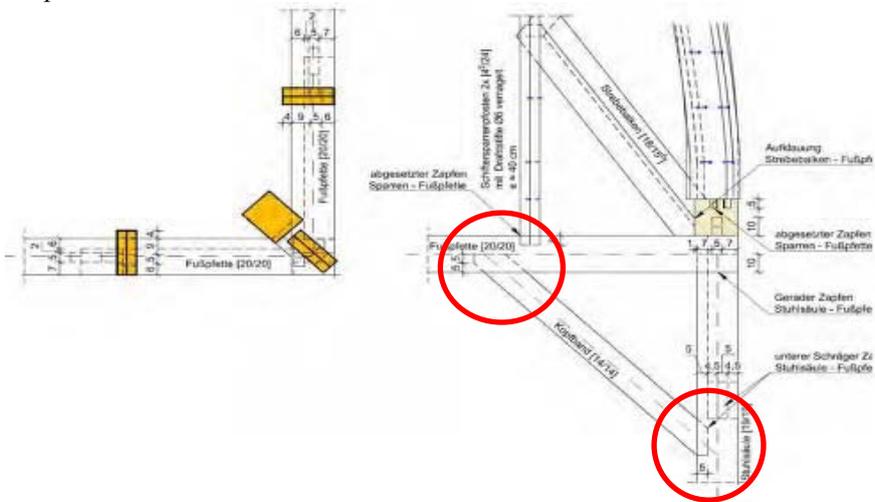
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Zapfen}$	65800 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

NORD/SÜD_Steifigkeit Kopfbandzapfen (TYP 4)

Kopfbandanschluss



Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	1095 N/mm ²

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	60 mm
b_{netto}	80 mm

Strebeholz

b_{Strebe}	140 mm
h_{Strebe}	140 mm
b_{Zapfen}	50 mm
t_{Zapfen}	50 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	45°
Ausbreitungsw. ϕ	45°

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	2,375 -
m	2,475 -

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cos^3 \alpha}$$

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$$C_{H,Zapfen} = 54000 \text{ N/mm } (\cong \text{kN/m})$$

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

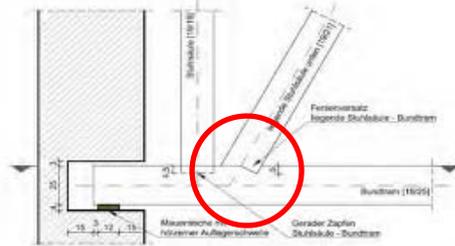
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$$C_{V,Zapfen} = 29900 \text{ N/mm } (\cong \text{kN/m})$$

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

OST/WEST_Steifigkeit Fersenversatz

Anschluss Bundtram - liegende Stuhlsäule unten



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

Die Formel erfordern, die Geometrieparameter in cm

$b_{Schwelle/Strebe}$ 190 mm → 19 cm

$t_{Versatz}$ 50 mm → 5 cm

Strebenneigung α 62 °

Steifigkeiten in Zangenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{axial,Versatz,1}$ 21800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{Versatz,Strebenaxial} = \left((45,2 - 42,1 \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \frac{b_{Strebe/Schwelle}}{12} \cdot \left(1 + \frac{t_{Versatz} - 2,34}{2,34} \cdot 0,1 \right) \right) \cdot 10^3$$

Achtung! Diese Formel ist im vorliegenden Fall **nicht** anwendbar, weil es sich nicht um einen Fersenversatz handelt, dessen Fersenstirn rechtwinkelig zur Faserrichtung des Schwellenholzes angeordnet ist.

Vielmehr handelt es sich hierbei um einen klassischen Fersenversatz. Die Drucknormalkraft ist aufgrund der steilen Strebenneigung ebenfalls sehr steil zur Faserrichtung des liegenden Schwellenholzes orientiert. Nachfolgend soll ein Ingenieurmodell vorgestellt werden, dass im Wesentlichen auf den zulässigen Holzpressungen am Schwellenholz beruht. Die Federsteifigkeit wurde mit charakteristischen Materialfestigkeiten ermittelt und ist in die axiale Strebenholzrichtung anzusetzen.

Festigkeitseigenschaften

$f_{c,0,k}$ 18 N/mm²

$f_{c,90,k}$ 0,4 N/mm²

$k_{c,90}$ 1,3 N/mm²

$f_{c,\alpha}$ 0,66 N/mm²

Geometrieparameter

Strebenneigung α 62 °

$b_{Schwelle/Strebe}$ 190 mm

h_{Strebe} 210 mm

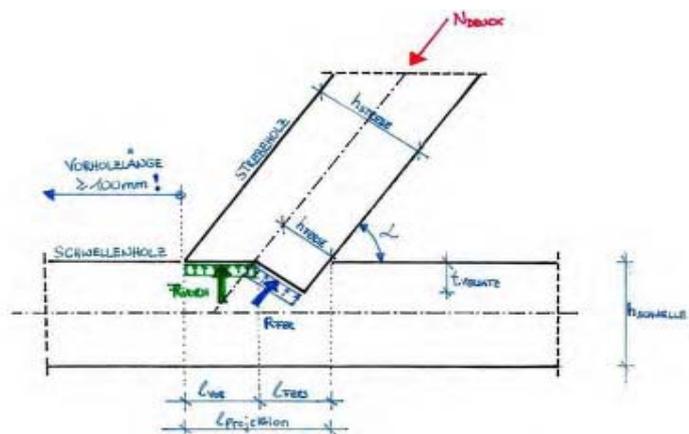
$t_{Versatz}$ 50 mm

$l_{Projektion}$ 238 mm

l_{Ferse} 121 mm

l_{Vor} 117 mm

h_{Ferse} 107 mm



max. Kraftübertragung über die Versatzverbindung

$R_{Schwelle,Ferse,k}$ 13388 N

$R_{Schwelle,Vor,k}$ 11581 N

$R_{Fersenversatz,k}$ 18825 N

$$R_{Fersenversatz,k} = R_{Schwelle,Ferse,k} + R_{Schwelle,Vor,k} \cdot \cos \alpha$$

axiale Federsteifigkeit (Druck)

zul. Verformung 1,5 mm

Federsteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

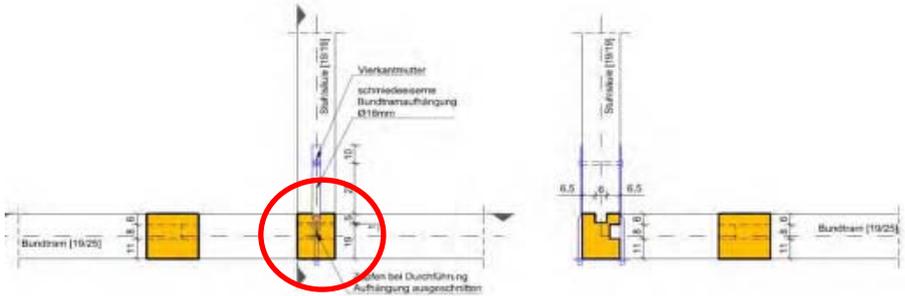
$C_{axial,Fersenversatz}$ 12500 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{axial,Fersenversatz} = \frac{R_{Fersenversatz}}{u_{lokal}}$$

Der so ermittelte axiale Federsteifigkeitswert entspricht in etwa 55% des oberen Ansatzes.

OST/WEST_Steifigkeit und Tragfähigkeit Eisenaufhängung

Anschluss Bundtram - Hängesäule



Bemessungswert der Tragfähigkeit der Bundtramaufhängung

Materialeigenschaften Holz

ρ_{Holz}	380 kg/m ³
$f_{c,90,k}$	2,7 N/mm ²

Materialeigenschaften Eisen

reduzierte Zugfestigkeit von modernem Baustahl

$f_{u,k,S235RJ}$	360 N/mm ²
Reduktion auf	80 %
$f_{u,k,Eisen}$	288 N/mm ²

Geometrieparameter des Anschlusses

b_{Buntram}	190 mm
$t_{\text{Hängesäule}}$	190 mm
$b_{\text{Eisenaufhängung}}$	45 mm
$t_{\text{Eisenaufhängung}}$	8 mm
$d_{\text{Bolzen,Schaft}}$	18 mm
$d_{\text{Bolzen,Gewinde}}$	16 mm
Lochspiel	2 mm

Materialsicherheitsbeiwerte

$\gamma_{M,VH}$	1,3 -
$\gamma_{M,Eisen}$	1,25 -

sonstige Beiwerte für die Berechnung

k_{mod}	0,8 -
$k_{c,90}$	1,5 -
α_1	0,25 - (Seileffekt)
α_2	0,25 - (Seileffekt)

$A_{\text{Eisenband}}$	200,00 mm ²
$A_{\text{Bolzen,Schaft}}$	254,47 mm ²
$A_{\text{Bolzen,Gewinde}}$	201,06 mm ²

Festigkeitseigenschaften

$f_{h,d}$	15,72 N/mm ²
$M_{y,d}$	126856 Nmm
Seileffekt ΔR_d	2118 N
$R_d(1)$	10592 N

$$R_{\text{Johansen},d} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,50 \cdot f_{h,d} \cdot t \cdot d \\ \sqrt{2 \cdot M_{y,d} \cdot f_{h,d} \cdot d} + \Delta R_d \end{array} \right.$$

(2) Tragfähigkeit infolge der Querholzpressung an der Bundtramunterseite

$f_{c,90,d}$	1,66 N/mm ²
A_{press}	8550 mm ²
$R_d(2)$	21309 N

$$R_{c,\text{Bundtram},90,d} = A_{\text{press}} \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

(3) Tragfähigkeit infolge der Zugtragfähigkeit des Hängeeisens

$f_{u,d,Eisen}$	230,4 N/mm ²
A_{min}	400,00 mm ²
$R_d(3)$	92160 N

$$R_{\text{Zug},\text{Eisen},d} = \frac{f_{u,k,\text{Eisen}}}{\gamma_{M,\text{Eisen}}} \cdot \min(A_{\text{Gewindequerschnitt}}; A_{\text{Eisenband, netto}})$$

Die Tragfähigkeit der eisernen Bundtramaufhängung ergibt sich aus dem Minimum (1),(2),(3):

$R_{d,\text{Eisenaufhängung}}$	10592 N
--------------------------------	----------------

Steifigkeitsermittlung der Bundtramaufhängung

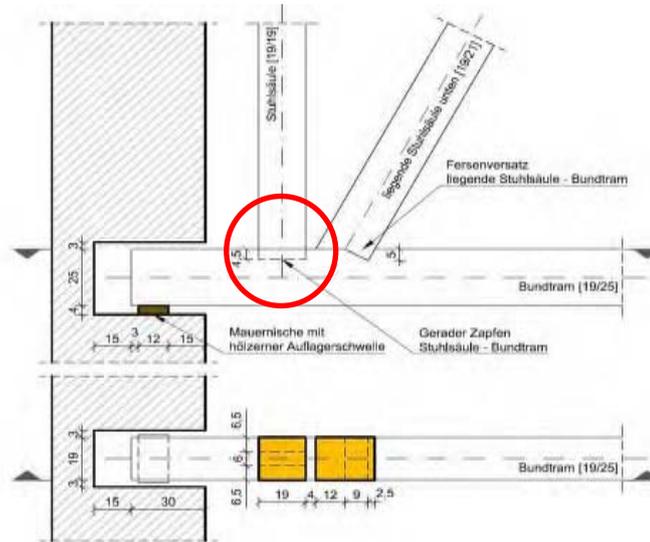
Axiale Federsteifigkeit (Zug)

$R_{k,\text{Eisenaufhängung}}^*$	13503 N
zul. Verformung	2 mm/Anschlussseite
Federsteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)	
$C_{V,\text{Eisenaufhängung}}$	3400 N/mm (\cong kN/m)

*Anmerkung: für die Steifigkeitsermittlung wird die Tragfähigkeit der Eisenaufhängung OHNE Teilsicherheitsbeiwerte herangezogen!
 $(\gamma_{M,VH} = \gamma_{M,Eisen} = 1,0)$

OST/WEST_Steifigkeit gerader Zapfen (TYP 1)

Anschluss Bundtram - Stuhlsäule



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$b_{Schwelle}$ 190 mm

$h_{Schwelle}$ 250 mm

b_{Steher} 190 mm

h_{Steher} 190 mm

$b_{Zapfenloch}$ 70 mm

A_{netto} 22800 mm²

inkl. 5mm beidseitliches Zapfenspiel

$$A_{netto} = (b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}) \cdot h_{Steher}$$

Steifigkeiten senkrecht zum Schwellenholz

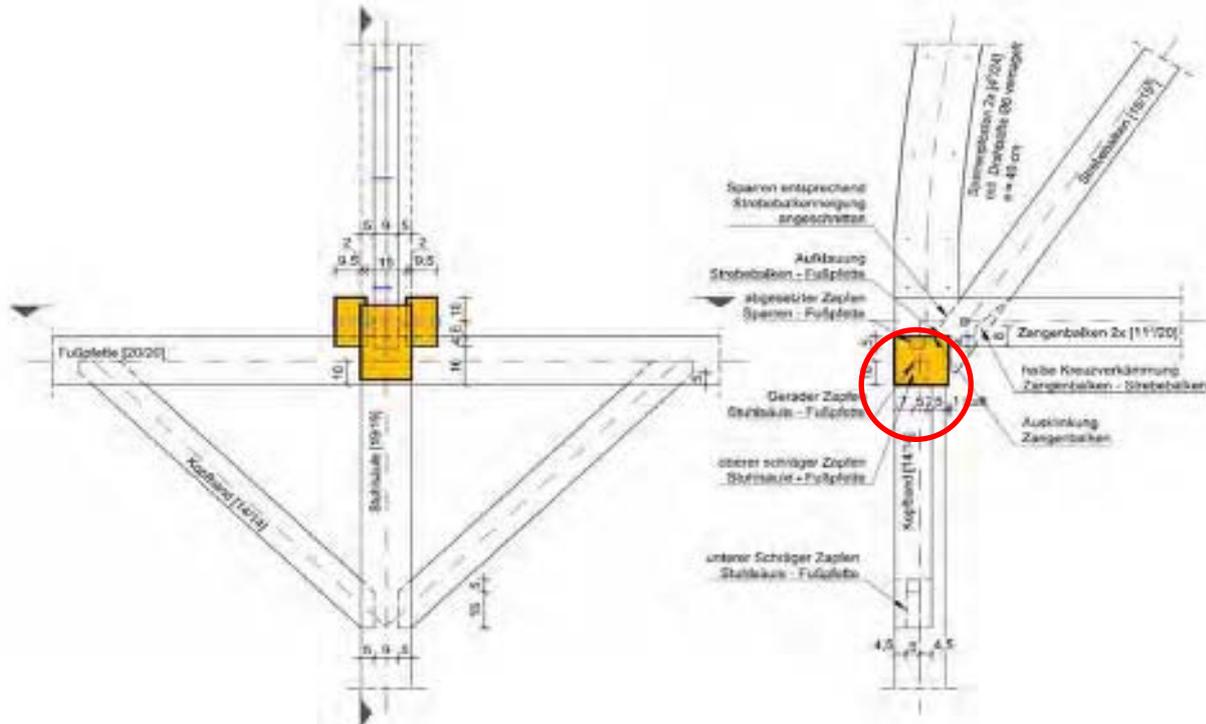
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen}$ 73000 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen} = E_{90,mean} \cdot \frac{A_{netto}}{\frac{h_{Schwelle}}{2}}$$

OST/WEST_Steifigkeit gerader Zapfen (TYP 2)

Anschluss Stuhlsäule - Fußpfette Kuppel



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$b_{Schwelle}$ 200 mm

$h_{Schwelle}$ 200 mm

b_{Steher} 190 mm

h_{Steher} 190 mm

$b_{Zapfenloch}$ 70 mm

A_{netto} 24700 mm²

inkl. 5mm beidseitliches Zapfenspiel

$$A_{netto} = (b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}) \cdot h_{Steher}$$

Steifigkeiten senkrecht zum Schwellenholz

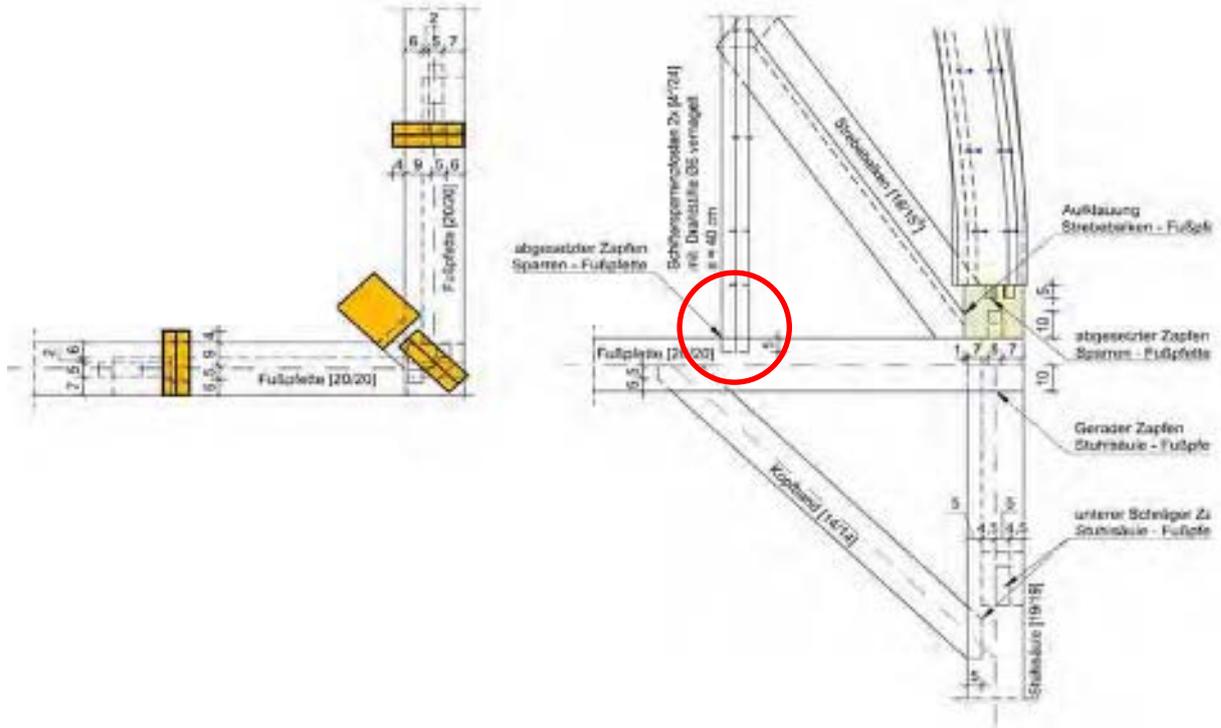
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen}$ 98800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Schwelle,gerader Zapfen} = E_{90,mean} \cdot \frac{A_{netto}}{\frac{h_{Schwelle}}{2}}$$

OST/WEST_Steifigkeit gerader, abgesetzter Zapfen (TYP 3)

Anschluss Sparrenpfosten - Fußpfette Kuppel



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$b_{Schwelle}$ 200 mm

$h_{Schwelle}$ 200 mm

b_{Steher} 90 mm

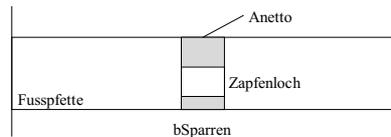
h_{Steher} 240 mm

$b_{Zapfenloch}$ 70 mm

$I_{Zapfenloch}$ 90 mm²

$A_{Zapfenloch}$ 6300 mm²

A_{netto} 11700 mm²



Sparrenpfostenbreite 2x45mm

inkl.5mm beidseitliches Zapfenspiel

Sparrenbreite

Grundfläche des Zapfenloches

Sparrenaufstandsfläche abzgl. Zapfenloch

Steifigkeiten senkrecht zum Schwellenholz

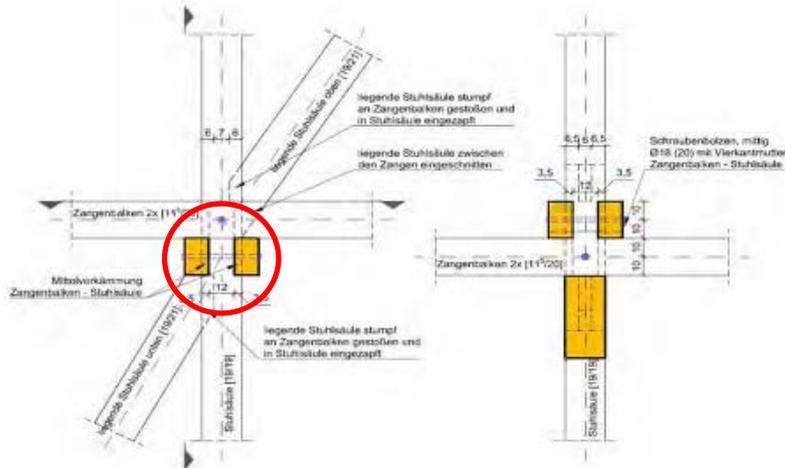
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Schwelle,abges.Zapfen}$ 46800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Schwelle,abgesetzterZapfen} = E_{90,mean} \cdot \frac{A_{netto}}{\frac{h_{Schwelle}}{2}}$$

OST/WEST_Steifigkeit Mittelkamm

Anschluss Zangenbalken - Hängestuhlsäule



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$n_{Mittelkamm}$ 2 Anzahl

Es handelt sich hierbei sozusagen um eine zwei-schnittige Mittelkammverbindung

$t_{Mittelkamm}$ 35 mm

h_{Zange} 200 mm

b_{Zange} 115 mm

$h_{Mittelholz}$ 190 mm

$b_{Mittelholz}$ 190 mm

Parameter für den Reibungsanteil

$F_{Auflast}$ 0 N

Hier kann eine Bolzenspannkraft eingetragen werden.

Reibbeiwert μ 0,4 -

empfohlener Reibbeiwert: 0,4

Steifigkeiten in Zangenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Mittelkamm,1}$ 30700 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{H,Kamm,1} = n_{Mittelkamm} \cdot \left(1,58 \cdot F_{Auflast} \cdot \mu + 416 \cdot \frac{h_{Zange} \cdot t_{Mittelkamm}}{b_{Mittelholz}} \right)$$

Wiederbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Mittelkamm,2}$ 52200 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{H,Mittelkamm,2} = 1,70 \cdot C_{H,Mittelkamm,1}$$

Steifigkeiten aus der Gespärrebene

Die Berechnung erfolgt unter Vernachlässigung des Lastausbreitungswinkels (keine kontinuierliche Lagerung)

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Mittelkamm,1}$ 43400 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Mittelkamm,1} = E_{90,mean} \cdot \frac{h_{Zange} \cdot h_{Mittelholz}}{2 \cdot (b_{Zange} - t_{Mittelkamm}) + b_{Mittelholz}}$$

Wiederbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

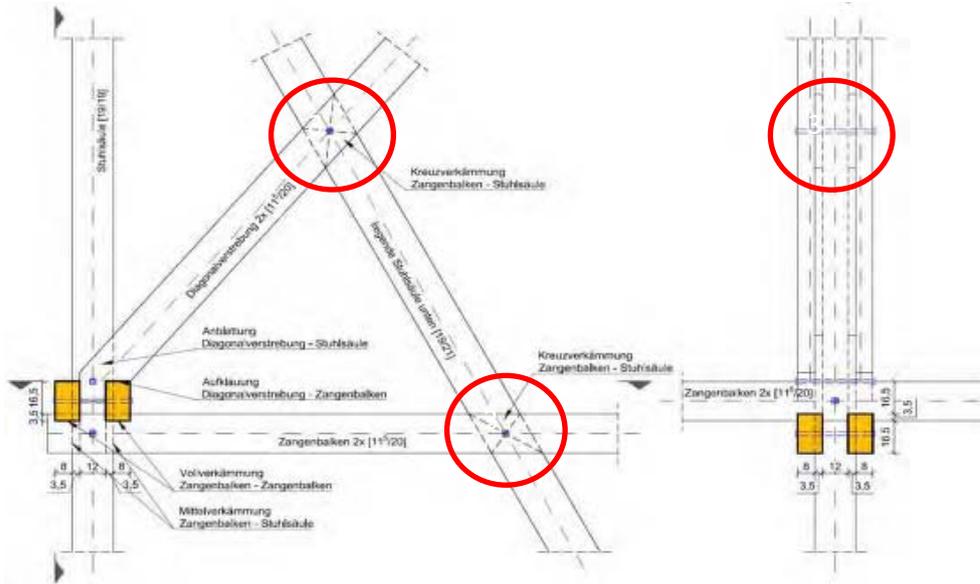
$C_{V,Mittelkamm,2}$ 73800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Mittelkamm,2} = 1,70 \cdot C_{V,Mittelkamm,1}$$

Anmerkung: die Steifigkeit aus der Gespärrebene wird für die Modellbildung nicht benötigt!

OST/WEST_Steifigkeit Kreuzkamm

Anschluss Zangenbalken/Diagonalverstrebung - liegende Stuhlsäule/Strebekamm



Emoduln

$E_{90,mean}$ 400 N/mm²

Geometrieparameter des Anschlusses

$n_{Kreuzkamm}$ 2 Anzahl

$t_{Kreuzkamm}$ 35 mm

h_{Zange} 200 mm

b_{Zange} 115 mm

$h_{Mittelholz}$ 190 mm

$b_{Mittelholz}$ 190 mm

Es handelt sich hierbei sozusagen um eine zwei-schnittige Kreuzkammverbindung

Steifigkeiten in Zangenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Kreuzkamm,1}$ 37100 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{H,Kreuzkamm,1} = 530 \cdot t_{Kreuzkamm}$$

Wiederbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Kreuzkamm,2}$ 92800 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{H,Kreuzkamm,2} = 2,50 \cdot C_{H,Kreuzkamm,1}$$

Steifigkeiten aus der Gespärreebene

Die Berechnung erfolgt unter Vernachlässigung des Lastausbreitungswinkels (keine kontinuierliche Lagerung)

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Kreuzkamm,1}$ 43400 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Kreuzkamm,1} = E_{90,mean} \cdot \frac{h_{Zange} \cdot h_{Mittelholz}}{2 \cdot (b_{Zange} - t_{Kreuzkamm}) + b_{Mittelholz}}$$

Wiederbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

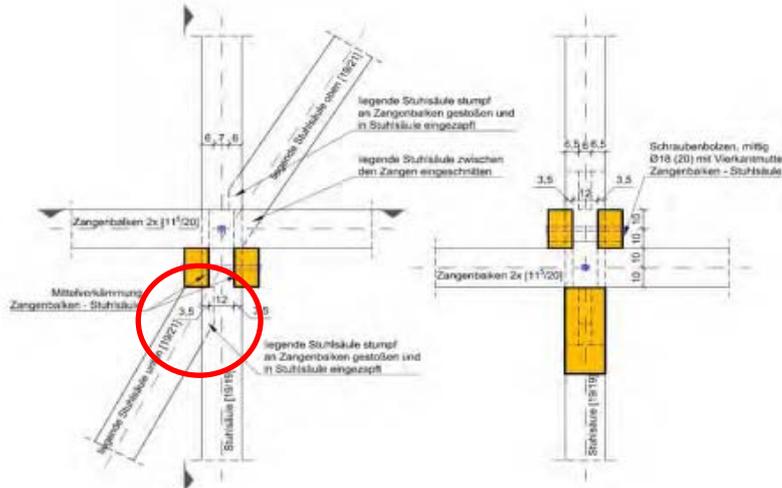
$C_{V,Kreuzkamm,2}$ 108500 N/mm (\cong kN/m)

$$C_{V,Kreuzkamm,2} = 2,50 \cdot C_{V,Kreuzkamm,1}$$

Anmerkung: die Steifigkeit aus der Gespärreebene wird für die Modellbildung nicht benötigt!

OST/WEST_Steifigkeit schräger, abgestirnter Zapfen (TYP 1)

Anschluss liegende Stuhlsäule unten - Hängestuhlsäule


Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	3164 N/mm ²

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cdot \cos^3 \alpha}$$

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	70 mm
b_{netto}	120 mm

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

Strebeholz

b_{Strebe}	190 mm
h_{Strebe}	210 mm
b_{Zapfen}	60 mm
t_{Zapfen}	60 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	28 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	1,583 -
m	3,728 -

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Zapfen}$	137700 N/mm (\cong kN/m)
----------------	-----------------------------

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \cdot \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

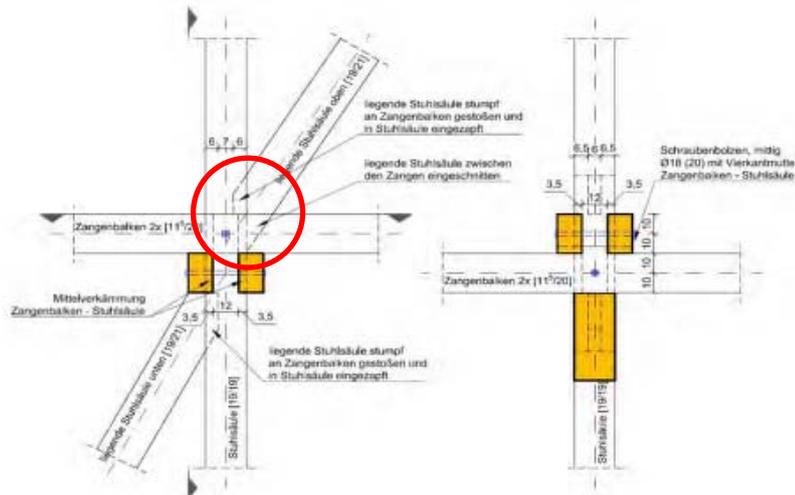
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Zapfen}$	78100 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

OST/WEST_Steifigkeit schräger, abgestirnter Zapfen (TYP 2)

Anschluss liegende Stuhlsäule oben - Hängestuhlsäule



Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	2365 N/mm ²

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	70 mm
b_{netto}	120 mm

Strebeholz

b_{Strebe}	190 mm
h_{Strebe}	210 mm
b_{Zapfen}	60 mm
t_{Zapfen}	60 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	32 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	1,583 -
m	3,302 -

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cos^3 \alpha}$$

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Zapfen}$	108300 N/mm ($\cong kN/m$)
----------------	------------------------------

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

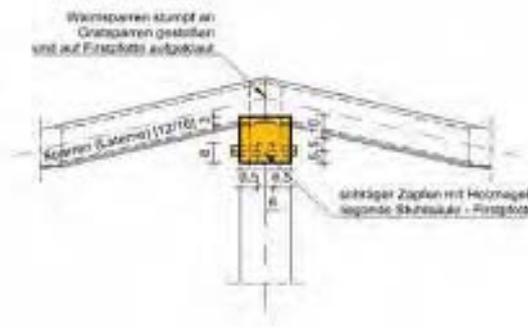
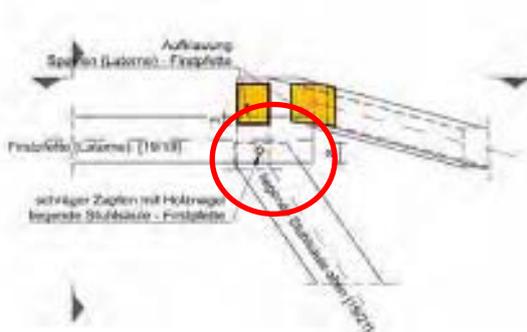
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Zapfen}$	71400 N/mm ($\cong kN/m$)
----------------	-----------------------------

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \varphi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \varphi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

OST/WEST_Steifigkeit schräger, abgestirnter Zapfen (TYP 3)

Anschluss liegende Stuhlsäule oben - Firstpfette Laterne


Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	651 N/mm ²

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	70 mm
b_{netto}	120 mm

Strebeholz

b_{Strebe}	190 mm
h_{Strebe}	210 mm
b_{Zapfen}	60 mm
t_{Zapfen}	80 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	58 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	1,583 -
m	2,064 -

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cdot \cos^3 \alpha}$$

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$$C_{H,Zapfen} = 44500 \text{ N/mm } (\approx \text{kN/m})$$

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

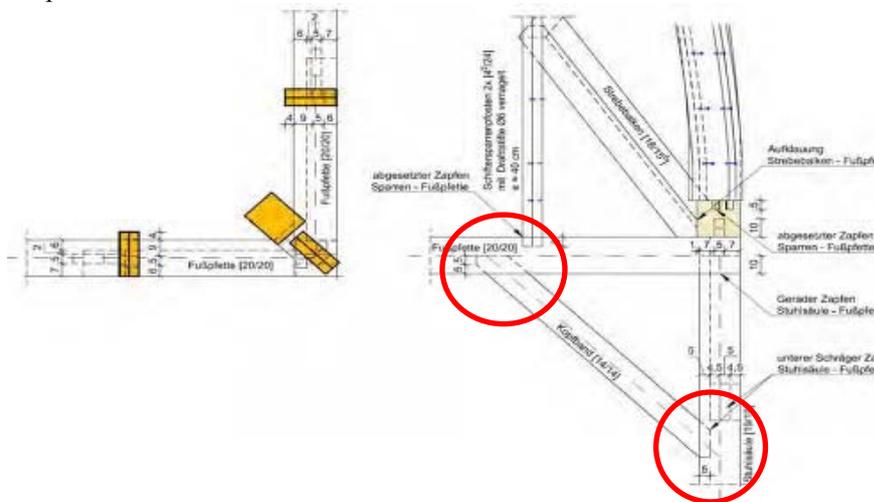
Erstbelastungsfedersteifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$$C_{V,Zapfen} = 51600 \text{ N/mm } (\approx \text{kN/m})$$

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

Anmerkungen: Der Holznagel dient nur der Lagesicherung und wurde bei der Ermittlung der Anschlusssteifigkeit vernachlässigt.

OST/WEST_Steiifigkeit Kopfbandzapfen (TYP 4) Kopfbandanschluss



Emoduln

$E_{0,mean}$	12000 N/mm ²
$E_{90,mean}$	400 N/mm ²
E_{α}	1095 N/mm ²

$$E_{\alpha} = \frac{E_{0,mean} \cdot E_{90,mean}}{E_{0,mean} \sin^3 \alpha + E_{90,mean} \cos^3 \alpha}$$

Schwellenholz

$b_{Schwelle}$	190 mm
$h_{Schwelle}$	190 mm
$b_{Zapfenloch}$	60 mm
b_{netto}	80 mm

$$b_{netto} = b_{Schwelle} - b_{Zapfenloch}$$

Strebeholz

b_{Strebe}	140 mm
h_{Strebe}	140 mm
b_{Zapfen}	50 mm
t_{Zapfen}	50 mm

Winkelsituation

Anschlussw. α	45 °
Ausbreitungsw. ϕ	45 °

$$k = \frac{h_{Schwelle}}{b_{netto}}$$

Verhältniszahlen/Hilfswerte

k	2,375 -
m	2,475 -

$$m = \frac{h_{Strebe} / \sin \alpha}{b_{netto}}$$

Steiifigkeiten parallel zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteiifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{H,Zapfen}$	54000 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{H,Zapfen} = \frac{t_{Zapfen} \cdot b_{Zapfen} \cdot E_{\alpha}}{h_{Strebe} \sin \alpha} \cdot \left(0,86 \cdot \frac{h_{Strebe}}{2 \cdot t_{Zapfen} \cdot \sin \alpha} + 2,20 \right)$$

Steiifigkeiten senkrecht zur Schwellenlängsrichtung

Erstbelastungsfedersteiifigkeit (auf -2 Stellen gerundet)

$C_{V,Zapfen}$	29900 N/mm (\cong kN/m)
----------------	----------------------------

$$C_{V,Zapfen} = \frac{2 \cdot \tan \phi}{\ln \left(2 \cdot \frac{k}{m} \cdot \tan \phi + 1 \right)} \cdot \left(\frac{b_{netto}}{2} \cdot E_{90,mean} \right)$$

ANHANG E WINDLASTBERECHNUNG

Für die Ermittlung der Windbelastung auf das Hauptkuppeldachtragwerk wurde das Berechnungsprogramm *ABIS-Windlastberechnung Version 9.0.0.2* verwendet. Die Software erlaubt eine einfache und schnelle Ermittlung der Windbelastung für unterschiedliche Dachtragwerksformen auf Basis der ÖNORM EN/B 1991-1-4. Aufgrund der Kuppelgestalt wurde die Windlastberechnung separat für die **Kuppel** (vereinfachte Berechnung als zylinderförmiges Dach mit vier unterschiedlichen Anströmrichtungen) und für das **Laternendach** (flachgeneigtes Walmdach) durchgeführt⁴⁵. Die Windlasten werden in *ABIS-Windlastberechnung* gemäß den Bestimmungen des Eurocodes für die einzelnen Windlastintensitätsbereiche (A, B, C,...) bestimmt. Die Windlasten entsprechend der Bereichseinteilung laut Norm auf das vorliegende Kuppeldachtragwerk zu applizieren, würde einen enormen Bearbeitungsaufwand in der Lastaufstellung bedeuten. Aus diesem Grund wurden die Windlasten im Widerspruch zum Eurocode approximiert als bereichsflächengewichteter Mittelwert für jede Dachfläche berechnet. Durch diese gewählte Methodik konnte die Anzahl der zu untersuchenden Windlastfälle auf acht Laststellungen reduziert werden und die Windlasten infolge der einzelnen Anströmrichtungen sind wesentlich leichter nachvollziehbar. Nach Meinung des Verfassers dieser Masterarbeit liefert dieses Vereinfachungsverfahren hinreichend genaue, approximierte Windlasten für jede einzelne Dachfläche. Die flächengewichtete Mittelwertbildung wurde mittels Tabellenkalkulation durchgeführt und sollte mithilfe der Skizzendarstellung des Kuppeldaches sehr einfach nachvollzogen werden können. Die Ergebnisse der Windlastberechnung wurden bereits in Abb. 6.10 übersichtlich zusammengestellt und sind in den Ausdrucksprotokollen in ANHANG F anhand der Lastfallnummern LF 401 bis LF 408 erkennbar.

Auf den nachfolgenden Seiten ist die Windlastermittlung in Form von Ausdruckprotokollen aus dem Programm *ABIS-Windlastberechnung* dargestellt.

⁴⁵ Auf die genaue Untersuchung der sicherlich auftretenden Windverwirbelungen im Übergangsbereich Kuppel-Laterne wurde im Rahmen dieser Masterarbeit bewusst verzichtet. Ebenso wurden windexponierte Dachaufbauten im Bereich der Laterne (Sendeanlagen, Wettermessenrichtungen, Zierelemente,...) bei der Windlastberechnung vernachlässigt.

ABIS Softwareentwicklung
 A-8010 G R A Z , Rechbauerstraße 22
 Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
 Windlast Kuppel (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung -> Belastung Nord/Süd)

Gesellschaft mbH
 Tel.: (0316) 83-13-61

--- Eingabedaten ---

Norm : ÖNORM B 1991-1-4
 Rechenverfahren : Berechnung für Geschoßbau
 Geländekategorie : IV
 Basiswindgeschwindigkeit in m/s : 20,40
 (Steiermark, Graz)

Grundriss

Schnitt

Einheiten in Meter
 Wandbereiche A, B und C bei Wind von vorne (im Grundriss eingezeichnet)
 Wandbereiche A und B bei Wind von links (im Schnitt eingezeichnet)

Gebäudeöffnungen in m ² :	vorne	hinten	links	rechts
	0,00	0,00	0,00	0,00

Logarithm. Dämpfungskoeff. :	0,005	0,020	0,005
------------------------------	-------	-------	-------

--- Ergebnisse ---

Mittlerer Staudruck qm : 0,126 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26,00 m)
 Böengeschwindigkeitsdruck qp : 0,449 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26,00 m)
 Innendruckbeiwert cpi ist 0,2 bzw. -0,3

ABIS - Windlastberechnung Seite: 1

ABIS Softwareentwicklung
 A-8010 G R A Z , Rechbauerstraße 22
 Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
 Windlast Kuppel (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung -> Belastung Nord/Süd)

Gesellschaft mbH
 Tel.: (0316) 83-13-61

Windbelastung w der Wände
(w_Druck (positiv) und w_Sog (negativ) in kN/m²)

Wind parallel zur Zyl.achse (von vorne), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	14,5	26,0	cpe
Luvwand :	0,40	0,49	0,80
Leewand :	-0,19	-0,23	-0,32
Windpar. Wand (A) :	-0,49	-0,61	-1,16
Windpar. Wand (B) :	-0,36	-0,44	-0,78
Windpar. Wand (C) :	-0,23	-0,29	-0,44

Wind parallel zur Zyl.achse (von vorne), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	14,5	26,0	cpe
Luvwand :	0,47	0,58	1,00
Leewand :	-0,22	-0,27	-0,40
Windpar. Wand (A) :	-0,60	-0,74	-1,44
Windpar. Wand (B) :	-0,43	-0,53	-0,97
Windpar. Wand (C) :	-0,27	-0,33	-0,54

Wind normal zur Zyl.achse (seitlich), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	17,0	26,0	cpe
Luvwand :	0,42	0,49	0,80
Leewand :	-0,22	-0,26	-0,37
Windpar. Wand (A) :	-0,51	-0,60	-1,14
Windpar. Wand (B) :	-0,36	-0,45	-0,80

Wind normal zur Zyl.achse (seitlich), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	17,0	26,0	cpe
Luvwand :	0,50	0,58	1,00
Leewand :	-0,25	-0,30	-0,46
Windpar. Wand (A) :	-0,62	-0,73	-1,42
Windpar. Wand (B) :	-0,46	-0,54	-1,00

ABIS - Windlastberechnung Seite: 2

ABIS Softwareentwicklung
 A-8010 G R A Z , Rechbauerstraße 22
 Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
 Windlast Kuppel (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung -> Belastung Nord/Süd)

Gesellschaft mbH
 Tel.: (0316) 83-13-61

Luvwand

Leewand

Illustration zu Wind von vorne bei mittlerer Belastung
 Einheiten in kN/m² (x-Achse) bzw. Meter (y-Achse)

Windbelastung w des Daches

Wind normal zur Zyl.achse (seitlich) :	Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe
Mittlere Belastung (A = Luv) :	0,42	0,64		
Mittlere Belastung (B = Scheitel) :	-0,60	-1,14		
Mittlere Belastung (C = Lee) :	-0,27	-0,40		
Örtliche Belastung (A = Luv) :	0,49	0,80		
Örtliche Belastung (B = Scheitel) :	-0,73	-1,42		
Örtliche Belastung (C = Lee) :	-0,31	-0,50		

Gesamtwindbelastung Fw [kN]

Windrichtung parallel zur Zyl.achse (von vorne) :	133,8	mit cf = 1,12, cs_cd = 0,85
Windrichtung normal zur Zyl.achse (seitlich) :	178,1	mit cf = 1,17, cs_cd = 0,85

cf Kraftbeiwert für Gebäude mit Dach, cs_cd Strukturbeiwert

ABIS - Windlastberechnung Seite: 3

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

--- Eingabedaten ---

Norm : ÖNORM B 1991-1-4
Rechenverfahren : Berechnung für Geschoßbau
Geländekategorie : IV
Basiswindgeschwindigkeit in m/s : 20.40
(Steiermark, Graz)

Einheiten in Meter
Wandbereiche A und B bei Wind von vorne (im Grundriss eingezeichnet)
Wandbereiche A, B und C bei Wind von links (im Schnitt eingezeichnet)

Gebäudeöffnungen in m ² :	vorne	hinten	links	rechts
	0.00	0.00	0.00	0.00

Logarithm. Dämpfungskoeffizient : 0.005 0.020 0.005

--- Ergebnisse ---

Mittlerer Staudruck qm : 0.126 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26.00 m)
Böengeschwindigkeitsdruck qp : 0.449 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26.00 m)
Innendruckbeiwert cpi ist 0.2 bzw. -0.3

ABIS - Windlastberechnung Seite: 1

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Windbelastung w der Wände
(w_Druck (positiv) und w_Sog (negativ) in kN/m²)

Wind parallel zum First (von vorne), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	17.0	26.0	cpe
Luvwand :	0.42	0.49	0.80
Leeward :	-0.22	-0.26	-0.37
Windpar. Wand (A) :	-0.51	-0.60	-1.14
Windpar. Wand (B) :	-0.38	-0.45	-0.80

Wind parallel zum First (von vorne), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	17.0	26.0	cpe
Luvwand :	0.50	0.58	1.00
Leeward :	-0.25	-0.30	-0.46
Windpar. Wand (A) :	-0.62	-0.73	-1.42
Windpar. Wand (B) :	-0.46	-0.54	-1.00

Wind normal zum First (seitlich), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	14.8	26.0	cpe
Luvwand :	0.40	0.49	0.80
Leeward :	-0.19	-0.23	-0.32
Windpar. Wand (A) :	-0.49	-0.61	-1.16
Windpar. Wand (B) :	-0.36	-0.44	-0.78
Windpar. Wand (C) :	-0.23	-0.29	-0.44

Wind normal zum First (seitlich), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	14.8	26.0	cpe
Luvwand :	0.47	0.58	1.00
Leeward :	-0.22	-0.27	-0.40
Windpar. Wand (A) :	-0.60	-0.74	-1.44
Windpar. Wand (B) :	-0.43	-0.53	-0.97
Windpar. Wand (C) :	-0.27	-0.33	-0.54

ABIS - Windlastberechnung Seite: 2

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Illustration zu Wind von vorne bei mittlerer Belastung
Einheiten in kN/m² (x-Achse) bzw. Meter (y-Achse)

Windbelastung w des Daches
(Dachneigung Alpha = 37.4°)

Wind parallel zum First (von vorne) :

	Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe
Mittlere Belastung (F) :	-0.58	-1.10		
Mittlere Belastung (G) :	-0.72	-1.40		
Mittlere Belastung (H) :	-0.47	-0.85		
Mittlere Belastung (I) :	-0.31	-0.50		
Örtliche Belastung (F) :	-0.76	-1.50		
Örtliche Belastung (G) :	-0.89	-2.00		
Örtliche Belastung (H) :	-0.63	-1.20		
Örtliche Belastung (I) :	-0.31	-0.50		

ABIS - Windlastberechnung Seite: 3

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Wind normal zum First (seitlich) :

	Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe
Mittlere Belastung (F) :	-0.20	-0.25	0.45	0.70
Mittlere Belastung (G) :	-0.20	-0.25	0.45	0.70
Mittlere Belastung (H) :	-0.14	-0.10	0.36	0.50
Mittlere Belastung (I) :	-0.22	-0.30	0.13	0.00
Mittlere Belastung (J) :	-0.27	-0.40	0.13	0.00
Örtliche Belastung (F) :	-0.43	-0.76	0.45	0.70
Örtliche Belastung (G) :	-0.43	-0.76	0.45	0.70
Örtliche Belastung (H) :	-0.14	-0.10	0.36	0.50
Örtliche Belastung (I) :	-0.22	-0.30	0.13	0.00
Örtliche Belastung (J) :	-0.27	-0.40	0.13	0.00

Lastfall 3

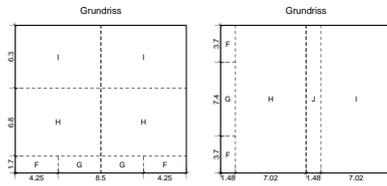
	zugeh. cpe	Lastfall 4	zugeh. cpe	
Mittlere Belastung (F) :	-0.20	-0.25	0.45	0.70
Mittlere Belastung (G) :	-0.20	-0.25	0.45	0.70
Mittlere Belastung (H) :	-0.14	-0.10	0.36	0.50
Mittlere Belastung (I) :	0.13	0.00	-0.22	-0.30
Mittlere Belastung (J) :	0.13	0.00	-0.27	-0.40
Örtliche Belastung (F) :	-0.43	-0.76	0.45	0.70
Örtliche Belastung (G) :	-0.43	-0.76	0.45	0.70
Örtliche Belastung (H) :	-0.14	-0.10	0.36	0.50
Örtliche Belastung (I) :	0.13	0.00	-0.22	-0.30
Örtliche Belastung (J) :	0.13	0.00	-0.27	-0.40

Dachüberstände :

	zugeh. cpe	
Wind von vorne (F) :	-1.12	-2.50
Wind von vorne (G) :	-1.35	-3.00
Wind seitlich (F) :	-0.79	-1.76
Wind seitlich (G) :	-0.78	-1.76

ABIS - Windlastberechnung Seite: 4

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung)



Dachbereiche (Einheiten in Meter):
Linke Zeichnung bei Wind von vorne, rechte Zeichnung bei Wind von links

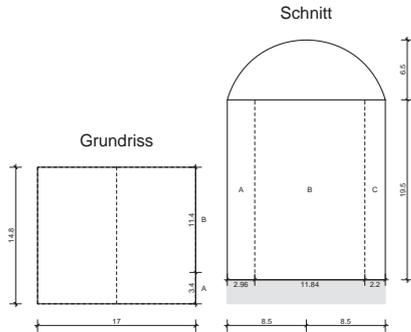
Gesamtwindbelastung F_w [kN]

Windrichtung parallel zum First (von vorne): 151.5 mit $c_f = 1.17$, $c_{s,cd} = 0.85$
 Windrichtung normal zum First (seitlich): 146.7 mit $c_f = 1.12$, $c_{s,cd} = 0.85$
 c_f Kraftbeiwert für Gebäude mit Dach, $c_{s,cd}$ Strukturbeiwert

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Kuppel (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung -> Belastung Ost/West)

--- Eingabedaten ---

Norm : ÖNORM B 1991-1-4
Rechenverfahren : Berechnung für Geschoßbau
Geländekategorie : IV
Basiswindgeschwindigkeit in m/s : 20,40
(Steiermark, Graz)



Einheiten in Meter
Wandbereiche A und B bei Wind von vorne (im Grundriss eingezeichnet)
Wandbereiche A, B und C bei Wind von links (im Schnitt eingezeichnet)

Gebäudeöffnungen in m ² :	vorne	hinten	links	rechts
	0,00	0,00	0,00	0,00

Logarithm. Dämpfungskoeff. :	0,005	0,020	0,005
------------------------------	-------	-------	-------

--- Ergebnisse ---

Mittlerer Staudruck q_m : 0,126 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26,00 m)
Böengeschwindigkeitsdruck q_p : 0,449 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26,00 m)
Innendruckbeiwert c_{pi} ist 0,2 bzw. -0,3

ABIS - Windlastberechnung

Seite: 1

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Kuppel (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung -> Belastung Ost/West)

Windbelastung w der Wände
(w_{Druck} (positiv) und w_{Sog} (negativ) in kN/m²)

Wind parallel zur Zyl.achse (von vorne), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	17,0	26,0	c _{pe}
Luvwand :	0,42	0,49	0,80
Leeward :	-0,22	-0,26	-0,37
Windpar. Wand (A) :	-0,51	-0,60	-1,14
Windpar. Wand (B) :	-0,38	-0,45	-0,80

Wind parallel zur Zyl.achse (von vorne), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	17,0	26,0	c _{pe}
Luvwand :	0,50	0,58	1,00
Leeward :	-0,25	-0,30	-0,46
Windpar. Wand (A) :	-0,62	-0,73	-1,42
Windpar. Wand (B) :	-0,46	-0,54	-1,00

Wind normal zur Zyl.achse (seitlich), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	14,8	26,0	c _{pe}
Luvwand :	0,40	0,49	0,80
Leeward :	-0,19	-0,23	-0,32
Windpar. Wand (A) :	-0,49	-0,61	-1,16
Windpar. Wand (B) :	-0,36	-0,44	-0,78
Windpar. Wand (C) :	-0,23	-0,29	-0,44

Wind normal zur Zyl.achse (seitlich), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	14,8	26,0	c _{pe}
Luvwand :	0,47	0,58	1,00
Leeward :	-0,22	-0,27	-0,40
Windpar. Wand (A) :	-0,60	-0,74	-1,44
Windpar. Wand (B) :	-0,43	-0,53	-0,97
Windpar. Wand (C) :	-0,27	-0,33	-0,54

ABIS - Windlastberechnung

Seite: 2

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Kuppel (Zylinderachse // zur Nord/Süd-Richtung -> Belastung Ost/West)

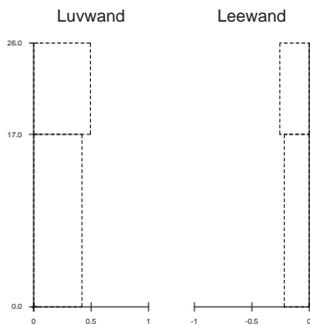


Illustration zu Wind von vorne bei mittlerer Belastung
Einheiten in kN/m² (x-Achse) bzw. Meter (y-Achse)

Windbelastung w des Daches

Wind normal zur Zyl.achse (seitlich) :	Lastfall 1	zugeh. c _{pe}	Lastfall 2	zugeh. c _{pe}
Mittlere Belastung (A = Luv) :	0,35	0,49		
Mittlere Belastung (B = Scheitel) :	-0,58	-1,08		
Mittlere Belastung (C = Lee) :	-0,27	-0,40		
Örtliche Belastung (A = Luv) :	0,41	0,61		
Örtliche Belastung (B = Scheitel) :	-0,70	-1,35		
Örtliche Belastung (C = Lee) :	-0,31	-0,50		

Gesamtwindbelastung F_w [kN]

Windrichtung parallel zur Zyl.achse (von vorne) : 163,3 mit c_f = 1,17, c_{s_cd} = 0,85
Windrichtung normal zur Zyl.achse (seitlich) : 146,7 mit c_f = 1,12, c_{s_cd} = 0,85

c_f Kraftbeiwert für Gebäude mit Dach, c_{s_cd} Strukturbeiwert

ABIS - Windlastberechnung

Seite: 3

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 G R A Z, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

--- Eingabedaten ---

Norm : ÖNORM B 1991-1-4
Rechenverfahren : Berechnung für Geschoßbau
Geländekategorie : IV
Basiswindgeschwindigkeit in m/s : 20.40
(Steiermark, Graz)

Einheiten in Meter
Wandbereiche A, B und C bei Wind von vorne (im Grundriss eingezeichnet)
Wandbereiche A und B bei Wind von links (im Schnitt eingezeichnet)

Gebäudeöffnungen in m ² :	vorne	hinten	links	rechts
	0.00	0.00	0.00	0.00

Logarithm. Dämpfungskoeffizient : 0.005 0.020 0.005

--- Ergebnisse ---

Mittlerer Staudruck qm : 0.126 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26.00 m)
Böengeschwindigkeitsdruck qp : 0.449 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26.00 m)
Innendruckbeiwert cpi ist 0.2 bzw. -0.3

ABIS - Windlastberechnung Seite: 1

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 G R A Z, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Windbelastung w der Wände
(w_Druck (positiv) und w_Sog (negativ) in kN/m²)

Wind parallel zum First (von vorne), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	14.8	26.0	cpe
Luvwind :	0.40	0.49	0.80
Leeward :	-0.19	-0.23	-0.32
Windpar. Wand (A) :	-0.49	-0.61	-1.16
Windpar. Wand (B) :	-0.36	-0.44	-0.78
Windpar. Wand (C) :	-0.23	-0.29	-0.44

Wind parallel zum First (von vorne), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	14.8	26.0	cpe
Luvwind :	0.47	0.58	1.00
Leeward :	-0.22	-0.27	-0.40
Windpar. Wand (A) :	-0.60	-0.74	-1.44
Windpar. Wand (B) :	-0.43	-0.53	-0.97
Windpar. Wand (C) :	-0.27	-0.33	-0.54

Wind normal zum First (seitlich), mittlere Belastung :

bis Höhe in m :	17.0	26.0	cpe
Luvwind :	0.42	0.49	0.80
Leeward :	-0.22	-0.26	-0.37
Windpar. Wand (A) :	-0.51	-0.60	-1.14
Windpar. Wand (B) :	-0.38	-0.45	-0.80

Wind normal zum First (seitlich), örtliche Belastung :

bis Höhe in m :	17.0	26.0	cpe
Luvwind :	0.50	0.58	1.00
Leeward :	-0.25	-0.30	-0.46
Windpar. Wand (A) :	-0.62	-0.73	-1.42
Windpar. Wand (B) :	-0.46	-0.54	-1.00

ABIS - Windlastberechnung Seite: 2

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 G R A Z, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Illustration zu Wind von vorne bei mittlerer Belastung
Einheiten in kN/m² (x-Achse) bzw. Meter (y-Achse)

Windbelastung w des Daches
(Dachneigung Alpha = 41.3°)

Wind parallel zum First (von vorne) :	Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe
Mittlere Belastung (F) :	-0.58	-1.10		
Mittlere Belastung (G) :	-0.72	-1.40		
Mittlere Belastung (H) :	-0.48	-0.98		
Mittlere Belastung (I) :	-0.31	-0.50		
Örtliche Belastung (F) :	-0.76	-1.50		
Örtliche Belastung (G) :	-0.99	-2.00		
Örtliche Belastung (H) :	-0.63	-1.20		
Örtliche Belastung (I) :	-0.31	-0.50		

ABIS - Windlastberechnung Seite: 3

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 G R A Z, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung)

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Wind normal zum First (seitlich) :

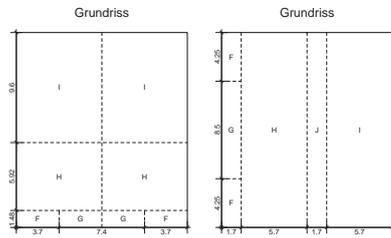
Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe	
Mittlere Belastung (F) :	-0.15	-0.12	0.45	0.70
Mittlere Belastung (G) :	-0.15	-0.12	0.45	0.70
Mittlere Belastung (H) :	-0.11	-0.05	0.38	0.55
Mittlere Belastung (I) :	-0.20	-0.25	0.13	0.00
Mittlere Belastung (J) :	-0.25	-0.35	0.13	0.00
Örtliche Belastung (F) :	-0.26	-0.37	0.45	0.70
Örtliche Belastung (G) :	-0.26	-0.37	0.45	0.70
Örtliche Belastung (H) :	-0.11	-0.05	0.38	0.55
Örtliche Belastung (I) :	-0.20	-0.25	0.13	0.00
Örtliche Belastung (J) :	-0.25	-0.35	0.13	0.00

Dachüberstände :

Wind von vorne (F) :	Wind von vorne (G) :	Wind seitlich (F) :	Wind seitlich (G) :
-1.12	-1.35	-0.62	-0.62
-2.50	-3.00	-1.37	-1.37

ABIS - Windlastberechnung Seite: 4

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rehbauerstraße 22
Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rehbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast kuppeläquivalentes Satteldach (Zylinderachse // zur Ost/West-Richtung)



Dachbereiche (Einheiten in Meter):
Linke Zeichnung bei Wind von vorne, rechte Zeichnung bei Wind von links

Gesamtwindbelastung F_w [kN]

Windrichtung parallel zum First (von vorne) : 123.1 mit $c_f = 1.12$, $c_{s,cd} = 0.85$
 Windrichtung normal zum First (seitlich) : 178.1 mit $c_f = 1.17$, $c_{s,cd} = 0.85$
 c_d Kraftbeiwert für Gebäude mit Dach, $c_{s,cd}$ Strukturbeiwert

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Laternenwalddach

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

--- Eingabedaten ---

Norm : ÖNORM B 1991-1-4
Rechenverfahren : Berechnung für Geschosbau
Geländekategorie : IV
Basiswindgeschwindigkeit in m/s : 20,40
(Steiermark, Graz)

Schnitt

Grundriss

Einheiten in Meter
Wandbereiche A, B und C bei Wind von vorne (im Grundriss eingezeichnet)
Wandbereiche A und B bei Wind von links (im Schnitt eingezeichnet)

Gebäudeöffnungen in m ² :	vorne	hinten	links	rechts
	0,00	0,00	0,00	0,00

Logarithm. Dämpfungskoeff. : 0,005 0,020 0,005

--- Ergebnisse ---

Mittlerer Staudruck qm : 0,129 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26,80 m)
 Böengeschwindigkeitsdruck qp : 0,454 kN/m² (bei der Gesamthöhe von 26,80 m)
 Innendruckbeiwert cpi ist 0,2 bzw. -0,3

ABIS - Windlastberechnung Seite: 1

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Laternenwalddach

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Windbelastung w der Wände
(w_Druck (positiv) und w_Sog (negativ) in kN/m²)

Wind parallel zum First (von vorne), mittlere Belastung :
 bis Höhe in m : 6,1 12,2 18,3 19,9 26,0 cpe
 Luvwind : 0,40 0,40 0,43 0,45 0,49 0,80
 Leeward : -0,23 -0,23 -0,25 -0,25 -0,28 -0,43
 Windpar. Wand (A) : -0,53 -0,53 -0,57 -0,59 -0,65 -1,26
 Windpar. Wand (B) : -0,39 -0,39 -0,42 -0,43 -0,48 -0,86
 Windpar. Wand (C) : -0,24 -0,24 -0,26 -0,27 -0,30 -0,47

Wind parallel zum First (von vorne), örtliche Belastung :
 bis Höhe in m : 6,1 12,2 18,3 19,9 26,0 cpe
 Luvwind : 0,47 0,47 0,51 0,53 0,58 1,00
 Leeward : -0,27 -0,27 -0,29 -0,30 -0,33 -0,53
 Windpar. Wand (A) : -0,65 -0,65 -0,70 -0,72 -0,80 -1,57
 Windpar. Wand (B) : -0,47 -0,47 -0,50 -0,52 -0,57 -1,08
 Windpar. Wand (C) : -0,29 -0,29 -0,31 -0,32 -0,35 -0,59

Wind normal zum First (seitlich), mittlere Belastung :
 bis Höhe in m : 8,3 16,6 17,7 26,0 cpe
 Luvwind : 0,40 0,42 0,43 0,49 0,80
 Leeward : -0,28 -0,29 -0,29 -0,34 -0,56
 Windpar. Wand (A) : -0,54 -0,57 -0,58 -0,67 -1,30
 Windpar. Wand (B) : -0,42 -0,44 -0,45 -0,52 -0,97

Wind normal zum First (seitlich), örtliche Belastung :
 bis Höhe in m : 8,3 16,6 17,7 26,0 cpe
 Luvwind : 0,47 0,49 0,50 0,58 1,00
 Leeward : -0,33 -0,34 -0,36 -0,40 -0,70
 Windpar. Wand (A) : -0,66 -0,69 -0,71 -0,82 -1,62
 Windpar. Wand (B) : -0,51 -0,53 -0,55 -0,63 -1,21

ABIS - Windlastberechnung Seite: 2

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Laternenwalddach

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Luvwind

Leeward

Illustration zu Wind von vorne bei mittlerer Belastung
Einheiten in kN/m² (x-Achse) bzw. Meter (y-Achse)

Windbelastung w des Daches
(Dachneigung Alpha_vorne = 16,8°, Alpha_seitlich = 14,7°)

Wind parallel zum First (von vorne) :	Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe
Mittlere Belastung (F) :	-0,48	-0,85	0,24	0,24
Mittlere Belastung (G) :	-0,44	-0,76	0,25	0,26
Mittlere Belastung (H) :	-0,22	-0,29	0,24	0,22
Mittlere Belastung (I) :	-0,31	-0,49		
Mittlere Belastung (J) :	-0,53	-0,96		
Mittlere Belastung (L) :	-0,73	-1,40		
Mittlere Belastung (M) :	-0,37	-0,62		
Mittlere Belastung (N) :	-0,22	-0,29		
Örtliche Belastung (F) :	-0,97	-1,94	0,24	0,24
Örtliche Belastung (G) :	-0,77	-1,50	0,25	0,26
Örtliche Belastung (H) :	-0,22	-0,29	0,24	0,22
Örtliche Belastung (I) :	-0,31	-0,49		
Örtliche Belastung (J) :	-0,76	-1,46		
Örtliche Belastung (L) :	-1,00	-2,00		
Örtliche Belastung (M) :	-0,64	-1,20		
Örtliche Belastung (N) :	-0,22	-0,29		

ABIS - Windlastberechnung Seite: 3

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rechbauerstraße 22
Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Laternenwalddach

Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Wind normal zum First (seitlich) :

Lastfall 1	zugeh. cpe	Lastfall 2	zugeh. cpe	
Mittlere Belastung (F) :	-0,51	-0,92	0,22	0,19
Mittlere Belastung (G) :	-0,46	-0,81	0,22	0,19
Mittlere Belastung (H) :	-0,23	-0,31	0,22	0,19
Mittlere Belastung (I) :	-0,32	-0,49		
Mittlere Belastung (J) :	-0,54	-0,99		
Mittlere Belastung (K) :	-0,63	-1,18		
Mittlere Belastung (L) :	-0,72	-1,39		
Mittlere Belastung (M) :	-0,36	-0,60		
Örtliche Belastung (F) :	-1,01	-2,02	0,22	0,19
Örtliche Belastung (G) :	-0,78	-1,52	0,22	0,19
Örtliche Belastung (H) :	-0,34	-0,33	0,22	0,19
Örtliche Belastung (I) :	-0,32	-0,49		
Örtliche Belastung (J) :	-0,76	-1,47		
Örtliche Belastung (K) :	-0,98	-1,96		
Örtliche Belastung (L) :	-1,00	-2,00		
Örtliche Belastung (M) :	-0,64	-1,20		

Dachüberstände :

Wind von vorne (F) :	zugeh. cpe
Wind von vorne (F) :	-1,33
Wind von vorne (G) :	-1,13
Wind seitlich (F) :	-1,37
Wind seitlich (G) :	-1,14

Grundriss

Dachbereiche (Einheiten in Meter) :
 Linke Zeichnung bei Wind von vorne, rechte Zeichnung bei Wind von links

ABIS - Windlastberechnung Seite: 4

ABIS Softwareentwicklung
A-8010 GRAZ, Rehbauerstraße 22
Gesellschaft mbH
Tel.: (0316) 83-13-61

Hauptkuppel Alte Technik TU Graz, Rehbauerstraße 12, 8010 Graz
Windlast Laternenwalmdach

Gesamtwindbelastung Fw [kN]

Windrichtung parallel zum First (von vorne) : 68.9 mit $c_f = 1.23$, $c_{s,cd} = 0.89$
Windrichtung normal zum First (seitlich) : 104.3 mit $c_f = 1.36$, $c_{s,cd} = 0.87$

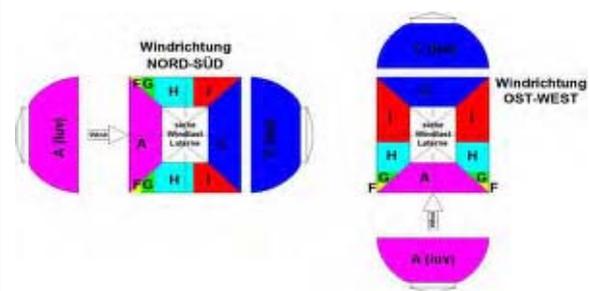
c_f Kraftbeiwert für Gebäude mit Dach, $c_{s,cd}$ Strukturbeiwert

Mittelwertbildung der Windlasten auf das Kuppeldach (zylindrisches Dach)

z	26 m	Höhe über Grundniveau
$q_{p(z)}$	0,449 kN/m ²	Böengeschwindigkeitsdruck
c_{pi} -	-0,3 -	Innensog
c_{pi} +	0,2 -	Innendruck

projizierte Flächeninhalte der einzelne Bereiche

Bereich	WR N-S	WR O-W	
A (=luv)	55,0275	45,4575	m ²
B (=top)	50,6300	50,6300	m ²
C (=lee)	55,0275	45,4575	m ²
F	2,8900	2,1904	m ²
G	8,6700	6,5712	m ²
H	43,4675	36,6959	m ²
I	35,8875	64,5975	m ²


projizierte Flächeninhalte der Dachflächen

Kuppels. N/S	55,0275 m ²
Kuppels. O/W	45,4575 m ²
Gesamt	200,9700 m ²

Vereinfachung:

Für jede Dachfläche wird eine durchschnittliche Windbelastung als gewichtetes Mittel aus den Teilflächen ermittelt!

Windrichtung NORD/SÜD

Bereich	zug. c_{pe}	Lastfall-ID	gew. Mittel	zug. c_{pe}	Lastfall-IS	gew. Mittel	
[-]	[-]	kN/m ²	kN/m ²	[-]	kN/m ²	kN/m ²	
A	0,64	0,20	0,20	0,64	0,42	0,42	N/S-Seite luv
B	-1,14	-0,60	Laterne	-1,14	-0,38	Laterne	Scheitel
C	-0,4	-0,27	-0,27	-0,4	-0,04	-0,04	N/S-Seite lee
F	-1,1	-0,58	-0,44	-1,1	-0,36	-0,21	O/W-Seite, parallel
G	-1,4	-0,72		-1,4	-0,49		
H	-0,85	-0,47		-0,85	-0,25		
I	-0,5	-0,31		-0,5	-0,09		

Windrichtung OST/WEST

Bereich	zug. c_{pe}	Lastfall-ID	gew. Mittel	zug. c_{pe}	Lastfall-IS	gew. Mittel	
[-]	[-]	kN/m ²	kN/m ²	[-]	kN/m ²	kN/m ²	
A	0,49	0,13	0,13	0,49	0,35	0,35	O/W-Seite luv
B	-1,08	-0,57	Laterne	-1,08	-0,35	Laterne	Scheitel
C	-0,4	-0,27	-0,27	-0,4	-0,04	-0,04	O/W-Seite lee
F	-1,1	-0,58	-0,40	-1,1	-0,36	-0,18	N/S-Seite, parallel
G	-1,4	-0,72		-1,4	-0,49		
H	-0,88	-0,48		-0,88	-0,26		
I	-0,5	-0,31		-0,5	-0,09		

IS...Innensog c_{pe} -Werte aus ABIS-Windlastberechnung
 ID...Innendruck

Mittelwertbildung der Windlasten auf das Laternendach (flachgeneigtes Walmdach)

z	26,8 m	Höhe über Grundniveau
q _{p(z)}	0,454 kN/m ²	Böengeschwindigkeitsdruck
c _{pi} -	-0,3 -	Innensog
c _{pi} +	0,2 -	Innendruck

projizierte Flächeninhalte der einzelne Bereiche

Bereich	WR N-S	WR O-W	
F	2,8459	1,4322	m ²
G	3,4445	1,8605	m ²
H	10,9421	4,7898	m ²
I	10,4587	5,1728	m ²
J	3,6852	2,9097	m ²
K	3,0886	0,0000	m ²
L	3,8004	1,8605	m ²
M	4,2821	3,4261	m ²
N	0,0000	11,9459	m ²

projizierte Flächeninhalte der Dachflächen

Walm	8,0825 m ²
Hauptdach	17,2325 m ²
Gesamt	50,6300 m ²

Vereinfachung:
Für jede Dachfläche wird eine durchschnittliche Windbelastung als gewichtetes Mittel aus den Teilflächen ermittelt!

Windrichtung NORD/SÜD

Bereich	zug. c _{pe}	Lastfall-ID	gew. Mittel	zug. c _{pe}	Lastfall-IS	gew. Mittel	
[-]	[-]	kN/m ²	kN/m ²	[-]	kN/m ²	kN/m ²	
F	-0,92	-0,51	-0,32	0,19	0,22	0,22	Hauptdach, luv
G	-0,81	-0,46		0,19	0,22		
H	-0,31	-0,23		0,19	0,22		
I	-0,49	-0,31	-0,42	-0,49	-0,09	-0,19	Walm, parallel
J	-0,99	-0,54		-0,99	-0,31		
K	-1,18	-0,63		-1,18	-0,40		
L	-1,39	-0,72	-0,53	-1,39	-0,49	-0,30	Hauptdach, lee
M	-0,6	-0,36		-0,6	-0,14		

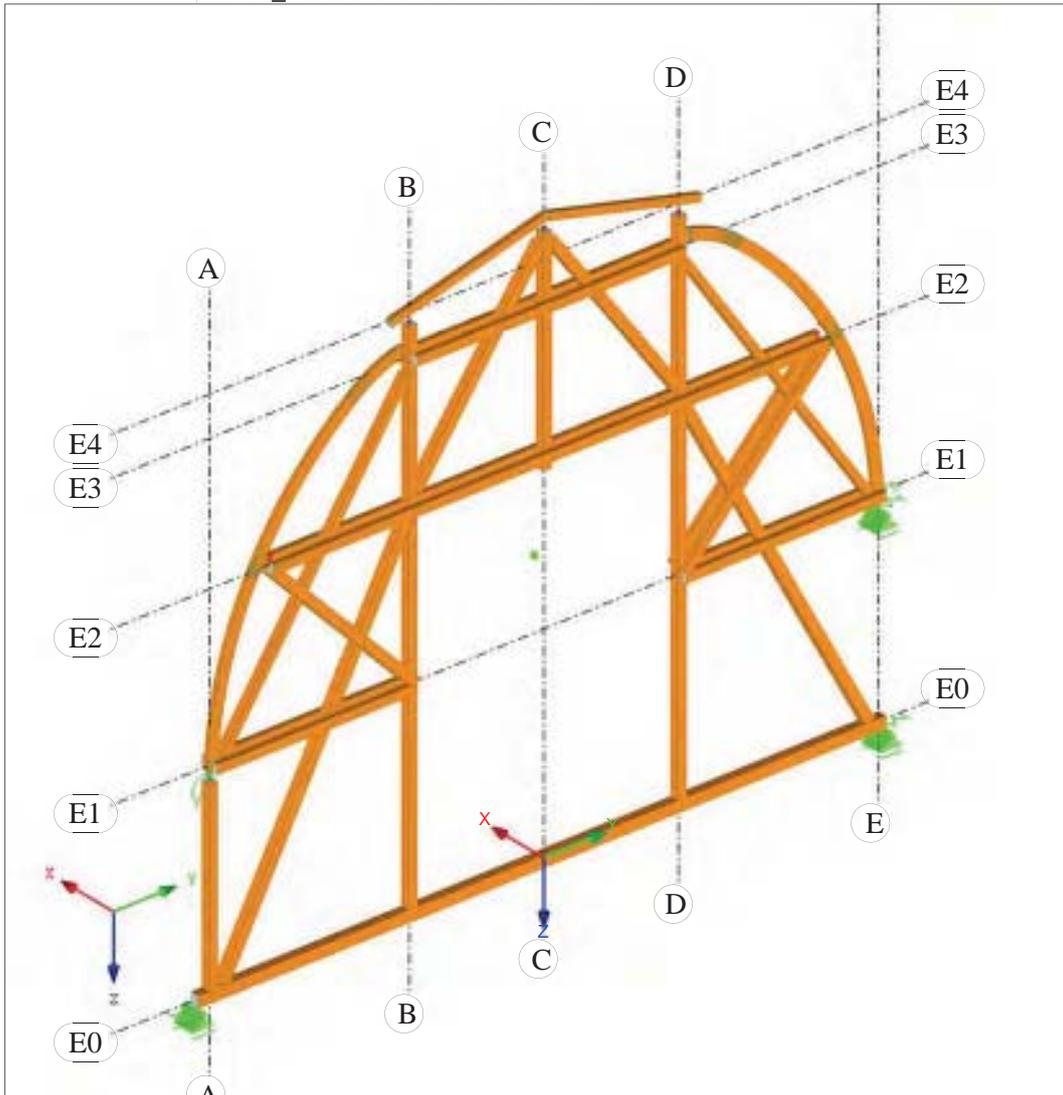
Windrichtung OST/WEST

Bereich	zug. c _{pe}	Lastfall-ID	gew. Mittel	zug. c _{pe}	Lastfall-IS	gew. Mittel	
[-]	[-]	kN/m ²	kN/m ²	[-]	kN/m ²	kN/m ²	
F	-0,85	-0,48	-0,32	0,24	0,25	0,25	Walm, luv
G	-0,76	-0,44		0,26	0,25		
H	-0,29	-0,22		0,24	0,25		
I	-0,49	-0,31	-0,56	-0,49	-0,09	-0,28	Hauptdach, parallel
J	-0,96	-0,53		-0,96	-0,30		
L	-1,40	-0,73		-1,4	-0,50		
M	-0,62	-0,37	-0,23	-0,62	-0,15	-0,03	Walm, lee
N	-0,29	-0,22		-0,29	0,00		

ANHANG F STABTRAGWERKSBERECHNUNG

Auf den nachfolgenden Seiten werden die Berechnungsergebnisse der in Kapitel 6 angestellten statischen Modellbildung als teilweiser Auszug aus den Ausdruckprotokollen aus dem Stabtragwerksprogramm dargestellt. Die Berechnung des Kuppeldachtragwerkes der „Alten Technik“ wurde mit dem Finite-Elemente- und Stabtragwerksprogramm *Dlubal RFEM 5.06* durchgeführt. Erläuterungen hinsichtlich der Vorgehensweise bei der Modellbildung sowie die getroffenen Annahmen sind dem Kapitel 6 zu entnehmen. Die Programmquelldaten der angestellten Tragwerksberechnung liegen in digitaler Form am Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz auf.

■ VG-3_ÜBERSICHT-ISOMETRIE



■ **MODELLDATEN: MATERIALIEN**

Mat. Nr.	Modul E [kN/cm ²]	Modul G [kN/cm ²]	Querdehnzahl ν [-]	Spez. Gewicht ρ [kN/m ³]	Wärmedehn. α [1/°C]	Teilsich.-Beiwert β_M [-]	Material-Modell
2	Pappel und Nadelholz C24 1100.00	ÖNORM EN 69.00	338:2009-12 + ÖNORM B 6.971	5.50	1995-1-1:2014 5.00E-06	1.30	Isotrop linear elastisch
Holzgüte C24							
3	Pappel und Nadelholz C30 1200.00	ÖNORM EN 75.00	338:2009-12 + ÖNORM B 7.000	5.50	1995-1-1:2014 5.00E-06	1.30	Isotrop linear elastisch
Holzgüte C30							

■ **KNOTENLAGER**

Lager Nr.	Knoten Nr.	Folge	Lagerdrehung [°]			Stütze in Z	Lagerung bzw. Feder					
			um X	um Y	um Z		u_x	u_y	u_z	δ_x	δ_y	δ_z
1	134,135	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Feder	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bundtramaufleger N/S												
3	121	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Feder	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mauerbankaufleger Süd												
4	118	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Feder	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Torsionsfest Lagerung Fußpfette												

■ **KNOTENLAGERFEDERN**

Lager Nr.	Knoten Nr.	Wegfeder [kN/m]			Drehfeder [kNm/rad]		
		$C_{u,x}$	$C_{u,y}$	$C_{u,z}$	$C_{g,x}$	$C_{g,y}$	$C_{g,z}$
1	134,135	-	250.000	-	-	-	-
3	121	-	250.000	-	50.000	-	-
4	118	-	-	-	50.000	-	-

■ **QUERSCHNITTE**

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I_T [cm ⁴]		I_y [cm ⁴]		I_z [cm ⁴]		Hauptachsen ϑ [°]	Drehung ϑ' [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
		A [cm ²]	A_y [cm ²]	A_z [cm ²]	Breite b	Höhe h					
1	H-Rechteck 190/250 3	30544.54 475.00	24739.58 395.83	14289.58 395.83	0.00	0.00	190.0	250.0	Bundtram [19/25]		
2	H-Rechteck 190/190 3	18331.82 361.00	10860.08 300.83	10860.08 300.83	0.00	0.00	190.0	190.0	Hängestuhlsäule [19/19]		
3	H-Rechteck 190/210 3	22159.27 399.00	14663.25 332.50	12003.25 332.50	0.00	0.00	190.0	210.0	liegende Stuhlsäule unten [19/21]		
4	H-Rechteck 180/155 3	10772.14 279.00	5585.81 232.50	7533.00 232.50	0.00	0.00	180.0	155.0	Strebebalken [18/15,5]		
5	H-Rechteck 190/210 3	22159.27 399.00	14663.25 332.50	12003.25 332.50	0.00	0.00	190.0	210.0	liegende Stuhlsäule oben [19/21]		
6	H-Rechteck 190/190 3	18331.82 361.00	10860.08 300.83	10860.08 300.83	0.00	0.00	190.0	190.0	Stuhlsäule [19/19]		
7	H-2B 200/190/115 3	12998.79 460.00	15333.33 191.67	5069.58 383.33	0.00	0.00	420.0	200.0	Diagonalverstrebung [2x11,5/20]		
8	H-2B 200/190/115 3	12998.79 460.00	15333.33 191.67	5069.58 383.33	0.00	0.00	420.0	200.0	Zangenbalkenpaar [2x11,5/20]		
9	H-Rechteck 90/240 2	4456.44 216.00	10368.00 180.00	1458.00 180.00	0.00	0.00	90.0	240.0	Sparrenpfosten (Kuppel) [2x4,5/24]		
10	H-Rechteck 120/160 2	4975.16 192.00	4096.00 160.00	2304.00 160.00	0.00	0.00	120.0	160.0			

■ QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I_T [cm ⁴]	I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]	Hauptachsen \varnothing [°]	Drehung \varnothing' [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
		A [cm ²]	A _y [cm ²]	A _z [cm ²]			Breite b	Höhe h
Sparren (Laterne) [12/16]								
11	H-Rechteck 190/190 3	18331.82 361.00	10860.08 300.83	10860.08 300.83	0.00	0.00	190.0	190.0
Firstpfette (Laterne) [19/19]								

■ STABENDGELENKE

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Axial/Quer-Gelenk bzw. Feder[kN/			Momentengelenk bzw. Feder[kNm/			Kommentar
		$u_x/P_x/P_x'$	$u_y/P_y/P_y'$	$u_z/P_z/P_z'$	$\varnothing_x/M_x/M_x'$	$\varnothing_y/M_y/M_y'$	$\varnothing_z/M_z/M_z'$	
1	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	OHNE Nachgiebigkeit_Momentengelenk_N/S
2	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	Scheren	Scheren	Scheren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	OHNE Nachgiebigkeit_Scherengele nk_N/S
10	Lokal x,y,z	12500.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fersenversatz_N/S
11	Lokal x,y,z	3400.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eisenaufhängung_N/S
12	Lokal x,y,z	73000.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerader Zapfen TYP1_N/S (Bundtram-Hängestuhlsäule)
13	Lokal x,y,z	98800.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerader Zapfen TYP 2_N/S (Stuhlsäule-Fußpfette (Kuppel/Laterne))
14	Lokal x,y,z	46800.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerader Zapfen TYP 3_N/S (Sparrenfuß-Fußpfette)
15	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	30700.000	30700.000	Scheren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Mittelkamm N/S (Zangenbalke n-Hängestuhlsäule)
16	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	37100.000	37100.000	Scheren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kreuzkamm TYP 1_N/S (Zangenabalk en-liegende Stuhlsäulen)
17	Benutzerdefiniertes X',Y',Z	37100.000	<input type="checkbox"/>	37100.000	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Kreuzkamm TYP 2_N (DiagonalzangenNORD-liegende Stuhlsäule/Strebebalke n)
18	Benutzerdefiniertes X',Y',Z	37100.000	<input type="checkbox"/>	37100.000	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Kreuzkamm TYP 2_S (DiagonalzangenSÜD-liegende Stuhlsäule/Strebebalke n)
19	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	78100.000	137700.000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	abgestimmter Zapfen TYP 1_N/S (liegende Stuhlsäule unten - Hängesäule)
20	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	66300.000	86900.000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	abgestimmter Zapfen TYP 2_N/S (liegende Stuhlsäule oben - H

■ STABENDGELENKE

Gelenk Nr.	Bezugs- system	Axial/Quer-Gelenk bzw. Feder[kN/			Momentengelenk bzw. Feder[kNm/			Kommentar
		$u_x/P_x/P_x$	$u_y/P_y/P_y$	$u_z/P_z/P_z$	$\mathbb{E}_x/M_x/M_x$	$\mathbb{E}_y/M_y/M_y$	$\mathbb{E}_z/M_z/M_z$	
21	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	65800.000	100400.000	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hängesäule) abgestirmer Zapfen TYP 3_N/S (liegende Stuhlsäule oben- Firstpfette)

■ STABSÄTZE

Satz Nr.	Stabsatz Bezeichnung	Typ	Stab Nr.	Länge [m]	Kommentar
4	Laternensparren N	Stabzug	1,9,15	3.485	Laternensparren N
5	Laternensparren S	Stabzug	2,10,16	3.485	Laternensparren S
6	Kuppelsparren N	Stabzug	24,28,44,46,50, 54,65,71,83,98, 111	8.237	Kuppelsparren N
7	Kuppelsparren S	Stabzug	25,29,45,47,51, 55,66,72,84,99, 116	8.237	Kuppelsparren S
10	Bundtram	Stabzug	140-144	14.697	Bundtram
11	Zangenbalken E1_N	Stabzug	112,113	4.360	Zangenbalken E1_N
12	Zangenbalken E1_S	Stabzug	114,115	4.365	Zangenbalken E1_S
13	Zangenbalken E2	Stabzug	74-81	12.150	Zangenbalken E2
14	Zangenbalken E3	Stabzug	32-35	5.880	Zangenbalken E3
20	Hängestuhlsäule N	Stabzug	22,36,42,56,69, 85,100,108,130	11.250	Hängestuhlsäule N
21	Hängestuhlsäule S	Stabzug	23,37,43,57,70, 86,101,109,131	11.250	Hängestuhlsäule N
22	abgetrennte Hängesäule_Mitt e	Stabzug	8,20,58,87	4.600	abgetrennte Hängesäule_Mitte
23	Stuhlsäule N	Stabzug	133	4.000	Stuhlsäule N
30	liegende Stuhlsäule unten N	Stabzug	94,106,129	8.529	liegende Stuhlsäule unten N
31	liegende Stuhlsäule unten S	Stabzug	95,107,132	8.529	liegende Stuhlsäule unten S
32	liegende Stuhlsäule oben N	Stabzug	19,52	4.721	liegende Stuhlsäule oben N
33	liegende Stuhlsäule oben S	Stabzug	21,53	4.721	liegende Stuhlsäule oben S
34	Strebebalken N	Stabzug	59,91,102	7.432	Strebebalken N
35	Strebebalken S	Stabzug	60,92,103	7.432	Strebebalken S

■ LASTFÄLLE

Last- fall	LF-Bezeichnung	EN 1990 ÖNORM Einwirkungskategorie	Eigengewicht - Faktor in Richtung			
			Aktiv	X	Y	Z
LF101	Eigengewicht Konstruktion	Ständig	<input checked="" type="checkbox"/>	0.000	0.000	1.000
LF102	ständige Lasten (Dachaufbau)	Ständig	<input type="checkbox"/>			
LF201	Nutzlast Kat. H	Verkehrslasten - Kategorie H: Dächer	<input type="checkbox"/>			
LF301	Schnee,Gesamt-voll	Schnee (H \geq 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF302	Schnee,N-voll	Schnee (H \geq 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF303	Schnee,S-voll	Schnee (H \geq 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF304	Schnee,O-voll	Schnee (H \geq 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF305	Schnee,W-voll	Schnee (H \geq 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF401	Wind,N-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF402	Wind,N-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF403	Wind,S-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF404	Wind,S-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF405	Wind,O-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF406	Wind,O-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			

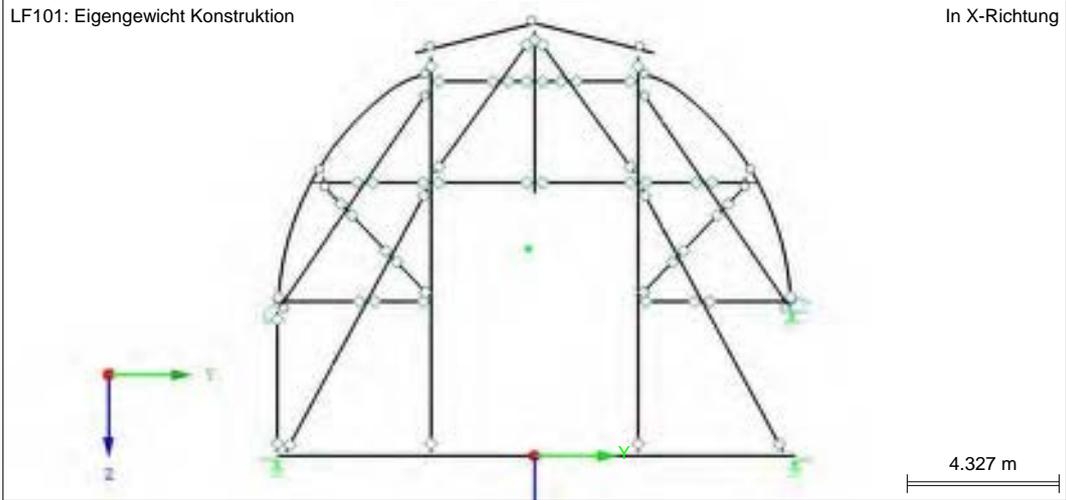
■ **LASTFÄLLE**

Lastfall	LF-Bezeichnung	EN 1990 ÖNORM Einwirkungskategorie	Eigengewicht - Faktor in Richtung			
			Aktiv	X	Y	Z
LF407	Wind, W-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF408	Wind, W-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			

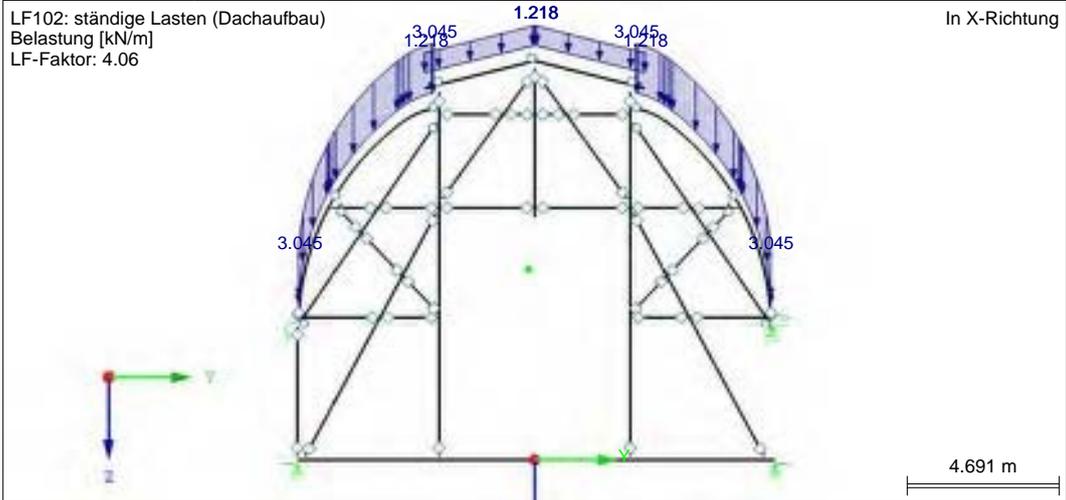
■ **ERGEBNISKOMBINATIONEN**

Ergebnikombin.	Bezeichnung	Belastung
EK1	GZT (STR/GEO) - Ständig / vorübergehend - Gl. 6.10	LK1/s bis LK50/s
EK2	GZG - Charakteristisch	LK51/s bis LK100/s
EK3	GZG - Häufig	LK101/s bis LK112/s
EK4	GZG - Quasi-ständig	LK113/s

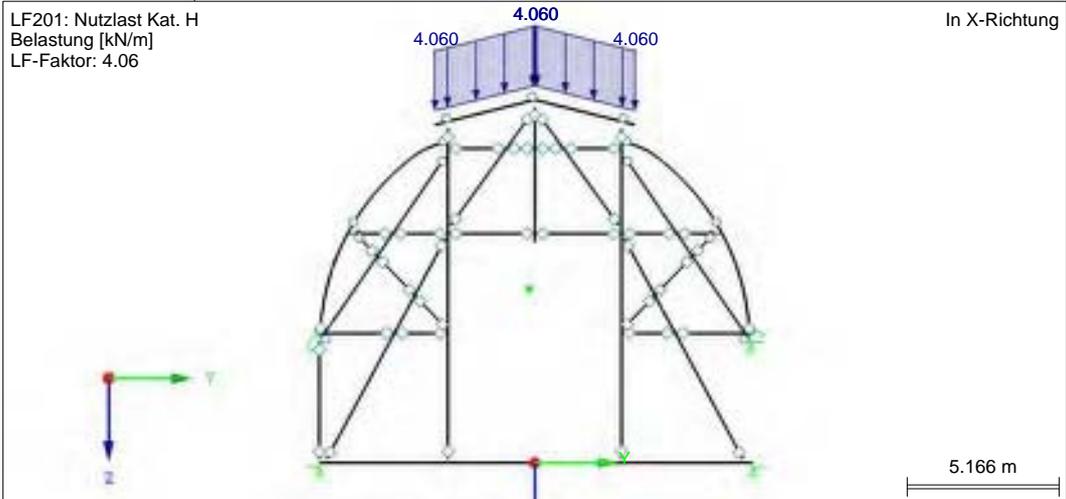
■ VG-3_LASTFÄLLE



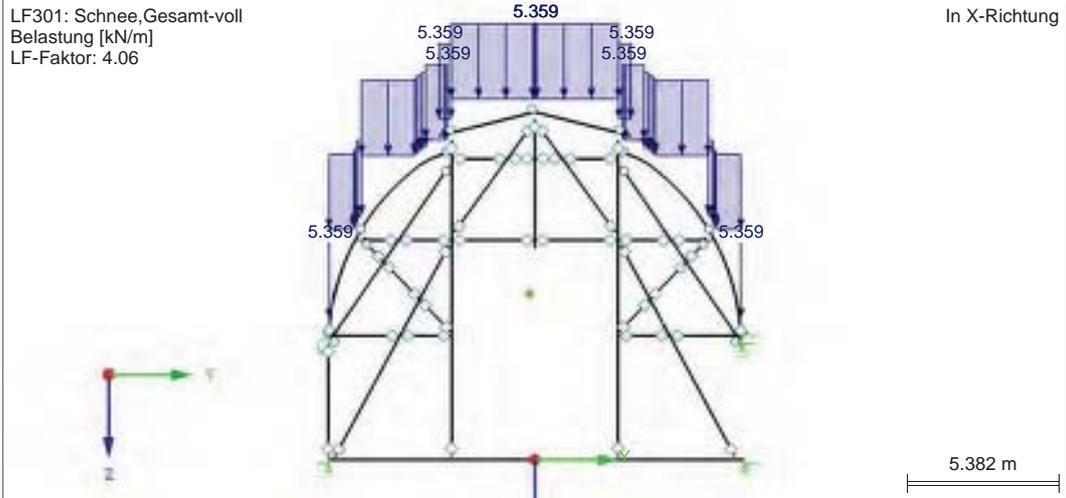
■ VG-3_LASTFÄLLE



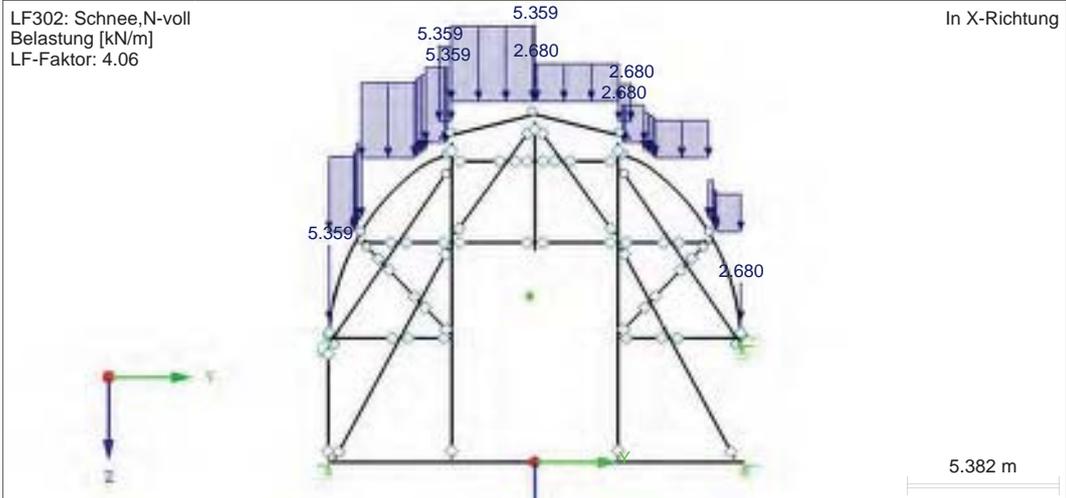
■ VG-3_LASTFÄLLE



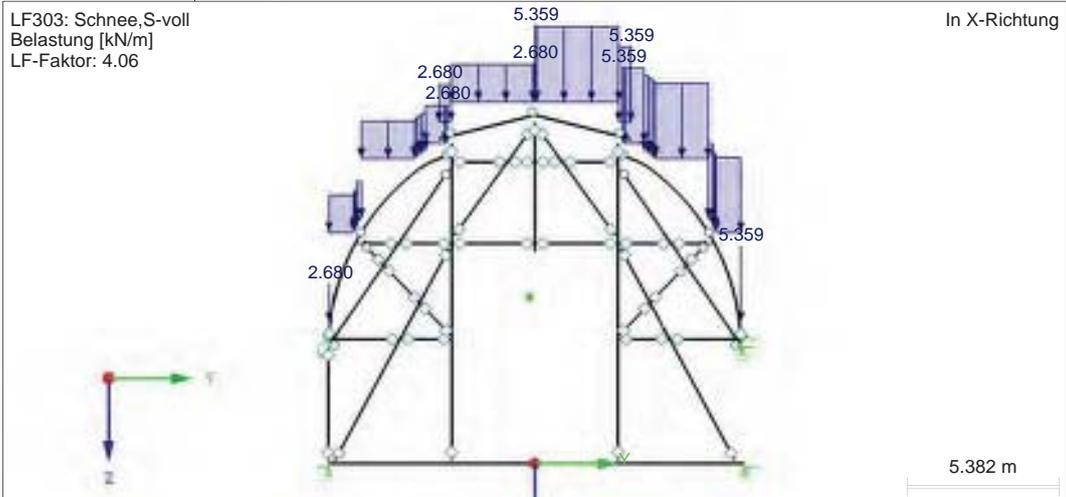
VG-3_LASTFÄLLE



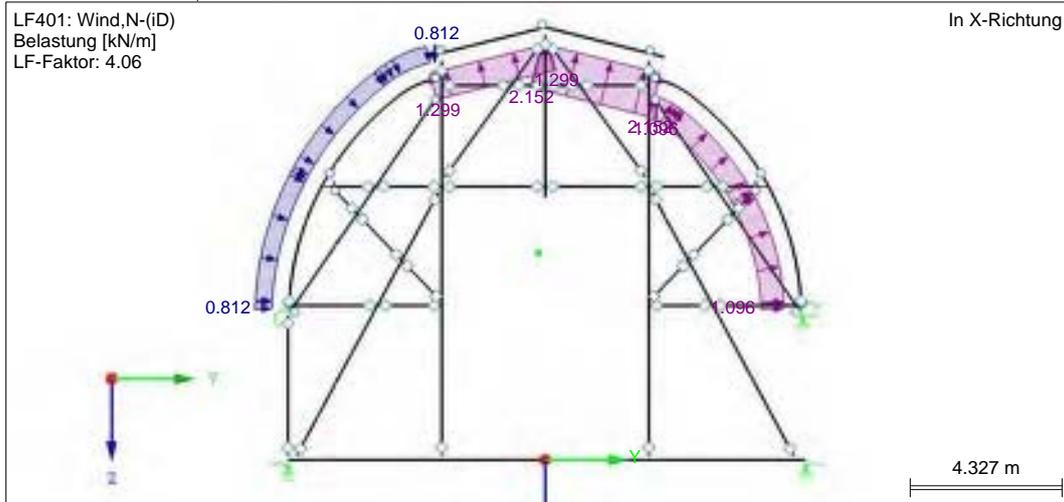
VG-3_LASTFÄLLE



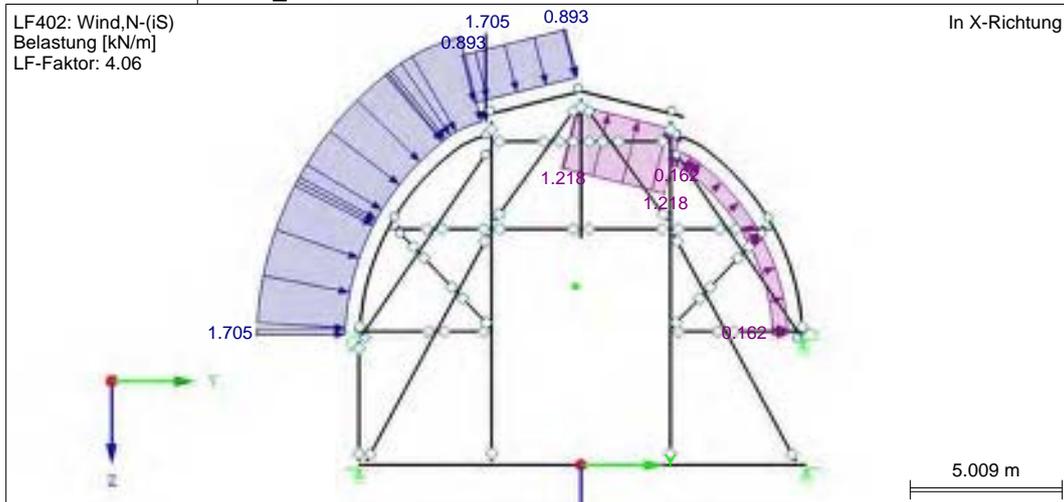
VG-3_LASTFÄLLE



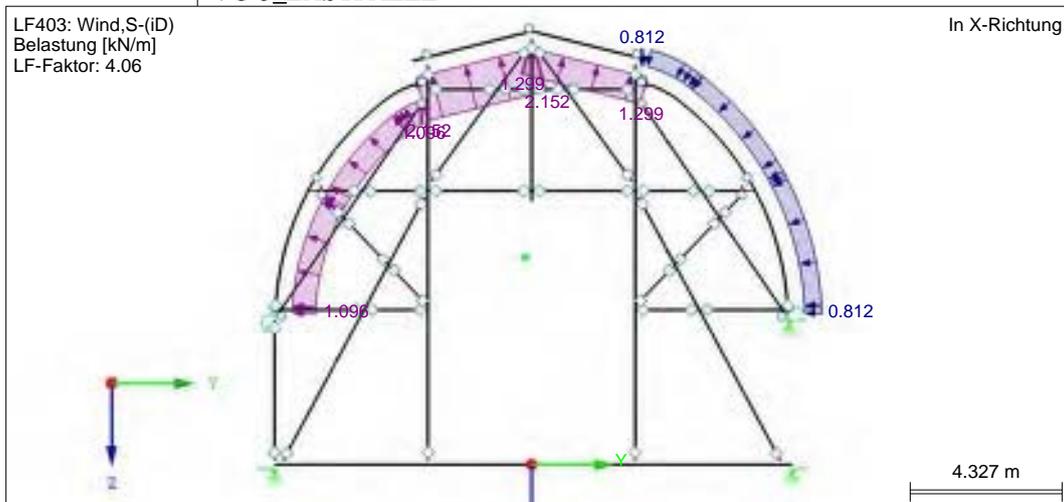
■ VG-3_LASTFÄLLE



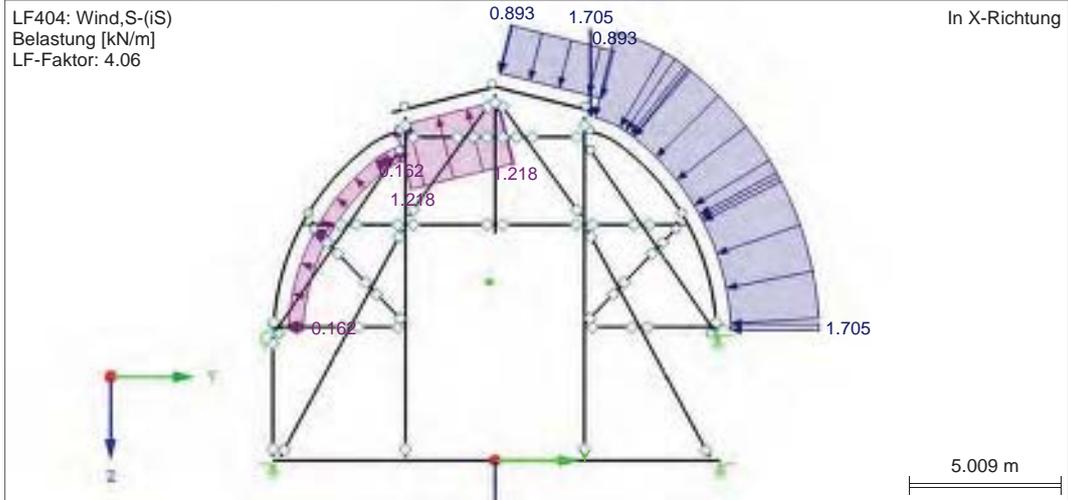
■ VG-3_LASTFÄLLE



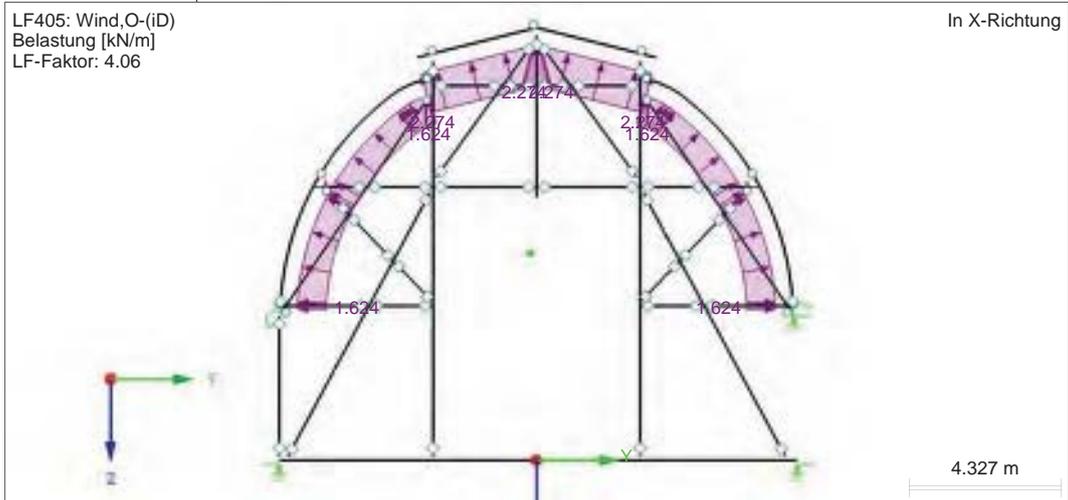
■ VG-3_LASTFÄLLE



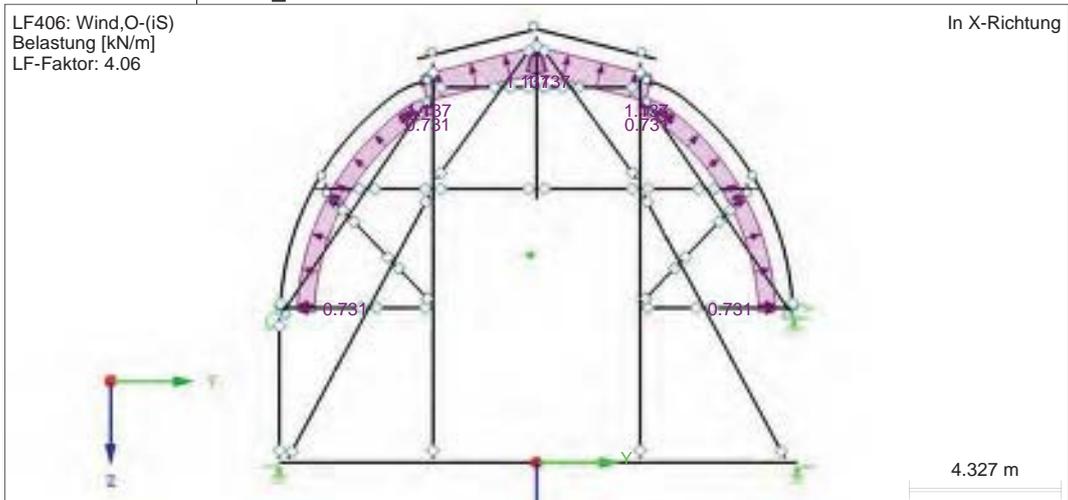
VG-3_LASTFÄLLE



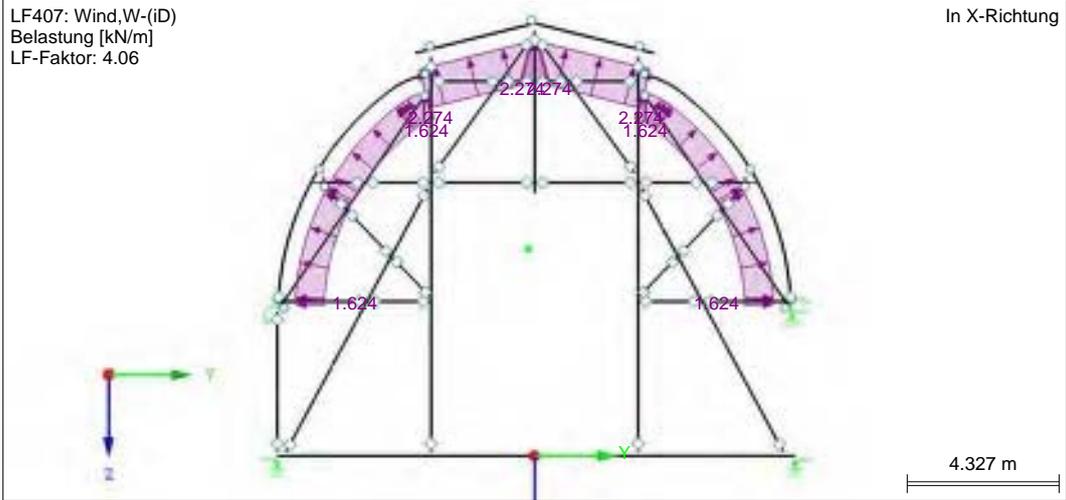
VG-3_LASTFÄLLE



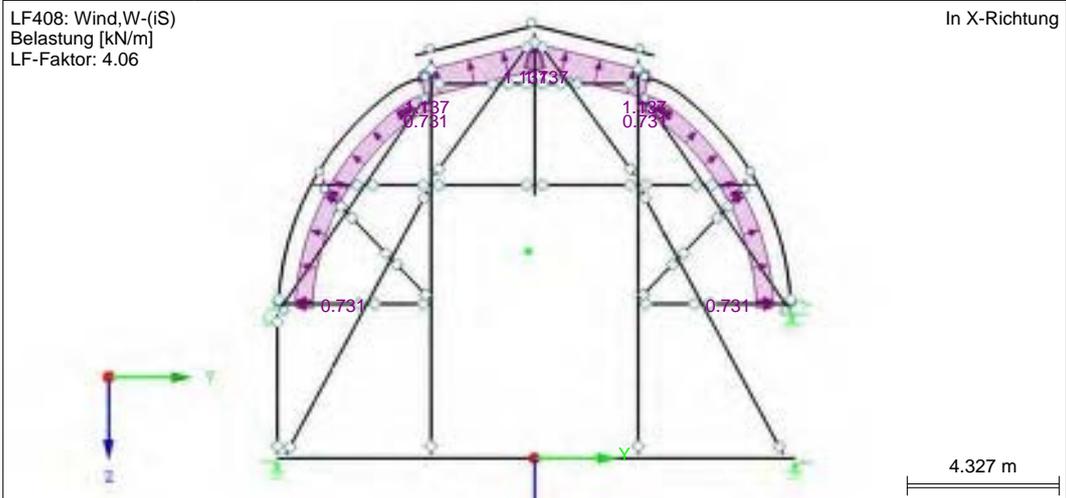
VG-3_LASTFÄLLE



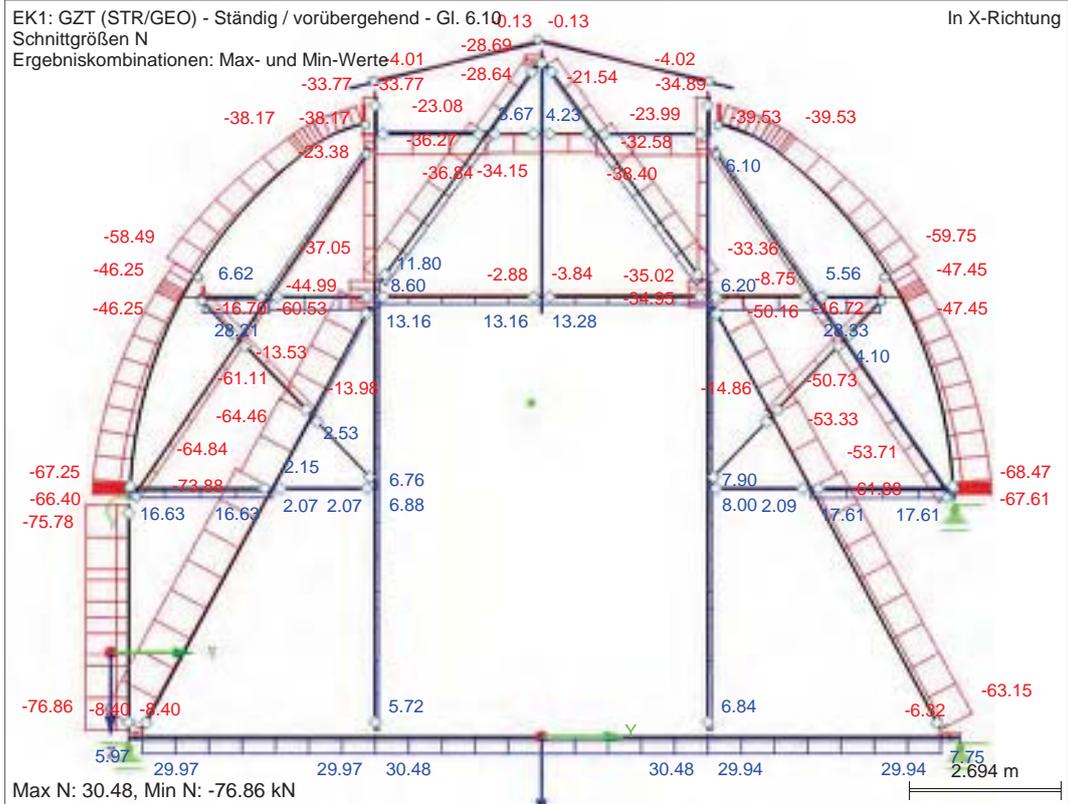
■ VG-3_LASTFÄLLE



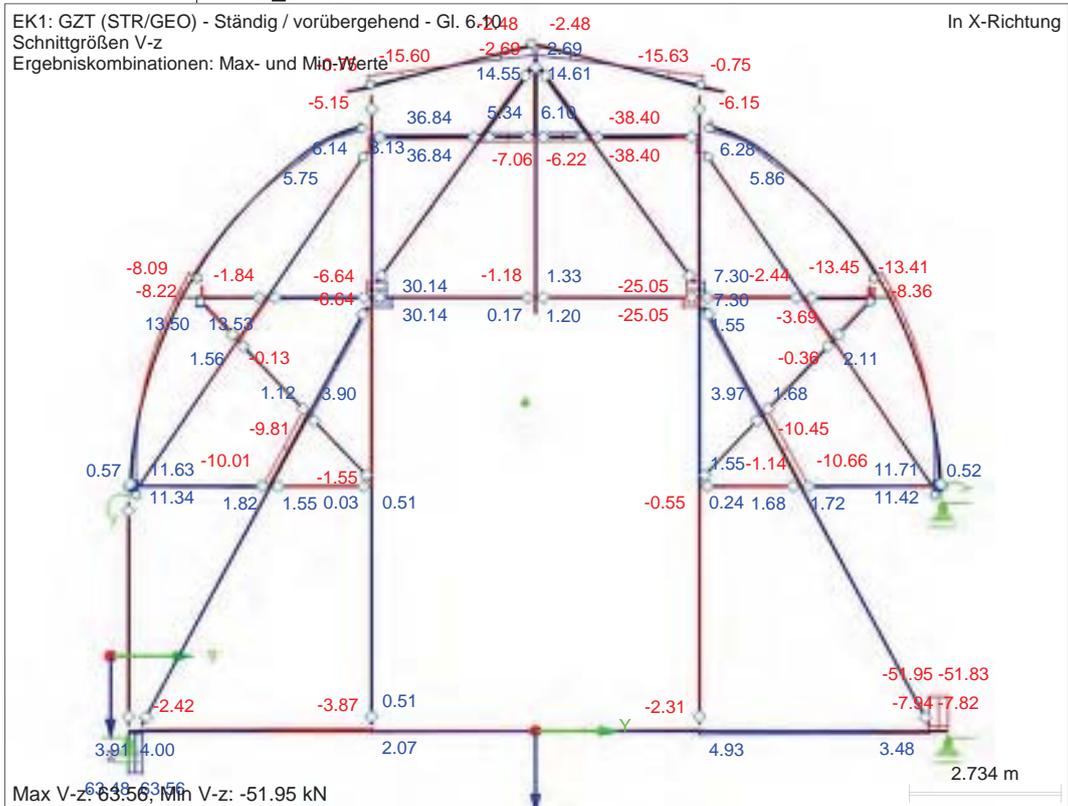
■ VG-3_LASTFÄLLE



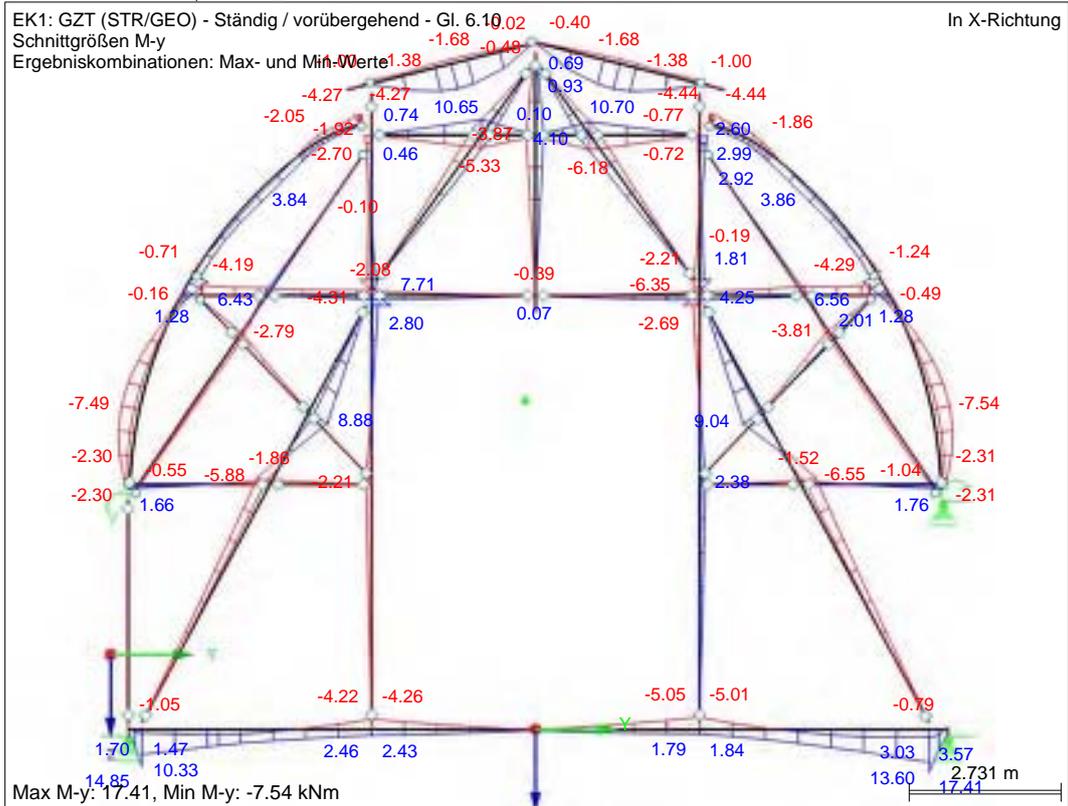
VG-3_ULS-SCHNITTGRÖSSEN



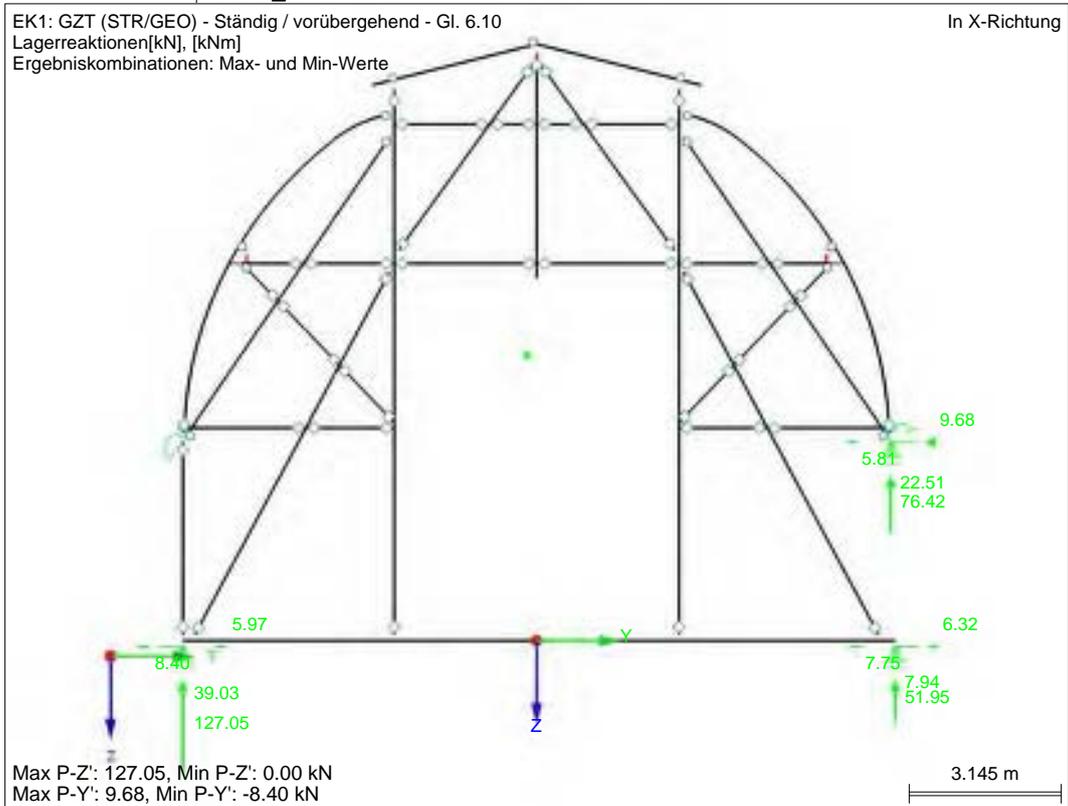
VG-3_ULS-SCHNITTGRÖSSEN



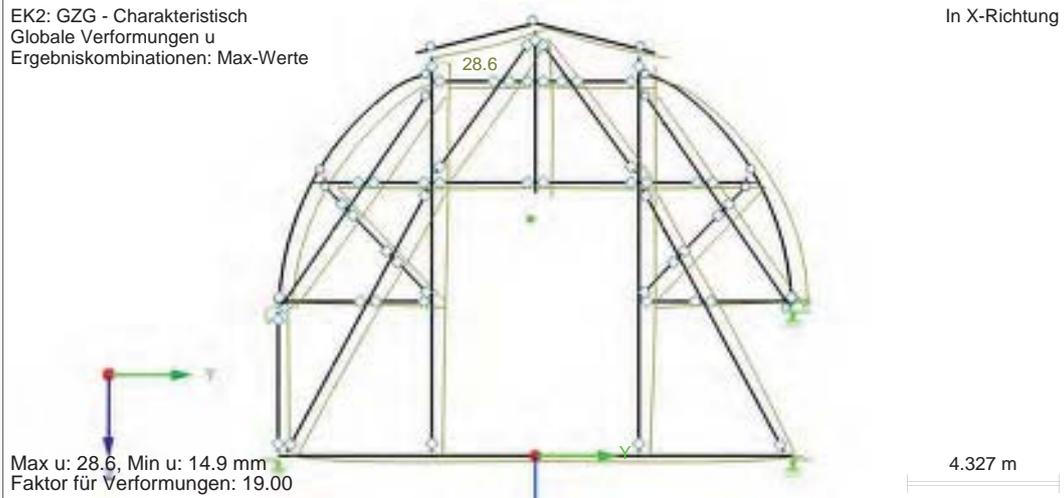
■ VG-3_ULS-SCHNITTGRÖSSEN



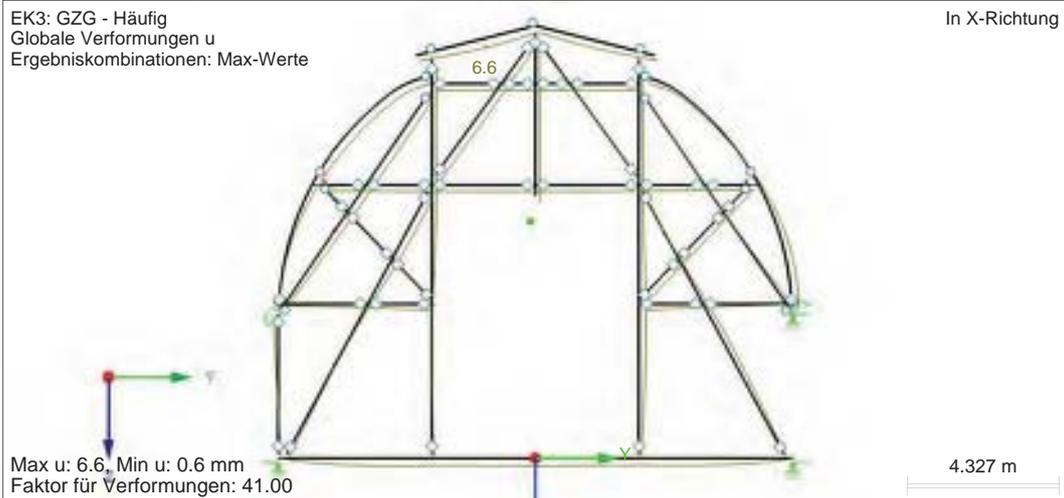
■ VG-3_ULS-LAGERREAKTIONEN



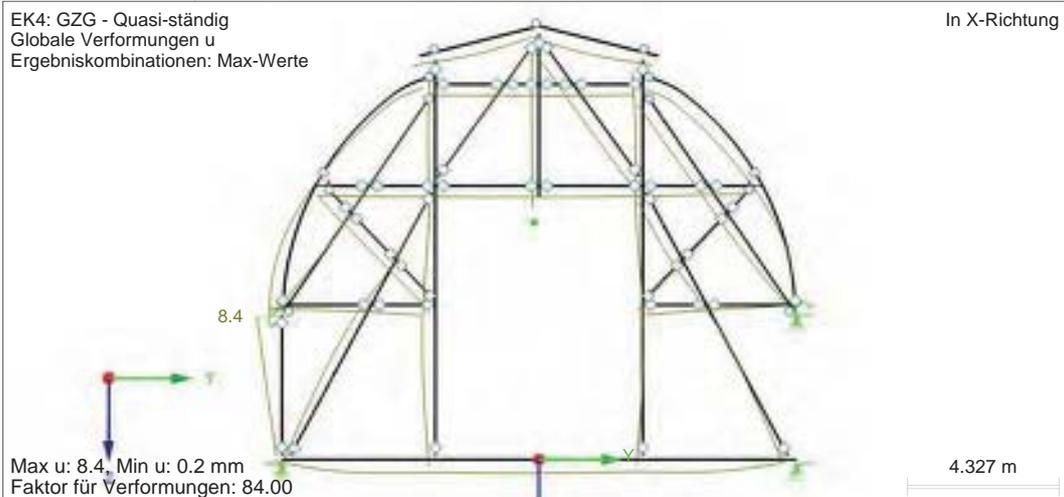
■ VG-3_SLS-GLOBALE VERFORMUNGEN



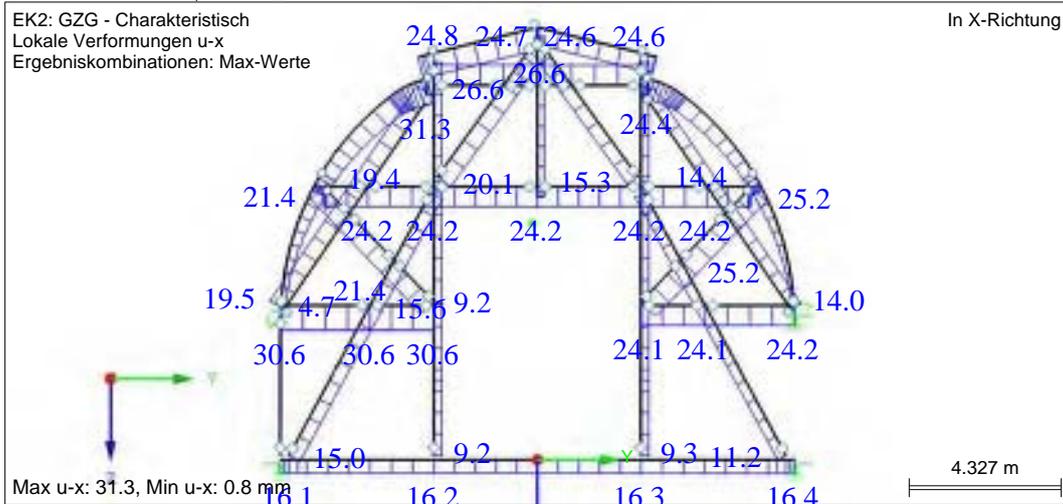
■ VG-3_SLS-GLOBALE VERFORMUNGEN



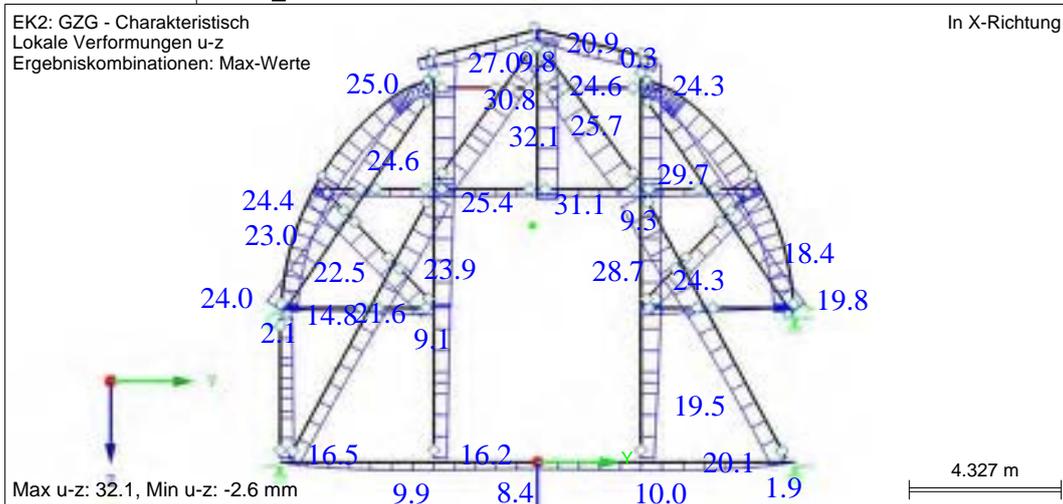
■ VG-3_SLS-GLOBALE VERFORMUNGEN



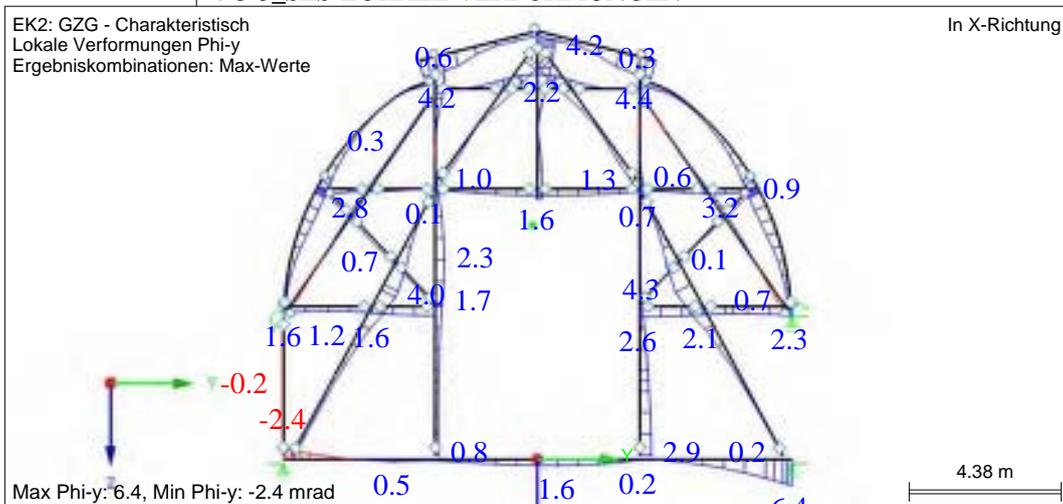
■ VG-3_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



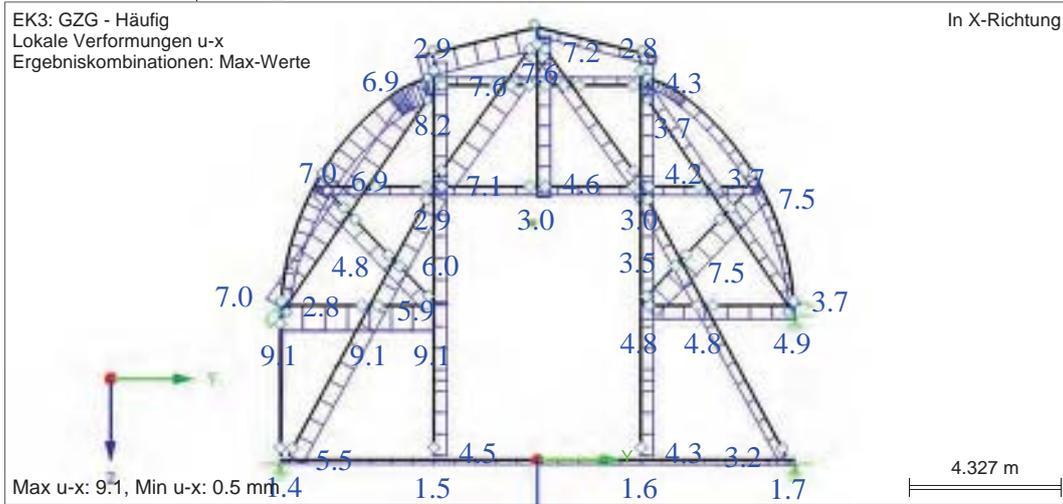
■ VG-3_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



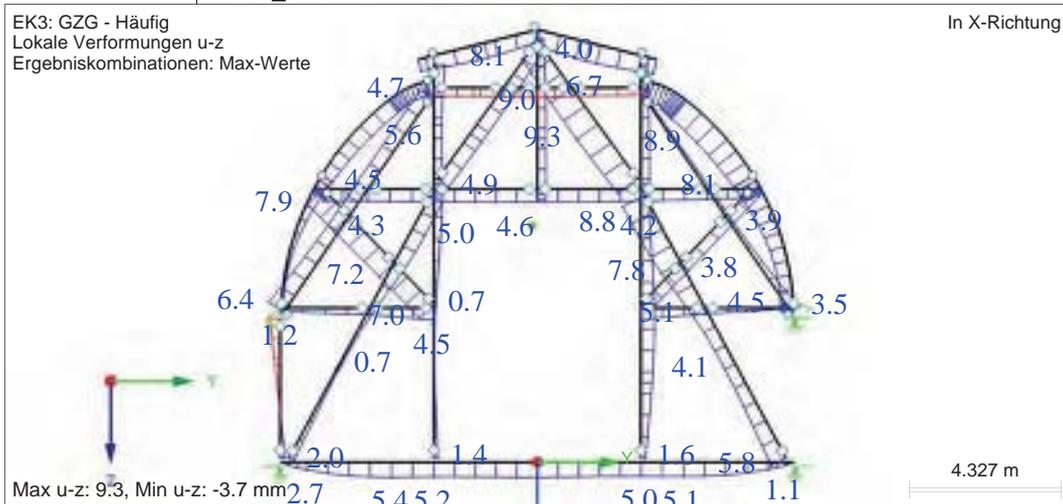
■ VG-3_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



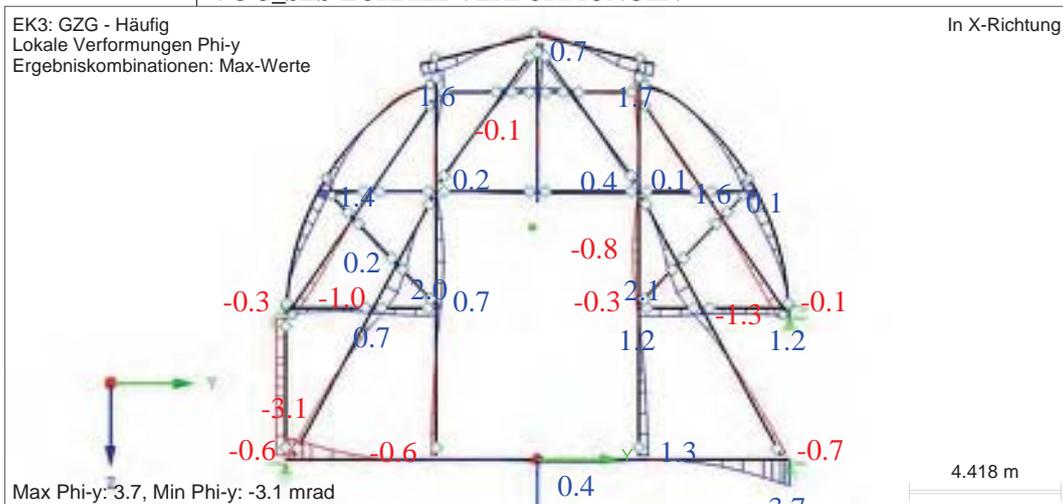
VG-3_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN

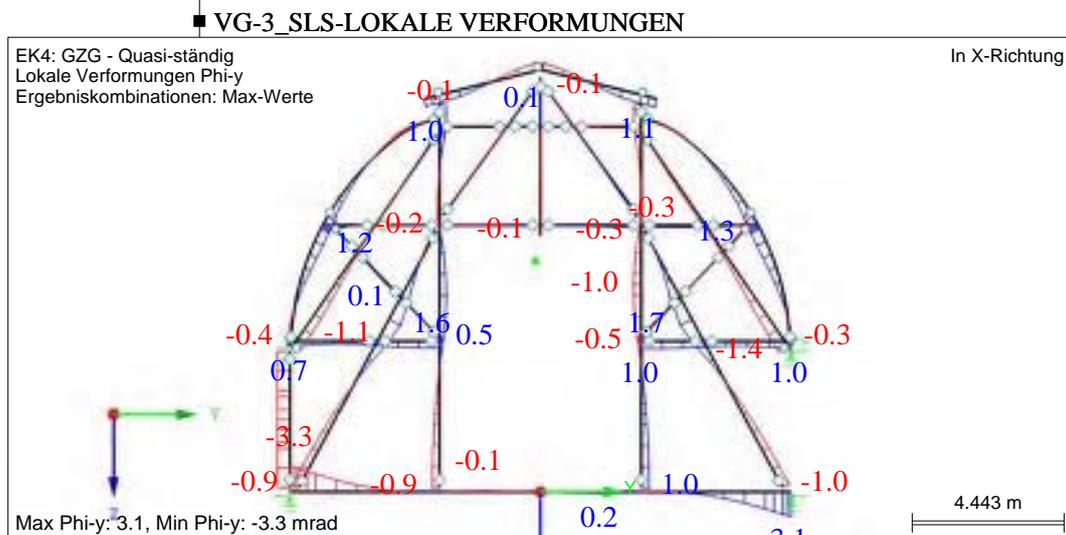
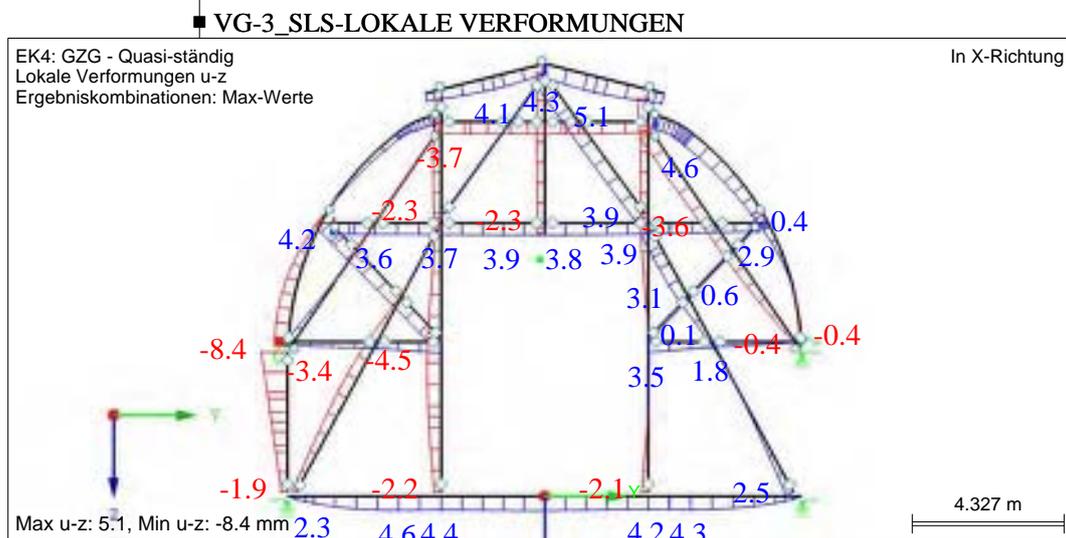
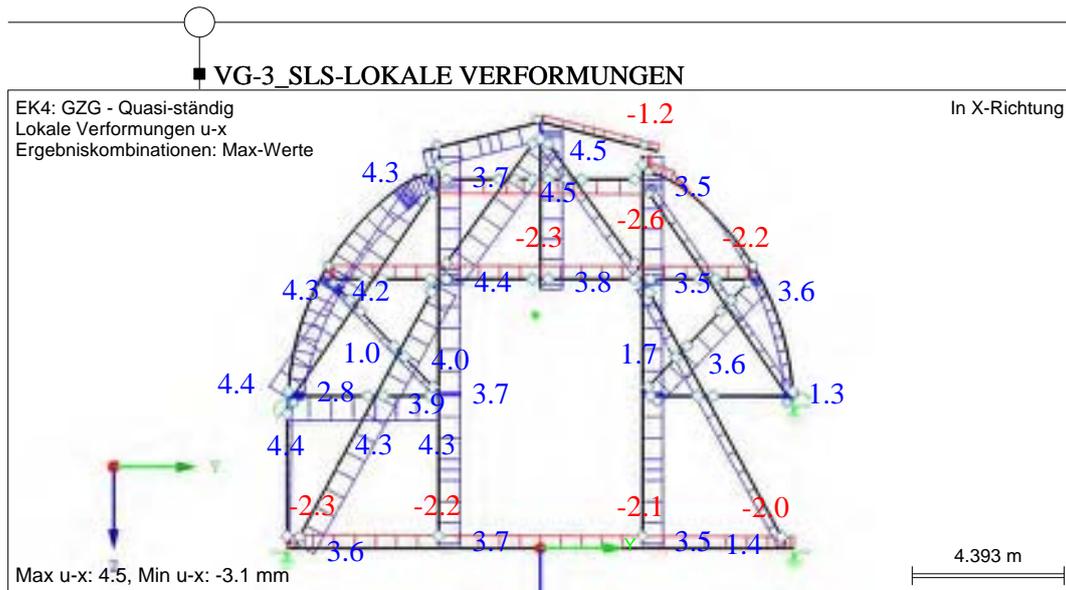


VG-3_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



VG-3_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN





2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
4	Laternensparren N (Stab Nr. 1,9,15)					
	1	0.027	LK12	0.00	100) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	9	0.000	LK19	0.00	101) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	9	2.986	LK11	0.00	102) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	9	2.986	LK11	0.16	111) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	9	1.194	LK11	0.26	151) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	9	0.597	LK8	0.17	161) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	9	2.986	LK11	0.03	171) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	9	2.986	LK11	0.04	321) <input checked="" type="checkbox"/>	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
9	2.986	LK11	0.04	345) <input checked="" type="checkbox"/>	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse	
5	Laternensparren S (Stab Nr. 2,10,16)					
	2	0.027	LK16	0.00	100) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	10	0.000	LK17	0.00	101) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	10	2.986	LK41	0.00	102) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	10	2.986	LK41	0.16	111) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	10	1.194	LK41	0.26	151) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	10	0.597	LK34	0.17	161) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	10	2.986	LK41	0.03	171) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	10	2.986	LK41	0.04	321) <input checked="" type="checkbox"/>	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
10	2.986	LK41	0.04	345) <input checked="" type="checkbox"/>	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse	
6	Kuppelsparren N (Stab Nr. 24,28,44,46,50,54,65,71,83,98,111)					
	111	0.200	LK11	0.05	102) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	111	0.200	LK17	0.14	111) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	24	0.000	LK4	0.00	151) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	24	0.050	LK11	0.07	171) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	111	0.200	LK11	0.25	303) <input checked="" type="checkbox"/>	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	111	0.000	LK11	0.28	323) <input checked="" type="checkbox"/>	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	98	3.339	LK11	0.05	2102) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	83	0.113	LK17	0.10	2111) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
50	0.111	LK4	0.05	2151) <input checked="" type="checkbox"/>	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung nach 6.4.3	
98	2.087	LK17	0.15	2171) <input checked="" type="checkbox"/>	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4 und 6.4.3	
7	Kuppelsparren S (Stab Nr. 25,29,45,47,51,55,66,72,84,99,116)					
	116	0.200	LK41	0.06	102) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	116	0.200	LK43	0.14	111) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	25	0.050	LK2	0.01	151) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
25	0.050	LK41	0.08	171) <input checked="" type="checkbox"/>	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und D	

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis		Bemessung Nr.	Bezeichnung
	116	0.200	LK41	0.25	☒ 1	303)	Druck nach 6.2.4 Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	116	0.000	LK41	0.29	☒ 1	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	29	0.000	LK2	0.00	☒ 1	2101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	99	3.339	LK41	0.06	☒ 1	2102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	84	0.113	LK43	0.10	☒ 1	2111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	51	0.111	LK2	0.06	☒ 1	2151)	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung nach 6.4.3
	29	0.609	LK2	0.04	☒ 1	2161)	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3 und 6.4.3
	99	2.087	LK43	0.15	☒ 1	2171)	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4 und 6.4.3
10	Bundtram (Stab Nr. 73,140-144,147)						
	142	0.000	LK15	0.05	☒ 1	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	140	0.000	LK16	0.01	☒ 1	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	140	0.000	LK15	1.26	☒ 1	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	144	0.000	LK8	0.30	☒ 1	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	141	0.000	LK15	0.30	☒ 1	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	140	0.246	LK15	0.36	☒ 1	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	144	0.000	LK8	0.30	☒ 1	311)	Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	140	0.246	LK15	0.38	☒ 1	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	140	0.246	LK15	0.16	☒ 1	341)	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
11	Zangenbalken E1_N (Stab Nr. 112,113)						
	112	1.272	LK8	0.02	☒ 1	3101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	112	0.000	LK8	0.03	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	113	1.817	LK18	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	113	1.817	LK31	0.04	☒ 1	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	113	1.817	LK31	0.04	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	113	1.817	LK17	0.06	☒ 1	3181)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	112	0.000	LK8	0.02	☒ 1	3183)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	112	0.000	LK8	0.08	☒ 1	3186)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
12	Zangenbalken E1_S (Stab Nr. 114,115)						
	115	0.637	LK5	0.01	☒ 1	3101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	115	0.000	LK17	0.03	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	115	2.548	LK3	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	114	1.817	LK44	0.04	☒ 1	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	114	1.817	LK44	0.04	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	114	1.817	LK17	0.05	☒ 1	3181)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - R

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis		Bemessung Nr.	Bezeichnung
					1		Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	115	0.000	LK15	0.02	☒ 1	3183)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	115	0.000	LK17	0.07	☒ 1	3186)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
13	Zangenbalken E2 (Stab Nr. 74-81)						
	76	1.249	LK17	0.05	☒ 1	3101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	74	0.000	LK17	0.13	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	80	0.000	LK3	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	77	0.000	LK5	0.06	☒ 1	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	77	0.000	LK5	0.06	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	80	1.166	LK43	0.13	☒ 1	3181)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	76	0.000	LK17	0.05	☒ 1	3183)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	80	1.166	LK43	0.23	☒ 1	3186)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
	78	2.940	LK3	0.05	☒ 1	3211)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.2.4
	78	0.000	LK3	0.00	☒ 1	3212)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.1.4
	79	0.000	LK3	0.05	☒ 1	3216)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.2.4
	78	2.940	LK3	0.06	☒ 1	3341)	Stab mit Biegung und Druck – Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	78	0.000	LK3	0.01	☒ 1	3342)	Stab mit Biegung und Druck – Knicken um beiden Achsen - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	79	0.000	LK3	0.04	☒ 1	3344)	Stab mit Biegung und Druck – Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.3.2
14	Zangenbalken E3 (Stab Nr. 32-35)						
	32	0.000	LK4	0.00	☒ 1	3101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	35	1.971	LK15	0.06	☒ 1	3102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	33	0.000	LK42	0.14	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	35	0.000	LK44	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	35	0.000	LK2	0.14	☒ 1	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	35	0.000	LK2	0.14	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	32	1.971	LK4	0.15	☒ 1	3181)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	32	0.657	LK4	0.00	☒ 1	3183)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	32	1.971	LK4	0.15	☒ 1	3186)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
	33	0.000	LK42	0.20	☒ 1	3211)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.2.4
	35	0.000	LK15	0.06	☒	3212)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - S

■ 2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	32	1.971	LK42	0.20	3216)	Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.1.4
	35	1.971	LK15	0.09	3303)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.2.4
	35	0.000	LK42	0.27	3341)	Druckstab mit Normaldruck - Knicken um beiden Achsen nach 6.3.2
	35	0.000	LK15	0.09	3342)	Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	35	0.000	LK15	0.09	3342)	Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	32	1.971	LK42	0.18	3344)	Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.3.2
20	Hängestuhlsäule N (Stab Nr. 22,36,42,56,69,85,100,108,130)					
	22	0.000	LK5	0.00	100)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	100	0.000	LK1	0.02	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	85	0.178	LK15	0.08	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	36	0.000	LK11	0.76	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	42	0.254	LK2	0.09	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	100	0.000	LK15	0.13	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	85	0.178	LK15	0.34	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	69	0.000	LK30	0.10	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	85	0.178	LK15	0.51	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
21	Hängestuhlsäule S (Stab Nr. 23,37,43,57,70,86,101,109,131)					
	23	0.000	LK3	0.00	100)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	101	0.000	LK1	0.02	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	86	0.178	LK11	0.07	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	37	0.000	LK15	0.78	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	43	0.254	LK27	0.15	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	43	0.254	LK4	0.15	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	86	0.178	LK11	0.28	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	70	0.141	LK37	0.12	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	86	0.178	LK11	0.43	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
22	abgetrennte Hängesäule_Mitte (Stab Nr. 8,20,58,87)					
	87	0.000	LK1	0.00	100)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	20	0.000	LK1	0.01	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	8	0.180	LK8	0.05	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	8	0.000	LK25	0.07	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	20	1.220	LK41	0.14	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	58	0.000	LK42	0.16	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - E

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	8	0.180	LK16	0.02	171)	Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	8	0.180	LK8	0.13	303)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	8	0.180	LK15	0.14	323)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
23	Stuhlsäule N (Stab Nr. 133)					
	133	4.000	LK11	0.14	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	133	4.000	LK11	0.28	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
30	liegende Stuhlsäule unten N (Stab Nr. 94,106,129)					
	94	0.000	LK2	0.00	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	129	4.875	LK15	0.12	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	106	1.460	LK8	0.16	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	94	2.193	LK2	0.09	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	106	0.000	LK11	0.19	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	129	4.875	LK15	0.89	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	94	2.193	LK2	0.09	311)	Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	129	0.000	LK15	0.99	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	129	0.000	LK15	0.90	341)	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
31	liegende Stuhlsäule unten S (Stab Nr. 95,107,132)					
	132	4.875	LK11	0.10	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	107	1.460	LK15	0.16	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	107	0.000	LK41	0.19	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	132	4.875	LK11	0.76	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	132	0.000	LK11	0.85	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	132	0.000	LK11	0.77	341)	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
32	liegende Stuhlsäule oben N (Stab Nr. 19,52)					
	19	0.000	LK7	0.00	100)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	52	0.000	LK2	0.02	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	52	3.220	LK41	0.06	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	19	1.501	LK42	0.07	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	19	1.501	LK23	0.12	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	52	0.000	LK25	0.15	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	52	0.000	LK42	0.15	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	52	3.220	LK41	0.15	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	52	0.000	LK25	0.13	311)	Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse

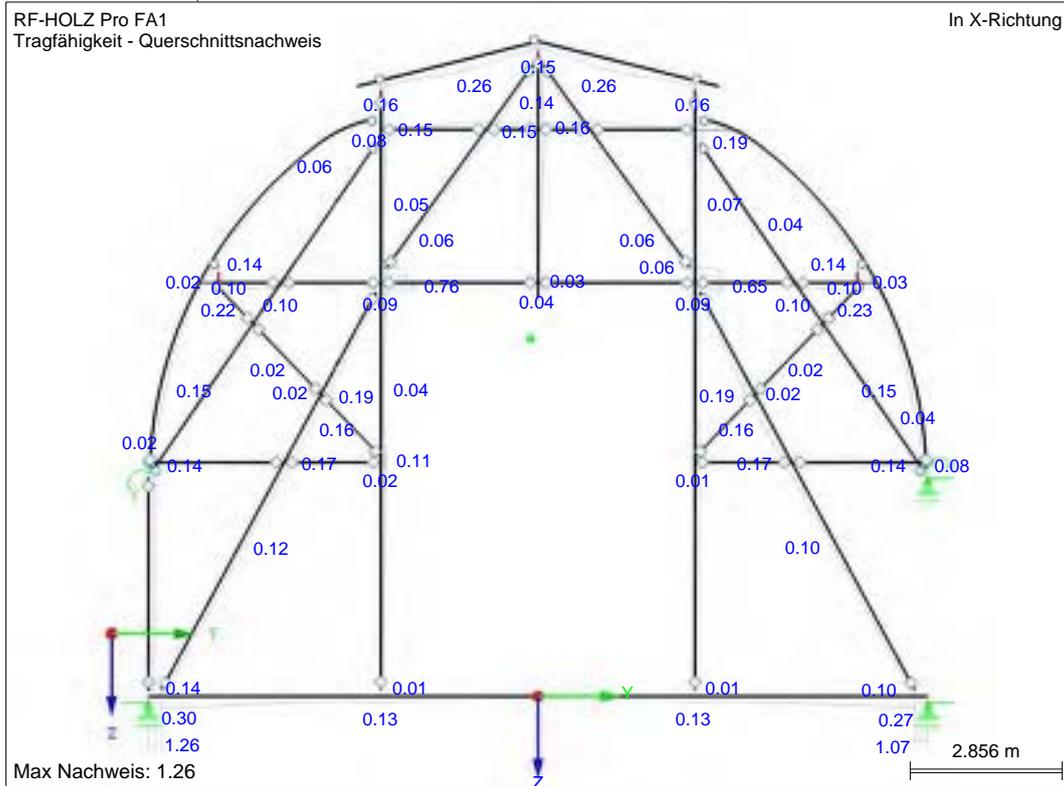
2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung	Bezeichnung
	52	0.000	LK42	0.24	1	323) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	52	0.000	LK41	0.16	1	341) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
33	liegende Stuhlsäule oben S (Stab Nr. 21,53)					
	21	1.001	LK6	0.00	1	100) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	53	0.000	LK4	0.03	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	53	3.220	LK24	0.06	1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspehnung in Faserrichtung nach 6.1.4
	21	0.000	LK42	0.07	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	21	1.501	LK40	0.13	1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	53	0.000	LK42	0.16	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	21	1.501	LK42	0.14	1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	53	3.220	LK24	0.14	1	303) Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	53	0.000	LK42	0.14	1	311) Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	53	0.000	LK25	0.23	1	323) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	53	0.000	LK25	0.15	1	341) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
34	Strebebalken N (Stab Nr. 59,91,102)					
	102	0.000	LK30	0.02	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	59	3.172	LK34	0.00	1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspehnung in Faserrichtung nach 6.1.4
	91	0.000	LK26	0.04	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	59	3.172	LK42	0.02	1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	102	0.000	LK30	0.07	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	59	3.172	LK41	0.01	1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	59	2.537	LK34	0.03	1	303) Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	59	3.172	LK34	0.03	1	323) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	59	3.172	LK34	0.03	1	345) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
35	Strebebalken S (Stab Nr. 60,92,103)					
	103	0.000	LK40	0.04	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	103	3.324	LK25	0.03	1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspehnung in Faserrichtung nach 6.1.4
	92	0.000	LK35	0.04	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	92	0.936	LK8	0.04	1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	103	3.324	LK40	0.08	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	103	2.770	LK25	0.04	1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	60	0.634	LK25	0.13	1	303) Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	103	3.324	LK25	0.23	1	323) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	103	3.324	LK25	0.20	1	345) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

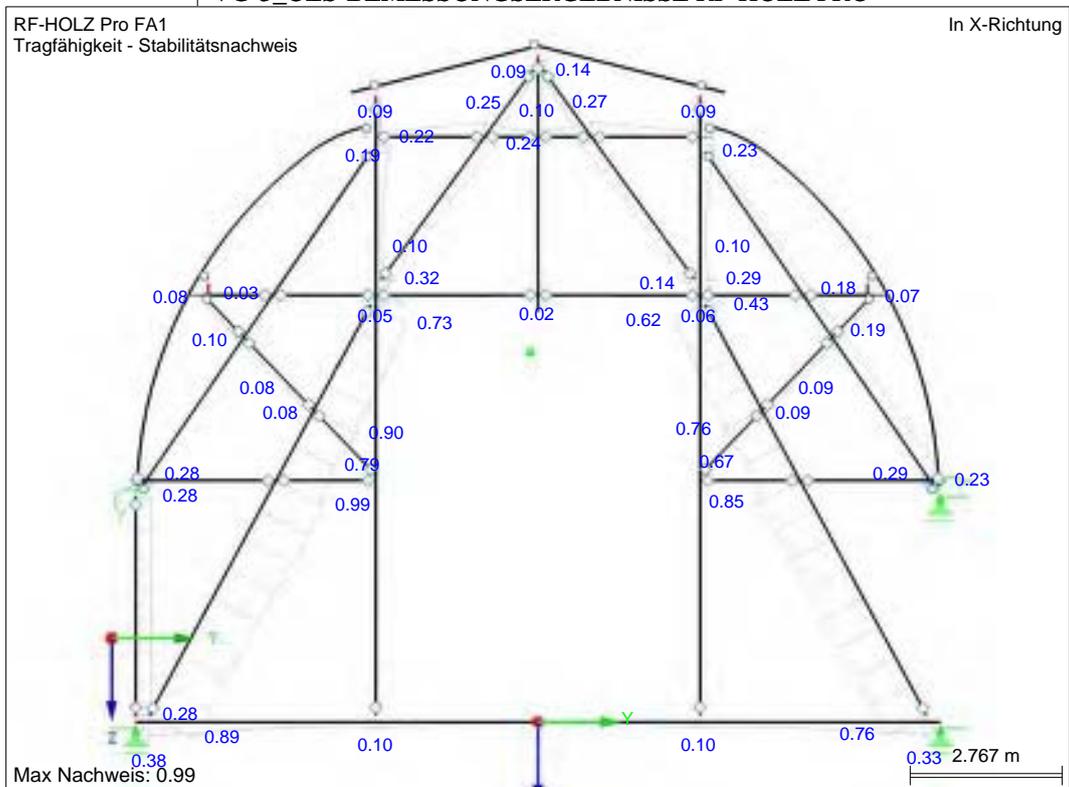
Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
40	Diagonalverstrebung N (Stab Nr. 90,96,104)					
	90	0.000	LK17	0.01	☒ 1	3102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspeannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	90	0.000	LK11	0.02	☒ 1	3111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	90	0.000	LK18	0.00	☒ 1	3112) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	104	0.000	LK1	0.01	☒ 1	3151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	104	0.000	LK1	0.01	☒ 1	3156) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	90	1.069	LK11	0.03	☒ 1	3211) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Druckgurt Nc + My nach 6.2.4
	90	1.069	LK17	0.01	☒ 1	3212) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspeannung im Druckgurt Nc + My nach 6.1.4
	96	0.000	LK11	0.03	☒ 1	3216) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Zuggurt Nc + My nach 6.2.4
	90	0.000	LK17	0.08	☒ 1	3303) Druckstab mit Normaldruck - Knicken um beiden Achsen nach 6.3.2
	90	1.069	LK11	0.10	☒ 1	3341) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspeannung in Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	90	1.069	LK17	0.08	☒ 1	3342) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Schwerpunktspeannung im Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	90	0.534	LK30	0.07	☒ 1	3344) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspeannung in Zuggurt Nc + My nach 6.3.2
	41	Diagonalverstrebung S (Stab Nr. 93,97,105)				
93		0.000	LK15	0.01	☒ 1	3102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspeannung in Faserrichtung nach 6.1.4
93		0.000	LK16	0.03	☒ 1	3111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
93		0.000	LK38	0.00	☒ 1	3112) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
97		0.000	LK2	0.04	☒ 1	3151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Druckgurt My nach 6.1.6
97		0.000	LK2	0.04	☒ 1	3156) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Zuggurt My nach 6.1.6
97		0.000	LK16	0.05	☒ 1	3211) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Druckgurt Nc + My nach 6.2.4
97		1.844	LK15	0.01	☒ 1	3212) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspeannung im Druckgurt Nc + My nach 6.1.4
93		1.069	LK16	0.05	☒ 1	3216) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspeannung in Zuggurt Nc + My nach 6.2.4
93		0.000	LK15	0.07	☒ 1	3303) Druckstab mit Normaldruck - Knicken um beiden Achsen nach 6.3.2
93		1.069	LK15	0.11	☒ 1	3341) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspeannung in Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
97		1.844	LK15	0.08	☒ 1	3342) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Schwerpunktspeannung im Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
97		1.844	LK41	0.07	☒ 1	3344) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspeannung in Zuggurt Nc + My nach 6.3.2

■ VG-3_ULS-BEMESSUNGSERGEBNISSE RF-HOLZ PRO



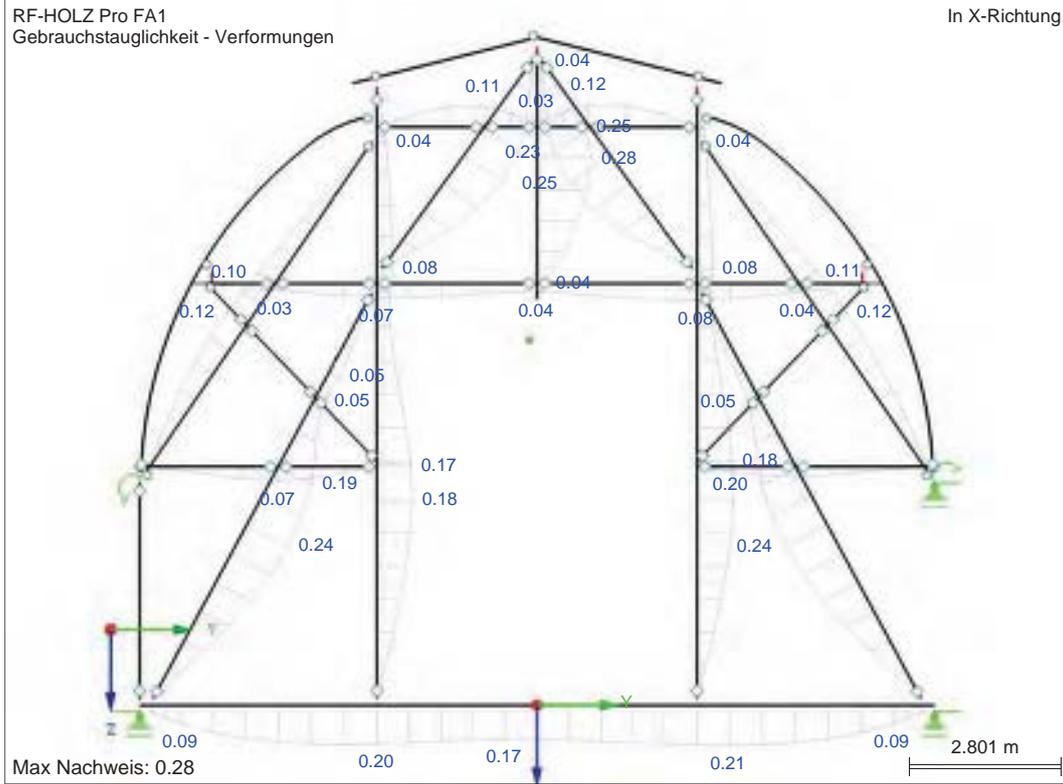
Ausnutzungsgrade

■ VG-3_ULS-BEMESSUNGSERGEBNISSE RF-HOLZ PRO



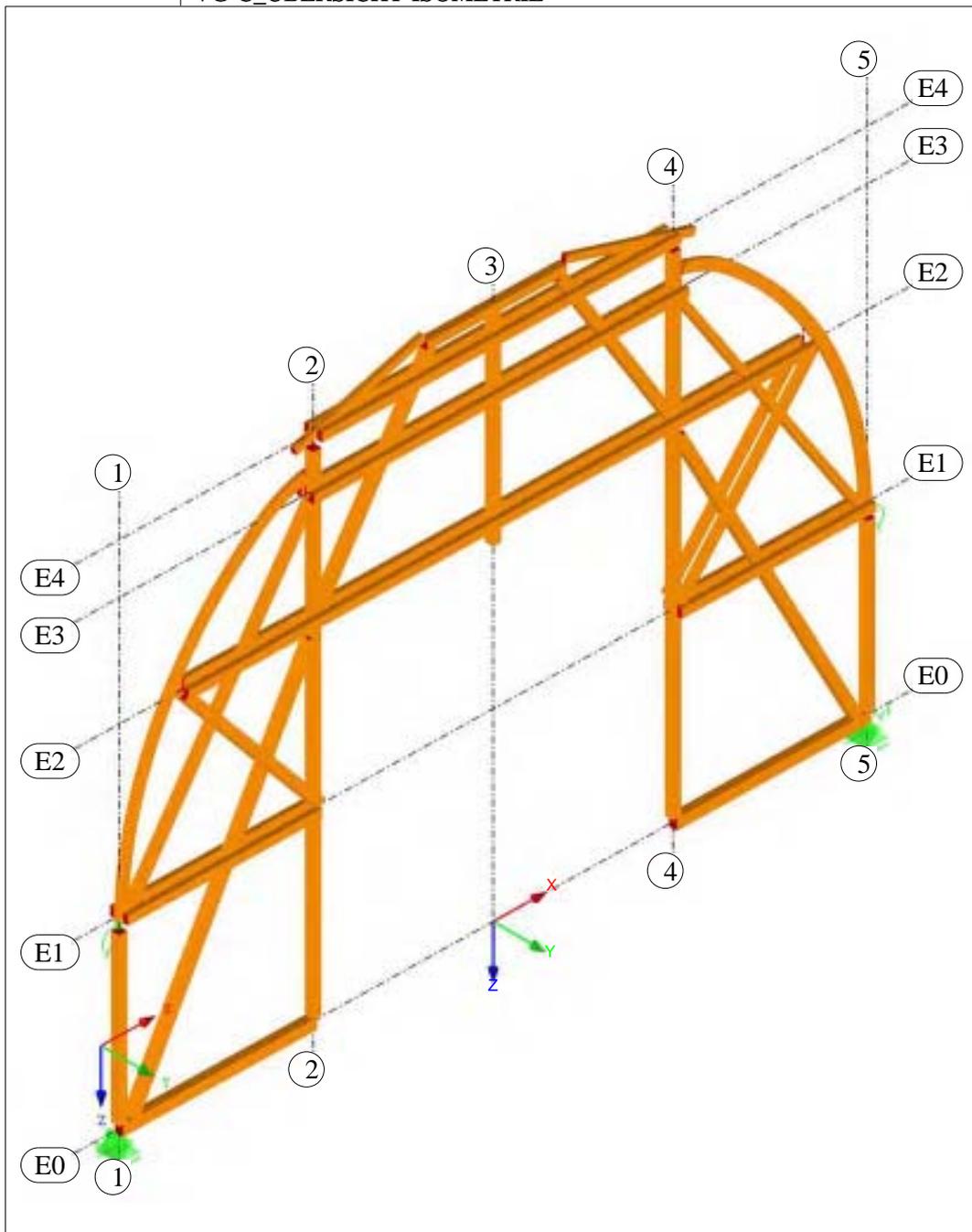
Ausnutzungsgrade

VG-3_SLS-BEMESSUNGSERGEBNISSE RF-HOLZ PRO



Ausnutzungsgrade

VG-C_ÜBERSICHT-ISOMETRIE



MATERIALIEN

Mat. Nr.	Modul E [kN/cm ²]	Modul G [kN/cm ²]	Querdehnzahl ν [-]	Spez. Gewicht ρ [kN/m ³]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Teilsich.-Beiw. β_M [-]	Material-Modell
2	Pappel und Nadelholz C24 1100.00	69.00	ÖNORM EN 6.971	338:2009-12 + 5.50	ÖNORM B 5.00E-06	1995-1-1:2014 1.30	Isotrop linear elastisch
3	Pappel und Nadelholz C30 1200.00 Holzgüte C30	75.00	ÖNORM EN 7.000	338:2009-12 + 5.50	ÖNORM B 5.00E-06	1995-1-1:2014 1.30	Isotrop linear elastisch

KNOTENLAGER

Lager Nr.	Knoten Nr	Folge	Lagerdrehung [°]			Stütze in Z	Lagerung bzw. Feder					
			um X	um Y	um Z		u _{x'}	u _{y'}	u _{z'}	$\delta_{x'}$	$\delta_{y'}$	$\delta_{z'}$
1	1141,1142	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	Feder	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Bundtramaufleger											
4	1123,1124	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Feder	<input type="checkbox"/>
	Torsionsfest Lagerung Fußpfette											
5	1145, 1148, 1149, 1151	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	6	1143, 1146, 1147, 1150	XYZ	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

KNOTENLAGERFEDERN

Lager Nr.	Knoten Nr.	Wegfeder [kN/m]			Drehfeder [kNm/rad]		
		C _{u,x'}	C _{u,y'}	C _{u,z'}	C _{g,x'}	C _{g,y'}	C _{g,z'}
1	1141,1142	250.000	-	-	-	-	-
4	1123,1124	-	-	-	-	50.000	-

QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I _r [cm ⁴] A [cm ²]	I _y [cm ⁴] A _y [cm ²]	I _x [cm ⁴] A _x [cm ²]	Hauptachsen ϑ [°]	Drehung ϑ' [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
							Breite b	Höhe h
1	H-Rechteck 190/250 3	30544.54 475.00	24739.58 395.83	14289.58 395.83	0.00	0.00	190.0	250.0
		Bundtram [19/25]						
2	H-Rechteck 190/190 3	18331.82 361.00	10860.08 300.83	10860.08 300.83	0.00	0.00	190.0	190.0
		Hängestuhlsäule [19/19]						
3	H-Rechteck 190/210 3	22159.27 399.00	14663.25 332.50	12003.25 332.50	0.00	0.00	190.0	210.0
		liegende Stuhlsäule unten [19/21]						
4	H-Rechteck 180/155 3	10772.14 279.00	5585.81 232.50	7533.00 232.50	0.00	0.00	180.0	155.0
		Strebebalken [18/15,5]						
5	H-Rechteck 190/210 3	22159.27 399.00	14663.25 332.50	12003.25 332.50	0.00	0.00	190.0	210.0
		liegende Stuhlsäule oben [19/21]						
6	H-Rechteck 190/190 3	18331.82 361.00	10860.08 300.83	10860.08 300.83	0.00	0.00	190.0	190.0
		Stuhlsäule [19/19]						
7	H-2B 200/190/115 3	12998.79 460.00	15333.33 191.67	5069.58 383.33	0.00	0.00	420.0	200.0
		Diagonalverstrebung [2x11,5/20]						
8	H-2B 200/190/115 3	12998.79 460.00	15333.33 191.67	5069.58 383.33	0.00	0.00	420.0	200.0
		Zangenbalkenpaar [2x11,5/20]						
9	H-Rechteck 90/240 2	4456.44 216.00	10368.00 180.00	1458.00 180.00	0.00	0.00	90.0	240.0

■ QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I_T [cm ⁴]	I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]	Hauptachsen α [°]	Drehung β [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
		A [cm ²]	A _y [cm ²]	A _z [cm ²]			Breite b	Höhe h
Sparrenpfosten (Kuppel) [2x4,5/24]								
10	H-Rechteck 120/160 2	4975.16 192.00	4096.00 160.00	2304.00 160.00	0.00	0.00	120.0	160.0
Sparren (Laterne) [12/16]								
11	H-Rechteck 190/190 3	18331.82 361.00	10860.08 300.83	10860.08 300.83	0.00	0.00	190.0	190.0
Firstpfette (Laterne) [19/19]								

■ STABENDGELENKE

Gelenk Nr.	Bezugs-system	Axial/Quer-Gelenk bzw. Feder[k			Momentengelenk bzw. Feder[kN			Kommentar
		$u_x/P_x/P_x'$	$u_y/P_y/P_y'$	$u_z/P_z/P_z'$	$M_x/M_x/M_x'$	$M_y/M_y/M_y'$	$M_z/M_z/M_z'$	
1001	Lokal x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	OHNE Nachgiebigkeit_Momentengelenk_O/W
1002	Global X,Y,Z	Scheren	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	OHNE Nachgiebigkeit_Scherengele nk_O/W
1010	Lokal x,y,z	12500.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fersenversatz_O/W
1011	Lokal x,y,z	3400.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eisenaufhängung O/W
1012	Lokal x,y,z	73000.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerader Zapfen TYP1_O/W (Bundtram-H ängestuhlsäul e)
1013	Lokal x,y,z	98800.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerader Zapfen TYP 2_O/W (Stuhlsäule-F ußpfette (Kuppel/Late rne)
1014	Lokal x,y,z	46800.000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerader Zapfen TYP 3_O/W (Sparrenfuß-F ußpfette)
1015	Global X,Y,Z	30700.000	<input type="checkbox"/>	30700.000	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Mittelkamm O/W (Zangenbalke n-Hängestuhl säule)
1016	Global X,Y,Z	37100.000	<input type="checkbox"/>	37100.000	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Kreuzkamm TYP 1_O/W (Zangenabalk en-liegende Stuhlsäulen)
1017	Benutzerdefini ertes X',Y',Z	<input type="checkbox"/>	37100.000	37100.000	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Kreuzkamm TYP 2_O (Diagonalzang enOST-liegen de Stuhlsäule/St rebebalken)
1018	Benutzerdefini ertes X',Y',Z	<input type="checkbox"/>	37100.000	37100.000	<input type="checkbox"/>	Scheren	<input type="checkbox"/>	Kreuzkamm TYP 2_W (Diagonalzang enWEST-lieg ende Stuhlsäule/St rebebalken)
1019	Global X,Y,Z	78100.000	<input type="checkbox"/>	137700.000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	abgestimmter Zapfen TYP 1_O/W (liegende Stuhlsäule unten - Hängesäule)
1020	Global X,Y,Z	71400.000	<input type="checkbox"/>	108300.000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	abgestimmter Z

STABENDGELENKE

Gelenk Nr.	Bezugs- system	Axial/Quer-Gelenk bzw. Feder[k			Momentengelenk bzw. Feder[kN			Kommentar
		$u_x/P_x/P_x$	$u_y/P_y/P_y$	$u_z/P_z/P_z$	M_x/M_x	M_y/M_y	M_z/M_z	
1021	Global X,Y,Z	44500.000	<input type="checkbox"/>	51600.000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zapfen TYP 2_O/W (liegende Stuhlsäule oben- Hängesäule) abgestirmer Zapfen TYP 3_O/W (liegende Stuhlsäule oben- Firstpfette)

STABSÄTZE

Satz Nr.	Stabsatz Bezeichnung	Typ	Stab Nr.	Länge [m]	Kommentar
1001	Laternenfirstpfette W	Stabzug	1006,1005	1.575	Laternenfirstpfette W
1002	Laternenfirstpfette O	Stabzug	1008,1007	1.575	Laternenfirstpfette O
1003	Laternenfirstpfette Gesamt	Stabzug	1008-1005	3.150	Laternenfirstpfette
1004	Laternensparren W	Stabzug	1012,1025	3.039	Laternensparren W
1005	Laternensparren O	Stabzug	1026,1013	3.039	Laternensparren O
1006	Kuppelsparren W	Stabzug	1034,1038,1042, 1050,1054,1058, 1069,1077,1089, 1104,1116	8.438	Kuppelsparren W
1007	Kuppelsparren O	Stabzug	1035,1039,1043, 1051,1055,1059, 1070,1080,1090, 1105,1121	8.438	Kuppelsparren O
1010	Stichbundtram W	Stabzug	1147,1148	4.385	Stichbundtram W
1011	Stichbundtram O	Stabzug	1149,1150	4.385	Stichbundtram O
1012	Zangenbalken E1_W	Stabzug	1117,1118	4.385	Zangenbalken E1_W
1013	Zangenbalken E1_O	Stabzug	1119,1120	4.385	Zangenbalken E1_O
1014	Zangenbalken E2	Stabzug	1081-1088	14.168	Zangenbalken E2
1015	Zangenbalken E4	Stabzug	1044-1049	8.470	Zangenbalken E3
1016	Zangenbalken E4	Stabzug	1017-1020	8.120	Zangenbalken E4
1020	Hängestuhlsäule W	Stabzug	1032,1052,1063, 1073,1078,1091, 1106,1114,1135	11.250	Hängestuhlsäule W
1021	Hängestuhlsäule O	Stabzug	1033,1053,1064, 1076,1079,1092, 1107,1115,1136	11.250	Hängestuhlsäule O
1022	abgetrennte Hängesäule_Mitt e	Stabzug	1015,1030,1062, 1093	4.600	abgetrennte Hängesäule_Mitte
1023	Stuhlsäule W	Stabzug	1138	3.800	Stuhlsäule W
1024	Stuhlsäule O	Stabzug	1139	3.800	Stuhlsäule O
1030	liegende Stuhlsäule unten W	Stabzug	1100,1112,1134	8.529	liegende Stuhlsäule unten W
1031	liegende Stuhlsäule unten O	Stabzug	1101,1113,1137	8.529	liegende Stuhlsäule unten O
1032	liegende Stuhlsäule oben W	Stabzug	1014,1029,1060	4.721	liegende Stuhlsäule oben W
1033	liegende Stuhlsäule oben O	Stabzug	1016,1031,1061	4.721	liegende Stuhlsäule oben O
1034	Strebebalken W	Stabzug	1065,1097,1108	7.550	Strebebalken W
1035	Strebebalken O	Stabzug	1066,1098,1109	7.550	Strebebalken O
1040	Diagonalverstrebu ng W	Stabzug	1096,1102,1110	4.702	Diagonalverstrebung W
1041	Diagonalverstrebu ng O	Stabzug	1099,1103,1111	4.702	Diagonalverstrebung O
2001	Bundtram VG-2	Stabzug	1159,4-6	14.600	Bundtram VG-2
2002	Bundtram VG-4	Stabzug	3-1,1158	14.600	Bundtram VG-4

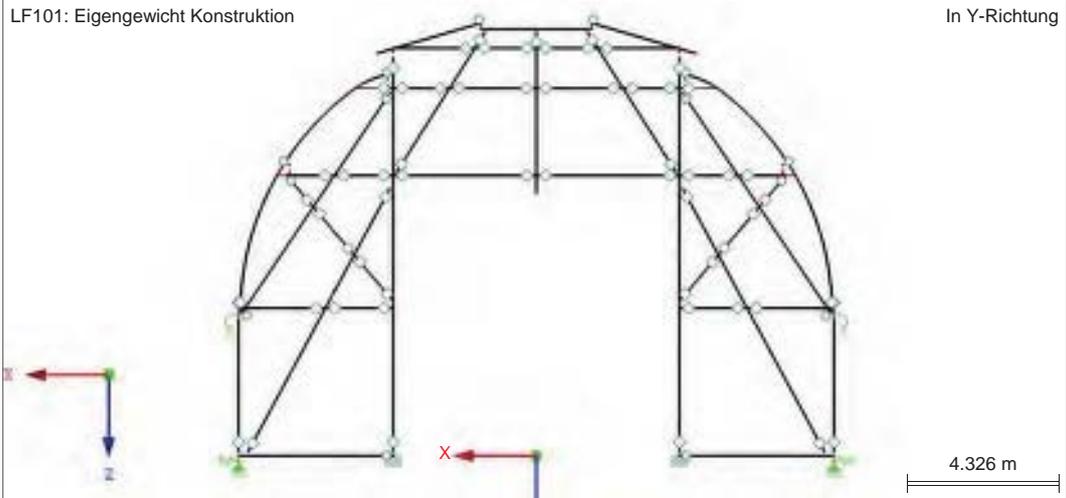
■ **LASTFÄLLE**

Lastfall	LF-Bezeichnung	EN 1990 ÖNORM Einwirkungskategorie	Eigengewicht - Faktor in Richtung			
			Aktiv	X	Y	Z
LF101	Eigengewicht Konstruktion	Ständig	<input checked="" type="checkbox"/>	0.000	0.000	1.000
LF102	ständige Lasten (Dachaufbau)	Ständig	<input type="checkbox"/>			
LF201	Nutzlast Kat. H	Verkehrslasten - Kategorie H: Dächer	<input type="checkbox"/>			
LF301	Schnee,Gesamt-voll	Schnee (H ≥ 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF302	Schnee,N-voll	Schnee (H ≥ 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF303	Schnee,S-voll	Schnee (H ≥ 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF304	Schnee,O-voll	Schnee (H ≥ 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF305	Schnee,W-voll	Schnee (H ≥ 1000 m über NN)	<input type="checkbox"/>			
LF401	Wind,N-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF402	Wind,N-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF403	Wind,S-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF404	Wind,S-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF405	Wind,O-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF406	Wind,O-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF407	Wind,W-(iD)	Wind	<input type="checkbox"/>			
LF408	Wind,W-(iS)	Wind	<input type="checkbox"/>			

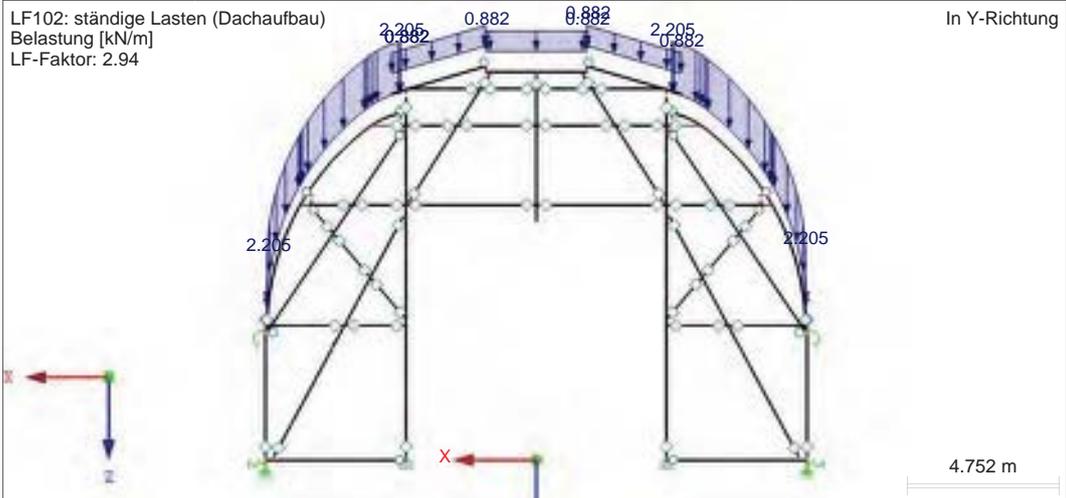
■ **ERGEBNISKOMBINATIONEN**

Ergebn kombin	Bezeichnung	Belastung
EK1	GZT (STR/GEO) - Ständig / vorübergehend - Gl. 6.10	LK1/s bis LK47/s
EK2	GZG - Charakteristisch	LK48/s bis LK94/s
EK3	GZG - Häufig	LK95/s bis LK106/s
EK4	GZG - Quasi-ständig	LK107/s

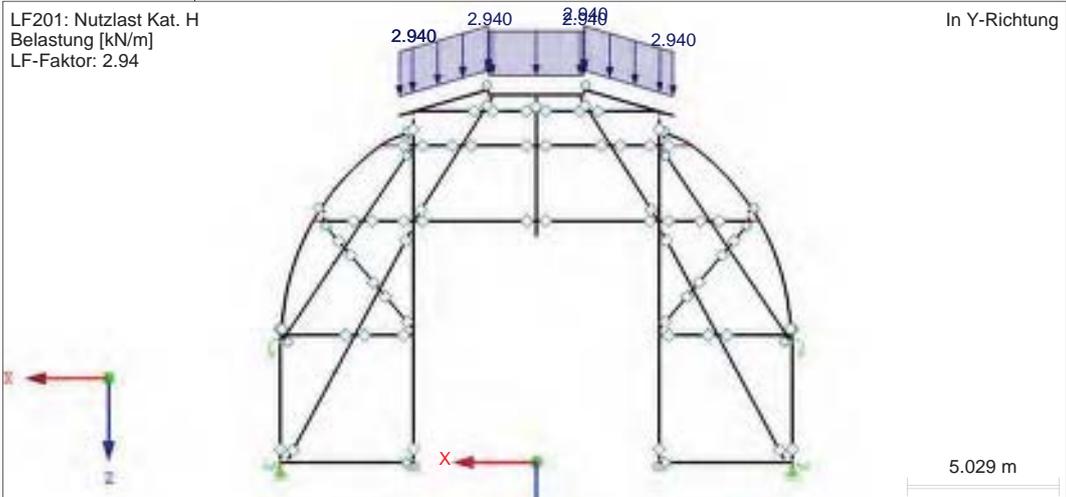
■ VG-C_LASTFÄLLE



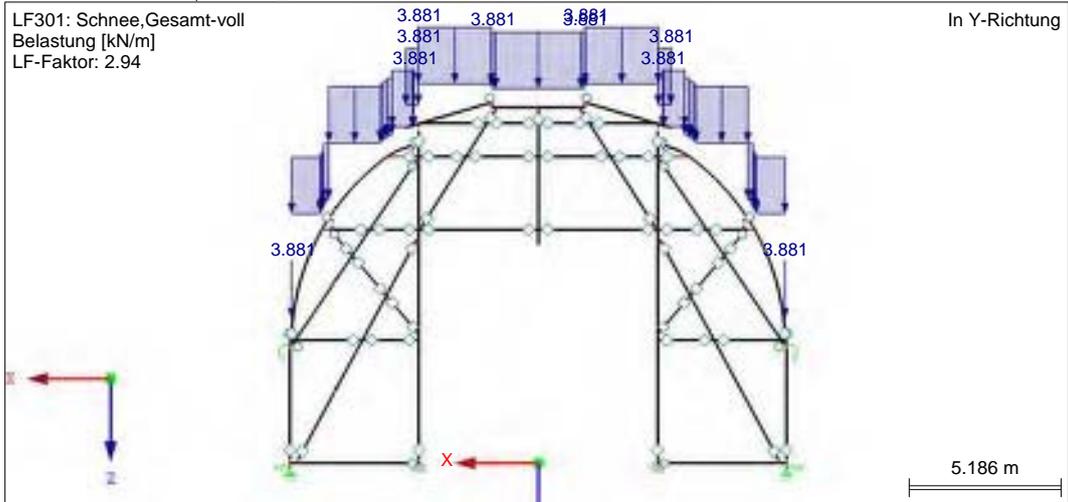
■ VG-C_LASTFÄLLE



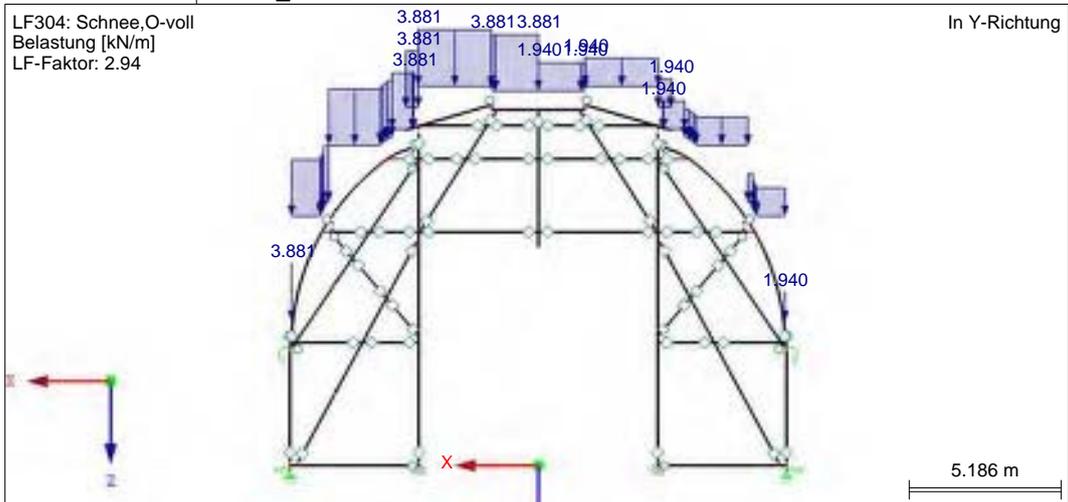
■ VG-C_LASTFÄLLE



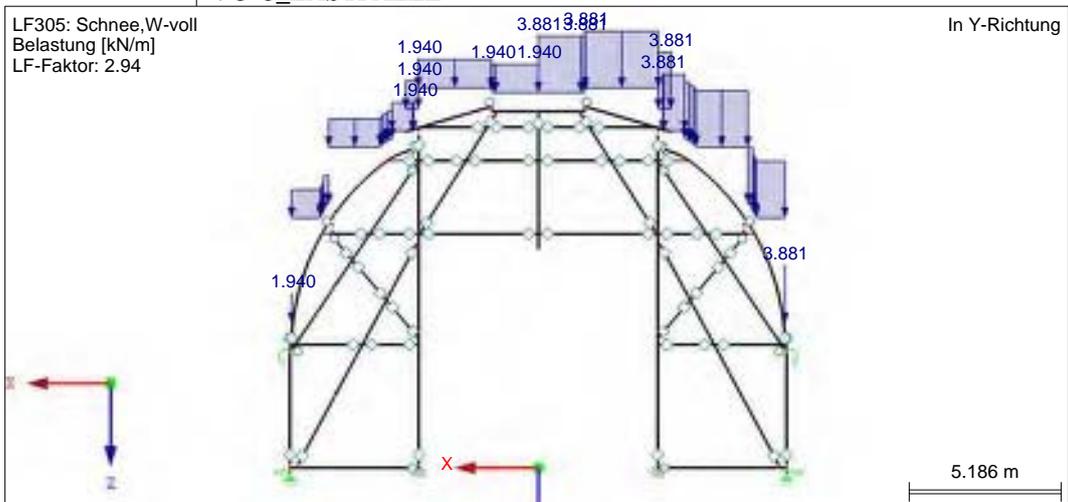
■ VG-C_LASTFÄLLE



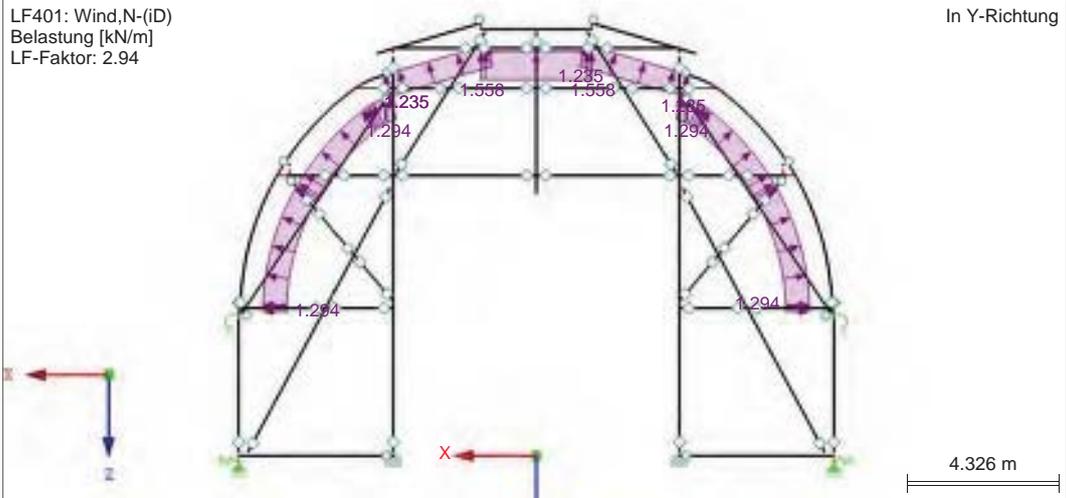
■ VG-C_LASTFÄLLE



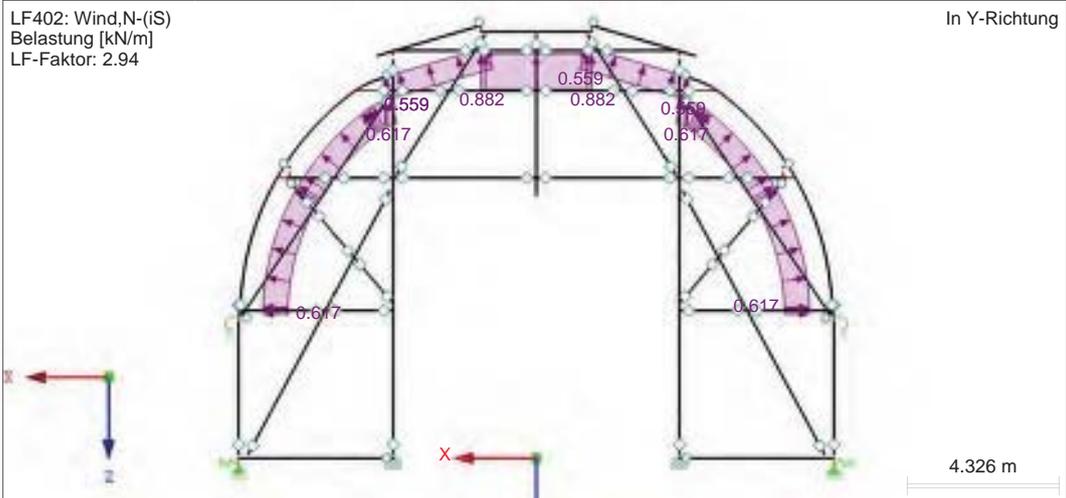
■ VG-C_LASTFÄLLE



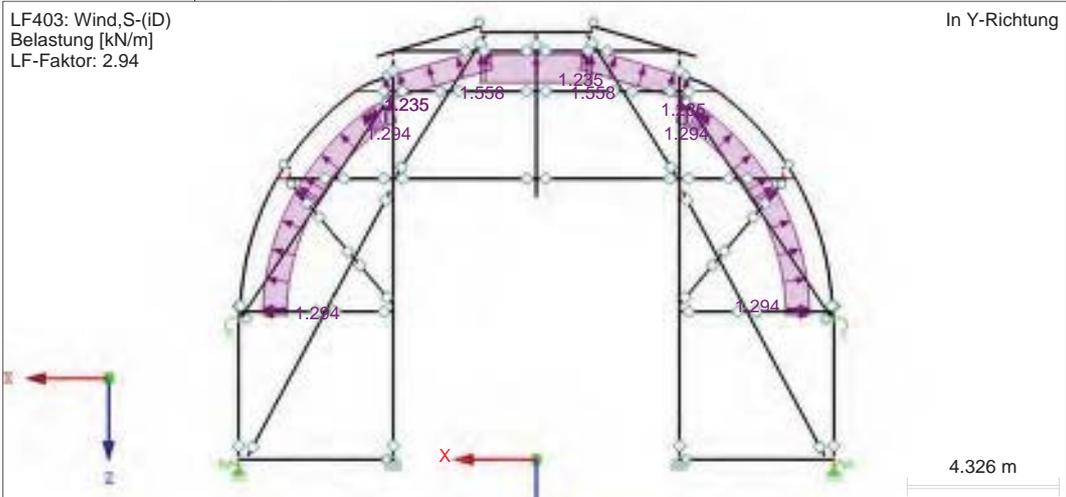
■ VG-C_LASTFÄLLE



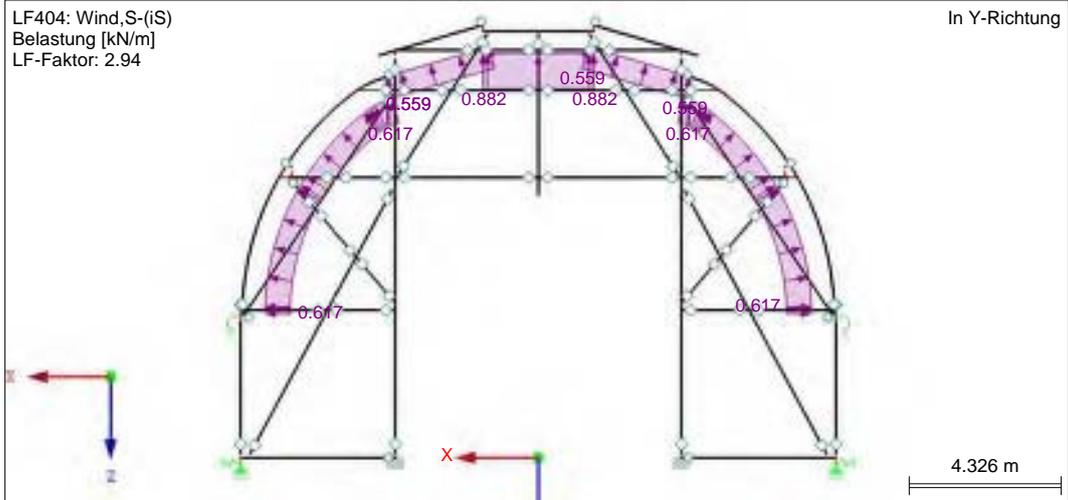
■ VG-C_LASTFÄLLE



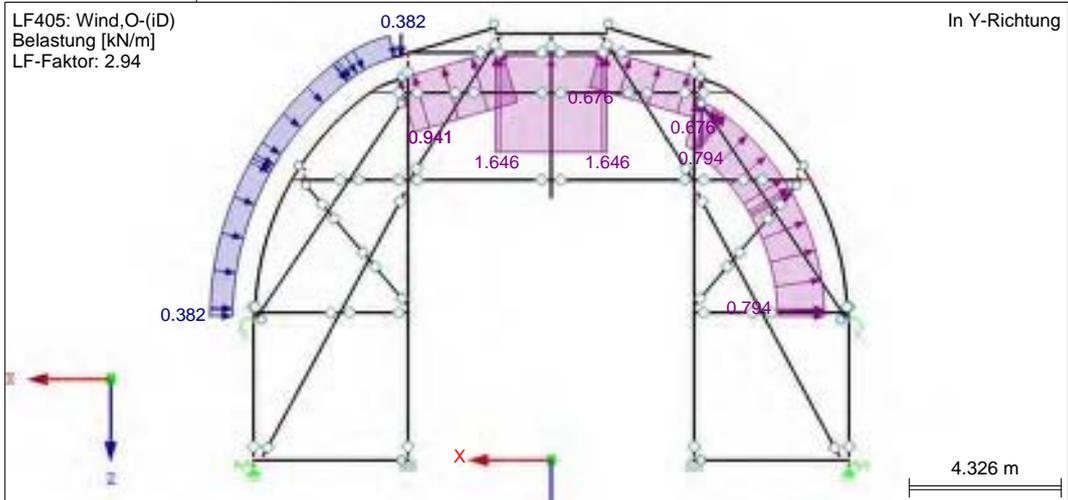
■ VG-C_LASTFÄLLE



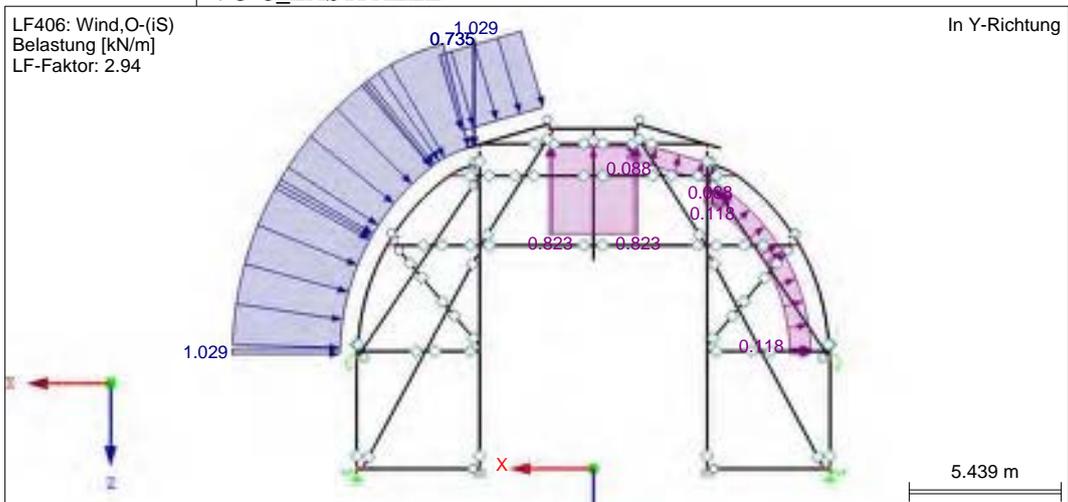
■ VG-C_LASTFÄLLE



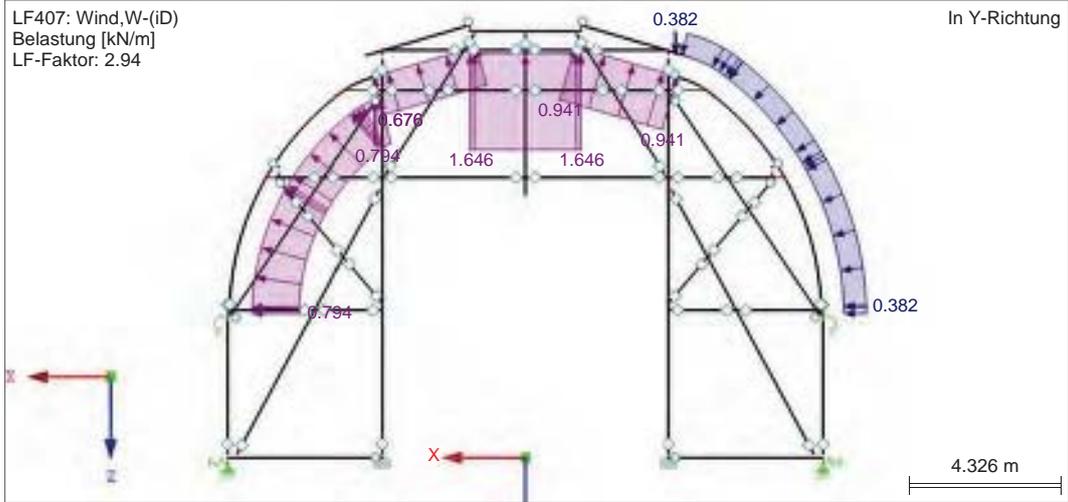
■ VG-C_LASTFÄLLE



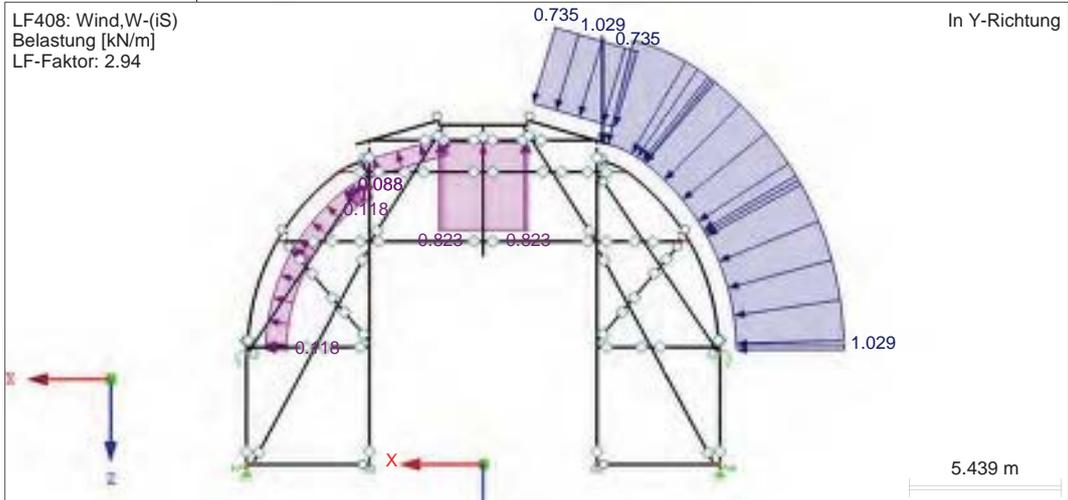
■ VG-C_LASTFÄLLE

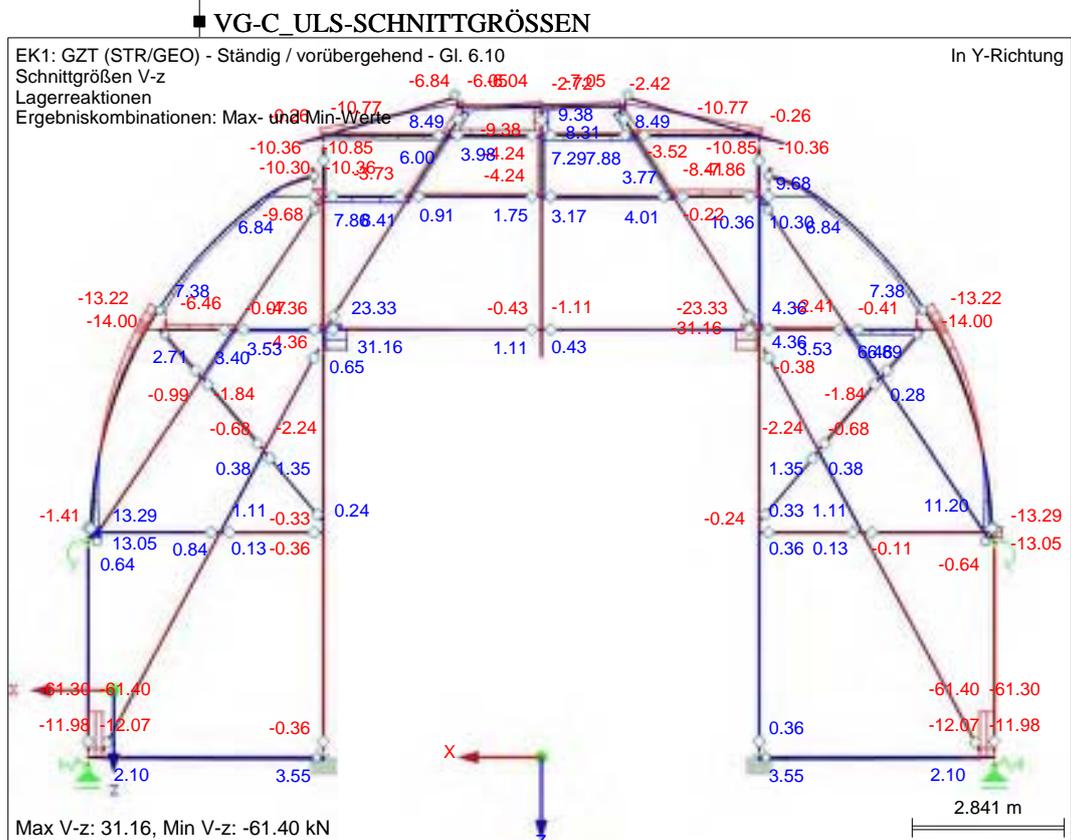
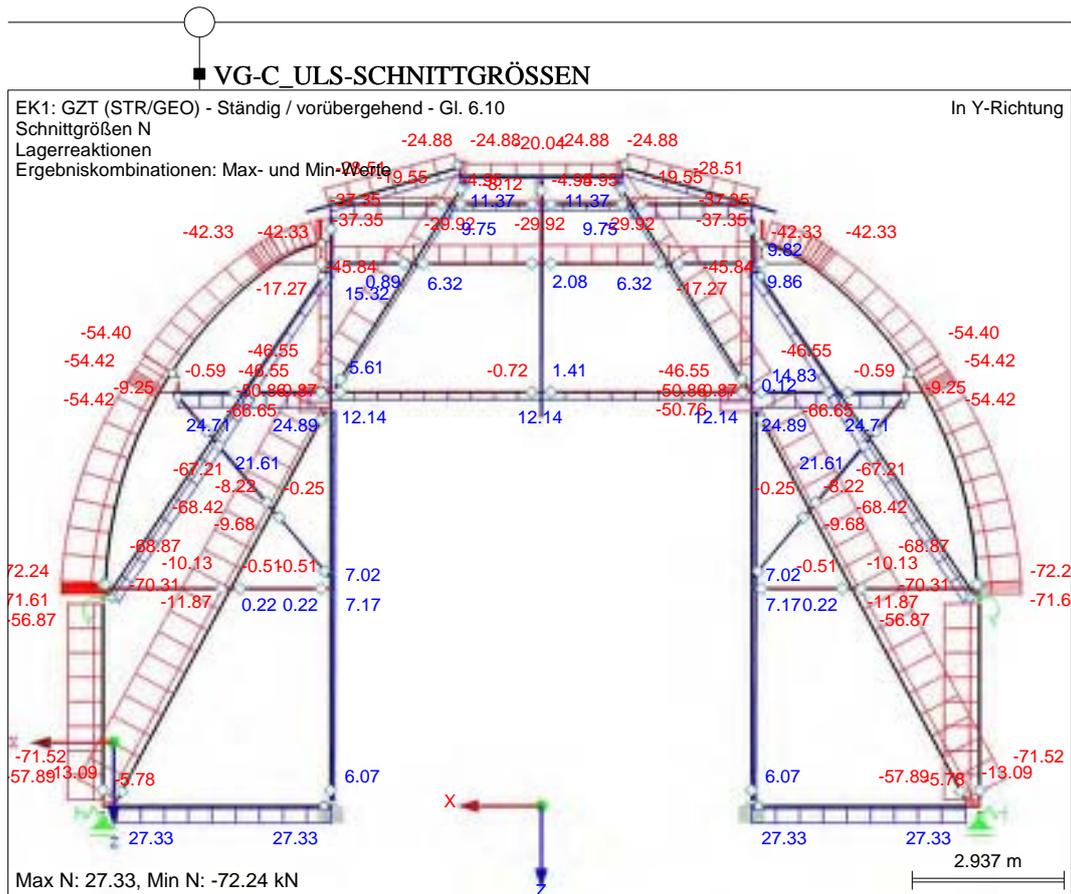


■ VG-C_LASTFÄLLE

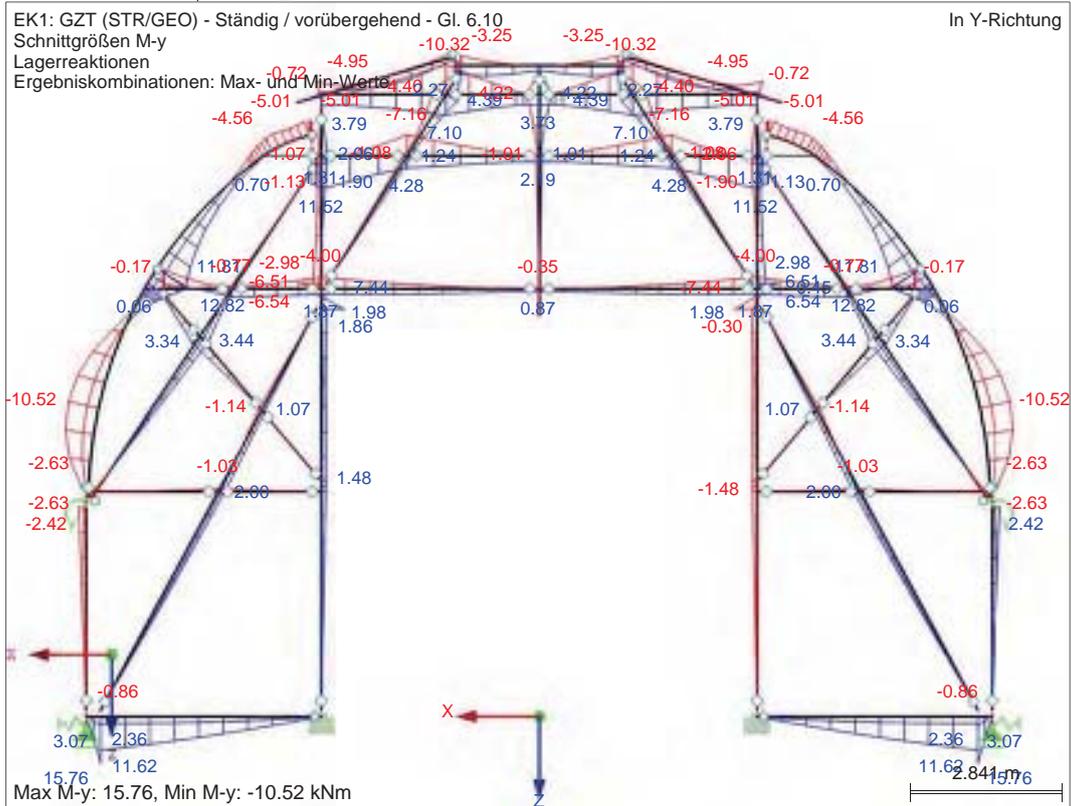


■ VG-C_LASTFÄLLE

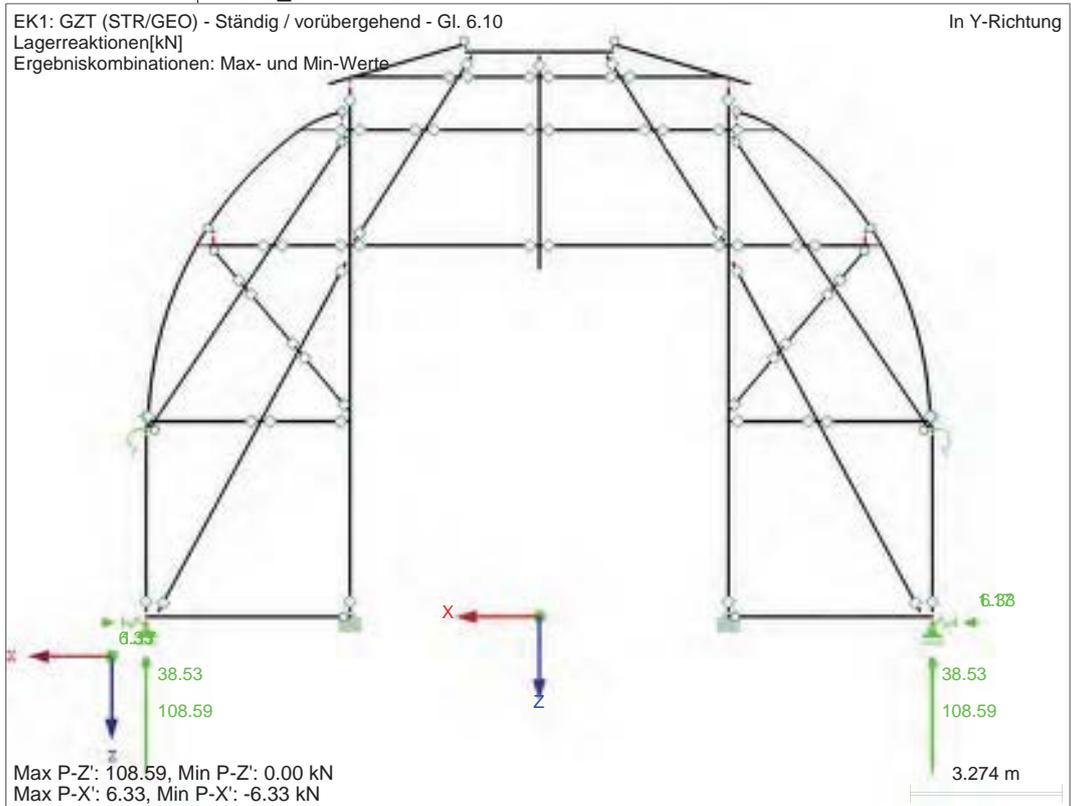




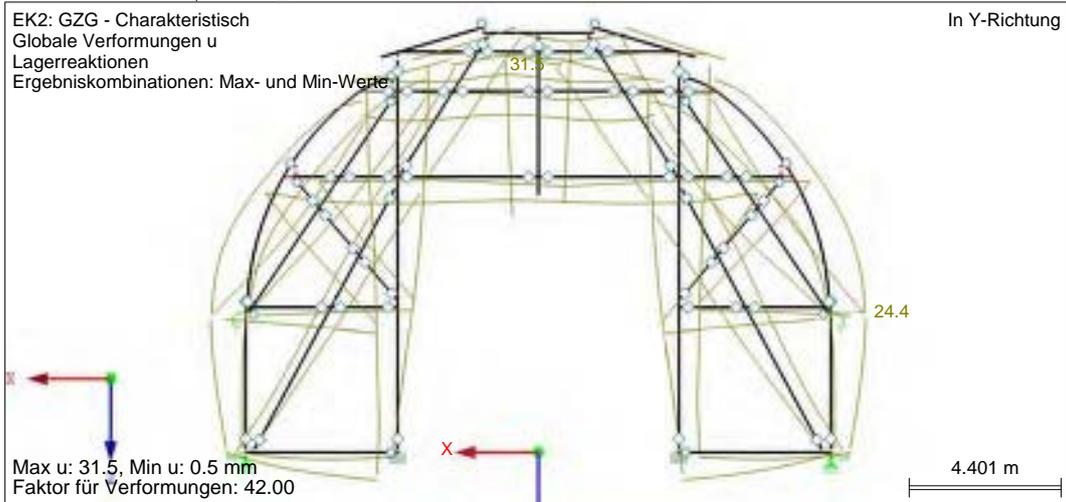
VG-C_ULS-SCHNITTGRÖSSEN



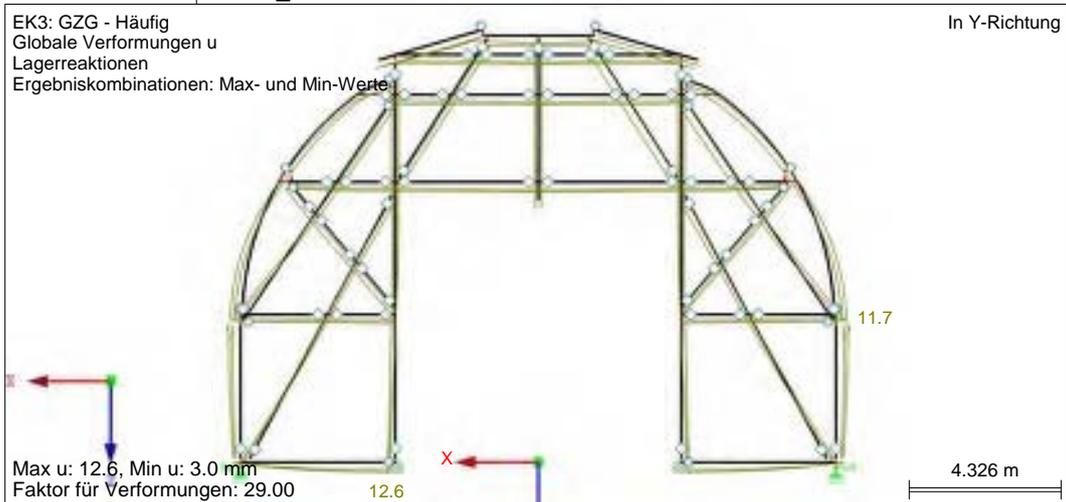
VG-C_ULS-LAGERREAKTIONEN



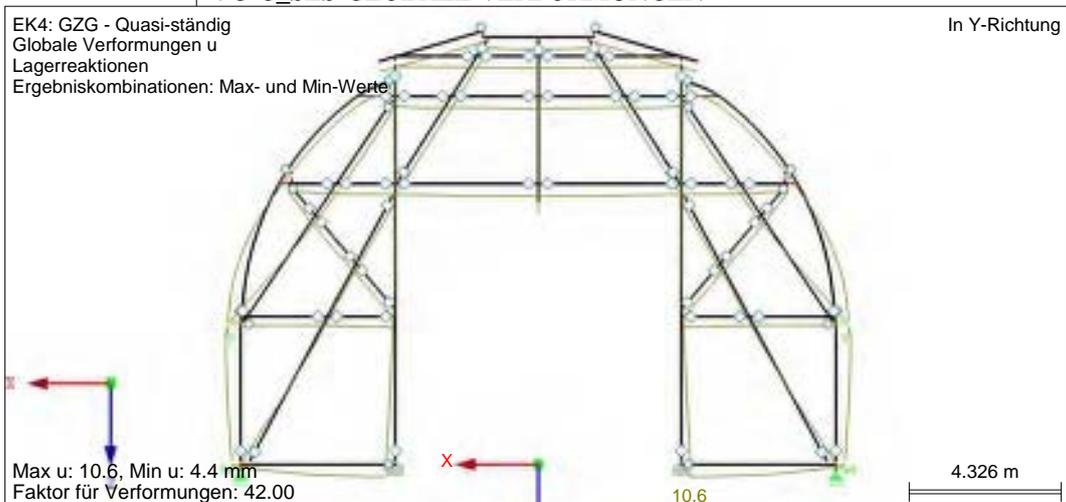
■ VG-C_SLS-GLOBALE VERFORMUNGEN



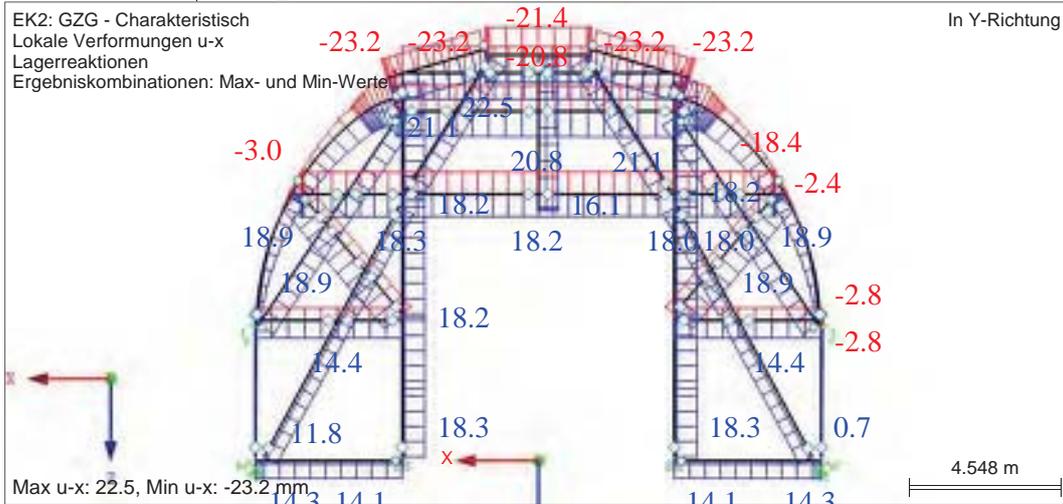
■ VG-C_SLS-GLOBALE VERFORMUNGEN



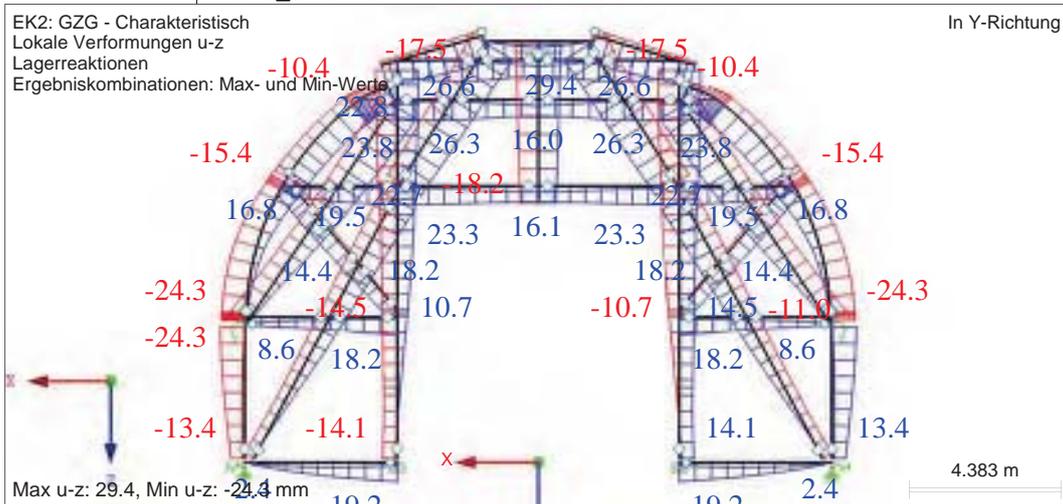
■ VG-C_SLS-GLOBALE VERFORMUNGEN



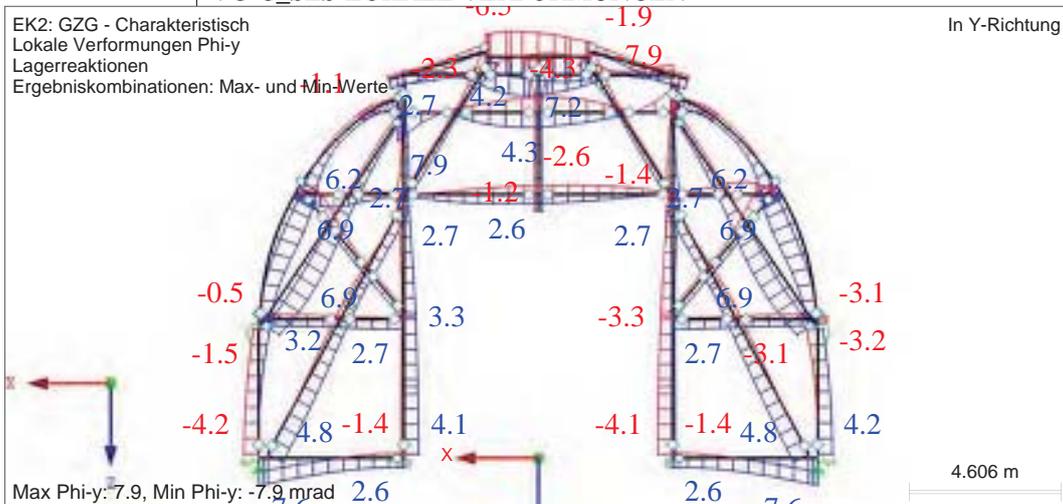
VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



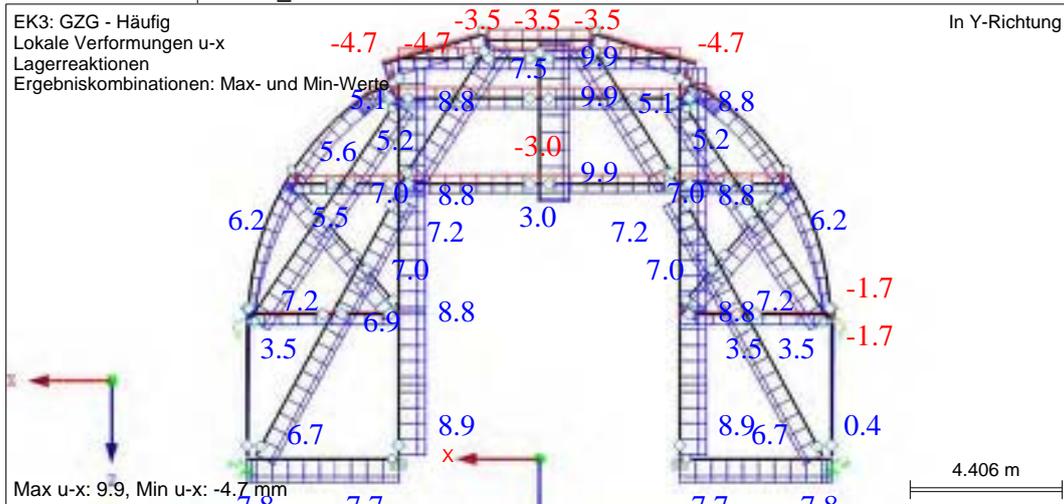
VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



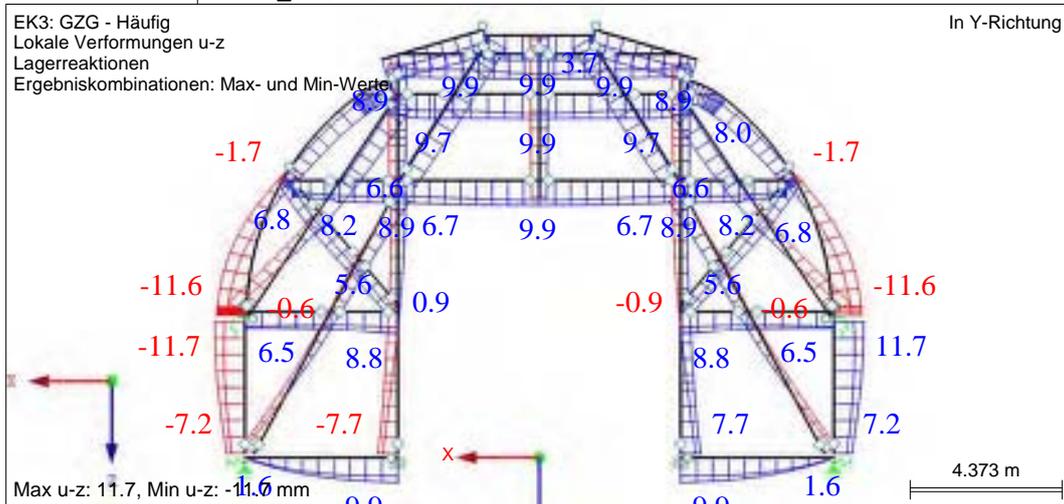
VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



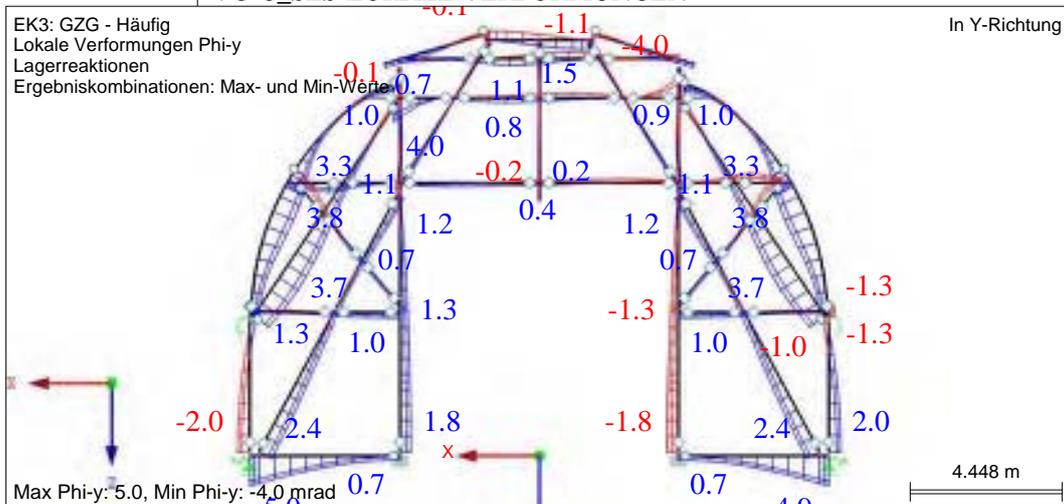
■ VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



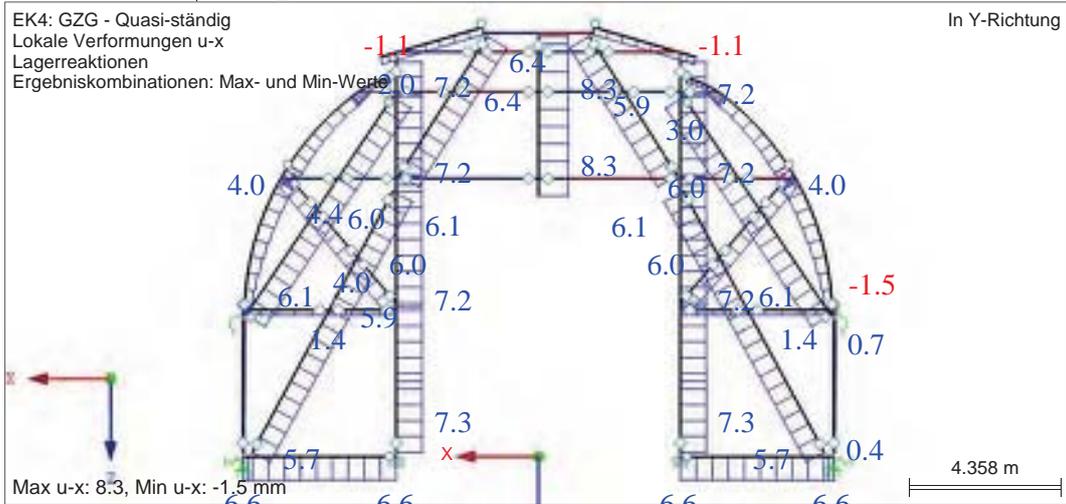
■ VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



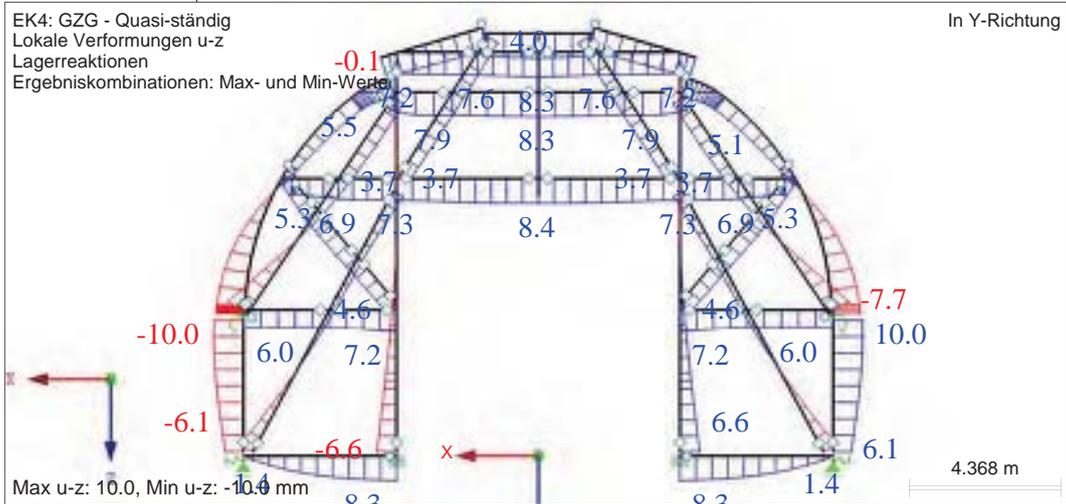
■ VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



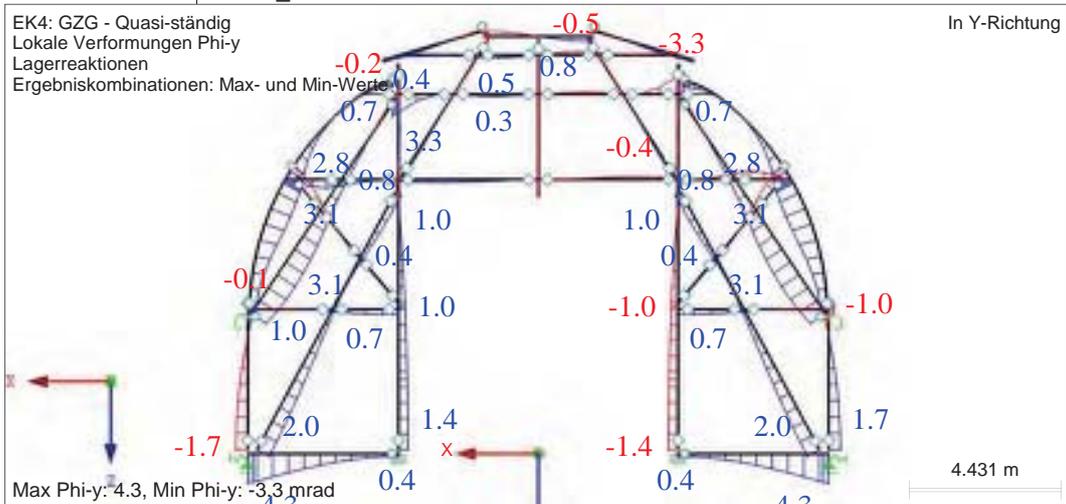
VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



VG-C_SLS-LOKALE VERFORMUNGEN



2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessu Nr.	Bezeichnung
1001	Laternenfirstpfette W (Stab Nr. 1005,1006)					
	1005	0.000	LK3	0.00	☒ 1	100) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1005	0.000	LK35	0.03	☒ 1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1005	0.000	LK51	0.04	☒ 1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1005	0.000	LK15	0.22	☒ 1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1005	0.000	LK15	0.04	☒ 1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1005	0.000	LK35	0.11	☒ 1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1006	1.455	LK35	0.15	☒ 1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1006	0.970	LK27	0.02	☒ 1	301) Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1006	0.970	LK51	0.20	☒ 1	321) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1005	0.000	LK81	0.00	☒ 1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1006	0.000	LK60	0.18	☒ 1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1006	0.000	EK4	0.07	☒ 1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1002	Laternenfirstpfette O (Stab Nr. 1007,1008)				
1008		0.120	LK2	0.00	☒ 1	100) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
1008		0.000	LK52	0.03	☒ 1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
1008		0.000	LK34	0.04	☒ 1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
1008		0.120	LK19	0.22	☒ 1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
1008		0.120	LK19	0.04	☒ 1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
1008		0.120	LK52	0.11	☒ 1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
1007		0.000	LK52	0.15	☒ 1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
1007		0.485	LK41	0.02	☒ 1	301) Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
1007		0.485	LK34	0.20	☒ 1	321) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
1007		0.000	LK98	0.00	☒ 1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
1007		1.455	LK60	0.18	☒ 1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1007		1.455	EK4	0.07	☒ 1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1003		Laternenfirstpfette Gesamt (Stab Nr. 1005-1008)				
	1005	0.000	LK3	0.00	☒ 1	100) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1008	0.000	LK52	0.03	☒ 1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1005	0.000	LK51	0.04	☒ 1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1008	0.120	LK19	0.22	☒ 1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1008	0.120	LK19	0.04	☒ 1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1008	0.120	LK52	0.11	☒ 1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3

■ 2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	1007	0.000	LK52	0.15	1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1006	0.970	LK27	0.02	1	301) Druckstab mit Normdruck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1006	0.970	LK51	0.20	1	321) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1005	0.000	LK81	0.00	1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1006	0.000	LK60	0.18	1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1006	0.000	EK4	0.07	1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1004	Laternensparren W (Stab Nr. 1012,1025)				
	1025	0.000	LK6	0.00	1	100) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1012	0.000	LK35	0.02	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1012	2.593	LK51	0.02	1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1012	2.593	LK19	0.11	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1012	0.864	LK15	0.09	1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1012	2.593	LK34	0.10	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1012	1.296	LK51	0.11	1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1012	0.864	LK6	0.01	1	301) Druckstab mit Normdruck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1012	1.296	LK51	0.14	1	321) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1012	1.296	LK51	0.14	1	345) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1012	0.000	EK4	0.00	1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1012	1.296	LK100	0.14	1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1012	1.296	EK4	0.03	1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1005	Laternensparren O (Stab Nr. 1013,1026)					
	1026	0.000	LK4	0.00	1	100) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1013	0.000	LK52	0.02	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1013	2.593	LK34	0.02	1	102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1013	2.593	LK15	0.11	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1013	0.864	LK19	0.09	1	151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1013	2.593	LK51	0.10	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1013	1.296	LK34	0.11	1	171) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1013	0.864	LK4	0.01	1	301) Druckstab mit Normdruck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1013	1.296	LK34	0.14	1	321) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um y-Achse
	1013	1.296	LK34	0.14	1	345) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1013	0.000	EK4	0.00	1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1013	1.296	LK83	0.14	1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	1013	1.296	EK4	0.03	☒ 1 402)	7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1006	Kuppelspannen W (Stab Nr. 1034,1038,1042,1050,1054,1058,1069,1077,1089,1104,1116)					
	1116	0.000	LK19	0.06	☒ 1 102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1034	0.050	LK19	0.16	☒ 1 111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1034	0.050	LK19	0.10	☒ 1 171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1116	0.000	LK19	0.28	☒ 1 303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1116	0.200	LK19	0.32	☒ 1 323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1104	3.766	LK19	0.06	☒ 1 2102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1077	0.115	LK9	0.17	☒ 1 2111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1069	0.000	LK19	0.32	☒ 1 2171)	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4 und 6.4.3
	1034	0.000	EK4	0.00	☒ 1 400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1034	0.050	LK84	0.01	☒ 1 401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1034	0.050	EK4	0.00	☒ 1 402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1038	0.000	LK62	0.00	☒ 1 2400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1058	1.871	LK101	0.52	☒ 1 2401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1058	2.256	EK4	0.12	☒ 1 2402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1007	Kuppelspannen O (Stab Nr. 1035,1039,1043,1051,1055,1059,1070,1080,1090,1105,1121)					
	1121	0.200	LK15	0.06	☒ 1 102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1035	0.050	LK15	0.16	☒ 1 111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1035	0.050	LK15	0.10	☒ 1 171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1121	0.200	LK15	0.28	☒ 1 303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1121	0.000	LK15	0.32	☒ 1 323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1105	3.766	LK15	0.06	☒ 1 2102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1080	0.115	LK9	0.17	☒ 1 2111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1070	0.000	LK15	0.32	☒ 1 2171)	Querschnittstragfähigkeit - Gekrümmter Träger - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4 und 6.4.3
	1035	0.000	EK4	0.00	☒ 1 400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1121	0.000	LK101	0.03	☒ 1 401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1121	0.000	EK4	0.01	☒ 1 402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1039	0.000	LK62	0.00	☒ 1 2400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1059	1.871	LK84	0.51	☒ 1 2401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	1059	2.256	EK4	0.12	2402)	7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1010	Stichbundtram W (Stab Nr. 7,1147,1148)					
	1148	0.000	LK15	0.04	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	7	0.000	LK15	0.01	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	7	0.005	LK15	1.03	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1147	0.000	LK18	0.12	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1148	4.114	LK15	0.28	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1147	0.000	LK15	0.32	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1148	4.114	LK15	0.24	311)	Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1147	0.000	LK15	0.33	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1147	0.000	LK15	0.12	341)	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	7	0.003	LK58	0.00	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1148	2.743	LK67	0.32	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1148	2.286	EK4	0.14	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1011	Stichbundtram O (Stab Nr. 8,1149,1150)					
	1149	0.000	LK19	0.04	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	8	0.000	LK19	0.01	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	8	0.012	LK19	1.03	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1150	0.000	LK14	0.12	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1149	4.114	LK19	0.28	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1150	0.000	LK19	0.32	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	8	0.000	LK6	0.01	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1149	4.114	LK19	0.24	311)	Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1150	0.000	LK19	0.33	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1150	0.000	LK19	0.12	341)	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	8	0.012	EK4	0.00	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1149	2.743	LK71	0.32	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1149	2.286	EK4	0.14	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1012	Zangenbalken E1_W (Stab Nr. 1117,1118)					
	1118	1.923	LK1	0.03	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1118	0.000	LK5	0.00	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1117	0.000	LK1	0.05	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis		Bemessu Nr.	Bezeichnung
	1117	0.000	LK1	0.05	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	1117	2.462	EK4	0.00	☒ 1	4000)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1117	0.000	LK59	0.05	☒ 1	4001)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1117	0.000	EK4	0.04	☒ 1	4002)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1013	Zangenbalken E1_O (Stab Nr. 1119,1120)						
	1119	1.923	LK1	0.03	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1119	0.000	LK37	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1119	1.923	LK1	0.05	☒ 1	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	1119	1.923	LK1	0.05	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	1119	0.000	EK4	0.00	☒ 1	4000)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1119	1.923	LK68	0.05	☒ 1	4001)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1119	1.923	EK4	0.04	☒ 1	4002)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1014	Zangenbalken E2 (Stab Nr. 1081-1088)						
	1086	0.000	LK24	0.07	☒ 1	3101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1082	0.000	LK9	0.24	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1087	0.000	LK37	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1088	0.000	LK1	0.01	☒ 1	3151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	1088	0.000	LK1	0.01	☒ 1	3156)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	1082	0.000	LK9	0.26	☒ 1	3181)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	1083	0.000	LK9	0.07	☒ 1	3183)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	1082	0.000	LK9	0.37	☒ 1	3186)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
	1081	0.000	EK4	0.00	☒ 1	4000)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1084	1.353	LK100	0.18	☒ 1	4001)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1084	4.060	EK4	0.05	☒ 1	4002)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1015	Zangenbalken E4 (Stab Nr. 1044-1049)						
	1046	1.968	LK34	0.06	☒ 1	3102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1044	0.000	LK19	0.36	☒ 1	3111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1048	0.000	LK23	0.00	☒ 1	3112)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1044	0.175	LK19	0.53	☒ 1	3211)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.2.4
	1044	0.000	LK19	0.07	☒ 1	3212)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.1.4
	1045	0.000	LK19	0.52	☒ 1	3216)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.2.4

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	1046	1.968	LK34	0.11	1	3303) Druckstab mit Normaldruck - Knicken um beiden Achsen nach 6.3.2
	1044	0.175	LK19	0.66	1	3341) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	1044	0.000	LK19	0.14	1	3342) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	1045	0.000	LK19	0.45	1	3344) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.3.2
	1044	0.000	EK4	0.00	1	4000) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1046	0.492	LK100	0.23	1	4001) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1046	2.459	EK4	0.06	1	4002) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1016	Zangenbalken E4 (Stab Nr. 1017-1020)					
	1017	1.393	LK12	0.01	1	3101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1019	0.434	LK18	0.00	1	3102) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1019	1.738	LK51	0.16	1	3111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1017	0.000	LK42	0.00	1	3112) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1019	1.738	LK19	0.18	1	3151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	1019	1.738	LK19	0.18	1	3156) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	1018	0.000	LK52	0.21	1	3181) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	1017	0.000	LK51	0.04	1	3183) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	1017	2.322	LK52	0.27	1	3186) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
	1020	0.000	LK51	0.31	1	3211) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.2.4
	1020	0.000	LK52	0.02	1	3212) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.1.4
	1019	1.738	LK51	0.31	1	3216) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.2.4
	1019	0.434	LK18	0.06	1	3303) Druckstab mit Normaldruck - Knicken um beiden Achsen nach 6.3.2
	1020	0.000	LK52	0.61	1	3341) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	1020	0.000	LK52	0.31	1	3342) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Schwerpunktspannung im Druckgurt Nc + My nach 6.3.2
	1019	1.738	LK51	0.30	1	3344) Stab mit Biegung und Druck - Knicken um beiden Achsen - Randspannung in Zuggurt Nc + My nach 6.3.2
	1017	0.000	EK4	0.00	1	4000) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1017	2.322	LK100	0.22	1	4001) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1018	1.738	EK4	0.03	1	4002) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1020	Hängestuhlsäule W (Stab Nr. 1032,1052,1063,1073,1078,1091,1106,1114,1135)					
	1052	0.000	LK34	0.04	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug i

■ 2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
					1	in Faserrichtung nach 6.1.2
	1091	0.378	LK15	0.07	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspehnung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1073	0.000	LK34	0.67	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1052	0.000	LK52	0.08	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1052	0.000	LK36	0.11	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1091	0.378	LK15	0.27	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1032	0.000	LK51	0.09	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1091	0.378	LK15	0.40	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1032	0.000	EK4	0.00	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1106	1.381	LK100	0.19	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1106	1.841	EK4	0.07	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1021	Hängestuhlsäule O (Stab Nr. 1033,1053,1064,1076,1079,1092,1107,1115,1136)					
	1053	0.000	LK51	0.04	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1092	0.378	LK19	0.07	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspehnung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1076	0.000	LK51	0.67	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1053	0.000	LK35	0.08	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1053	0.000	LK45	0.11	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1092	0.378	LK19	0.27	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1033	0.000	LK34	0.09	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1092	0.378	LK19	0.40	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1033	0.000	EK4	0.00	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1107	1.381	LK83	0.19	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1107	1.841	EK4	0.07	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1022	abgetrennte Hängesäule_Mitte (Stab Nr. 1015,1030,1062,1093)					
	1015	0.000	LK10	0.00	100)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1062	0.000	LK1	0.01	101)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1015	0.450	LK8	0.01	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspehnung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1015	0.000	LK52	0.27	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1030	0.000	LK52	0.19	151)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1030	0.000	LK50	0.16	161)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1015	0.450	LK52	0.19	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1015	0.450	LK8	0.02	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1015	0.450	LK52	0.20	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 -

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis		Bemessu Nr.	Bezeichnung
	1015	0.000	EK4	0.00	1 1	400)	- Knicken um beiden Achsen Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1030	0.575	LK83	0.07	1 1	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1023	Stuhlsäule W (Stab Nr. 1138)						
	1138	3.800	LK19	0.13	1 1	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1138	0.000	LK19	0.02	1 1	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1138	0.000	LK19	0.14	1 1	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1138	3.800	LK19	0.23	1 1	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1138	0.000	LK19	0.32	1 1	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1138	0.000	EK4	0.00	1 1	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1138	1.425	LK71	0.16	1 1	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1138	1.425	EK4	0.07	1 1	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1024	Stuhlsäule O (Stab Nr. 1139)						
	1139	3.800	LK15	0.13	1 1	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1139	0.000	LK15	0.02	1 1	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1139	0.000	LK15	0.14	1 1	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1139	3.800	LK15	0.23	1 1	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1139	0.000	LK15	0.32	1 1	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1139	0.000	EK4	0.00	1 1	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1139	1.425	LK67	0.16	1 1	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1139	1.425	EK4	0.07	1 1	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1030	liegende Stuhlsäule unten W (Stab Nr. 1100,1112,1134)						
	1134	4.649	LK15	0.09	1 1	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1112	0.000	LK1	0.04	1 1	111)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1112	0.000	LK35	0.07	1 1	171)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1134	4.649	LK15	0.24	1 1	303)	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1112	0.000	LK15	0.26	1 1	323)	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1134	4.184	LK15	0.23	1 1	341)	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1100	0.000	EK4	0.00	1 1	400)	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1134	0.930	LK101	0.12	1 1	401)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1134	1.395	EK4	0.06	1 1	402)	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1031	liegende Stuhlsäule unten O (Stab Nr. 1101,1113,1137)						
	1137	4.649	LK19	0.09	1 1	102)	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - D

2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
					1	Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1113	0.000	LK1	0.04	111) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1113	0.000	LK52	0.07	171) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1137	4.649	LK19	0.24	303) 1	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1113	0.000	LK19	0.26	323) 1	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1137	4.184	LK19	0.23	341) 1	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1101	0.000	EK4	0.00	400) 1	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1137	0.930	LK84	0.12	401) 1	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1137	1.395	EK4	0.06	402) 1	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1032	liegende Stuhlsäule oben W (Stab Nr. 1014,1029,1060)					
	1014	0.531	LK3	0.00	100) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1014	0.000	LK6	0.02	101) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1060	2.832	LK34	0.08	102) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1014	0.531	LK52	0.22	111) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1029	0.000	LK18	0.09	151) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1014	0.531	LK52	0.18	161) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1029	0.000	LK51	0.17	171) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1060	2.832	LK34	0.20	303) 1	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1014	0.531	LK52	0.17	311) 1	Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1029	0.000	LK34	0.23	323) 1	Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1060	2.360	LK34	0.20	341) 1	Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1014	0.000	EK4	0.00	400) 1	Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1029	0.905	LK83	0.10	401) 1	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1060	0.472	EK4	0.02	402) 1	Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1033	liegende Stuhlsäule oben O (Stab Nr. 1016,1031,1061)					
	1016	0.531	LK2	0.00	100) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Sehr kleine Schnittgrößen
	1016	0.000	LK4	0.02	101) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1061	2.832	LK51	0.08	102) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Druckspannung in Faserrichtung nach 6.1.4
	1016	0.531	LK35	0.22	111) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1031	0.000	LK14	0.09	151) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung nach 6.1.6
	1016	0.531	LK35	0.18	161) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1031	0.000	LK34	0.17	171) 1	Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Druck nach 6.2.4
	1061	2.832	LK51	0.20	303) 1	Druckstab mit Normaldruck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen

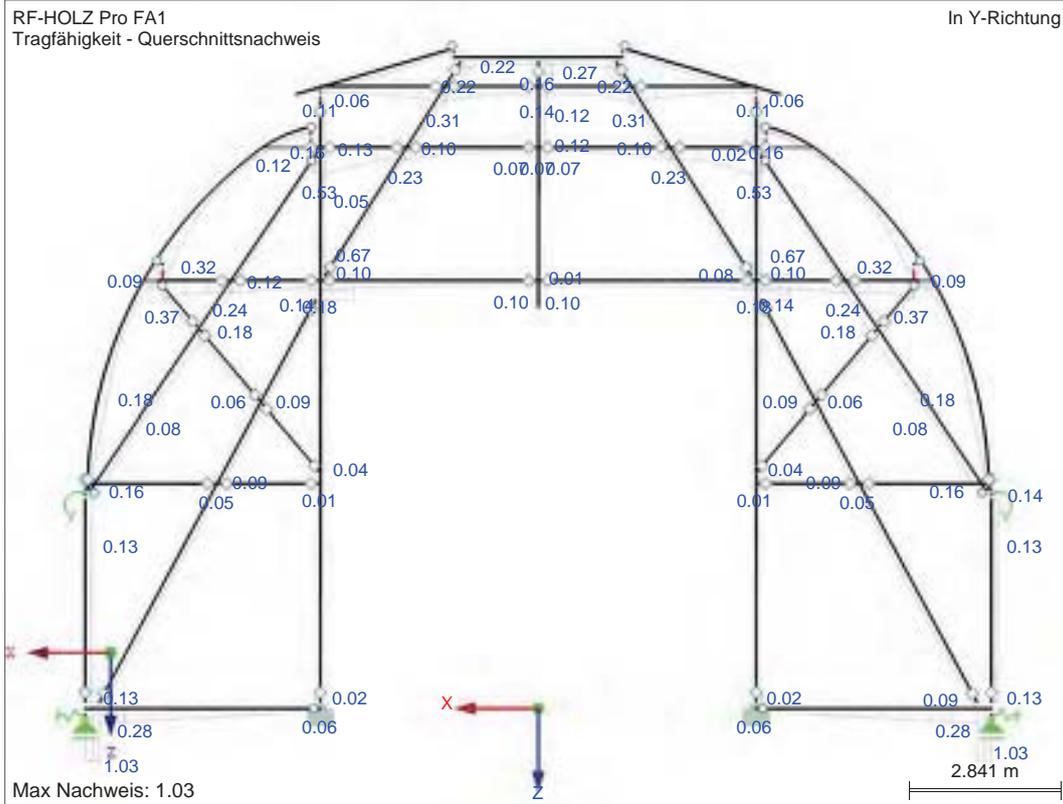
■ 2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
	1016	0.531	LK35	0.17	1	311) Biegestab ohne Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1031	0.000	LK51	0.23	1	323) Stab mit Biegung und Druck nach 6.3.2 - Knicken um beiden Achsen
	1061	2.360	LK51	0.20	1	341) Biegestab mit Druckkraft nach 6.3.3 - Biegung um y-Achse
	1016	0.000	EK4	0.00	1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1031	0.905	LK100	0.10	1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1061	0.472	EK4	0.02	1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1034	Strebebalken W (Stab Nr. 1065,1097,1108)					
	1108	0.000	LK9	0.08	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1108	3.635	LK9	0.03	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1108	0.000	LK9	0.18	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1065	0.000	EK4	0.00	1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1097	1.082	LK71	0.33	1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1097	1.082	EK4	0.15	1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1035	Strebebalken O (Stab Nr. 1066,1098,1109)					
	1109	0.000	LK9	0.08	1	101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1109	3.635	LK9	0.03	1	111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1109	0.000	LK9	0.18	1	161) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Einfache Biegung um y-Achse und Zug nach 6.2.3
	1066	0.000	EK4	0.00	1	400) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1098	1.082	LK67	0.33	1	401) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1098	1.082	EK4	0.15	1	402) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1040	Diagonalverstrebung W (Stab Nr. 1096,1102,1110)					
	1096	0.000	LK1	0.01	1	3101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1096	0.000	LK19	0.09	1	3111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1102	0.000	LK6	0.00	1	3112) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1102	0.450	LK20	0.09	1	3151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	1102	0.450	LK20	0.09	1	3156) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	1102	0.000	LK19	0.15	1	3181) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	1096	0.392	LK1	0.01	1	3183) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	1096	1.176	LK19	0.16	1	3186) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
	1096	0.000	EK4	0.00	1	4000) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1102	0.450	LK71	0.17	1	4001) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1102	0.450	EK4	0.07	1	4002) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7

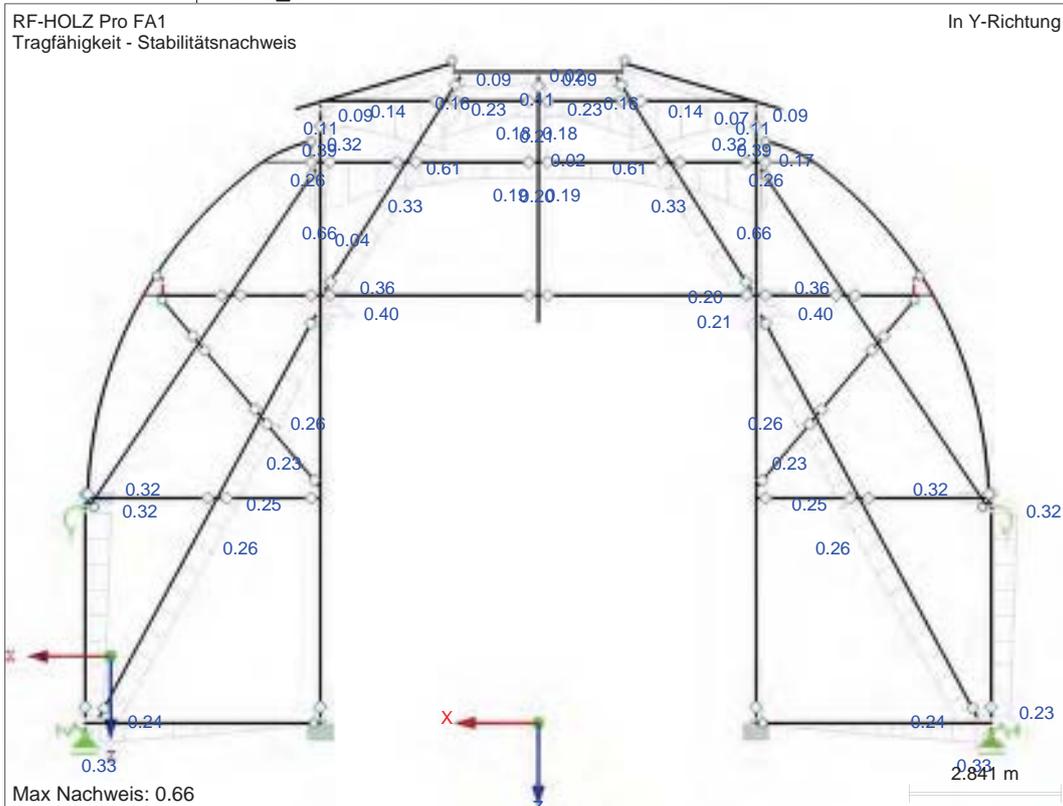
■ 2.3 NACHWEISE STABSATZWEISE

Satz Nr.	Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Bemessung Nr.	Bezeichnung
						7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
1041	Diagonalverstrebung O (Stab Nr. 1099,1103,1111)					
	1099	0.000	LK1	0.01	☒ 1	3101) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Zug in Faserrichtung nach 6.1.2
	1099	0.000	LK15	0.09	☒ 1	3111) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vz nach 6.1.7
	1103	0.000	LK18	0.00	☒ 1	3112) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schub aus Querkraft Vy nach 6.1.7
	1103	0.450	LK16	0.09	☒ 1	3151) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt My nach 6.1.6
	1103	0.450	LK16	0.09	☒ 1	3156) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt My nach 6.1.6
	1103	0.000	LK15	0.15	☒ 1	3181) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Druckgurt Nt + My nach 6.2.3
	1099	0.392	LK1	0.01	☒ 1	3183) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Schwerpunktspannung im Zuggurt Nt + My nach 6.1.2
	1099	1.176	LK15	0.16	☒ 1	3186) Beanspruchbarkeit von Querschnitt - Randspannung in Zuggurt Nt + My nach 6.2.3
	1099	0.000	EK4	0.00	☒ 1	4000) Gebrauchstauglichkeit - Sehr kleine Verformungen
	1103	0.450	LK67	0.17	☒ 1	4001) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Charakteristisch nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung
	1103	0.450	EK4	0.07	☒ 1	4002) Gebrauchstauglichkeit - Bemessungssituation Quasi-ständig nach 7.2 (2) - Innenfeld, z/v-Richtung

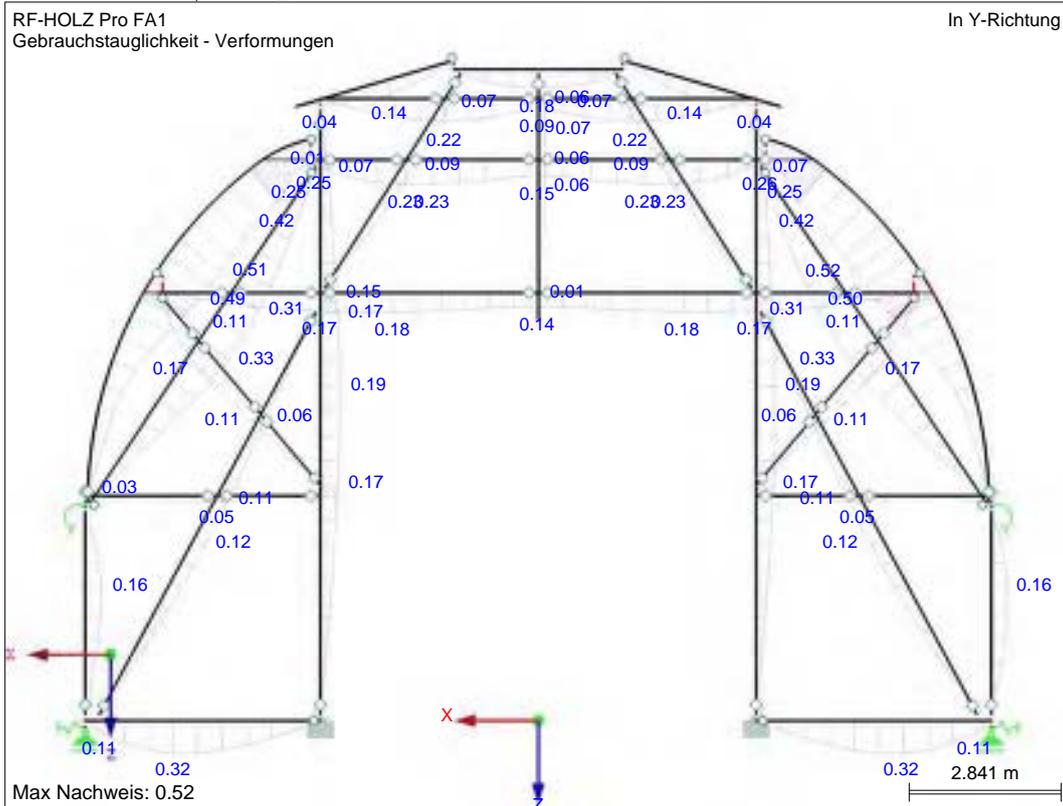
■ VG-C_ULS-BEMESSUNGSERGEBNISSE RF-HOLZ PRO



■ VG-C_ULS-BEMESSUNGSERGEBNISSE RF-HOLZ PRO



■ VG-C_SLS-BEMESSUNGSERGEBNISSE RF-HOLZ PRO



Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl