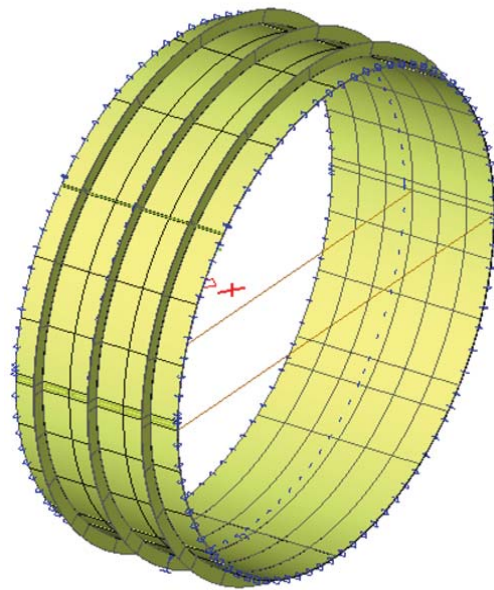


Erweiterte Untersuchungen der Montagezustände von Stahl-Linern von Druckschächten mit großem Durchmesser

D-5-31-2011



Mucaj Arber
Institut für Stahlbau und Flächentragwerke
Technische Universität Graz

Institut für Stahlbau und Flächentragwerke

Masterarbeit

von

Arber Mucaj

Technische Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften –

Konstruktiver Ingenieurbau

Thema:

Erweiterte Untersuchungen der Montagezu-
stände von Stahl-Linern von Druckschächten
mit großem Durchmesser

Betreuer/in: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Greiner

Betreuer/in: Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Lechner

Eingereicht: 20.05.2011

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Danksagung

Ich möchte diese Masterarbeit meinen Eltern Suzana und Shani Mucaj widmen, die, davon abgesehen, dass sie mir das Studium ermöglichten, auch immer großes Interesse für meine Arbeit zeigten und mich soweit wie möglich unterstützten.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Ehegattin Nora und meinem Sohn Noar, die mit viel Geduld meine Launen während des gesamten Studiums ertragen haben. Für das Verständnis und die Liebe, die sie mir in diesen Jahren immer wieder entgegen gebracht haben, ein herzliches Danke.

Infolge der interdisziplinären Tätigkeiten an diesem Projekt war eine intensive Arbeit von Nöten. In diesem Sinne möchte ich ganz besonders Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Greiner und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Lechner vom Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der Technischen Universität Graz für die Zusammenarbeit in jeder Phase meiner Masterarbeit danken.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit einer erweiterten Untersuchung des Hinterbetoniervorganges von dünnwandigen Stahl-Liner-Konstruktionen, die einen sehr großen Durchmesser aufweisen. Durch diese erweiterte Untersuchung und anhand der vorgenommenen Berechnungen werden Grundlagen geschaffen, um letztlich die Montagezustände nach statischen Gesichtspunkten dieser Stahl-Liner-Konstruktionen optimieren zu können, wenn die Betonbettung mitberücksichtigt wird. Als Weiterführung zu den angestellten Untersuchungen in der Masterarbeit von Herrn Dipl.-Ing. Christoph Ott wurde eine weitere Variante analysiert. Im Gegensatz zur Variante 5, welche in der MA-Ott detailliert beleuchtet wurde, werden in der vorliegenden Arbeit zwei sehr ähnliche Varianten, die einen Auflagerabstand in Längsrichtung von 3m aufweisen, näher untersucht. Es werden alle relevanten Ergebnisse im Rohr, Schnittkräfte, beobachteten Verformungen und Spannungen im Beulring und wenn relevant in der Rohrschale ausgegeben und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen. Zusätzlich wurde in dieser Masterarbeit auf die nach dem Hinterbetonieren verbleibenden Verformungen des Stahlrohres hinsichtlich der Toleranz in Form von Ovalität und Unrundheit eingegangen. Für die Durchführung der Untersuchungen bzw. Berechnungen wurde grundsätzlich das Programm SCIA-Engineer gewählt. Mit dem Stabstatik Programm RuckZuck wurde weiters ein Ersatzmodell erstellt, welches Auskunft über den Abbau von Spannungsspitzen an den Auflagerpunkten gibt. Ferner zu den Radialverformungen in der Rohrschale wurden auch die Längsverformungen (Verwölbungen) ausgewertet. Mit dem Programm Microsoft-Excel erfolgte die Verarbeitung der Ergebnisse zu Diagrammen.

Schlagwörter:

Druckschacht, Stahl-Liner, Wasserkraft, Hinterfüllbeton, Montage

Abstract

This master thesis deals with an extended investigation of the concreting of thin-walled steel-liner constructions of penstocks with large diameters. By this extended investigation and by the conducted calculations important knowledge has been worked out, in order to optimize the several assembly stages according to the mechanical aspects of the steel-liner constructions when the continuous elastic support reaction the backfill concrete is used. As continuation to the investigations already performed in the master thesis by MSc. Christoph Ott, a further example has been analyzed. In contrast to the version 5 which has been investigated in the master thesis Ott, this thesis deals with two rather similar examples, however with a larger distance of temporarily supports in longitudinal direction. All relevant results of the analyses, section forces and section moments, deformations and stresses in the stiffening rings as well as in the cylindrical shell are illustrated and compared with the existing results. In addition to that, the remaining deflections and displacements of the steel-liner after the concreting of the backfill concrete are documented and compared with existing tolerance limits concerning ovality and radial run-out. For execution of the herein documented investigations the software package SCIA-Engineer was selected. Further, a submodel analyzed by the software package RuckZuck was created, in order to provide information of the bending moment reduction due to the support width of the pinned supports at the stiffener rings. In addition to the evaluation of the radial deformations, the axial deformations in the cylindrical shell (warping deformations) have been evaluated. By the software Microsoft-Excel the post-processing of the results into diagrams has been accomplished.

Keywords:

penstock, steel-liner, hydro power backfill concrete, assembly

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	9
2	Annahmen der gewählten Stahl-Liner-Konstruktion.....	10
2.1	Aufgabe des Stahl-Liners.....	10
2.2	Gewählte Geometrie des Stahl-Liners	10
2.3	Lasten	12
3	Hinterfüllbeton	14
3.1	Allgemein	14
3.2	Betonparameter C20/25.....	14
3.2.1	Entwicklung der Hydratationswärme	14
3.2.2	Entwicklung des Temperaturverlaufs im jungen Beton.....	15
3.2.3	Zeitliche Entwicklung der Betoneigenschaften	15
3.3	Betoniervorgänge.....	18
4	Modellierung.....	19
4.1	Allgemein	19
4.2	Lastfallkombinationen [1]	21
4.2.1	Allgemein	21
4.2.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	21
4.2.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	22
4.3	Parameter der FE-Berechnung [1].....	22
4.3.1	Allgemein	22
4.3.2	Direkte Lösung.....	22
4.3.3	FE – Netz.....	23
4.4	Stahlrohr	24
4.5	Auflager [1].....	25
4.5.1	Allgemein	25
4.5.2	Nichtlinearität	26
4.6	Bettung [1].....	27
4.6.1	Allgemein	27
4.6.2	Variante 5a Betonbettung C20/25	29
4.6.3	Variante 5b Betonbettung C40/50	30
5	Darstellung der Ergebnisse.....	31
5.1	Allgemein	31
5.2	Variante 5a Verformungs-Diagramme	33
5.2.1	Radialverformungen u_z im Beulring-2	33

5.2.2	Radialverformungen u_z des Stahlrohres im Schnitt S2	36
5.2.3	Längsverformungen (Verwölbungen) u_x des Stahlrohres im Schnitt S2	40
5.3	Schnittkräfte im Beulring-2 Diagramme	44
5.3.1	Normalkräfte im Beulring-2	44
5.3.2	Querkräfte im Beulring-2.....	48
5.3.3	Biegemomente im Beulring-2	48
5.4	Spannungsdiagramme.....	49
5.4.1	Spannungen im Beulring-2 außen-innen	49
5.4.2	Spannungen im Beulring-3 außen-innen	50
5.4.3	Membranschnittkräfte n_x, n_y des Stahlrohres im Schnitt S1	51
5.4.4	Spannungen im Rohr Schnitt S1	52
5.4.5	Spannungen im Rohr Schnitt S2	56
5.5	Schnittkräfte im Stahlrohr Konturplot	59
5.6	Variante 5b (C40/50) Verformungen Diagramme	78
5.6.1	Radialverformungen u_z im Beulring-2	78
5.7	Spannungen Diagramme C40/50	79
5.7.1	Spannungen im Beulring-2 außen-innen	80
5.7.2	Spannungen im Rohr Schnitt S1	81
5.7.3	Spannungen im Rohr Schnitt S2	84
6	Beschreibung der Ergebnisse Variante 5a.....	87
6.1	Allgemein	87
6.2	Beschreibung der Verformungen	87
6.3	Beschreibung der Spannungen	89
6.4	Momentenreduktion im Auflagerbereich	91
6.4.1	Allgemein	91
6.4.2	Ersatzmodell Schicht 17	95
6.4.3	Ersatzmodell Schicht 18	99
6.5	Berechnung der Ovalität	103
6.5.1	Allgemein	103
6.5.2	Ovalität inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht	104
6.5.3	Die Ovalität exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht.....	106
6.6	Berechnung der Unrundheit.....	109
6.6.1	Allgemein	109
6.6.2	Unrundheit inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht mit Schablone $b=R/2111$	
6.6.3	Unrundheit exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht mit Schablone $b=R/2112$	

6.7	Beschreibung der Auflagerkräfte	113
7	Variantenvergleich	115
7.1	Allgemein	115
7.2	Verformungsvergleich der Varianten	115
7.3	Spannungsvergleich der Varianten	117
7.4	Vergleich der Vergleichsspannungen im Rohr	120
7.5	Ungünstigste Montagezustände	124
8	Zusammenfassung	126
9	Anhang	128
	Anhang 1	129
	Radialverformungen u_z einzeln im Beulring 2 Variante 5b	129
	Anhang 2	132
	Systemskizzen der Betonierstufen	132
11	Abbildungsverzeichnis	151
12	Tabellenverzeichnis	156

1 Einleitung und Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist eine Optimierung der Montagezustände von Stahl-Liner Konstruktionen, die als sehr dünnwandige Konstruktionen mit sehr großem Durchmesser ausgeführt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden für die Stahl-Liner Konstruktion zwei Variante analysiert, die hinsichtlich des Spannungs- und Verformungsverhaltens während des Betonierens (Hinterfüllung) für die Bemessung unterschiedliche Ergebnisse liefern, als die zuvor untersuchte Varianten von Herrn Ott [1]. Die vorliegende Arbeit schließt unmittelbar an die Arbeit von Herrn Ott an.

Anhand der nichtlinearen Berechnungen in der MA-Ott, die alle für Tragmodell mit 1m Auflagerabstand durchgeführt wurden, wird in dieser Masterarbeit untersucht, in welcher Größenordnung sich die ermittelten Ergebnisse (Verformungen und Spannungen sowohl im Beulring als auch in der Rohrschale) bewegen, wenn für die Rohrmontage ein größerer Auflagerabstand in Längsrichtung gewählt wird. Daher werden in dieser Masterarbeit sehr ähnliche Schalenmodelle wie bisher analysiert, welche allerdings einen Auflagerabstand von 3m in Längsrichtung aufweisen. Als eine Ergänzung zur Masterarbeit von Herrn Ott, in welcher die Auflager als Punktlager modelliert worden sind, wird hier der Einfluss der Auflagerbreite berücksichtigt, um in Erfahrung zu bringen in welcher Größenordnung die Momente im Auflagerbereich reduziert werden können. Diese Untersuchungen wurden allerdings anhand eines Ersatzmodells des Beulringes durchgeführt, welches im Programm RuckZuck [10] erstellt wurde. Dies mit dem Ziel, die Biegemomente zu simulieren.

Im Zuge der weiteren Überlegungen wird untersucht, ob eine Erhöhung der Betonklasse für die Panzerung der Stahl-Liner Konstruktion günstigere Ergebnisse für das Montagezustands liefert. Zusätzlich wird in dieser Masterarbeit das Verformungsverhalten hinsichtlich der Toleranz von Ovalität und Unrundheit untersucht. Anhand der Ergebnisse bezüglich der Verformungen in der Rohrschale werden die für die Toleranz von Unrundheit und Ovalität maßgebende Montagezustände ermittelt. Ferner wird in dieser Masterarbeit analysiert, welchen Einfluss die Längsverformungen bzw. Verwölbungen in der Rohrschale auf die Spannungswerte haben.

Grundsätzlich wird die elektronische Berechnung mittels einer Studentenversion des FE-Programms SCIA-Engineer 9.0 von der Firma Nemetschek [9] durchgeführt.

2 Annahmen der gewählten Stahl-Liner-Konstruktion

2.1 Aufgabe des Stahl-Liners

Grundsätzlich handelt es sich um unterirdische Triebwasserwege von Wasserkraftwerken, welche im Bereich vor dem Krafthaus mit Stahl gepanzert werden, um einen tragfähigen und dichten Übergang zu den Turbinen einlaufen über lange Zeit sicherzustellen. Weiters führt sie das Triebwasser in einen laminaren Strömungszustand über, dessen bessere Strömungseigenschaften die Effizienz der Turbine erhöhen (Abb. 1).

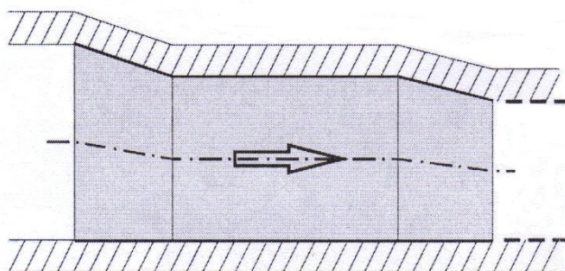


Abb. 1 Stahl-Liner mit unsymmetrische Kegel [2]

2.2 Gewählte Geometrie des Stahl-Liners

Die angenommene Stahl-Liner Konstruktion hat eine Gesamtlänge von 37,5m. Sie besteht aus 3 Teilbereichen, die sich durch ihre ungleichen geometrischen Eigenschaften unterscheiden. Der Durchmesser des ersten Teils des Stahlrohres beträgt 8,3m. Im ersten Bereich erfolgt eine Aufweitung des Stahlrohres auf einer Länge von 5,0m, wonach der Durchmesser 9000mm ergibt. Danach hat das Rohr über eine Länge von 22,50m einen gleichbleibenden Durchmesser. Im letzten Teilbereich, der eine Länge von 10,0m hat, kommt es zu einer weiteren Veränderung des Durchmessers auf 10,7m (Abb. 2). Die Stahl-Liner Konstruktion wird mit der Stahlgüte S355 ausgeführt, wobei die Blechdicke einheitlich 25mm beträgt, diese beinhaltet einen Korrosionszuschlag von 2mm. Da es sich hier um eine Konstruktion mit einem sehr großen Durchmesser handelt, ist diese Konstruktion beulgefährdet. Aufgrund dessen wird die Stahl-Liner Konstruktion über ihre gesamte Länge in Umfangsrichtung mit Beulringen gesichert, um Einbeulen im Rahmen der Bemessung auf Außen durch auszuschließen. Die Beulringe werden in Stahlgüte S355 mit der Abmessung $h/b=250/15$ mm auf das Stahlrohr aufgeschweißt. Für den Bauzustand wurden Ringe mit der Abmessung $h/b=250/25$ mm angewendet. Der Abstand dieser Ringe variiert je nach Teilbereich und beträgt durchschnittlich rund 1m .

Im Anwendungsbeispiel erfolgt die erste Lagerung der Stahl-Liner in Längsrichtung an den Beulringen in Abständen von etwa 3m durch jeweils acht Auflager (siehe Abb. 12). Zusätzlich zu den Auflagern wirkt der Beton ab einem gewissen Alter unterstützend als Bettung für das Stahlrohr.

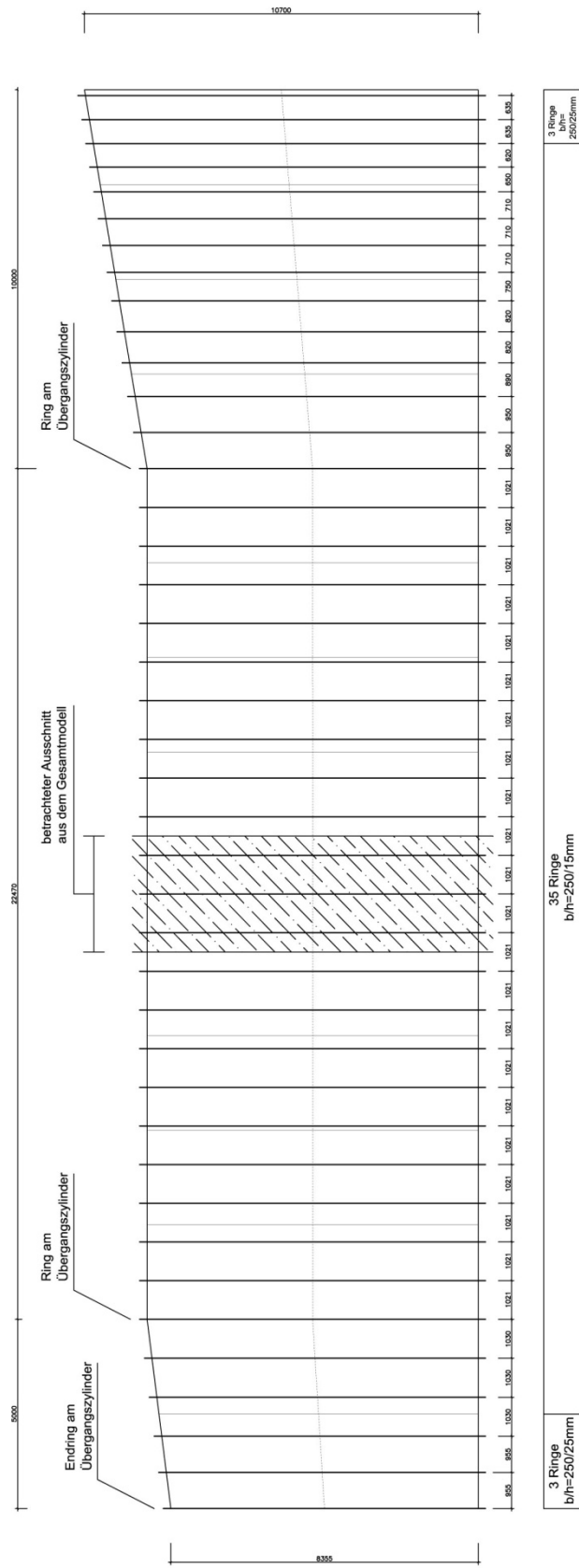


Abb. 2 Stahl-Liner Konstruktion [8]

2.3 Lasten

Im Zuge der Masterarbeit wird das Stahlrohr für die unterschiedlichen Zustände des Einbetonierens in den Felsen analysiert. Zu Beginn wird das Stahlrohr auf die drei unteren Auflagerpunkte gestützt, die nur durch das Eigengewicht belastet werden. In Folge erfolgt ein Anbringen weiterer Auflager, die den Stahl-Liner während der Betonierphase gegen den Fels abstützen. Während des Betonierens wirkt im Bereich der 1m hohen Betonschicht der Frischbetondruck. Diese Wirkung klingt nach etwa 5h ab. Durch das Abbinden des Betons entsteht Hydratationswärme, die als äußere Einwirkung das Stahlrohr ausdehnt.

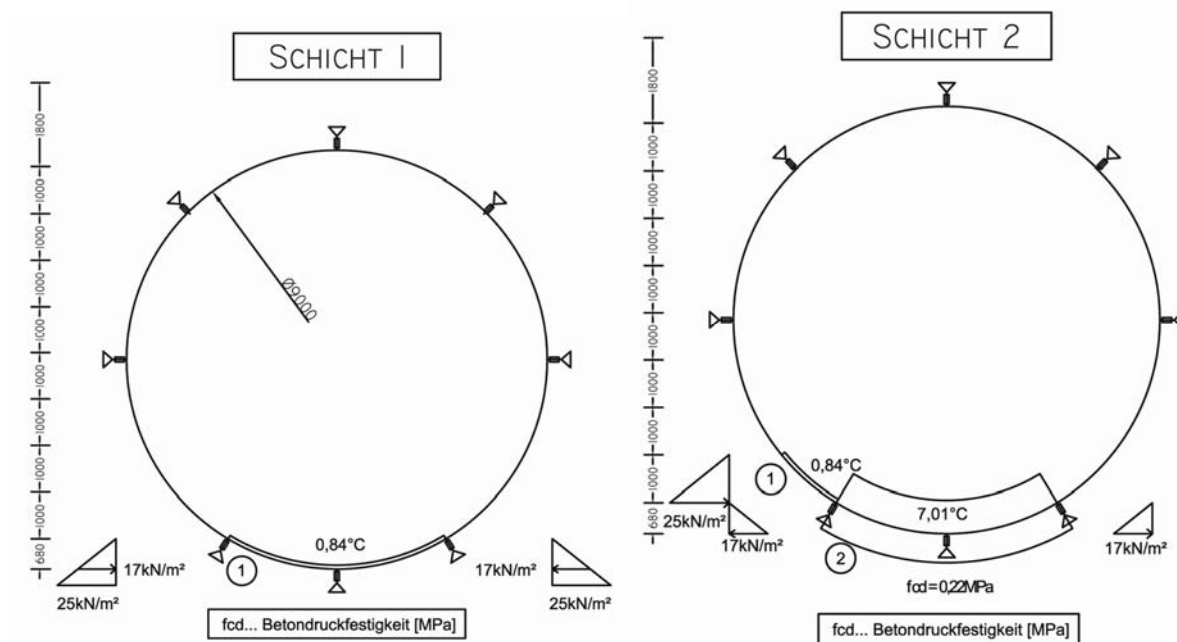


Abb. 3 Belastungssituation und Eigenschaften des Betons/Schicht-1 und Schicht-2

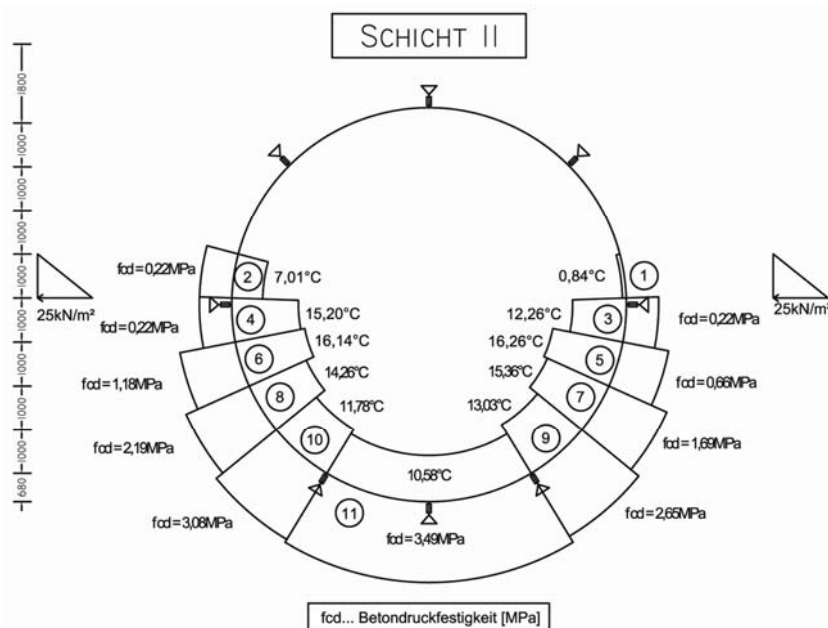


Abb. 4 Belastungssituation und Eigenschaften des Betons Schicht-11

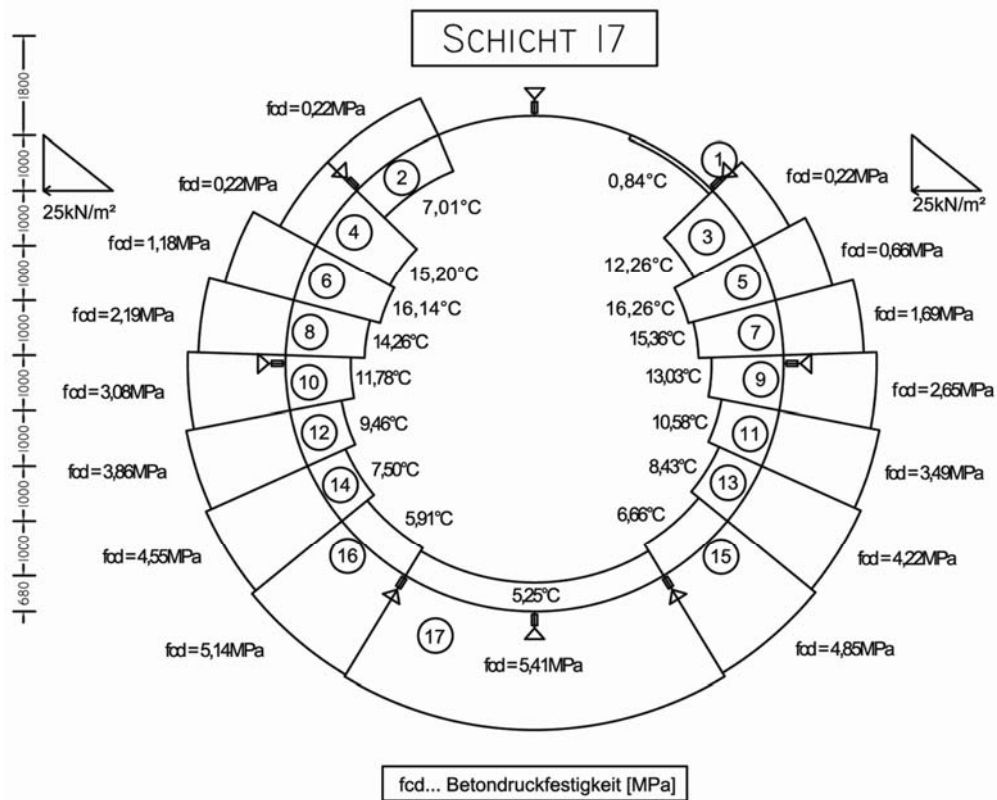


Abb. 5 Belastungssituation und Eigenschaften des Betons Schicht-17

In Abb. 3 bis Abb. 5 werden die Belastungssituationen für einige Betonierzustände dargestellt. Aus diesen Abbildungen ist auch die Entwicklung der Temperatur ersichtlich, die als Folge der Betonerhärtung entsteht und das Stahlrohr ausdehnt. Während der Betonerhärtung entsteht die Festigkeitsentwicklung. Die Entwicklung der Betondruckfestigkeit in der Frühphase ist in den Abbildungen je nach Montagefortschritt angegeben. Eine vollständige Darstellung aller Betonierzustände mit allen Belastungen und der Betonfestigkeitsentwicklung von Schicht-1 bis Schicht-18 ist im Anhang 2 zu finden.

3 Hinterfüllbeton

3.1 Allgemein

Für die Panzerung (Hinterfüllung) des Stahl-Liners wird Beton C20/25 mit der Zementklasse CEM II B-S 32,5N verwendet. Diese Annahmen wurden gemäß MA-Ott getroffen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse durchführen zu können. Im Zuge der weiteren Überlegungen wird zusätzlich auch Beton der Klasse C40/50 als Bettung verwendet. Der Frischbetondruck bleibt für beide Betonklassen gleich groß. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Frischbetondruckermittlung, welche im MA-Ott detailliert angegeben ist, bezogen. Im folgenden Kapitel werden exemplarisch die verwendeten Parameter für die Betongüte C20/25 dargestellt.

3.2 Betonparameter C20/25

3.2.1 Entwicklung der Hydratationswärme

Wie bekannt, wird während der Betonerhärtung Wärme entlassen, die zu einer Erhöhung der Bauteiltemperatur führt. Die für die Entstehung der Hydratationswärme maßgebenden Faktoren sind Zementmenge und die spezifische Hydratationswärme, die sich von der Zementart und der Frischbetontemperatur abhängt. Für die vorliegenden Berechnungen wird gemäß MA-Ott die Frischbetontemperatur mit 15°C und die Zementgüte CEM II B-S 32,5N angenommen. In der Abb. 6 wird die Entwicklung der Hydratationswärme für verschiedene Zementgüten grafisch dargestellt.

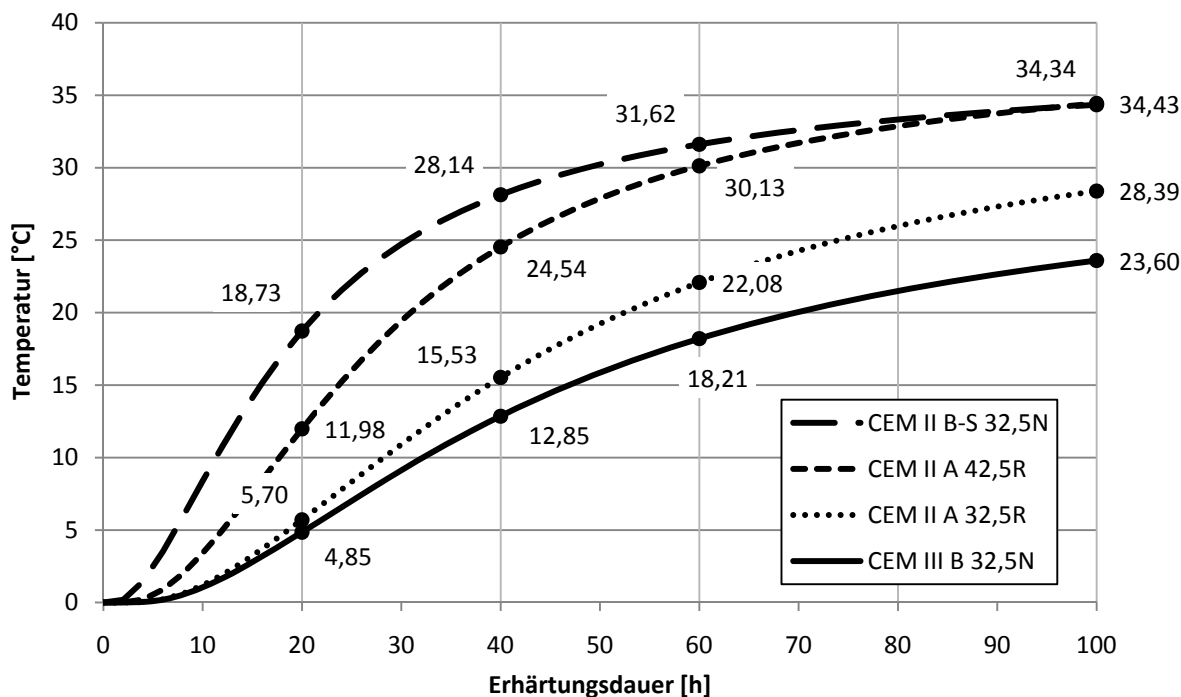


Abb. 6 Hydratationswärme

3.2.2 Entwicklung des Temperaturverlaufs im jungen Beton

Um eine genaue Temperaturermittlung des jungen Betons zu erfassen, sind folgende Faktoren zu berücksichtigen: Umgebungstemperatur der Luft, Felstemperatur, Windgeschwindigkeit. Gemäß MA-Ott wird eine Umgebungstemperatur von $T_{luft} = 20^\circ\text{C}$, eine Felstemperatur von $T_{fels} = 12^\circ\text{C}$ sowie eine Windgeschwindigkeit von $v_w = 2,5\text{m/s}$ zugrunde gelegt. Um eine konstante Windgeschwindigkeit zu gewährleisten, muss die Betonierstelle gleichmäßig belüftet werden, was in Ställen allenfalls gegeben ist. In der Abb. 7 wird die Entwicklung des Temperaturverlaufs im jungen Beton in Abhängigkeit der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit abgebildet.

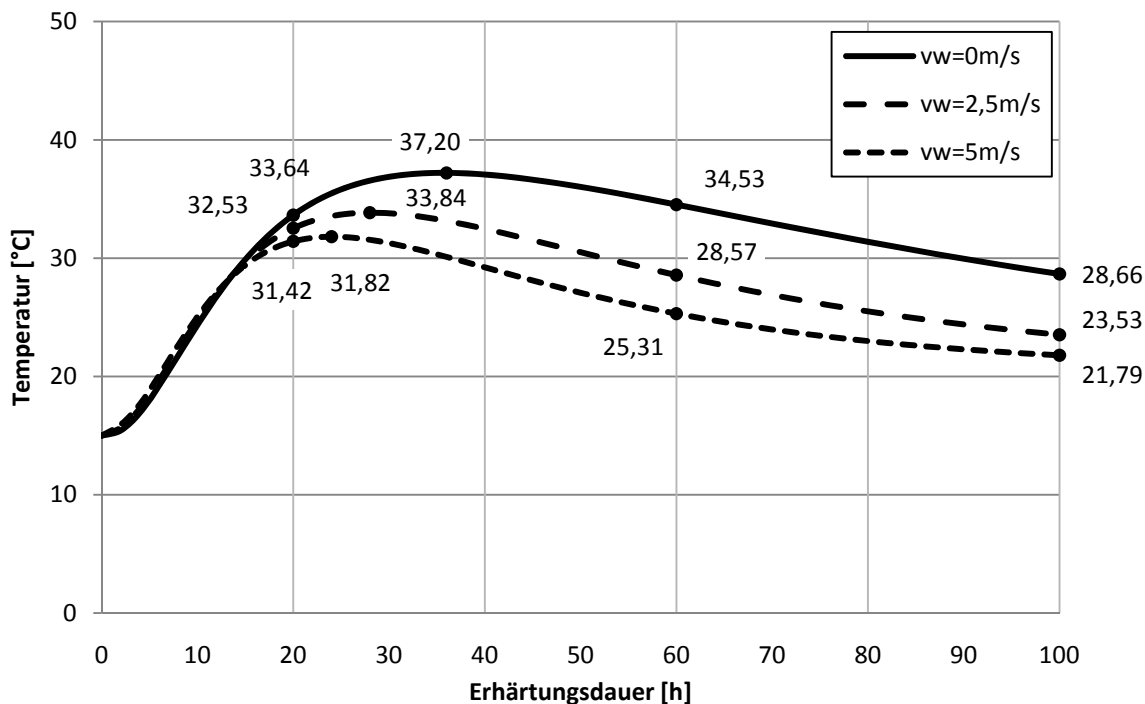


Abb. 7 Temperaturverlauf bei $T_{luft} = 20^\circ\text{C}$

3.2.3 Zeitliche Entwicklung der Betoneigenschaften

Die zeitliche Entwicklung der Betoneigenschaften ist im Detail in der Masterarbeit von Herrn Christoph Ott näher beschrieben. Wie in derselben Masterarbeit erläutert wurde, brauchen wir den zeitlichen Verlauf der Betoneigenschaften, um eine genaue Berechnung der Spannungen im Rohr im Zusammenhang mit der Betonbettung durchführen zu können. Deswegen ist man in der vorliegenden Masterarbeit nicht auf diese Berechnungen eingegangen und es wurden nur die zeitlichen Verläufe des E-Moduls (Abb. 8) und der Betondruckfestigkeit (Abb. 9) dargestellt. Grundsätzlich beruhen die zeitabhängigen Kennwerte auf der Zeitfunktion $\beta_{cc}(t)$ des Modell Codes 90 [5]. Die Betonschicht hat eine Abmessung von 1000/1500mm. Aus diesen Bauteilmassen und der Zementgüte CEM II B-S 32,5N ergibt sich eine zeitliche Entwicklung des Schwindmaßes, welches aber für die Berechnung während des Betonierens keinen baupraktisch relevanten Auswirkungen hat (0,02mm/m). In der Abb. 10 wird der zeitliche Verlauf des Schwindens während des gesamten Betoniervorgangs dargestellt. Um anzugeben, wie das Schwindmaß mit der Zeit zunimmt bzw. abnimmt, wurde zusätzlich eine Berechnung in Entwicklung des Schwindmaßes für einen Zeitraum von bis zu

einem Jahr durchgeführt (Abb. 11). Aus der Abb. 11 ist ersichtlich, dass das Schwindmaß (0,09mm/m) auch nach einem Jahr für die vorliegende Berechnung (Schichtdicke 1m) nicht relevant ist.

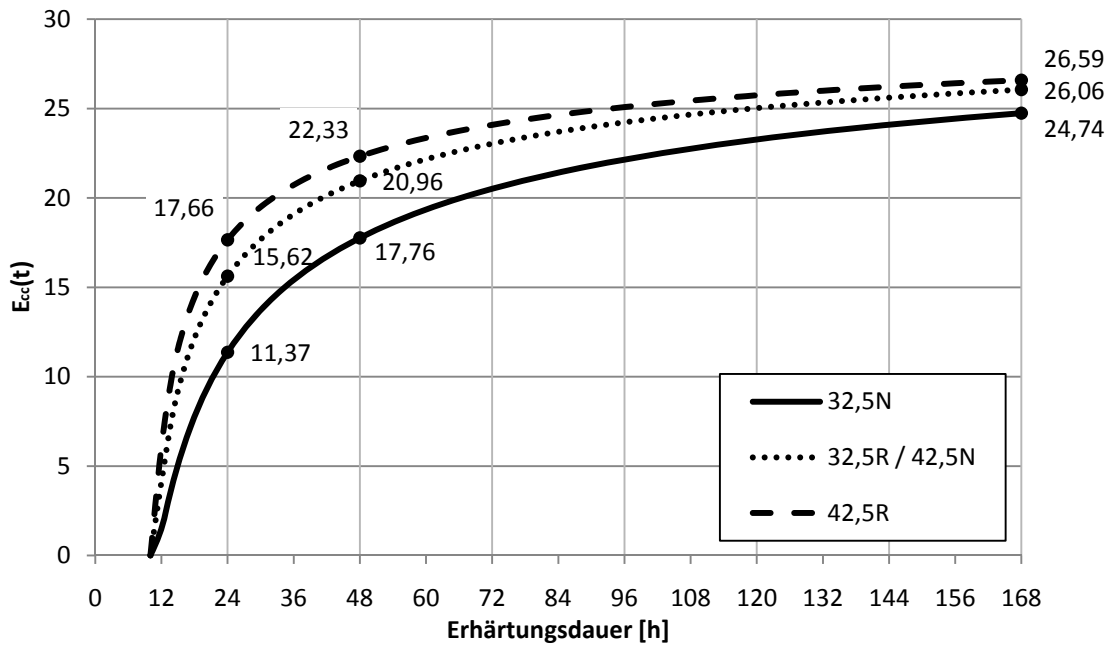


Abb. 8 Verlauf des E_{cc} – Moduls (C20/25)

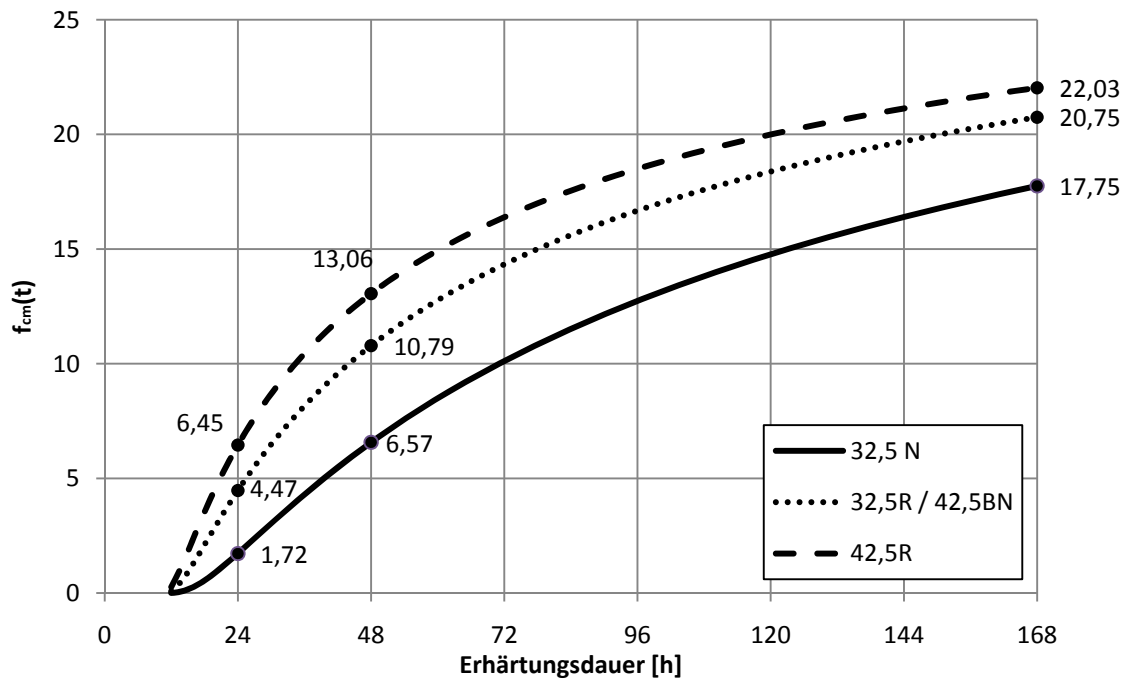


Abb. 9 Verlauf der mittleren Betonzylinderdruckfestigkeit f_{cm} (C20/25)

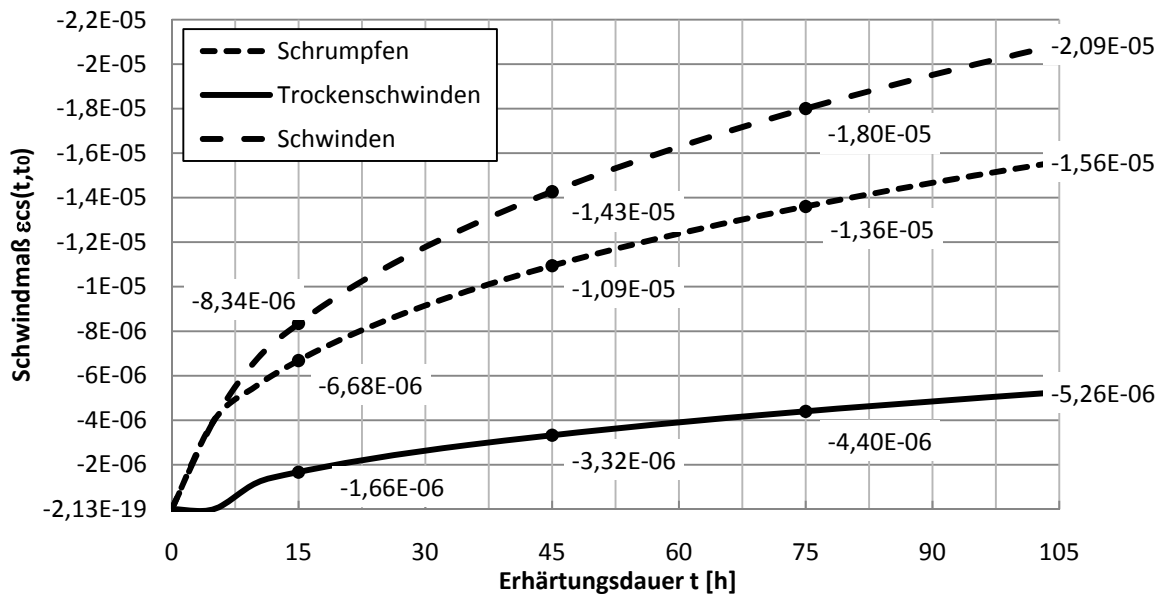


Abb. 10 Zeitlicher Verlauf des Schwindens bei CEM 32,5N, Bauteildimension 1000/1500mm, relative Luftfeuchte 80%

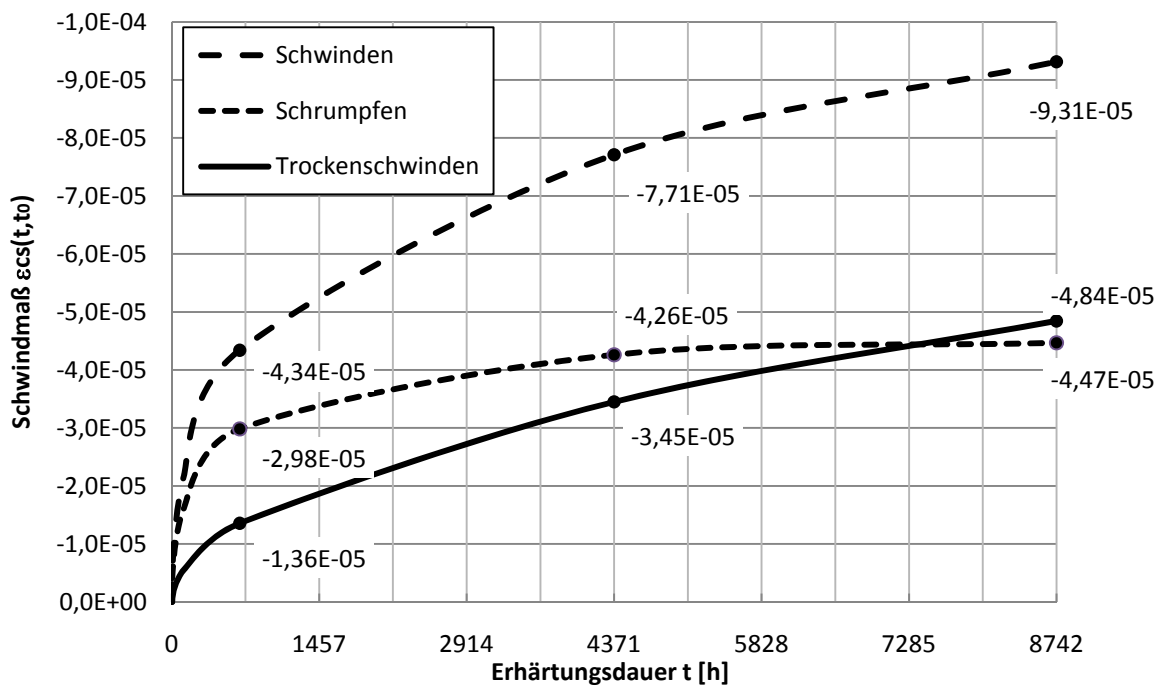


Abb. 11 Zeitlicher Verlauf des Schwindens bei CEM 32,5N, Bauteildimension 1000/1500mm, relative Luftfeuchte 80% nach einem Jahr

3.3 Betoniervorgänge

Aufgrund dessen, dass das Einbetonieren (Hinterfüllung) des gesamten Rohres auf einmal unmöglich ist, wird es in Abschnitten vollzogen. Es sind insgesamt 18 Betonierabschnitte, die über eine Einbauhöhe von ca. 12m gestapelt werden. Wichtig zu erwähnen ist die Tatsache, dass diese Betonierabschnitte eine Höhe von jeweils einem Meter haben, wobei der letzte Betonierabschnitt eine Höhe von 1,8m aufweist. Durch die letzte Betonierschicht wird eine vollständige Füllung zwischen dem Fels und dem Stahlrohr realisiert. Die erste Betonierschicht wird symmetrisch auf beiden Seiten eingebracht, während die weiteren Schichten bis zur letzten abschließenden alternierend betoniert werden, einmal links und einmal rechts. Infolgedessen entsteht eine ungleichmäßige Belastung aus dem Betonseitendruck. Die Betoniergeschwindigkeit beträgt 0,2m/Std. Daraus resultiert, dass wir für die Betonierung eines Abschnittes etwa fünf Stunden brauchen (Abb. 12). Um eine Vernagelung bzw. kraftschlüssige Verbindung, zwischen den Betonschichten herzustellen, werden die obersten zehn Zentimeter der alten Betonschicht mithilfe eines Rüttlers aufgelockert. Währenddessen erfolgt das Betonieren der neuen Schicht. In Längsrichtung beträgt die Betonierabschnittslänge 10-12m.

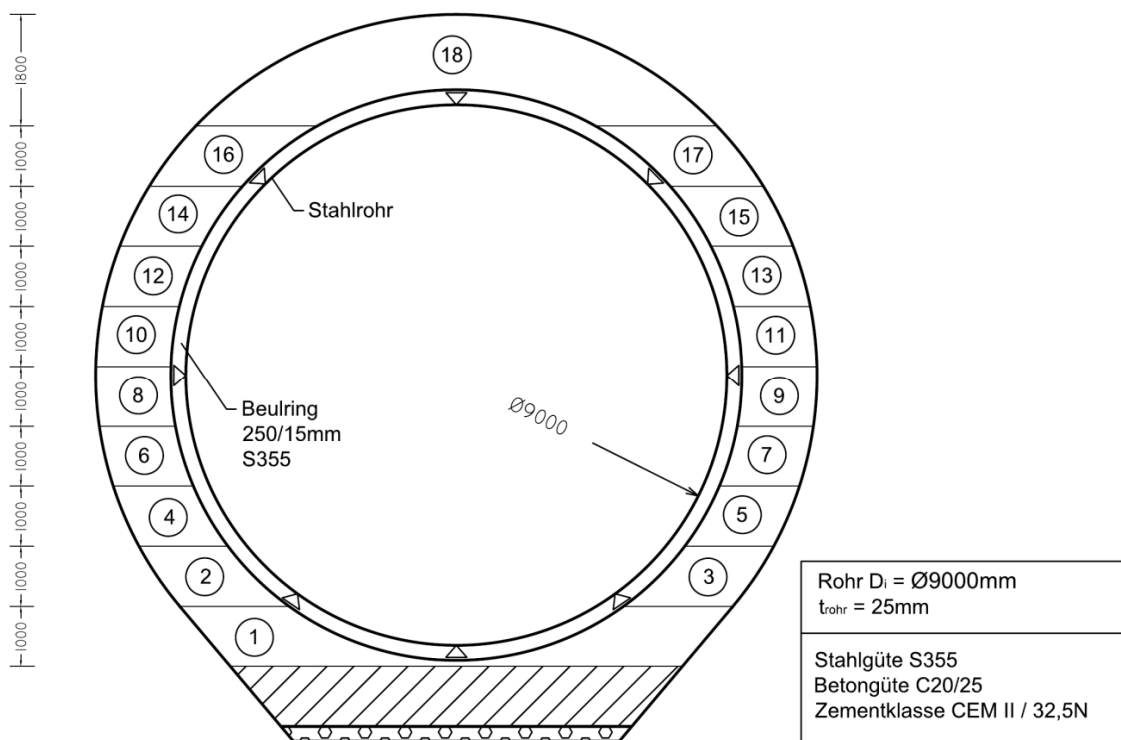


Abb. 12 Darstellung der Betonierabschnitte am Rohr

4 Modellierung

4.1 Allgemein

Sowohl die Modellierung des Stahlrohres als auch die Berechnung aller für die Bemessung erforderlichen Schnittkräfte, Verformungen und Spannungen wurden mit dem Programm SCIA – Engineer [9] (Nemetschek) realisiert.

Die bereits abgeschlossene Masterarbeit, welche von Herrn Christoph Ott verfasst wurde und in der fünf verschiedene Varianten untersucht wurden, hat gezeigt, dass sich die untersuchte Variante 5 für die Abbildung der Tragwirkung am besten als Berechnungsmodell eignet. Der Grund für diese Schlussfolgerung ist die frühere Entwicklung der Betondruckfestigkeit (bereits nach 5 Stunden) bei Variante 5 (Abb. 13), welche auch mit den Angaben zum Schalungsdruck gemäß [6] übereinstimmen. Diese Annahme hat gezeigt, dass je früher die Betondruckfestigkeit als wirkend angesetzt wird, desto mehr Verformungen und Spannungen im System eingefroren sind.

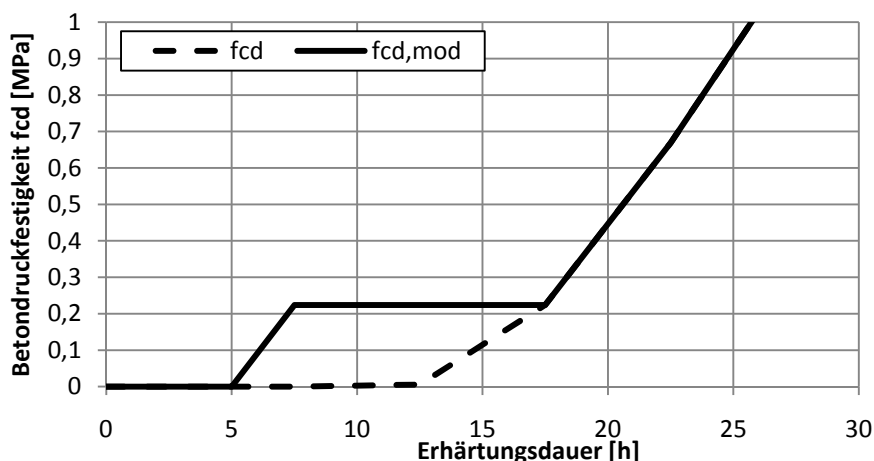


Abb. 13 Modifizierte Entwicklung der Betondruckfestigkeit $f_{cd,mod}$

Weil sich die Variante 5 am besten als Berechnungsmodell herausgestellt hat, wird hier im Zuge dieser Masterarbeit nur die Variante 5 weiteruntersucht, um weitere Grundlagen für eine Optimierung der Montagezustände zu erarbeiten.

Da sich die Ergebnisse bei der Variante 5 der MA-Ott auf ein modelliertes System mit Auflagerabstand in Längsrichtung von einem Meter beschränken, wird im Weiteren untersucht, mit welchem Faktor die ermittelten Ergebnisse extrapoliert werden, wenn der Auflagerabstand vergrößert wird. Hier wird ein etwa 3m langes Rohrsegment abgeschnitten und mit SCIA-Engineer [9] modelliert (Abb. 14). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das neu modellierte System als Variante 5a bezeichnet. Für jede Betonierphase wird ein eigenes Modell mit speziell angepassten Parametern für die Umgebungsbedingungen wie Betonbettung, Auflagereigenschaften, Temperaturverlauf und Position des Frischbetondruckes erstellt. Da die einzelnen Modelle (Schicht 0-18) getrennt modelliert werden, werden die Modelle über eine nichtlineare Eingabe der Auflagerbedingungen miteinander gekoppelt, um eine kontinuierliche Superposition der Zwischenergebnisse der Modelle in ihrer Belastungsgeschichte zu erreichen. Das bedeutet, dass wie im Verbundbau die Verformungen und die Auflagerkräfte als eingefrorene Zustände in das Modell der nächsten Betonierstufe übertragen werden.

Da die Modellierung der gesamten Länge des Stahlrohres aufgrund seiner Regelmäßigkeit zu aufwändig und nicht nötig ist, wird ein etwa 3,0m langes Rohrsegment mit drei gleichen Beulringen, die in etwa 1,0m Abstand zueinander liegen, versehen. Durch das Anbringen von Symmetriebedingungen an den Segmentenden und auf der Ebene des Mittelrings (Ring 2) entsteht ein realistisches Modell (Abb. 14). Die Längsverschiebungen am Rohrende werden freigelassen, um zu sehen, welche Größe diese Verformungen einnehmen werden. Wenn diese Längsverformungen am Rohrende gesperrt werden, entsteht eine Wölbbehinderung der eingesteiften Zylinderschale. Bei der Darstellung der Längsverformungen wird näher beschrieben, welche Größenordnung diese Wölbnormalspannungen annehmen.

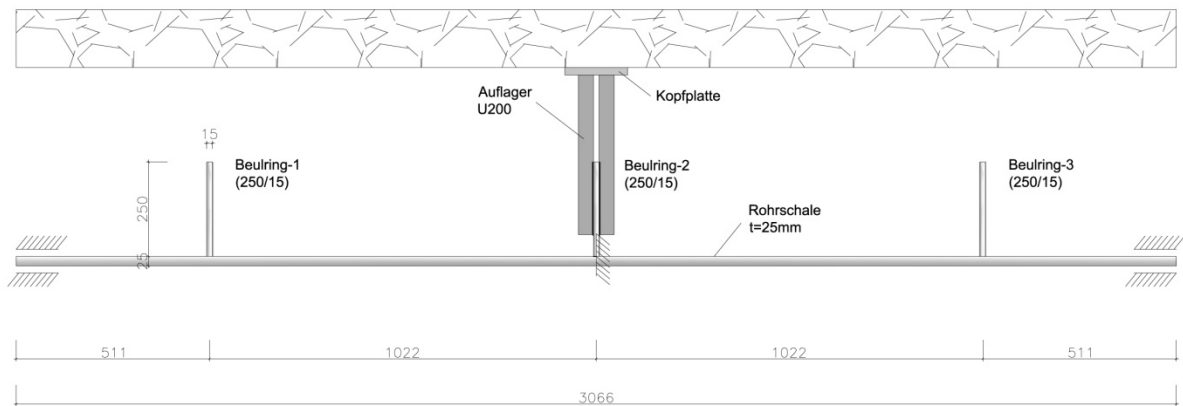


Abb. 14 Modellskizze mit Auflagerbedingungen und Position

Die punktförmigen Auflager befinden sich in der Ebene des Beulrings 2 auf Höhe des Stahlrohres. Um die Belastungsgeschichten richtig abzubilden, wird wie im Verbundbau im jeweils nächsten Betonschritt die Betonlast als Entlastung ins System aufgebracht. Die Betondruckfestigkeit und somit die Betonbettung werden mit ihrem zeitlichen Festigkeitswert in die Berechnung miteinbezogen.

Generell läuft die Berechnung am perfekten Rohr (ideelle Geometrie) ab. Erst durch das Aufsummieren der Spannungen, Verformungen und Schnittkräfte der einzelnen Betonierstufen lassen sich die Zwischen-Ergebnisse der zeitlich aufeinanderfolgenden Betonierphasen ermitteln.

Die Lager, die von Beginn an das Eigengewicht aufnehmen, befinden sich bei 0° , $31,86^\circ$ und $328,14^\circ$. Vor dem Anbringen der ersten Betonschicht werden die verbleibenden Auflager angebracht, die sich in den Winkeln 90° , 135° , 180° , 225° und 270° befinden (Abb. 15). Die Auflagerpunkte werden einheitlich mit jeweils 2 Stück U200 S235 ausgebildet.

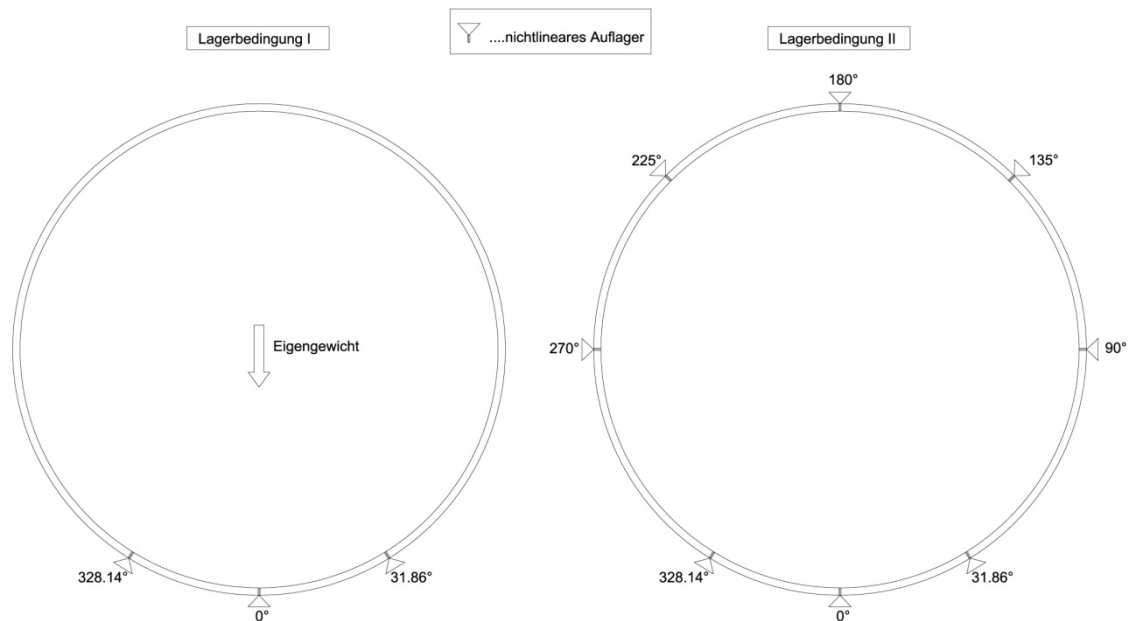


Abb. 15 Lagerbedingungen des Stahl-Liners

4.2 Lastfallkombinationen [1]

4.2.1 Allgemein

Aufgrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden die gleichen Annahmen wie in MA-Ott gewählt. Im Zuge der Berechnung des Betoniervorganges wirken Eigengewicht, Frischbetondruck und eine aus der Hydratationswärme des abbindenden Betons entstehende Temperaturlast je nach Montagefortschritt auf das Stahlrohr ein.

Um sowohl die maximalen Spannungen als auch die relevanten Verformungen nachzuweisen, werden zwei Lastfallkombinationen, die sich aus dem Frischbetondruck und der Temperaturlast zusammensetzen, erstellt. Diese beschreiben den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) sowie den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).

4.2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

Für die Spannungsbemessung und Stabilitätsbemessung des Stahlrohres ist der Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebend. Dieser berechnet sich mit der ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituation. Aufgrund der genauen Temperaturermittlung während der Hydratation wird die Annahme von $\gamma_{T} = 1,3$ für den Teilsicherheitsbeiwert gewählt. Allerdings wird für den Kombinationsbeiwert $\psi_{0,T} = 1,0$ (anstatt wie üblich 0,6) angenommen. Dadurch ergibt sich insgesamt eine höhere Auftrittswahrscheinlichkeit als im Hochbau ($\psi * \gamma = 0,6 * 1,5 = 0,9$).

$$E_{d,ULS} = 1,35 * g_k + 1,50 * P_{Beton,k} + 1,3 * \Delta T_k \quad (1)$$

4.2.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Die Verformungen sowie die Auflagerkräfte, welche als eingefrorene Zustände in den nächsten Betonierschritt übernommen werden, berechnen sich aus der charakteristischen Kombination. Der ψ -Wert für Temperatur wird hierbei konsistent zur ULS-Berechnung mit 1,0 angenommen. Diese stellt in etwa die Situation während des Betonierens dar. Die charakteristische Lastkombination wird somit der Verformungsberechnung des Systems sowie der Ermittlung der Spalt- und Vorspannparameter von Betonbettung und Einzelauflagern in Abhängigkeit der Betonierstufen zu Grunde gelegt.

$$E_{d,SLS} = g_k + p_{\text{Beton},k} + \Delta T_k \quad (2)$$

4.3 Parameter der FE-Berechnung [1]

4.3.1 Allgemein

Für die Berechnung des Stahlrohres wird das Programm SCIA – Engineer [9] verwendet. Das System wurde mittels der Finite-Element-Berechnung mit dem Ansatz der direkten Lösung berechnet. Auf den Einsatz der Theorie 2. Ordnung wird aufgrund der langen Berechnungszeit pro System verzichtet. Weiters hat sich gezeigt, dass sich die Ergebnisse bei einem Einsatz der Theorie 2. Ordnung nur geringfügig unterscheiden, da kaum Umfangsmembrankräfte entstehen. Im Wesentlichen wird die ringversteifte Stahl – Rohrkonstruktion im Zuge des Betoniervorganges auf Biegewirkung belastet. Die Berechnung findet am perfekten Rohr statt. Das bedeutet, dass das Rohr ohne eine Vorverformung oder Vorkrümmung eingegeben wird. Eine Berechnung des Schalentrages mit Umfangsimperfektionen wäre nur bei größten Umfangsmembrankräften von Bedeutung. Ein Abheben oder eine Vorspannung der Auflager ist durch den Einsatz nichtlinearer Auflagerparameter im Modell berücksichtigt. Auch das Entstehen eines Spaltes zwischen Stahlrohr und Beton infolge der äußeren Belastung ist in der Struktur in Abhängigkeit der Betonierfolge beachtet. Gleiches gilt für die Definition der Bettungseigenschaften.

4.3.2 Direkte Lösung

Hierbei handelt es sich um eine normale Cholesky-Lösung auf Basis einer Zerlegung des Systemgefüges in SCIA – Engineer [9]. Der Vorteil liegt darin, dass mehrere rechte Seiten gleichzeitig gelöst werden können. Dieser Lösungstyp ist besonders für kleine und mittelgroße Probleme effektiv. Es hat sich weiters gezeigt, dass sich die Rechenzeit mit diesem Lösungsansatz für die große Anzahl an Systemen in einem sinnvollen Rahmen befindet. Schubverformungen werden berücksichtigt.

4.3.3 FE – Netz

Für die Generierung des FE-Netzes wurde eine mittlere Größe der Netzteilung von 40/40mm verwendet (Abb. 16). Im Bereich kleiner Schalenelemente ergibt sich eine kleinere Netzteilung und daraus erfolgt einer Netzverdichtung in diesem Bereich, die eine mittlere Größe der Elemente von 10/10mm aufweist (Abb. 17). Der Mindestabstand zweier Netzknoten beträgt 1mm und die Mindestlänge eines Stabelementes beträgt 0,1m. Die Netzgenerierung ergibt sich für uns ein Modell mit einer Anzahl von 75200 Elementen. Davon stellen 71500 Elemente 2D-Schalenelemente dar und 3700 sind 1D-Elemente. Die Schalenelemente dienen der Modellierung des glatten Rohres, die Stabelemente werden für die Beulringe verwendet. In beiden Fällen handelt es sich um Elemente mit einem linearen Verformungsansatz.

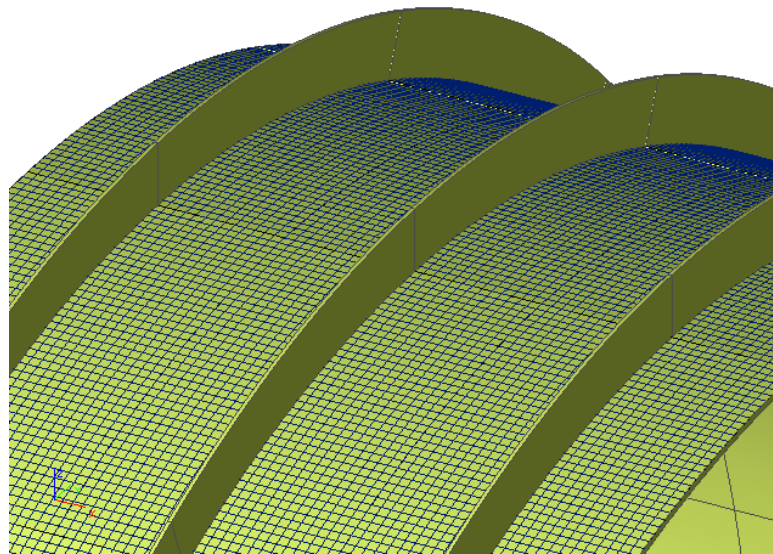


Abb. 16 Verteilung des FE-Netzes im Bereich größer Elemente

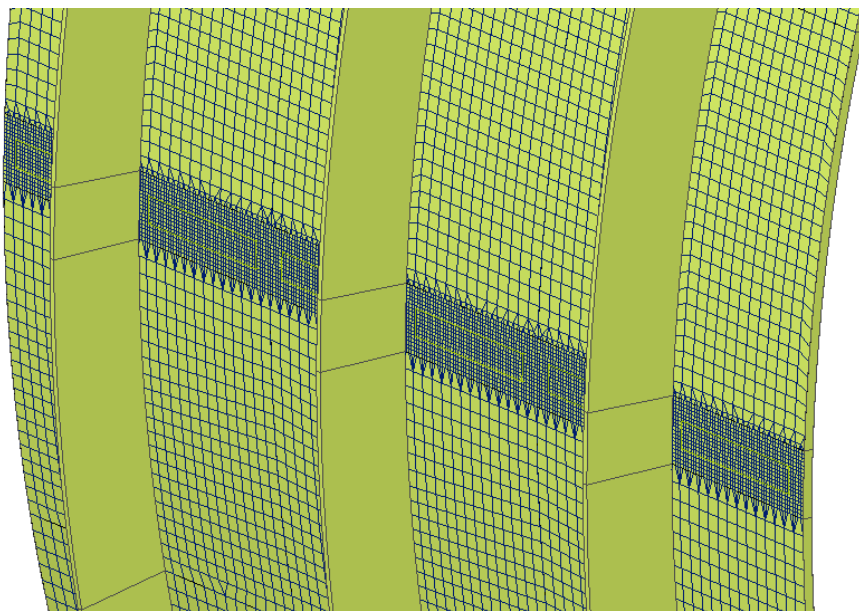


Abb. 17 Verteilung des FE-Netzes im Bereich kleiner Elemente

4.4 Stahlrohr

Für die Modellierung des Stahlrohres wurden Schalenelemente mit einer Dicke von $t=25\text{mm}$ und einer Stahlgüte von S355 mit der Fließgrenze $f_y = 355\text{N/mm}^2$ verwendet. Die Beulringe sind als Träger mit den Abmessungen $250/15\text{mm}$ modelliert und sitzen außen mittig auf der Kontaktkante der Schalenelemente auf. Die Berechnung des Stahlrohres erfolgt linear elastisch.

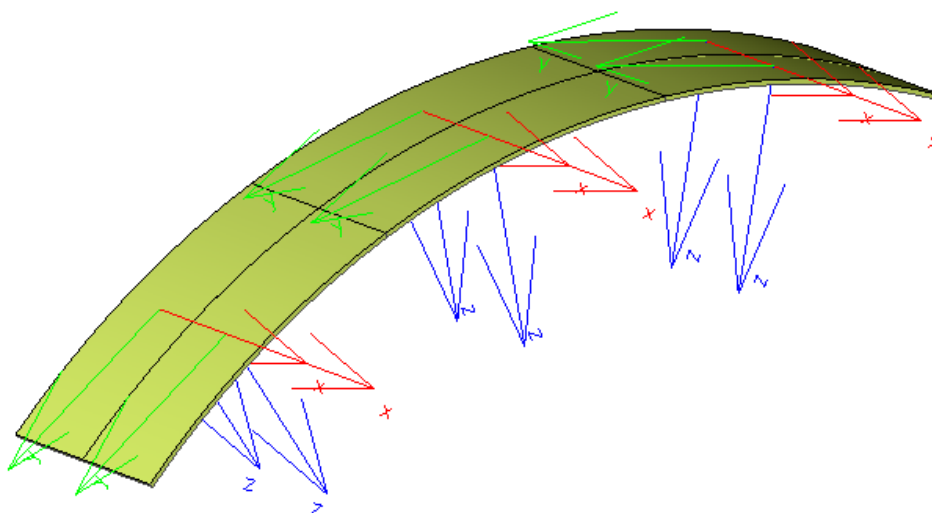


Abb. 18 Ausschnitt des Stahlrohrs mit dargestellten positiven Lokalachsen

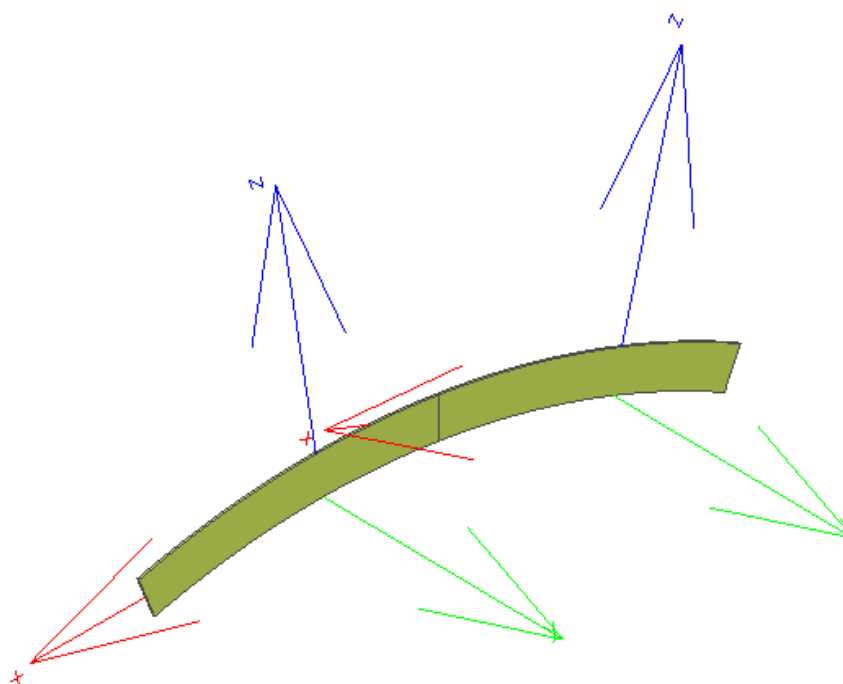


Abb. 19 Ausschnitt des Beulringes mit dargestellten positiven Lokalachsen

4.5 Auflager [1]

4.5.1 Allgemein

Die Auflager bestehen wie gezeigt aus 2xU200 Profilen, welche auf der Baustelle passend an die Felsoberfläche abgelängt werden. An der Felsausbruch-Oberfläche wird eine Kopfplatte angebracht und mittels Keilen erfolgt die Montage des Lagers zwischen dem Beulring und dem Felsen. Danach wird das Profil an den Beulring geschweißt. Daher nehmen die Auflager Druckkräfte auf, jedoch sind sie gegen ein Abheben nicht gesichert.

Für die ganze Hinterfüllung des Stahlrohres mit Beton sind 18 Betonierstufen erforderlich. Jede Betonierstufe hat ein einziges Modell, das mit 8 in der Umfangsrichtung angeordneten Auflagern gestützt ist. Grundsätzlich hat jedes Auflager individuelle nichtlineare Eigenschaften für jede Betonierstufe. Durch diese nichtlineare Eingabe können in das Lager vor der Berechnung sowohl eine Vorspannkraft als auch eine Verschiebung eingebracht werden. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Analyse des Stahlrohres über die gesamte Betonierphase, um die Auflagerkräfte und Verschiebungen von Schicht zu Schicht übertragen zu können.

Der Querschnitt der Auflager wird nur für die Ermittlung der Auflagereigenschaften benötigt ($0,2\text{m}^2$). Dieser hat jedoch keinen Einfluss auf den Verlauf des Biegemoments und der Querkräfte im Ring.

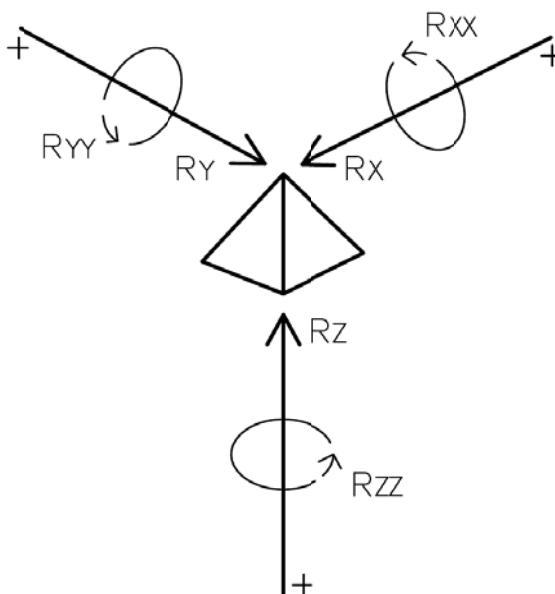


Abb. 20 Vorzeichenkonvention der Auflager

4.5.2 Nichtlinearität

Eine Eingabe der nichtlinearen Bedingung erfolgt in SCIA – Engineer [9] mit der Möglichkeit die Lager über eine Funktion zu definieren. Es wird zwischen einem Abheben und einer in das System aufgebrachten Druckkraft unterschieden (Abb. 21).

Ein Abheben in der Betonierstufe zuvor, kann nun, durch eine in das zu untersuchende System eingebrachte Verformung, berücksichtigt werden. Durch das Festlegen eines kräftefreien Verformungsbereichs in der negativen z-Richtung des Auflagers ist ein widerstandsloses Rückverformen möglich, ehe das Lager wieder starr auf Druck wirkt.

Befindet sich das Auflager durch das System zuvor unter Druck, ist also eine Vorspannung vorhanden, so wird diese mit einem verformungsfreien Bereich simuliert. Erst wenn die eingebrachte Kraft überschritten ist, beginnt sich das Auflager widerstandslos in die positive z-Richtung zu verformen.

Ab einer Betonierhöhe von 4,50m (Schicht 10) wird davon ausgegangen, dass die Betonauflast auf die Kopfplatte, die an das U-Profil angeschweißt ist, ein Abheben der Auflager verhindert. Ab diesem Zeitpunkt sind die Auflager als „starr“ modelliert.

Während der Berechnung werden die Auflagerreaktionen dokumentiert und durch ein Aufsummieren über den zeitlichen Verlauf der Montage mittels Microsoft Excel [11] sind für jeden Zeitpunkt die Auflagerkräfte aus der nichtlinearen Kombination von Frischbetondruck und Temperatur festgehalten.

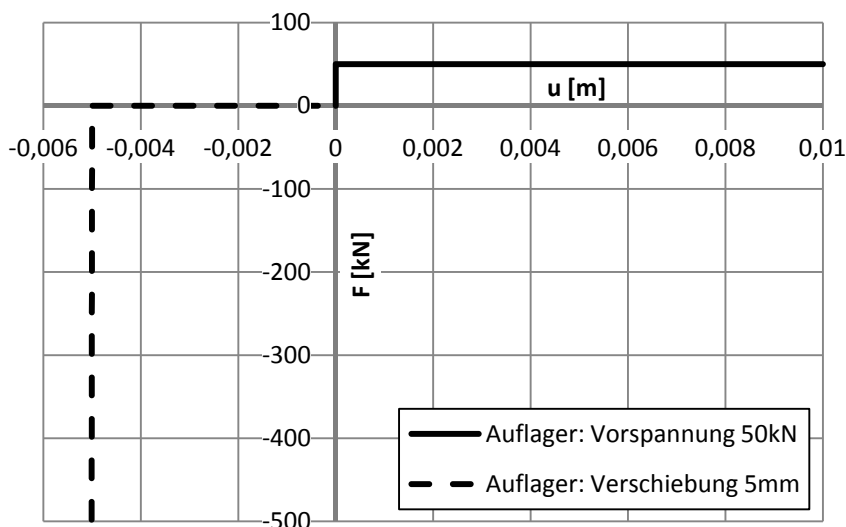


Abb. 21 Nichtlineare Auflagerbedingung am Bsp. einer Vorspannung und Verschiebung

4.6 Bettung [1]

4.6.1 Allgemein

Während der Betonierphase wirken sowohl Druckkräfte als auch Zugkräfte auf den jungen Beton. Da die Betonzugfestigkeit jedoch nicht in Rechnung gestellt wird, müssen die Eigenschaften der Bettung über eine nichtlineare Eingabe im Programm SCIA – Engineer [9] erfolgen. Der Bereich der Betonzugfestigkeit wird mit null angesetzt und die Betondruckfestigkeit entspricht der Betonarbeitslinie aus EN 1992-1-1.

Es darf dabei aus Gründen einer einfacheren Modellierung die vereinfachte Spannungs – Dehnungslinie verwendet werden. Diese weist eine gleiche oder etwa höhere Modellsicherheit auf (Abb. 22) als die für den Betonbau typische parabolische Spannungs - Dehnungslinie. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass die Betonparameter des jungen Betons einer größeren Streuung unterliegen, und daher die lineare Spannungs – Dehnungslinie als ausreichend erachtet wird.

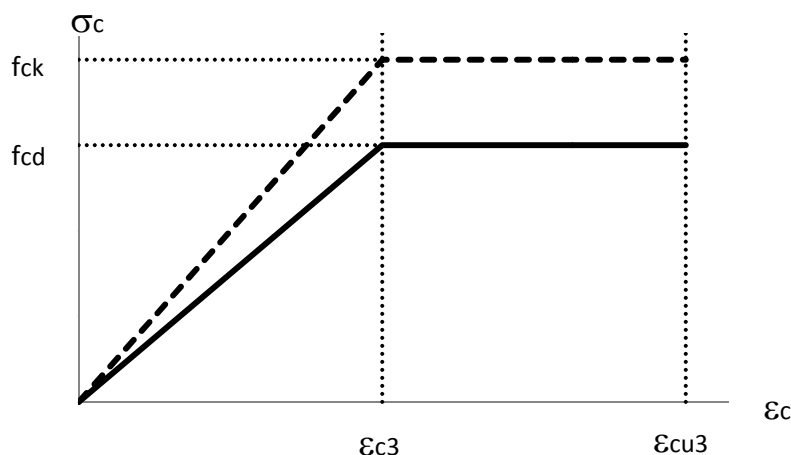


Abb. 22 Bilineare Spannung – Dehnungslinie lt. ÖNORM 1992-1-1 [3]

Dabei ist ϵ_{c3} die rechnerische Bruchdehnung des Betons mit 1,75‰ im EN 1992-1-1 definiert. Die Betondehnung ϵ_{cu3} unter der Maximalspannung f_{cd} endet bei 3,5‰. Die charakteristische Betondruckfestigkeit $f_{ck}(t)$ muss lt. Glg. (3) noch auf den Bemessungswert $f_{cd}(t)$ umgerechnet werden.

$$f_{cd}(t) = \alpha_{cc} * f_{ck}(t) / \gamma_c \quad (3)$$

mit	$f_{cd}(t)$	= charakteristische Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des Betonalters
	α_{cc}	= Faktor zur Berücksichtigung von Langzeiteffekten (Wird vernachlässigt)
	$f_{ck}(t)$	= Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
	γ_c	= Teilsicherheitsbeiwert für Beton

Da der Beton in seiner frühen Phase Kräfte aufnehmen muss, wird der Faktor ($\alpha_{cc} = 1,0$) zur Berücksichtigung der Langzeiteinwirkungen vernachlässigt.

In Abb. 23 ist die Eingabe der Betonbettung mittels SCIA – Engineer [9] anhand eines Beispiels dargestellt. Der Verlauf der Betondruckfestigkeit wird mittels der Spannungs – Dehnungslinie modelliert. Basis für die Bestimmung der Nachgiebigkeit ist die Hooke'sche Federsteifigkeit für eine Betonschichtdicke von 1m.

Ein widerstandsloses Verformen lässt sich über ein Verschieben der Dehnungslinie in das System einbringen.

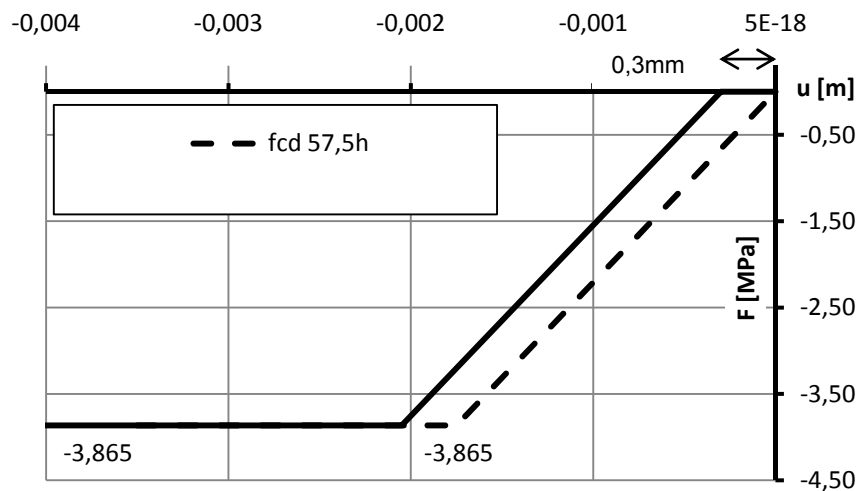


Abb. 23 Nichtlinearer Bettungsverlauf nach 57,5h und einer eingebrachten Verschiebung von 0,3mm

4.6.2 Variante 5a Betonbettung C20/25

In der Tab. 1 wird die Entwicklung der Betonfestigkeit für C20/25 in seiner Frühphase für jede Betonierphase für das Modell mit 3m Auflagerabstand dargestellt. Zusätzlich wird auch die Entwicklung der Temperatur als Folge der Hydratation des Zements in jeder Betonierphase demonstriert.

	f_{ck} [N/mm ²]	f_{cd} [N/mm ²]	T [C°]	ΔT [C°]
Schicht 1	0,00	0,00	0,84	0,00
Schicht 2	0,34	0,22	7,01	6,17
Schicht 3	0,34	0,22	12,26	5,25
Schicht 4	0,34	0,22	15,20	2,94
Schicht 5	1,00	0,67	16,26	1,06
Schicht 6	1,77	1,18	16,14	-0,12
Schicht 7	2,55	1,70	15,36	-0,78
Schicht 8	3,29	2,19	14,26	-1,10
Schicht 9	3,98	2,65	13,03	-1,23
Schicht 10	4,63	3,09	11,78	-1,25
Schicht 11	5,23	3,49	10,58	-1,20
Schicht 12	5,80	3,86	9,46	-1,12
Schicht 13	6,32	4,21	8,43	-1,03
Schicht 14	6,81	4,54	7,49	-0,93
Schicht 15	7,27	4,85	6,66	-0,84
Schicht 16	7,70	5,14	5,91	-0,75
Schicht 17	8,11	5,41	5,25	-0,66
Schicht 18	8,49	5,66	4,66	-0,59
Schicht 19	8,86	5,90	4,15	-0,52
Schicht 20	9,20	6,13	3,69	-0,45

Tab. 1 Variante 5a: Entwicklung der Betondruckfestigkeit und der Temperatur C20/25

4.6.3 Variante 5b Betonbettung C40/50

Bei Annahme einer höheren Betonklasse als Hinterfüllbeton, ist ersichtlich, dass der Beton im Vergleich zum Beton C20/25 etwa doppelte Anfangsfestigkeit entwickelt. Der Frischbetondruck, der auf das Stahlrohr einwirkt, bleibt gleich groß. Für die Erstellung des Betons C40/50 wird die gleiche Zementklasse CEM II B-S 32,5N verwendet. Obwohl für die Erstellung der Beton C40/50 größere Zementmenge nötig ist, wurde der Einfluss der Zementmenge auf Hydratationsmenge vernachlässigt und wurde angenommen, dass auch die Entwicklung der Temperatur als Folge der Hydratation gleiche Werte aufweist (Tab. 2).

	f_{ck} [N/mm ²]	f_{cd} [N/mm ²]	T [C°]	ΔT [C°]
Schicht 1	0,00	0,00	0,84	0,00
Schicht 2	0,67	0,45	7,01	6,17
Schicht 3	0,67	0,45	12,26	5,25
Schicht 4	0,67	0,45	15,20	2,94
Schicht 5	2,01	1,34	16,26	1,06
Schicht 6	3,55	2,36	16,14	-0,12
Schicht 7	5,09	3,40	15,36	-0,78
Schicht 8	6,57	4,38	14,26	-1,10
Schicht 9	7,96	5,31	13,03	-1,23
Schicht 10	9,26	6,17	11,78	-1,25
Schicht 11	10,47	6,98	10,58	-1,20
Schicht 12	11,59	7,73	9,46	-1,12
Schicht 13	12,64	8,43	8,43	-1,03
Schicht 14	13,63	9,08	7,49	-0,93
Schicht 15	14,55	9,70	6,66	-0,84
Schicht 16	15,41	10,27	5,91	-0,75
Schicht 17	16,22	10,81	5,25	-0,66
Schicht 18	16,99	11,33	4,66	-0,59
Schicht 19	17,71	11,81	4,15	-0,52
Schicht 20	18,40	12,27	3,69	-0,45

Tab. 2 Variante 5b: Entwicklung der Betondruckfestigkeit und der Temperatur C40/50

5 Darstellung der Ergebnisse

5.1 Allgemein

Alle berechneten Ergebnisse (Verformungen, Schnittkräfte und Spannungen) des Stahlrohres und Beulringes, die mit dem Programm SCIA – Engineer [9] berechnet wurden, werden im Folgenden mit dem Programm Microsoft Excel [11] weiterbearbeitet, um eine bessere Darstellung und einen Vergleich der Ergebnisse der betrachteten Modelle mit einer Stützweite von 1m (MA-Ott) und einer Stützweite von 3m in der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt am Beulring mit den Auflagerpunkten des Rohres (Beulring 2) und an einer Außenkante des Stahlrohres zwischen den Ringen (Schnitt S2) (Abb. 25). In den folgenden Diagrammen werden die Werte entlang des Rohrumfanges ausgegeben. Die Umfangslänge wird daher in Grad von 0-360° dargestellt (Abb. 24).

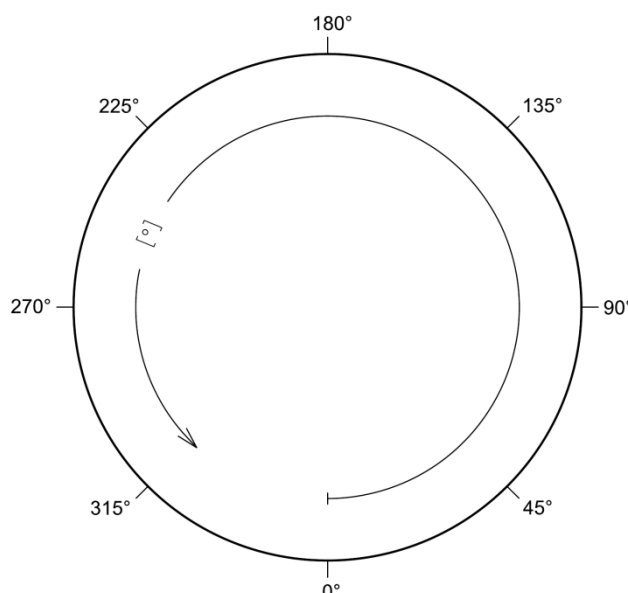


Abb. 24 Umfangslänge [°] des Stahlrohres

Die Ausgabe der Ergebnisse wird nicht für alle Betonierstufen gegeben, sondern nur für die relevantesten Betonierzustände. Es werden der Verlauf der Verformungen, Spannungen sowie Schnittkräfte dargestellt. Der kontinuierliche Verlauf der Ergebnisse über das gesamte Einbetonieren des Stahl-Liners ist für eine eingehende Betrachtung, mittels Microsoft Excel in der beiliegenden CD und Anhang einsehbar.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt auf 3 verschiedenen Arten:

- Ergebnisse jedes einzelnen Betonierschrittes
- Aufsummieren der Betonierschritte von 1-18 mit Rohreigengewicht
- Aufsummieren der Betonierschritte von 1-18 ohne Rohreigengewicht

Diese Weise der Darstellung der Ergebnisse erleichtert das Verständnis jedes Betonierschrittes. Aufgrund dessen, dass das Eigengewicht des Stahlrohres für die Endergebnisse eine große Bedeutung hat, wird auch ein Aufsummieren der Betonierschritte mit Eigengewicht und zusätzlich ohne Eigengewicht durchgeführt.

Wie man in der Abb. 25 sehen kann, werden die Ringspannungen nur am Beulring 2 an der K-Naht (innen) und an der Ringaußenkante (außen) dargestellt. Die Spannungen im Stahlrohr werden sowohl bei Beulring 2 (Schnitt S1) als auch in der Symmetrieachse am Ende des Rohrsegmentes (Schnitt S2) ausgewiesen. Der Schnittverlauf S1 befindet sich in der Symmetrie Achse des Systems und der zweite schneidet das Stahlrohr am Rand. Die Verformungsverläufe für die zwei anderen Beulringe 1 und 3 sowie für die Rohrspannungen an diese Bereichen werden im Folgenden nicht dargestellt, da die ermittelten Werte nicht maßgebend werden. Es werden nur noch die Spannungen $\sigma_{\text{außen}}$ und σ_{innen} im Beulring 3 dargestellt.

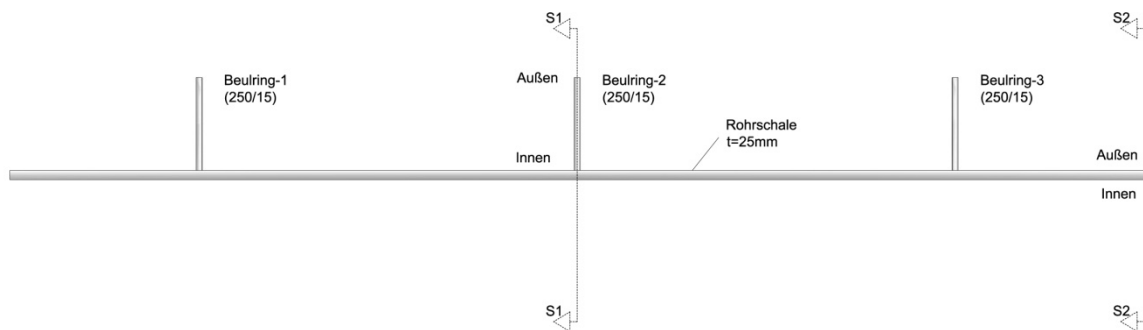


Abb. 25 Darstellung der Schnittführung und Definition der Beulringkante

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Variante 5a ausführlich dargestellt und erläutert, welche dem Beton C20/25 als Bettung gerechnet wurden. Aufgrund dessen, dass die Variante 5b sehr ähnliche Ergebnisse wie Variante 5a erzielt, werden wir nur die wichtigsten Einzelergebnisse von Variante 5a dargestellt. Es werden folgende Ergebnisse dargestellt:

- Radialverformungen u_z im Beulring-2
- Radialverformungen u_z des Stahlrohres im Schnitt S2
- Längsverformungen (Verwölbungen) u_x des Stahlrohres im Schnitt S2
- Schnittkräfte (Normalkraft, Momente und Querkräfte) im Beulring-2
- Spannungen im Beulring-2 innen
- Spannungen im Beulring-2 außen
- Spannungen im Beulring-3 innen
- Spannungen im Beulring-3 außen
- Membranschnittkräfte n_x, n_y des Stahlrohres im Schnitt S1
- Spannungen des Stahlrohres im Schnitt S1 und S2 innen
- Spannungen des Stahlrohres im Schnitt S1 und S2 außen
- Vergleichsspannungen des Stahlrohres innen und außen im Schnitt S1 und S2

5.2 Variante 5a Verformungs-Diagramme

5.2.1 Radialverformungen u_z im Beulring-2

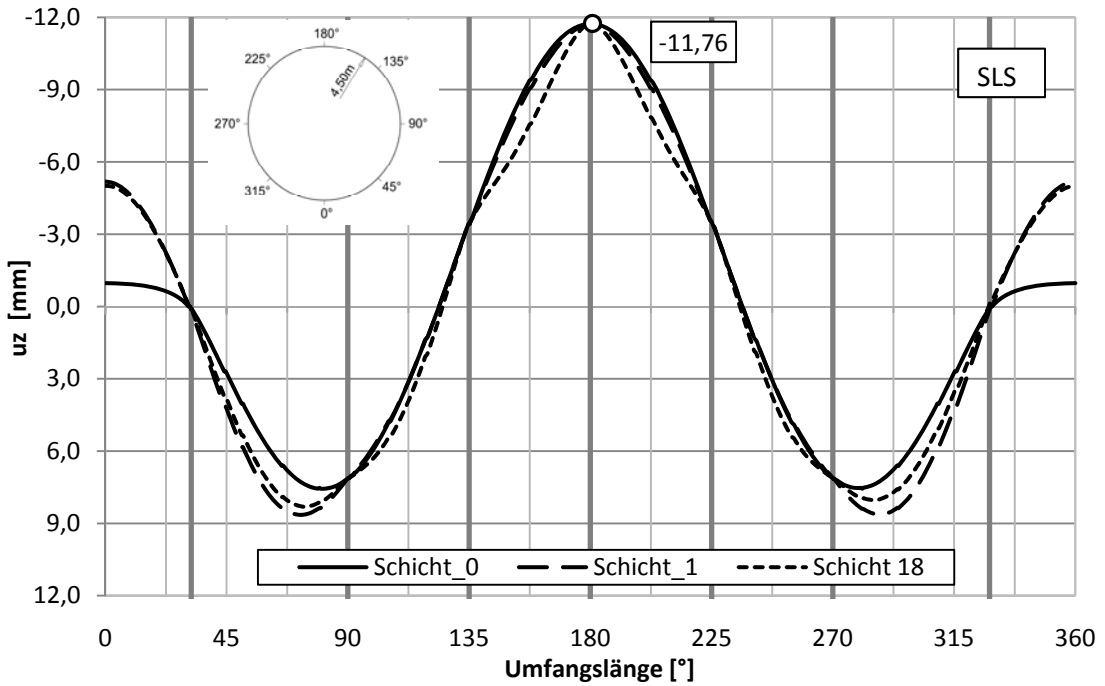


Abb. 26 Variante 5a : Beulring 2 / Gesamtverformungen u_z [mm]

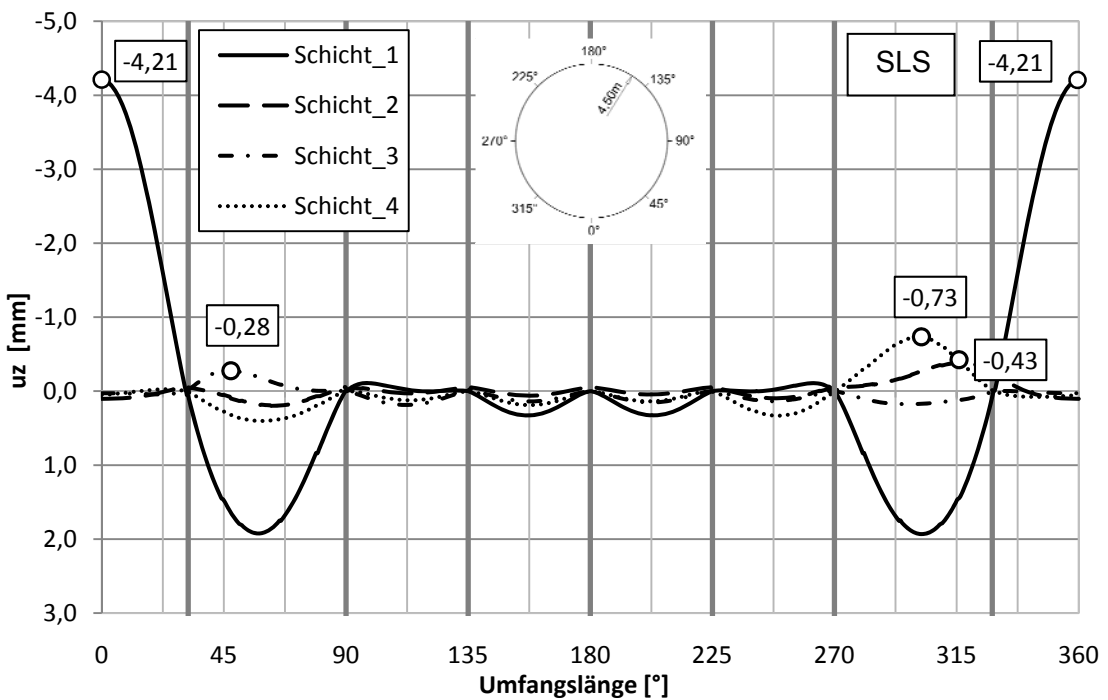


Abb. 27 Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 1-4

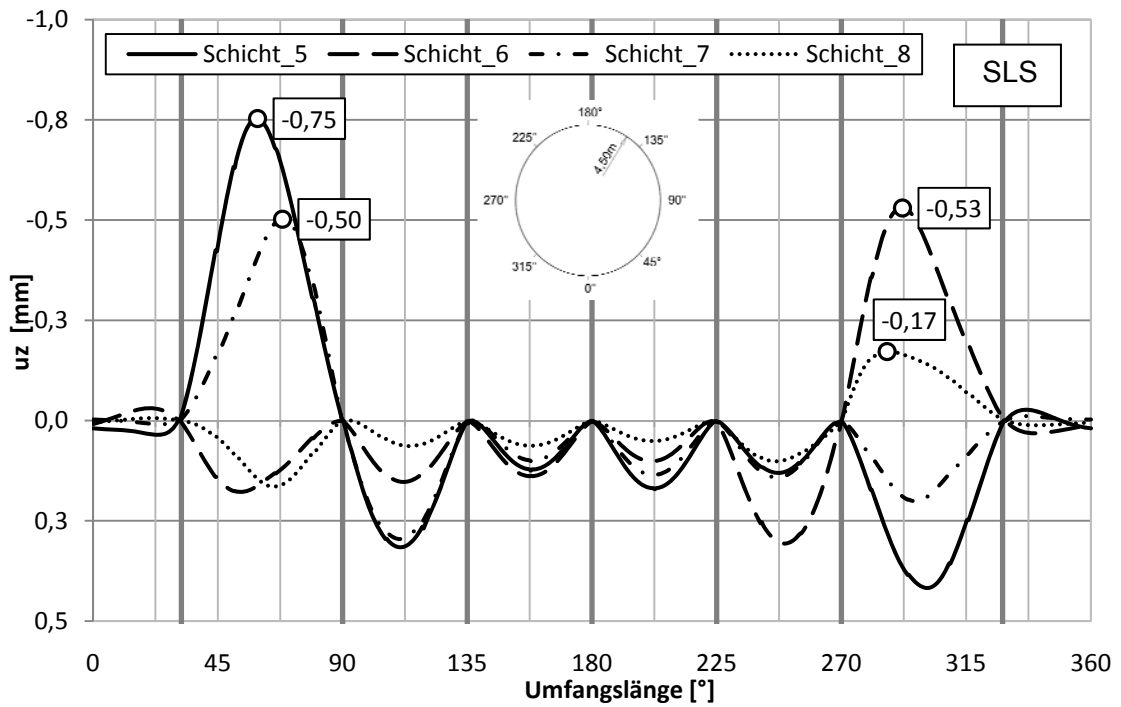


Abb. 28 Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 5-8

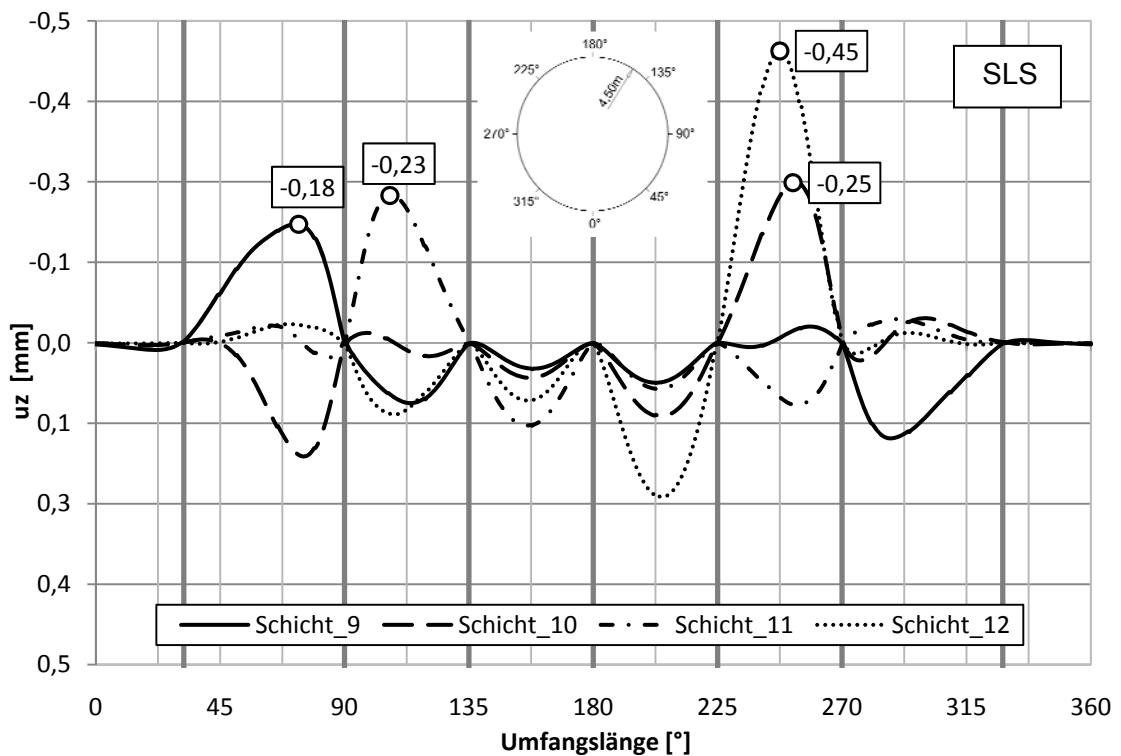


Abb. 29 Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 9-12

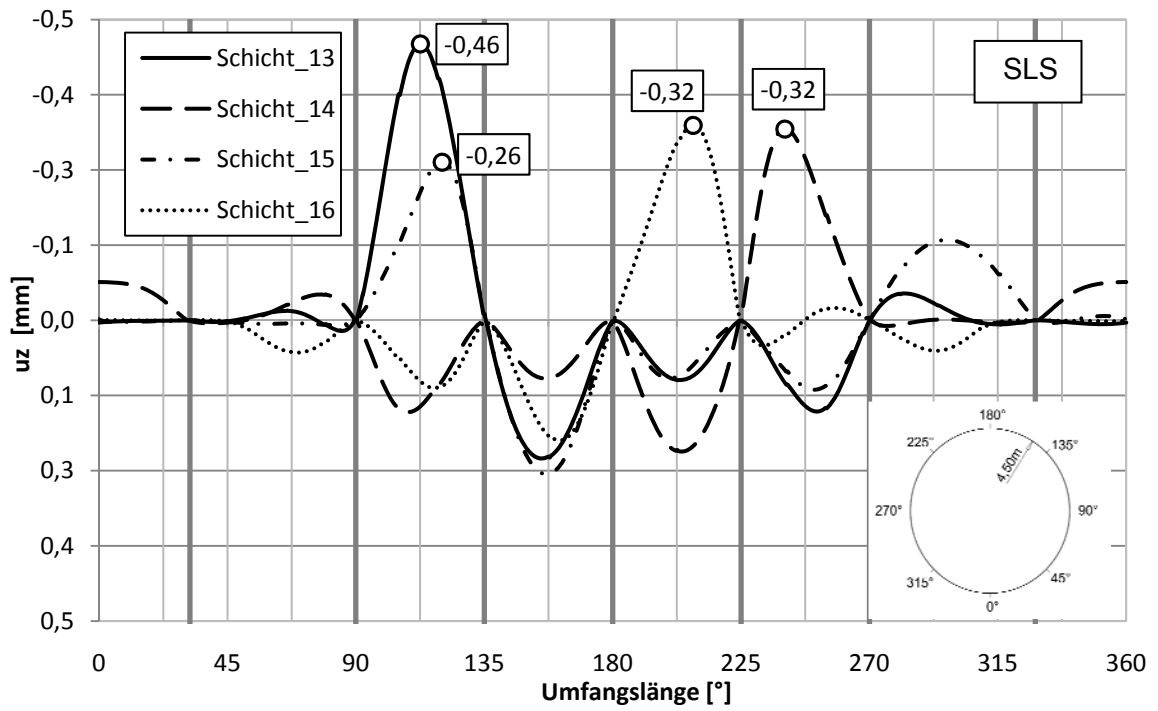


Abb. 30 Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 13-16

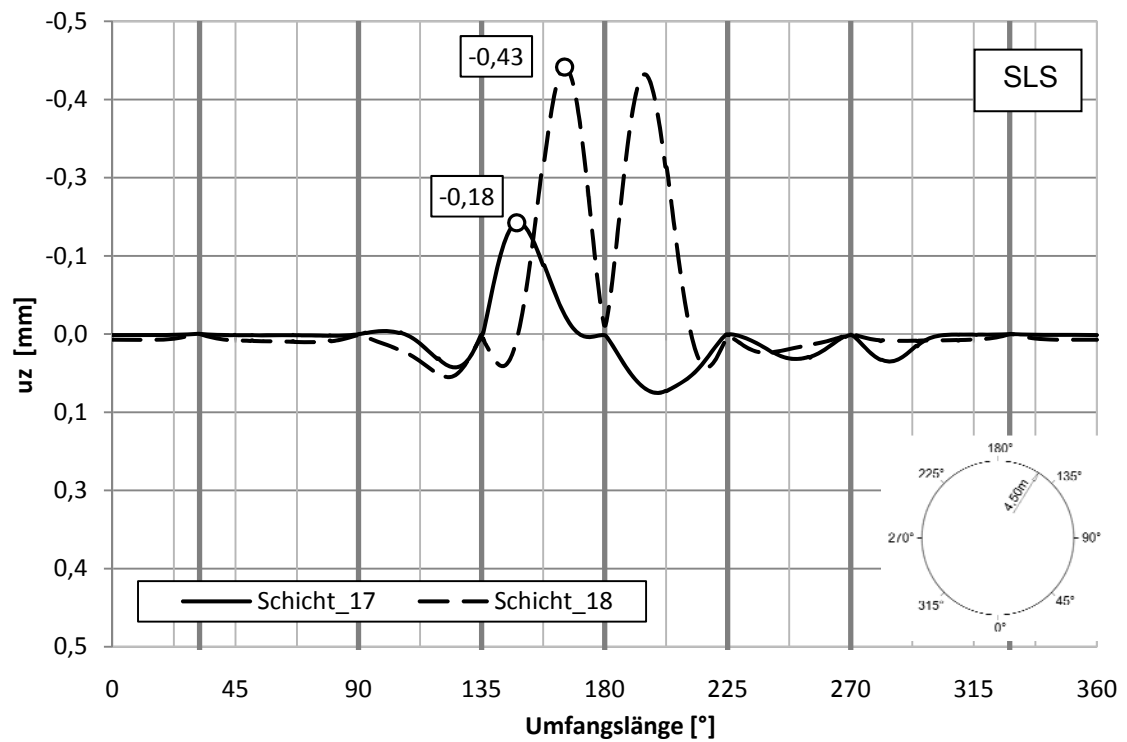


Abb. 31 Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 17-18

5.2.2 Radialverformungen u_z des Stahlrohres im Schnitt S2

Die Radialverformungen u_z des Stahlrohres im Schnitt S2 werden im Vergleich mit den Einzelverformungen des Beulringes 2 (Schnitt S1) dargestellt. Dadurch wird ersichtlich, dass sich der Verlauf der Verformungen unter Eigengewicht des Stahlrohres über die Abschnittslänge kaum ändert (Abb. 32). Während der gesamten Betonierphasen treten doch kleine Unterschiede im Verlauf der Verformungen ein. Diese Unterschiede sind als Folge der Punktlagerungen des Beulringes in der Umfangsrichtung zu sehen. Grundsätzlich ist für das gewählte Tragsystem eine sehr hohe Schalensteifigkeit vorhanden, welche für diese nahezu gleichmäßigen Verformungsverläufe in Längsrichtung verantwortlich ist.

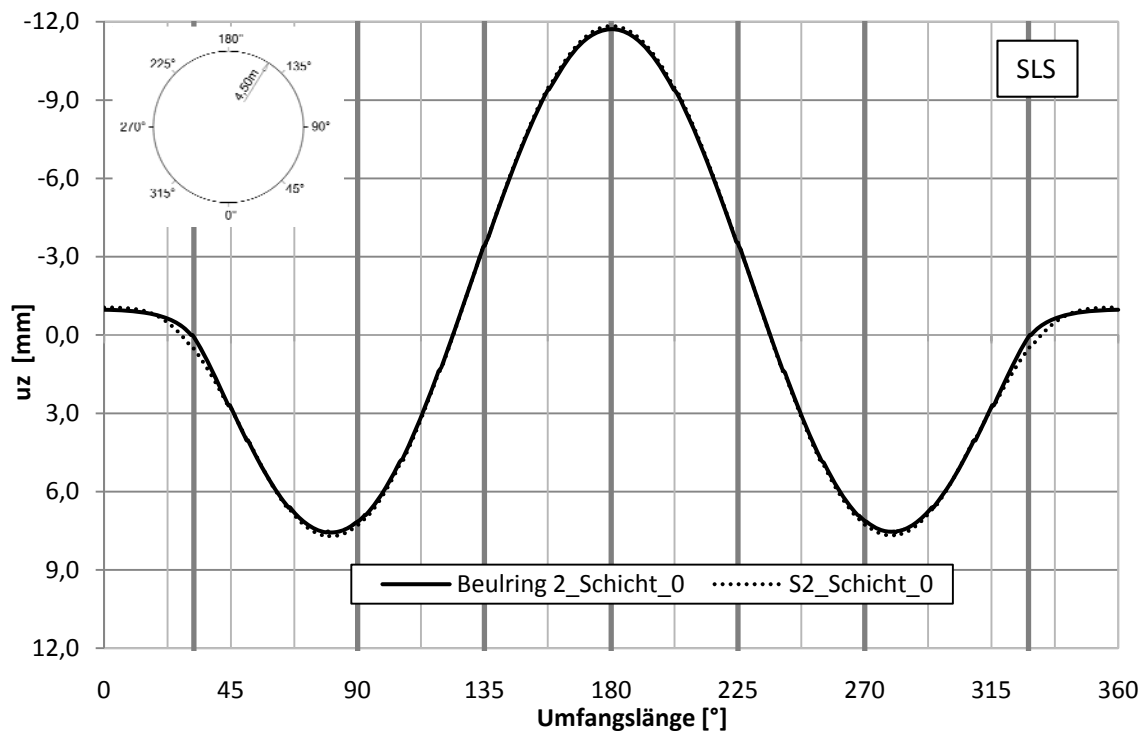


Abb. 32 Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_0

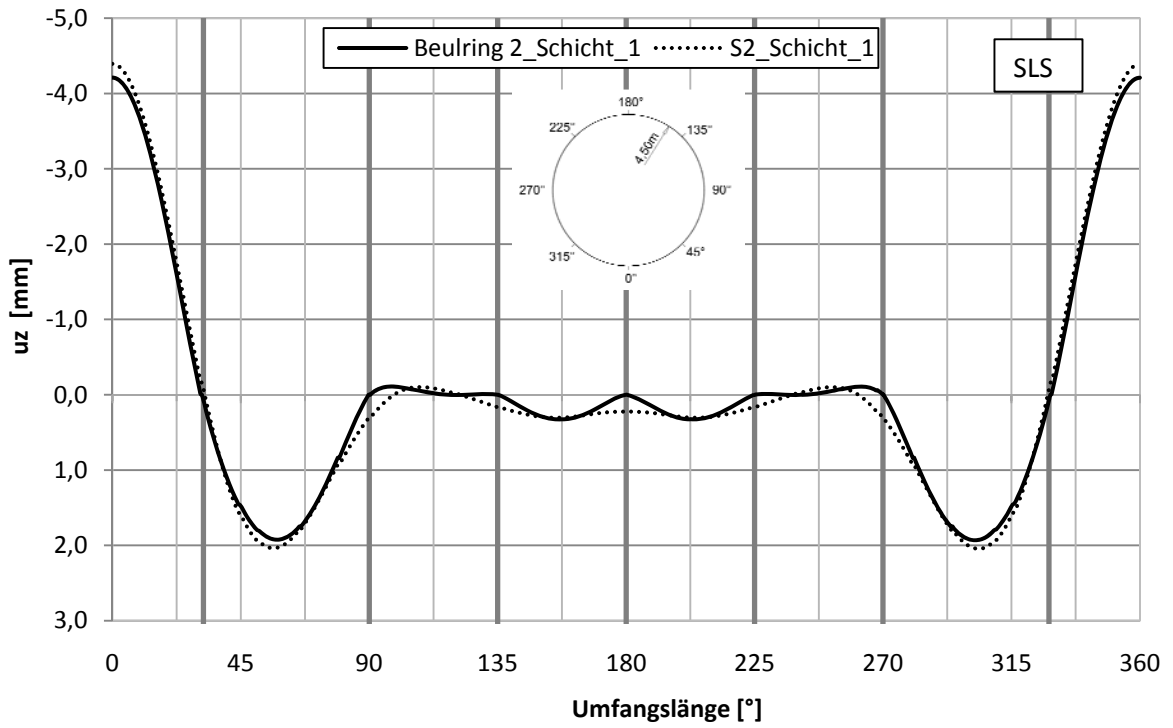


Abb. 33 Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_1

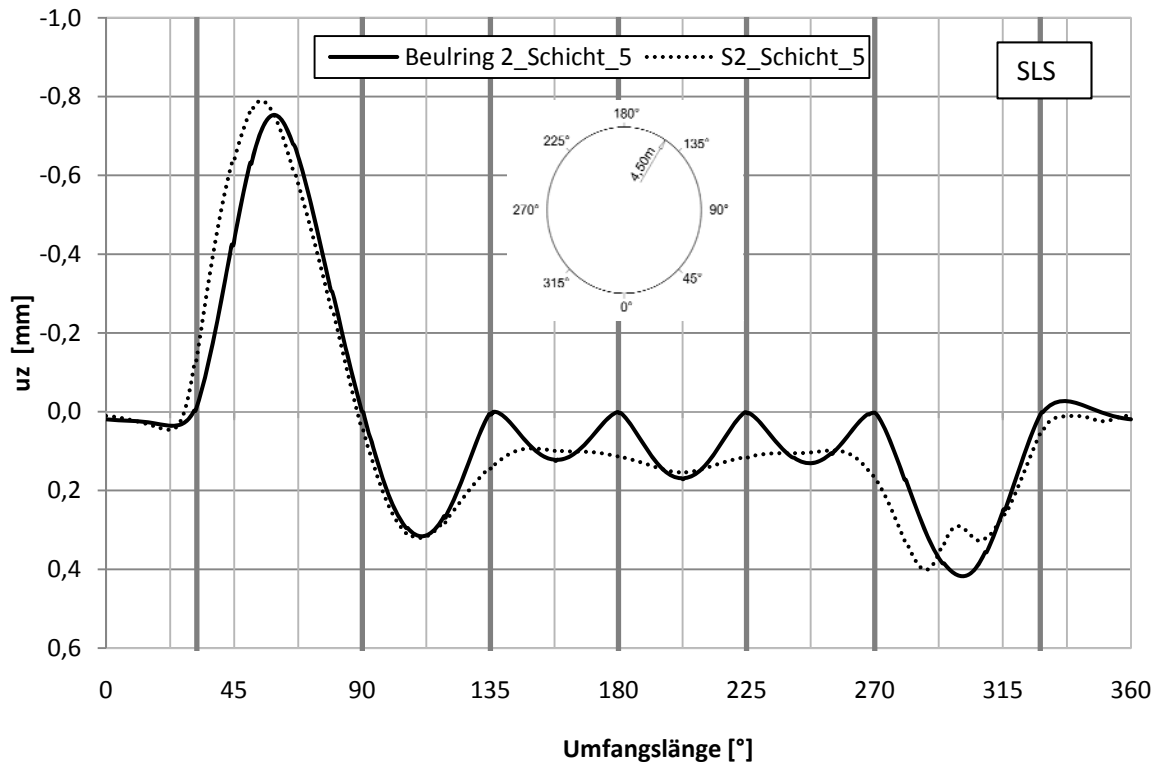


Abb. 34 Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_5

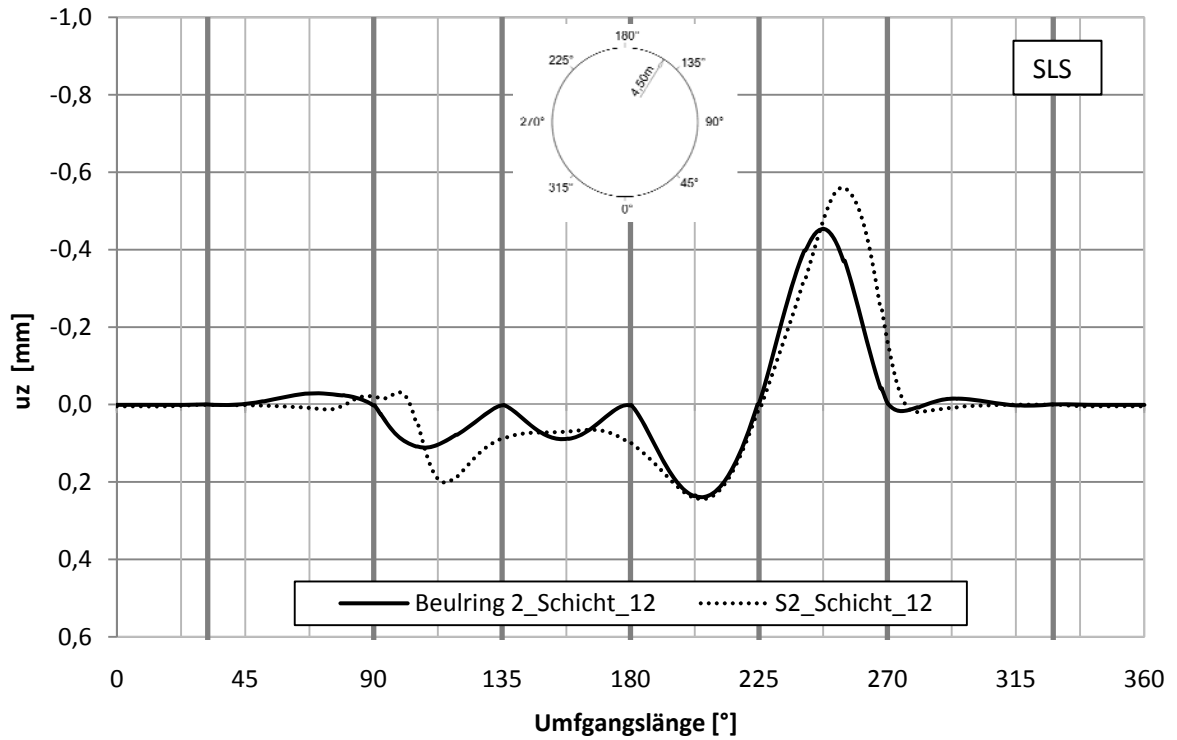


Abb. 35 Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_12

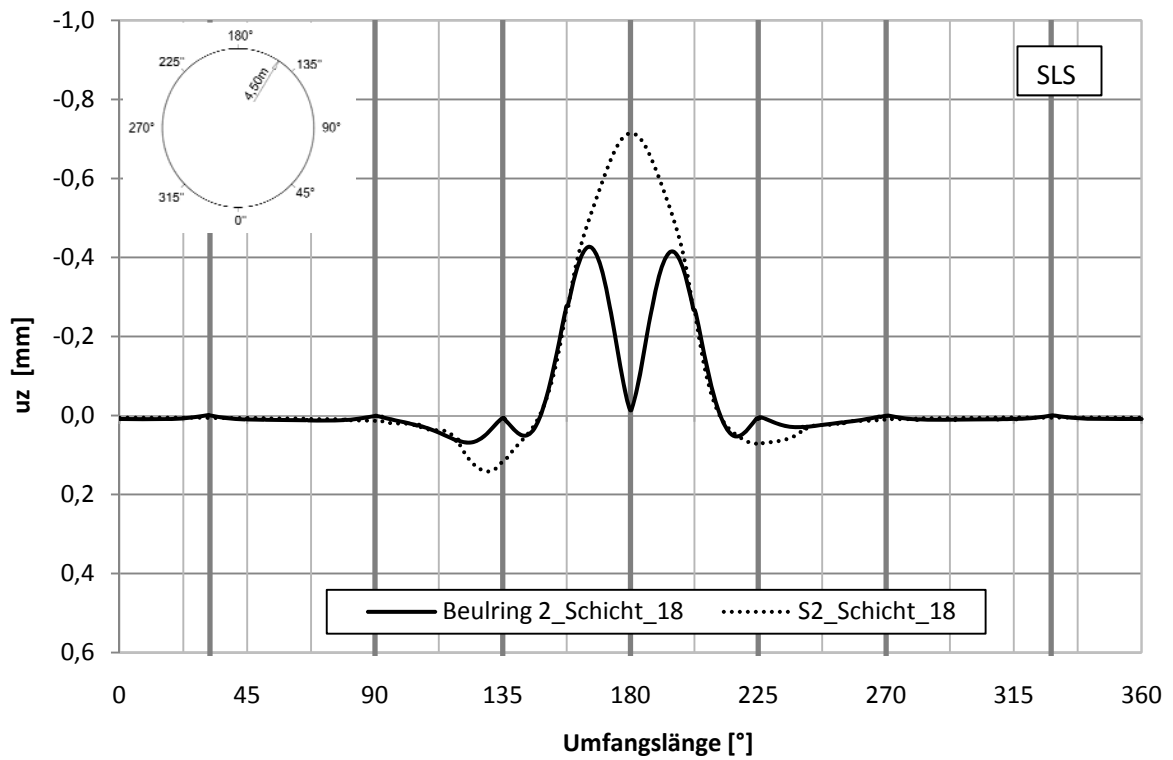


Abb. 36 Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_18

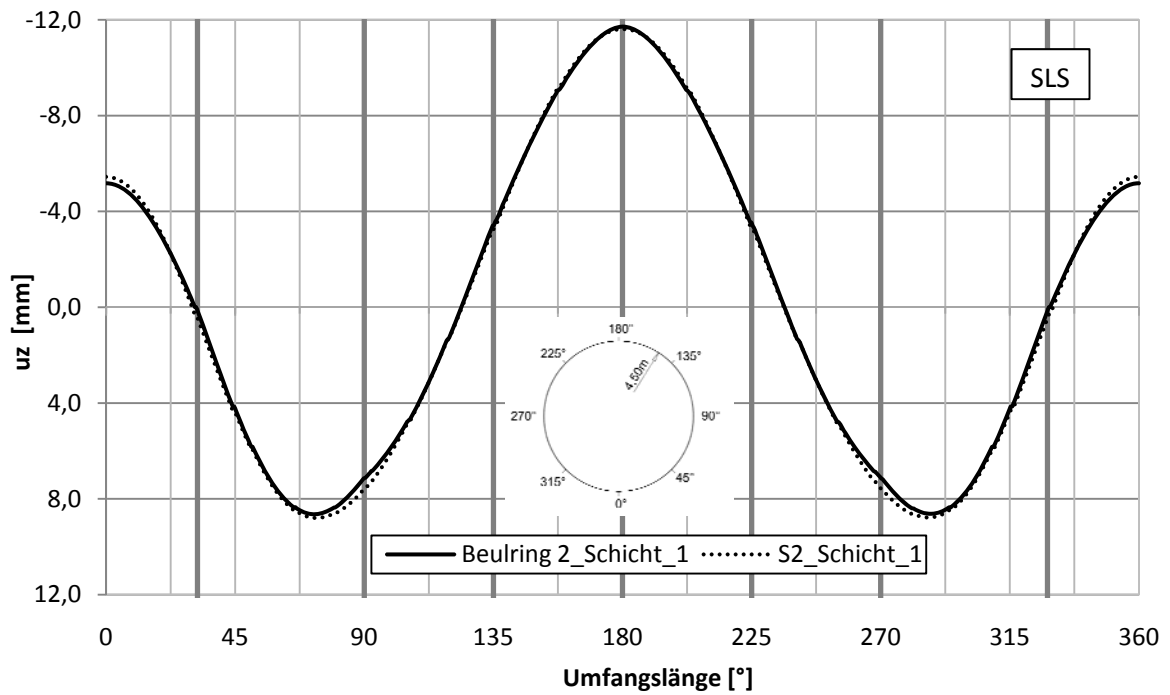


Abb. 37 Variante 5a: Vergleich der Gesamtverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_1

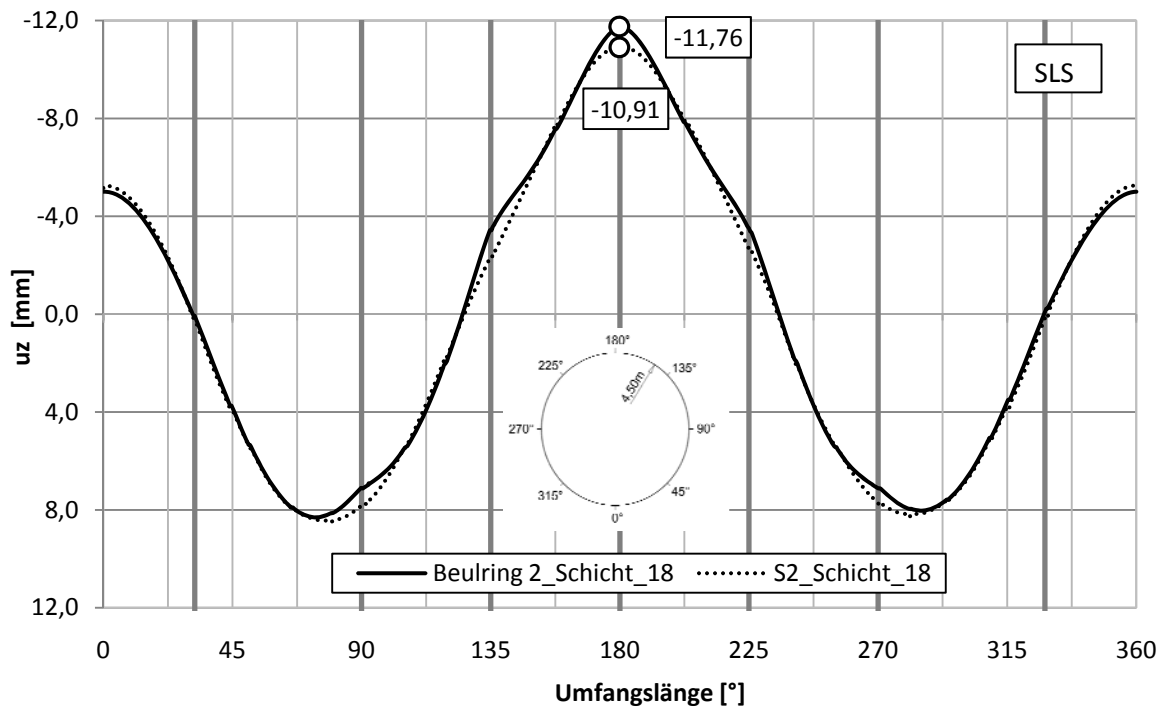


Abb. 38 Variante 5a: Vergleich der Gesamtverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_18

5.2.3 Längsverformungen (Verwölbungen) u_x des Stahlrohres im Schnitt S2

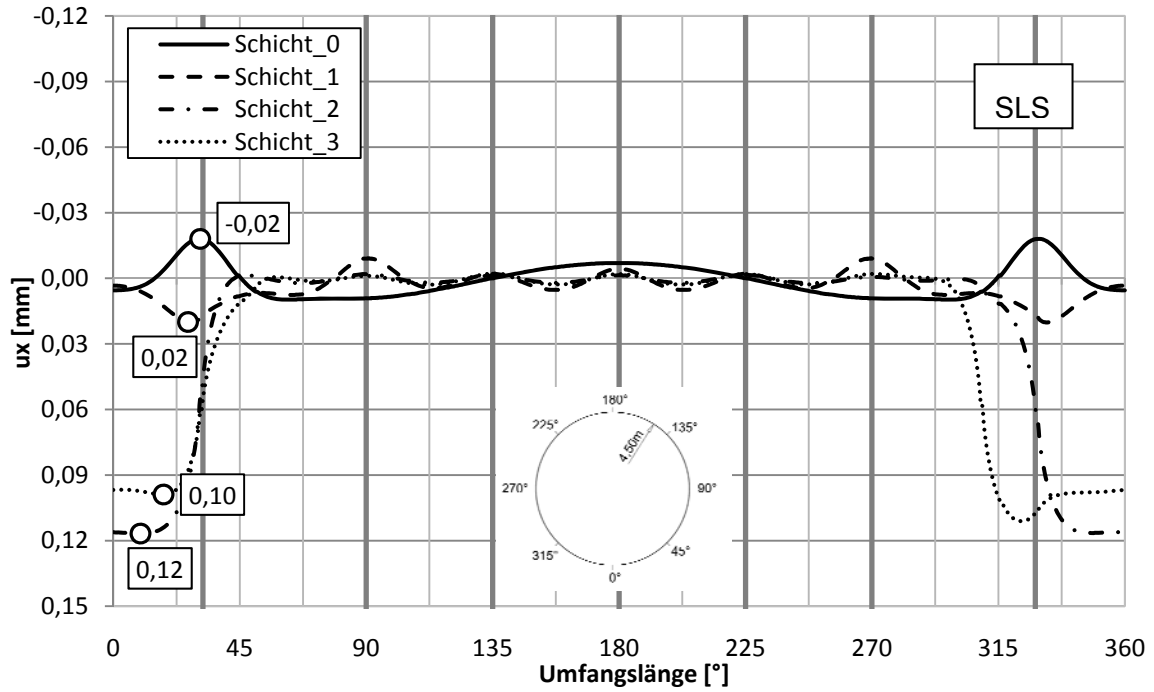


Abb. 39 Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 0-3

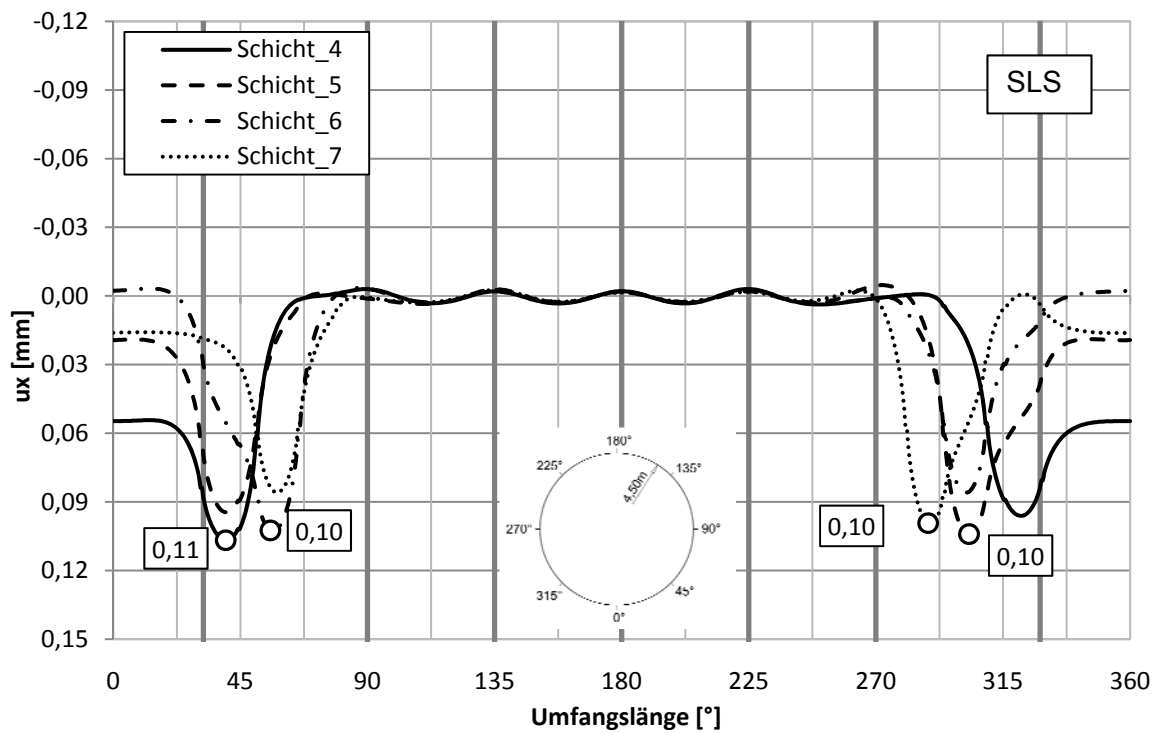


Abb. 40 Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 4-7

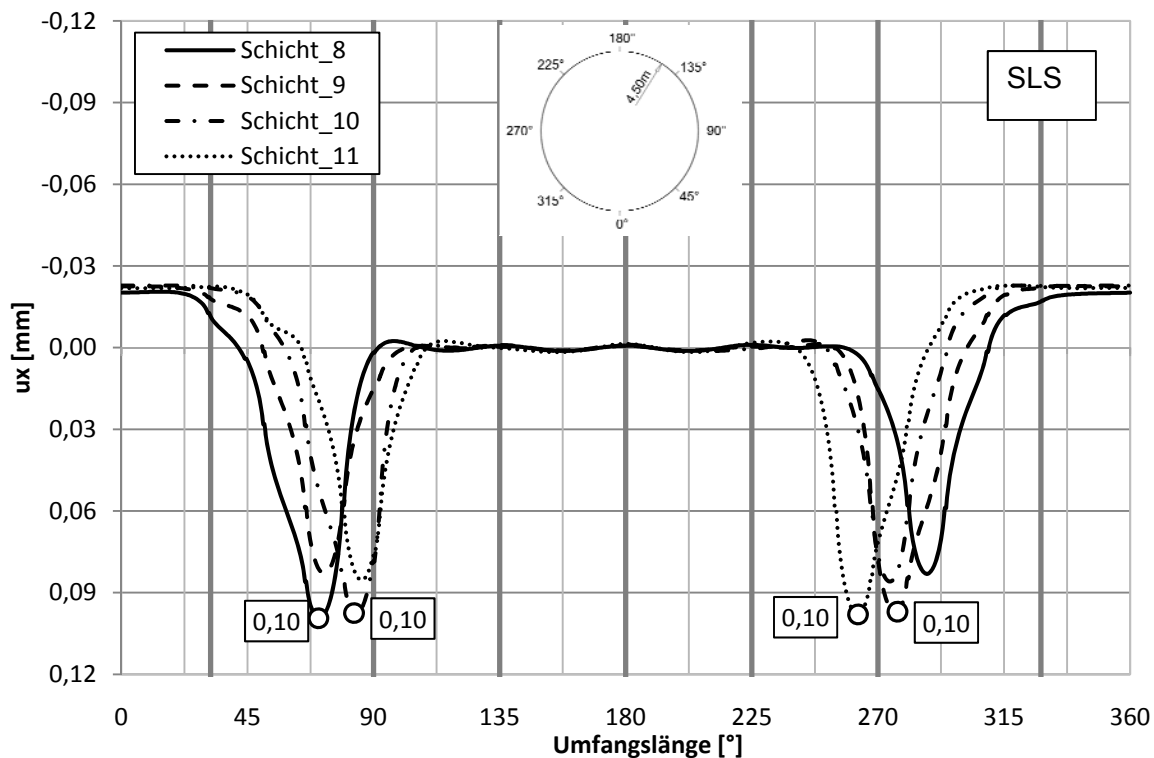


Abb. 41 Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 8-11

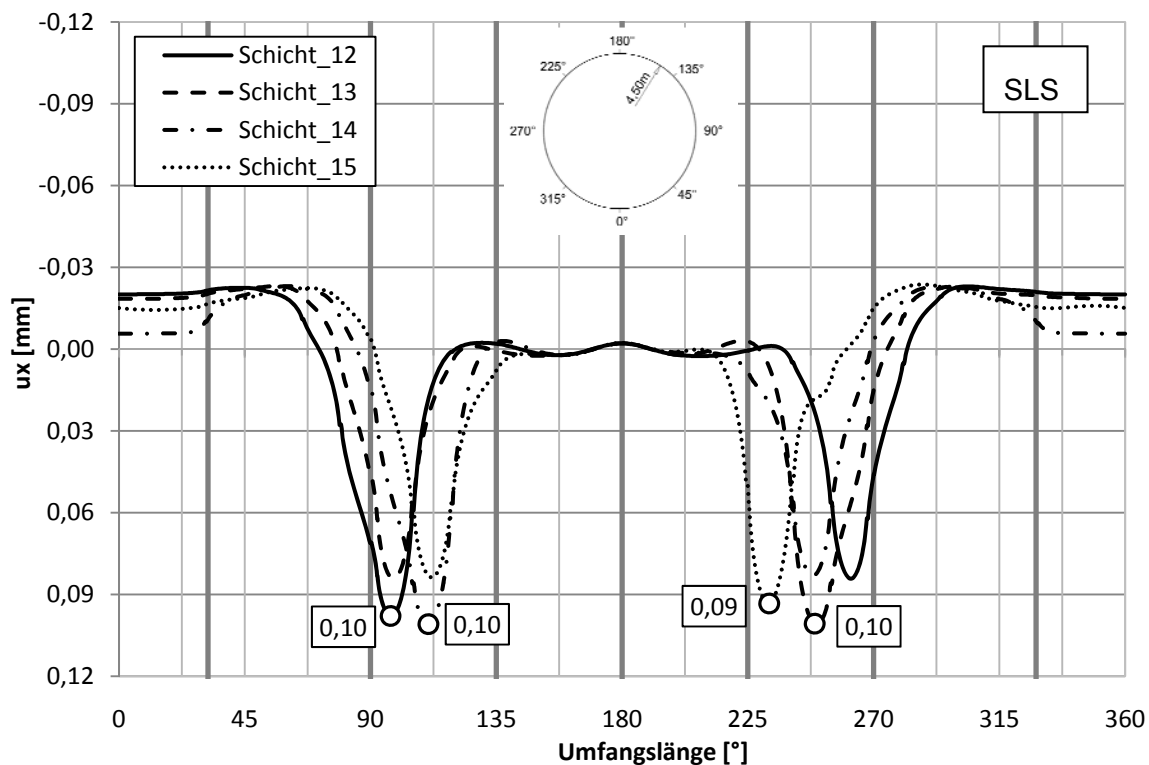


Abb. 42 Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 12-15

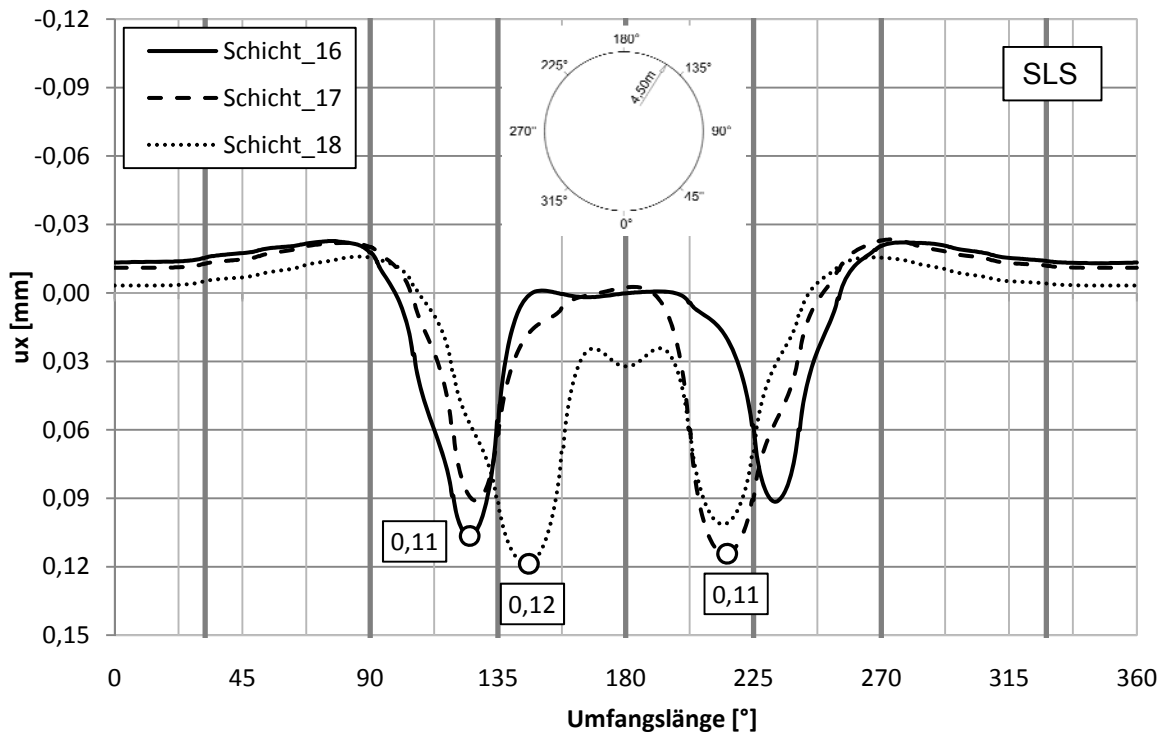


Abb. 43 Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 16-18

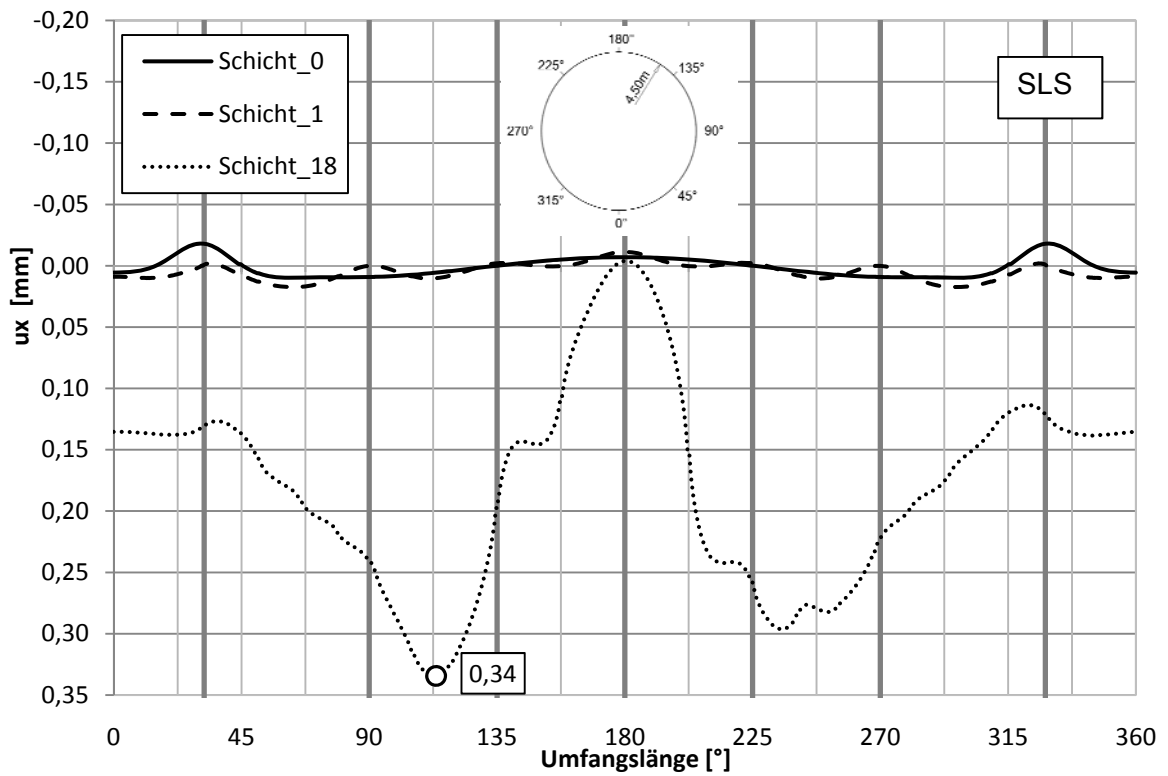


Abb. 44 Variante 5a: Gesamt-Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2

Da in der Modellierung des Stahlrohres die Längsverschiebungen u_x in den Symmetrieachsen frei gelassen werden, um so den letzten Rohrschuss unter möglichst realistischen Verhältnissen zu analysieren, wird in der Abb. 39 bis Abb. 43 die Entwicklung der Längsverschiebungen beginnend mit dem Lastfall des Eigengewichts bis hin zur letzten Betonierschicht in Diagrammen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Längsverschiebungen immer nur im Bereich des wirksamen Frischbetondrucks größer werden. Eine Kompensation ähnlich wie bei den Radialverschiebungen ist bei den Längsverwölbungen nicht zu verzeichnen. In der Abb. 44 ist die Gesamt-Längsverformung im Schnitt S2 dargestellt. Der maximal auftretende Wert von 0,34mm tritt beim Winkel 112° auf. Würde die Längsverschiebung im Schnitt S2 gesperrt, dann würden entsprechende Wölbnormalspannungen entstehen. Die Größenordnung dieser u_x Wölbnormalspannungen lässt sich für die vorliegende Rohrschale wie folgt abschätzen:

$$\max \sigma_{x,w} = \frac{u_x}{L} * E \quad (4)$$

Mit:

$$u_{x,ges} = 0,34\text{mm}$$

$$L = 1533\text{mm}$$

$$E_{\text{stahl}} = 210000\text{N/mm}^2$$

Mit obiger Gleichung (4) ergibt sich eine zusätzliche maximale Längsnormalspannung von $\max \sigma_{x,w} = 46,6\text{N/mm}^2$ bei Wölbbehinderung. In der Abb. 45 wird der Verlauf der Längsspannungen für Schicht 18 dargestellt.

$$\sigma_{x,w} = \frac{0,34}{1533} * 210000 = 46,6\text{N/mm}^2$$

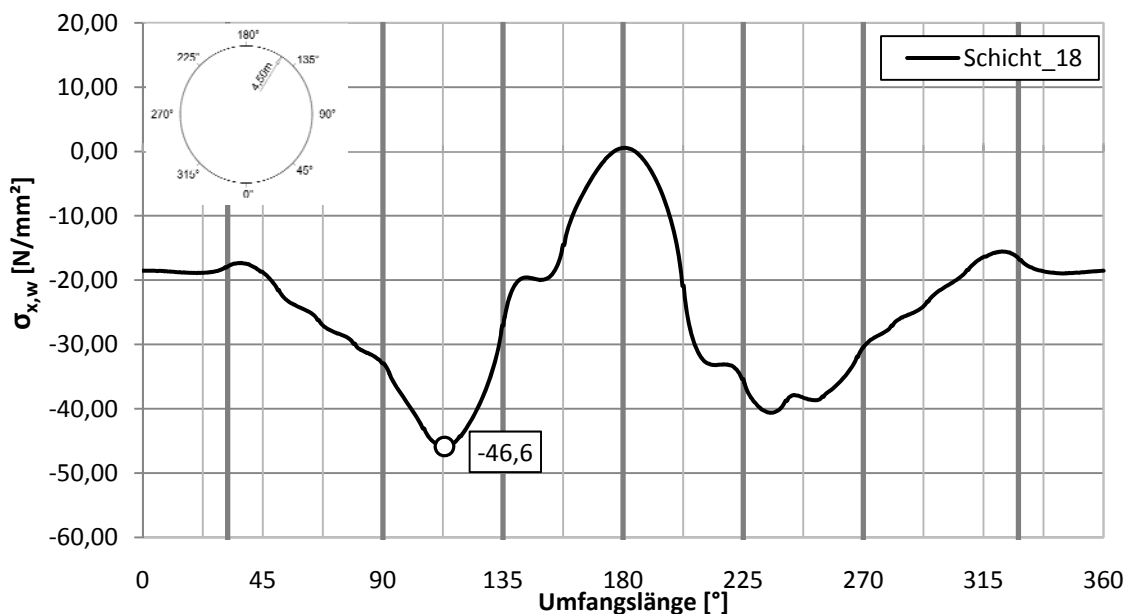


Abb. 45 Längsnormalspannungen $\sigma_{x,w}$ im Stahlrohr infolge Wölbbehinderung [N/mm^2]/Schicht_18

5.3 Schnittkräfte im Beulring-2 Diagramme

5.3.1 Normalkräfte im Beulring-2

Aus Gründen des leichteren Vergleiches mit den Längsverwölbungen (5.2.3) werden im Folgenden die einzelnen Normalkraftverläufe je Schicht ausgegeben und schlussendlich der Gesamtverlauf der Normalkräfte für Schicht_0, Schicht_1 und Schicht_18 dargestellt. In der Abb. 46 ist ersichtlich, dass der maximale Wert von -325,55kN der Normalkraft während des Eigengewichtes bei den Auflagern 31,86° und 328,14° auftritt. Während des ersten Betonierschrittes erfahren die Auflager 90° und 270° der größten Normalkraft von 194,87kN. Beim zweiten und dritten Betonierschritt entsteht die maximale Normalkraft beim Auflager 31,86°. Bis zum letzten Betonierschritt lässt sich keine größere Normalkraft erkennen. Während des letzten Betonierschrittes erfährt der Auflager bei 180° eine positive Normalkraft von 246kN, die zu einer Reduktion der maximal auftretenden Gesamtnormalkraft während des vorletzten Betonierschrittes führt (Abb. 50).

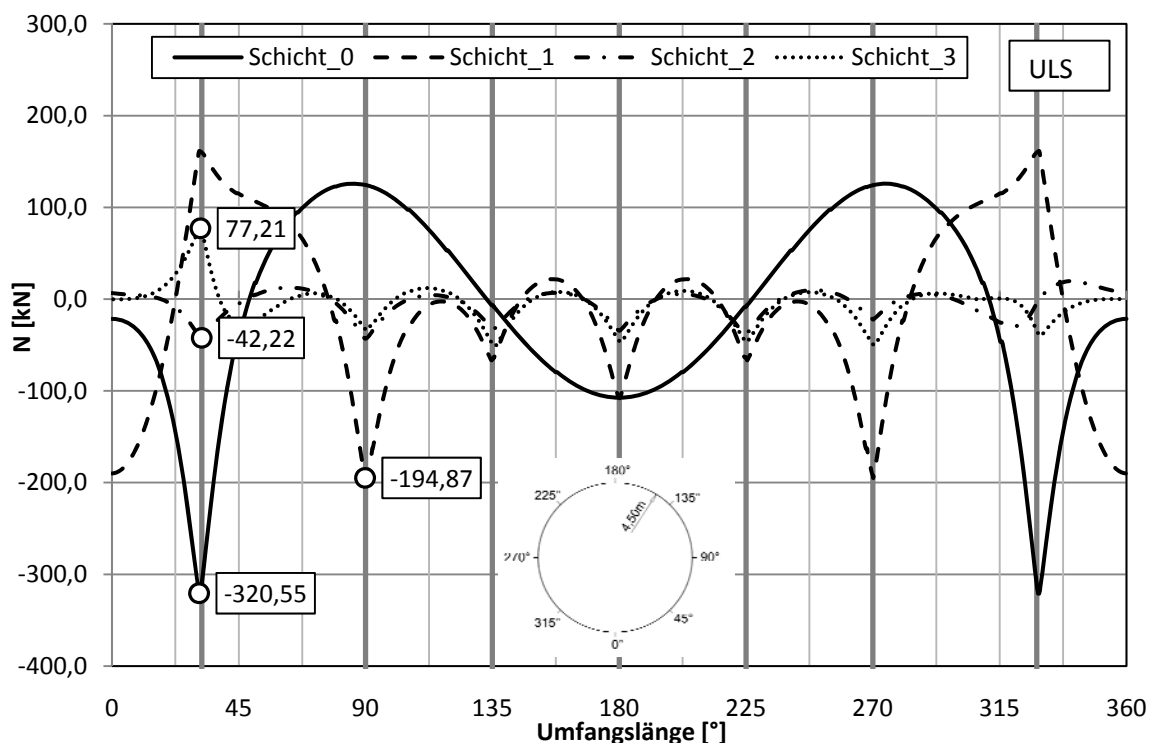


Abb. 46 Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 0-3

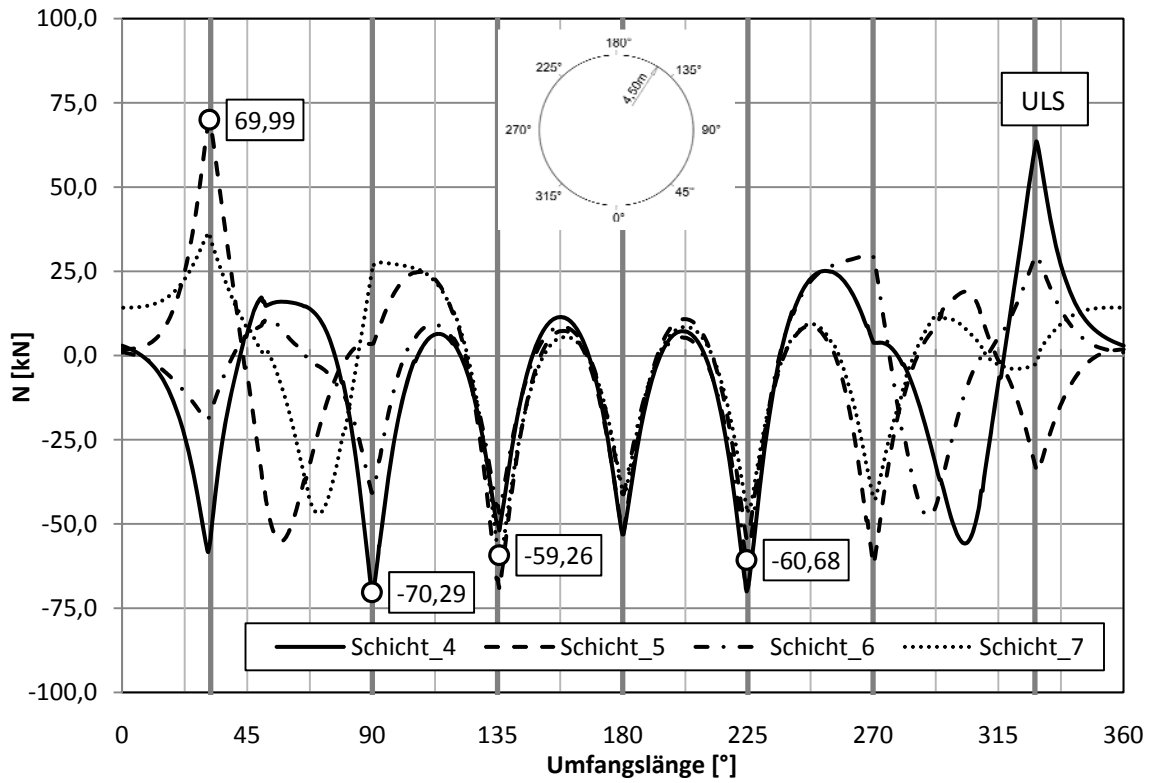


Abb. 47 Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 4-7

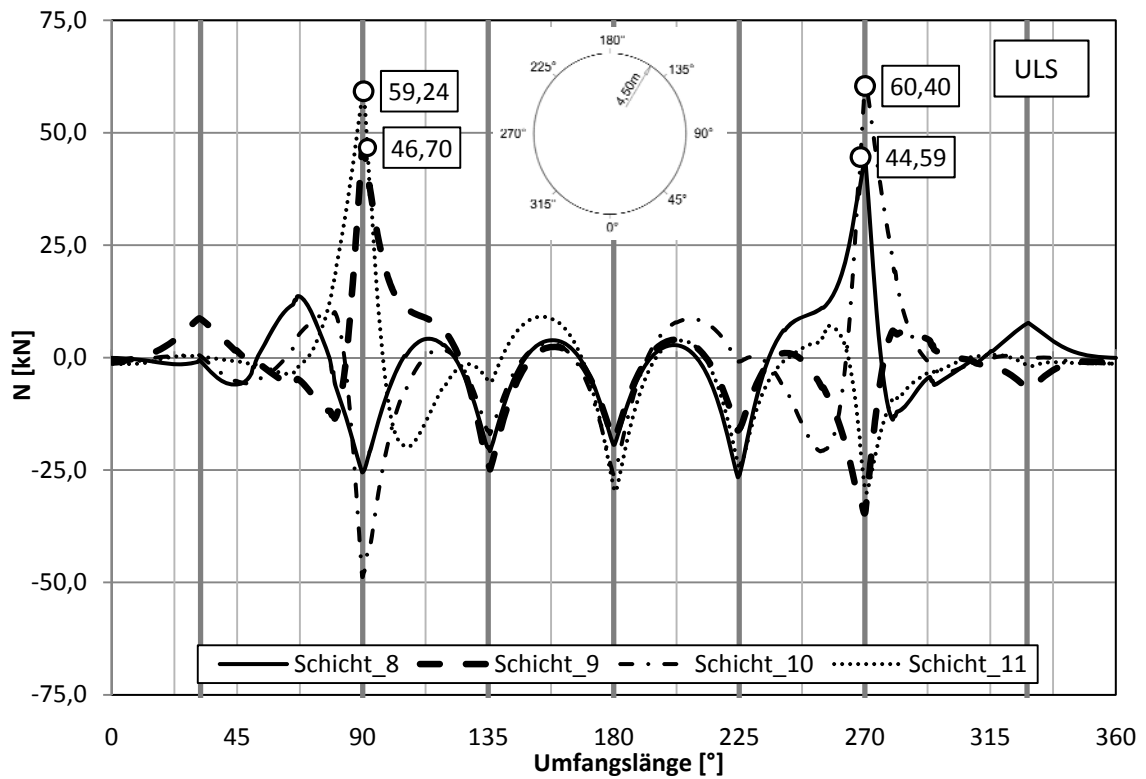


Abb. 48 Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 8-11

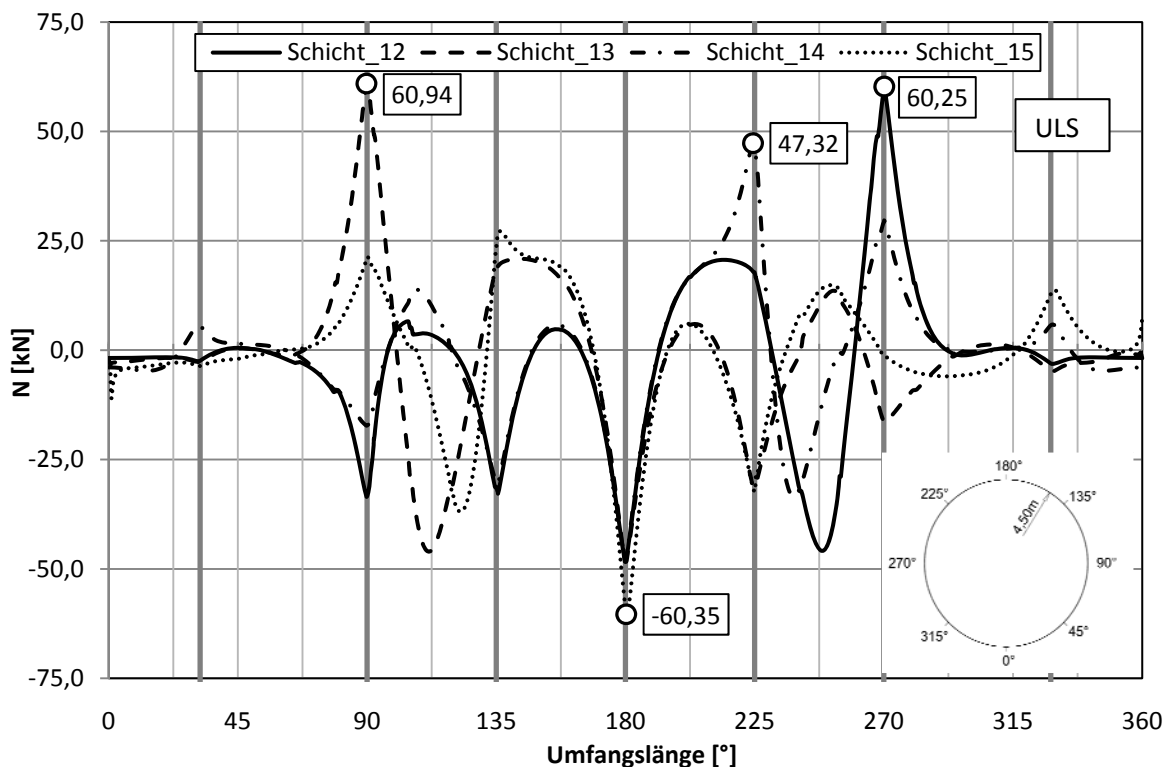


Abb. 49 Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 12-15

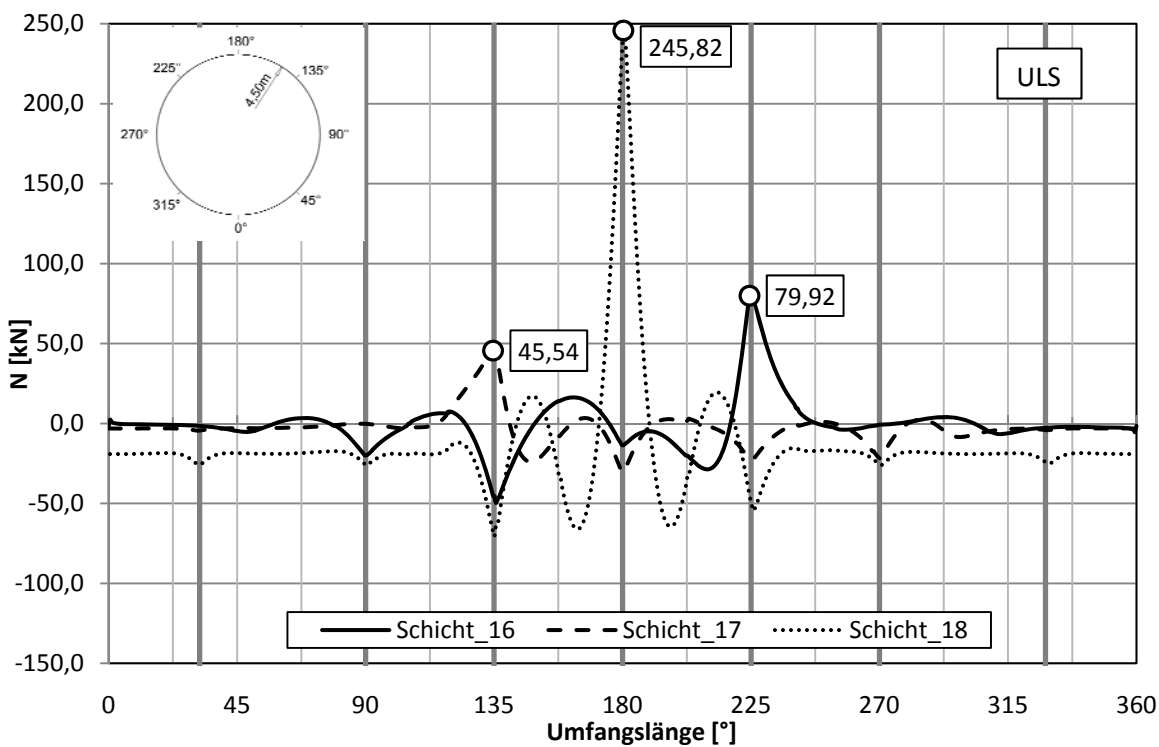


Abb. 50 Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 16-18

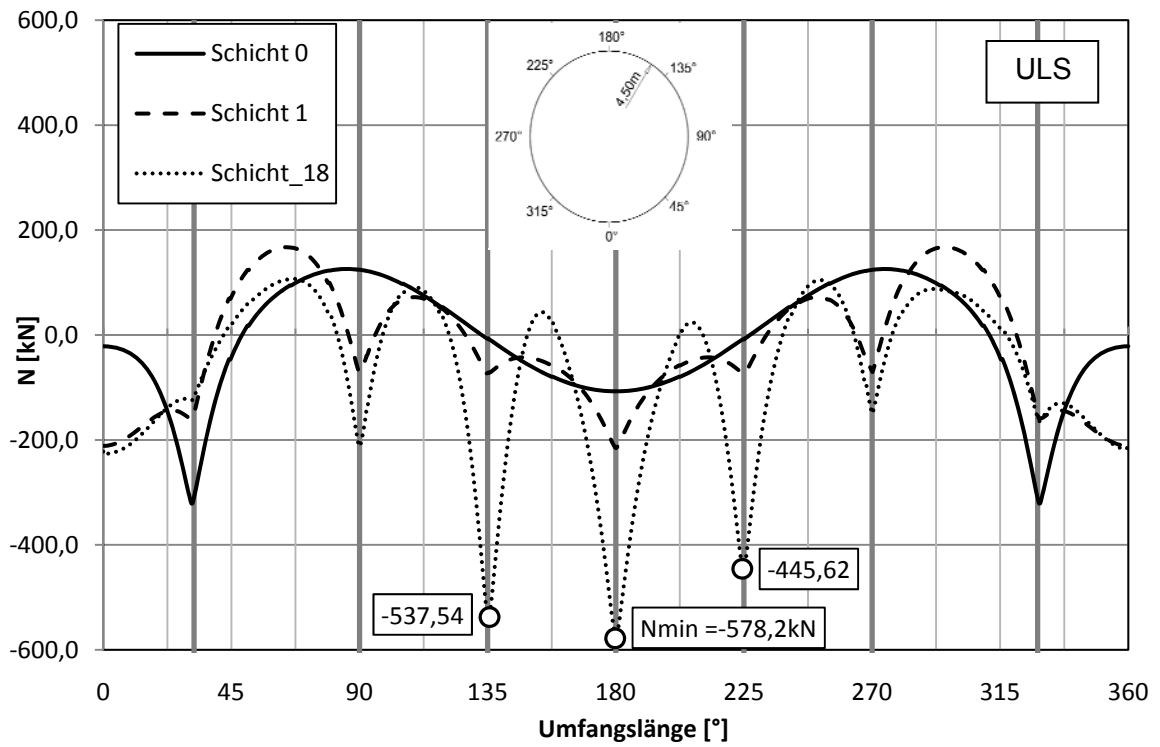


Abb. 51 Variante 5a: Beulring 2 / Gesamtnormalkraft N [kN]

5.3.2 Querkräfte im Beulring-2

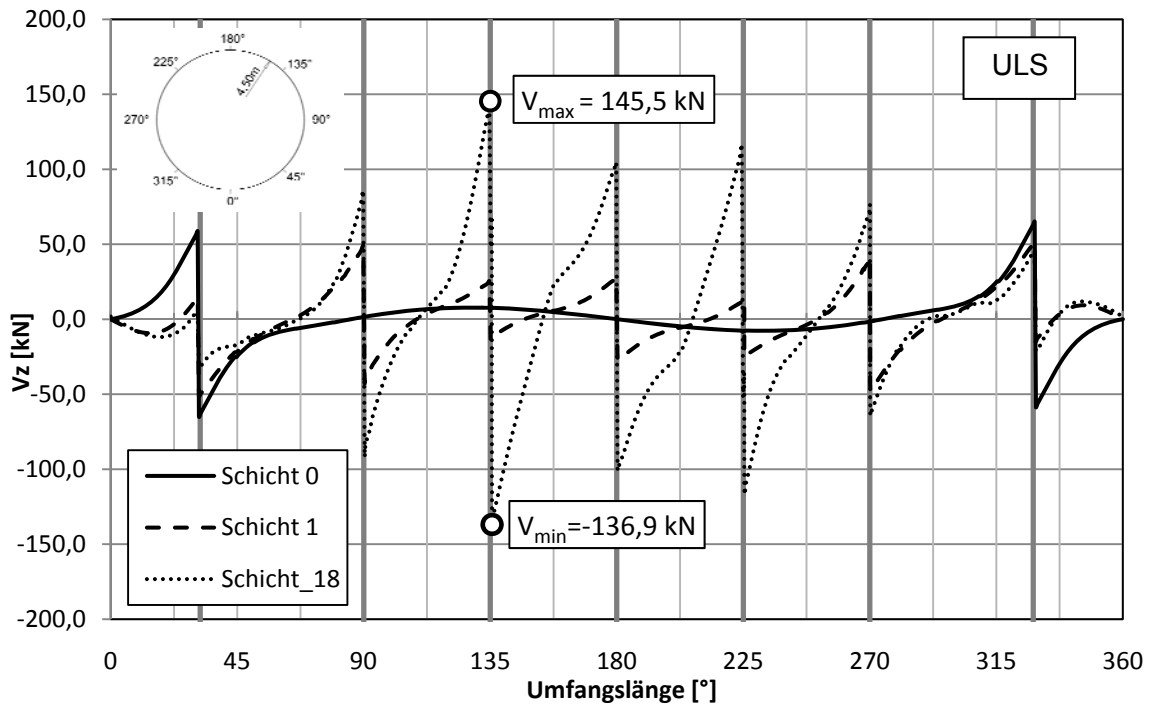


Abb. 52 Variante 5a: Beulring 2 / Gesamtquerkraft V_z [kN]

5.3.3 Biegemomente im Beulring-2

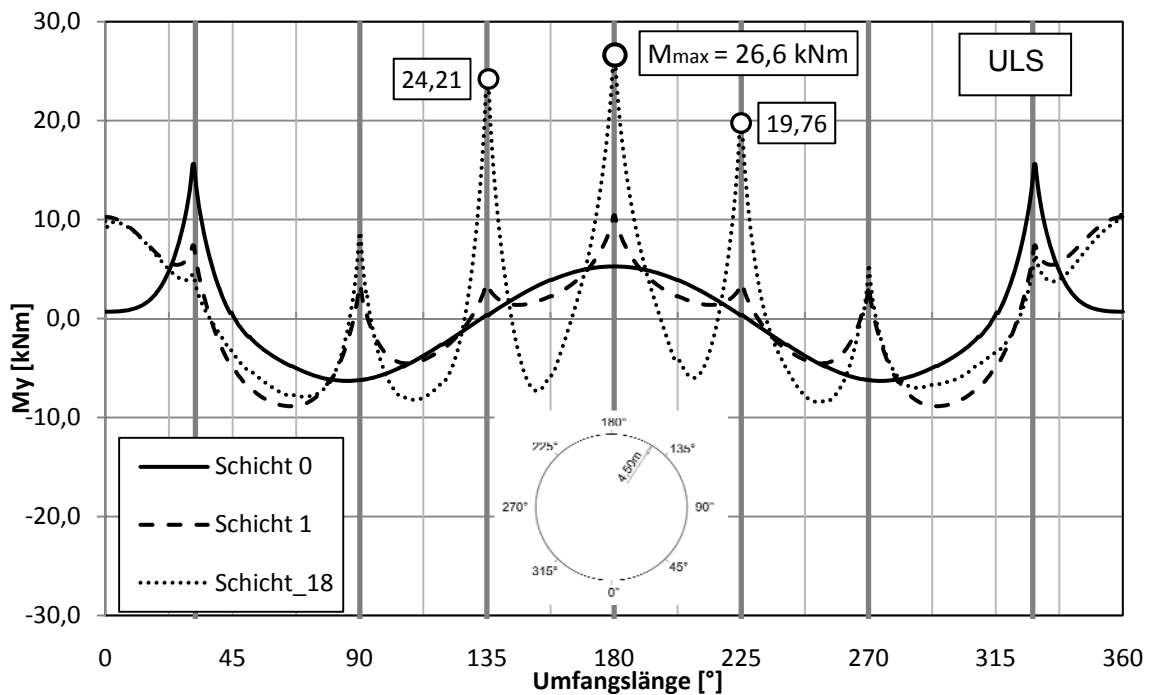


Abb. 53 Variante 5a: Beulring 2 / Gesamtmoment M_y [kNm]

5.4 Spannungsdiagramme

5.4.1 Spannungen im Beulring-2 außen-innen

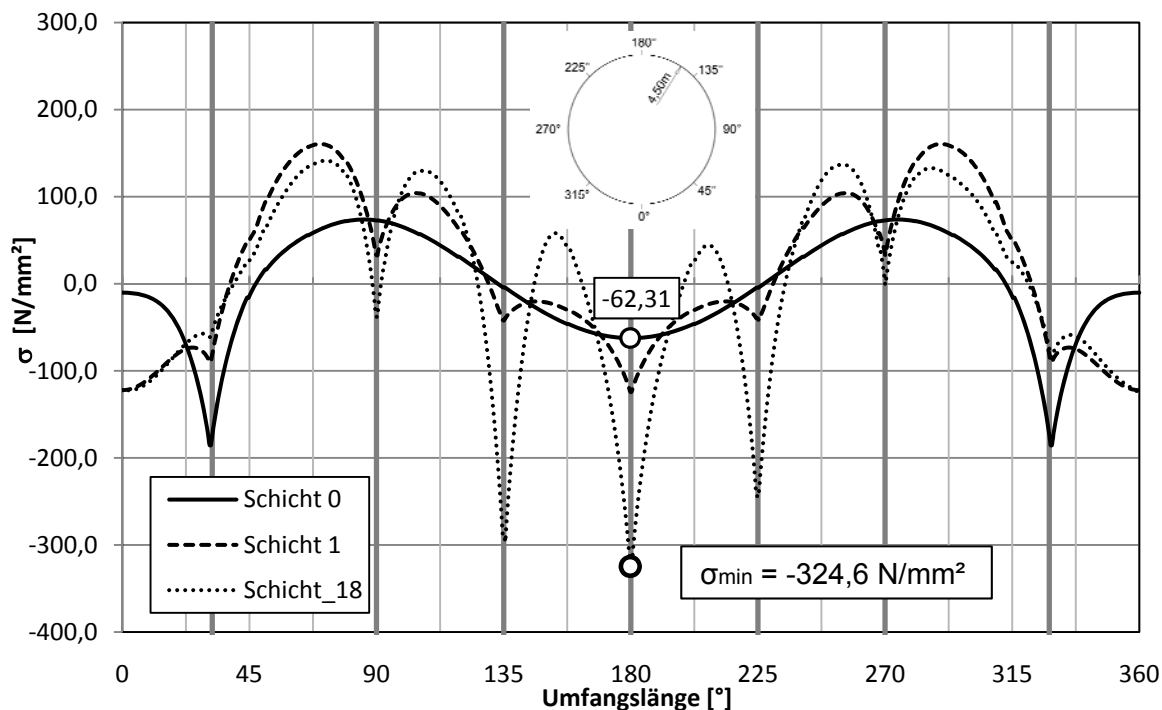


Abb. 54 Variante 5a: Beulring 2 / Spannungen außen σ [N/mm²]

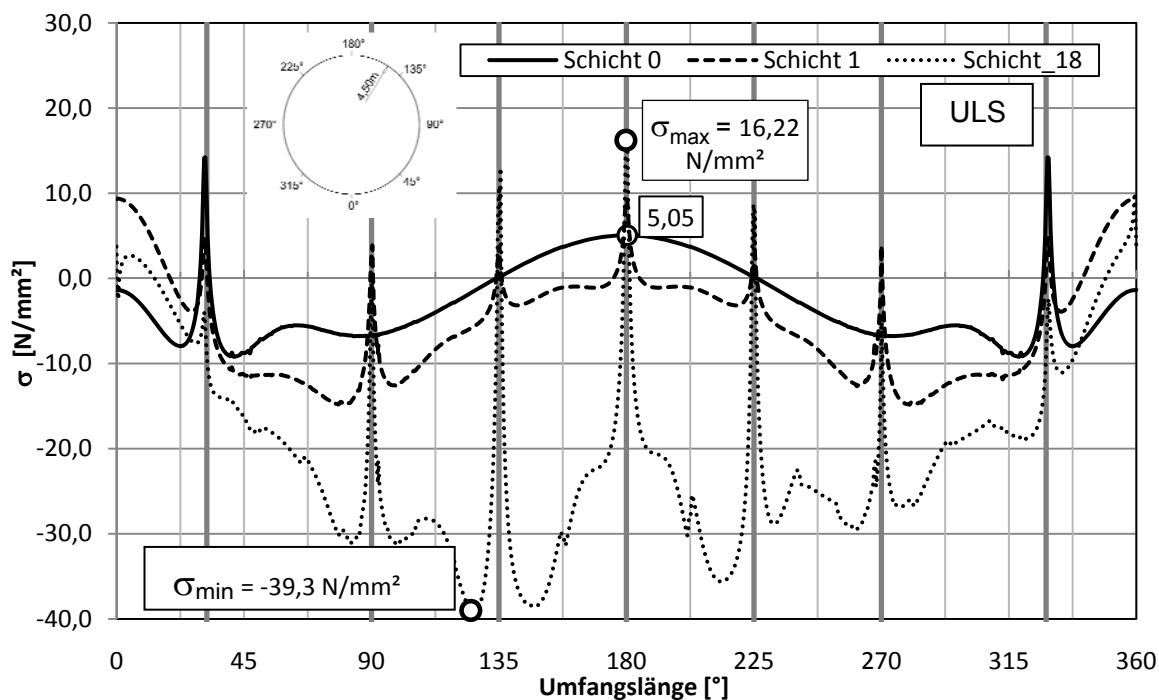


Abb. 55 Variante 5a: Beulring 2 / Spannungen innen σ [N/mm²]

5.4.2 Spannungen im Beulring-3 außen-innen

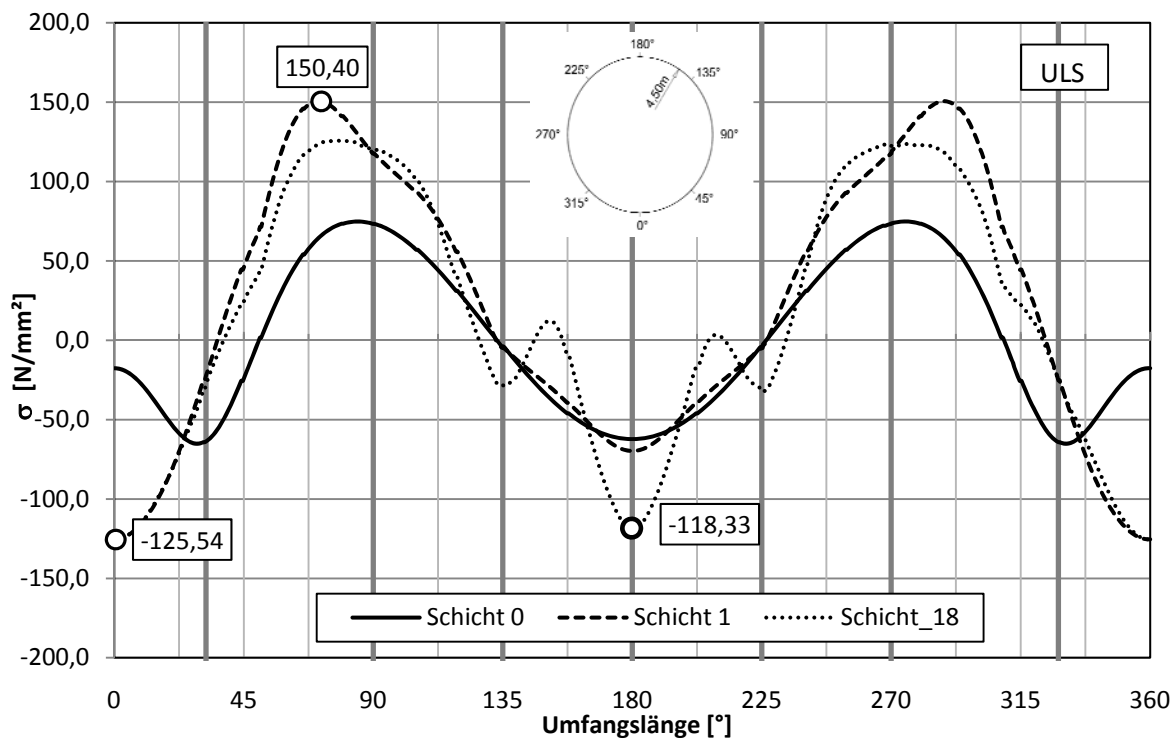


Abb. 56 Variante 5a: Beulring 3 / Spannungen außen σ [N/mm²]

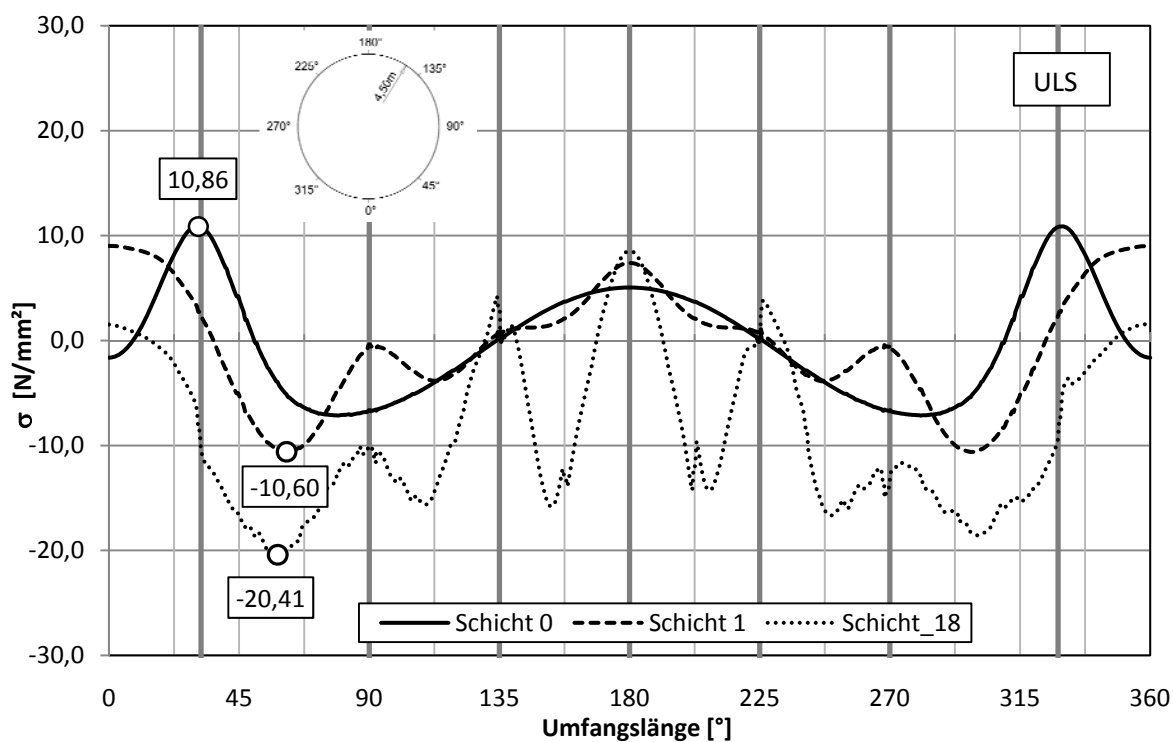


Abb. 57 Variante 5a: Beulring 3 / Spannungen innen σ [N/mm²]

5.4.3 Membranschnittkräfte n_x , n_y des Stahlrohres im Schnitt S1

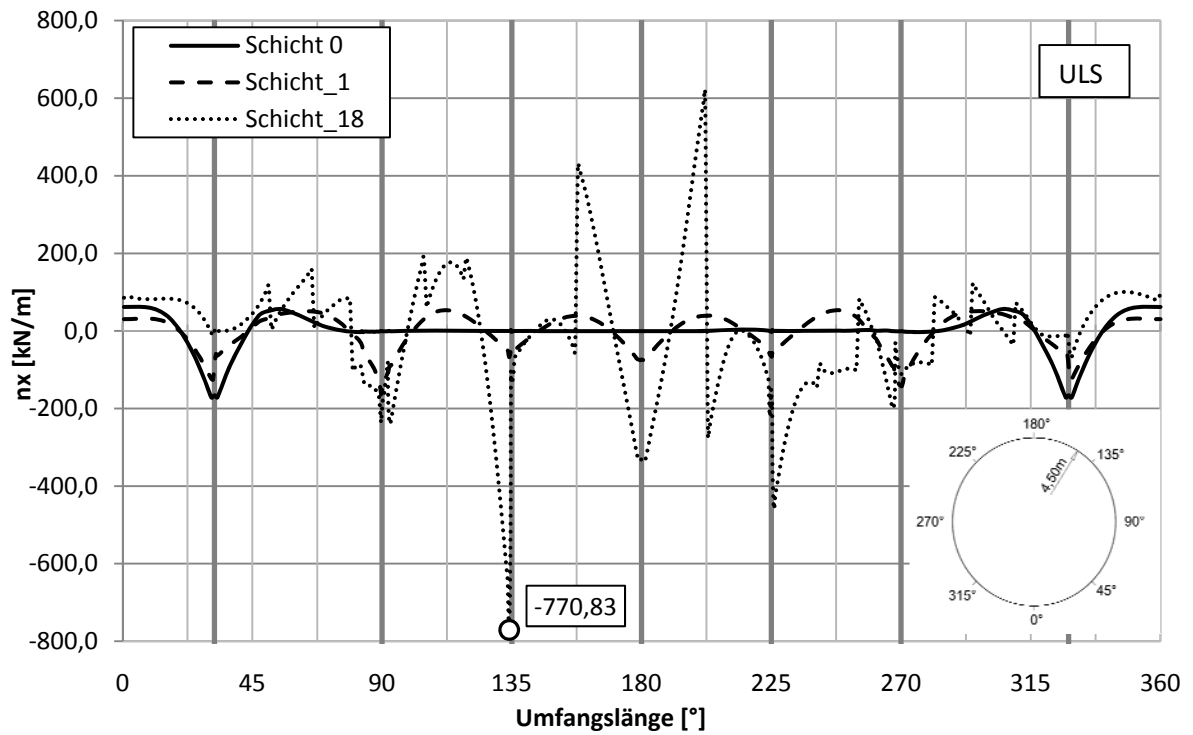


Abb. 58 Gesamtmembranschnittkräfte n_x [kN/m] / Schnitt S1

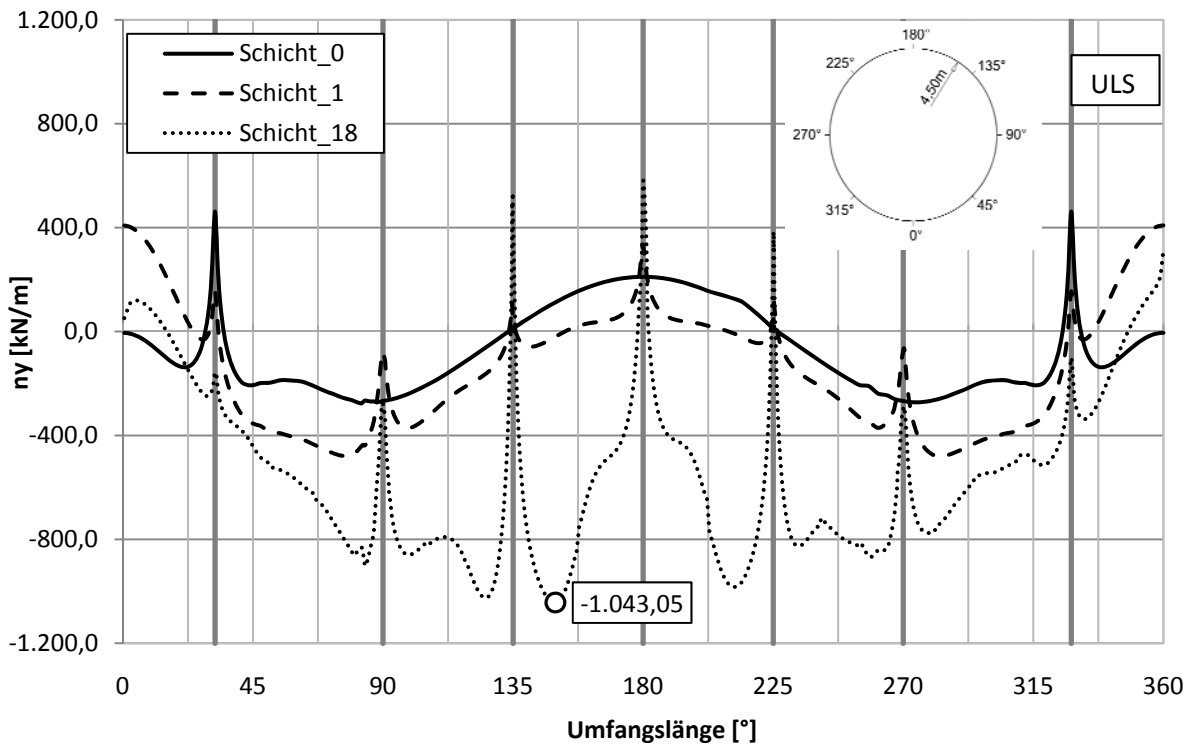


Abb. 59 Gesamtmembranschnittkräfte n_y [kN/m] / Schnitt S1

5.4.4 Spannungen im Rohr Schnitt S1

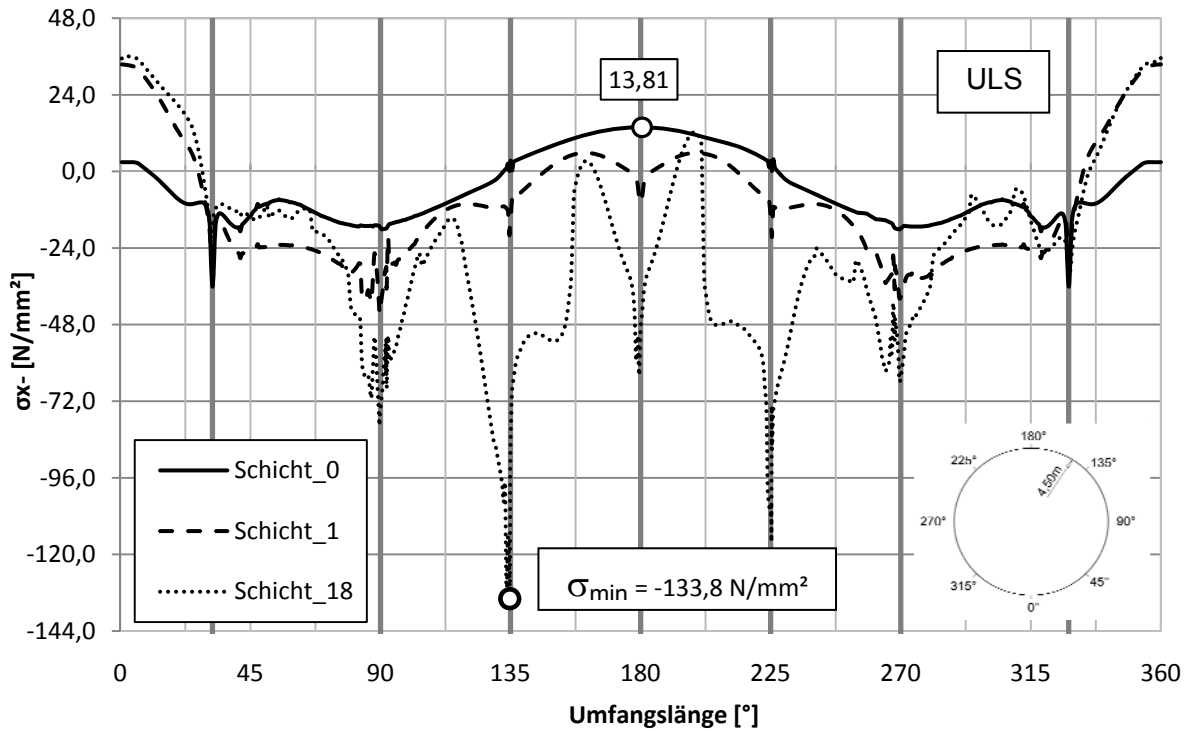


Abb. 60 Variante 5a: Rohr / S1 / Längsspannung/außen σ_{x-} [N/mm²]

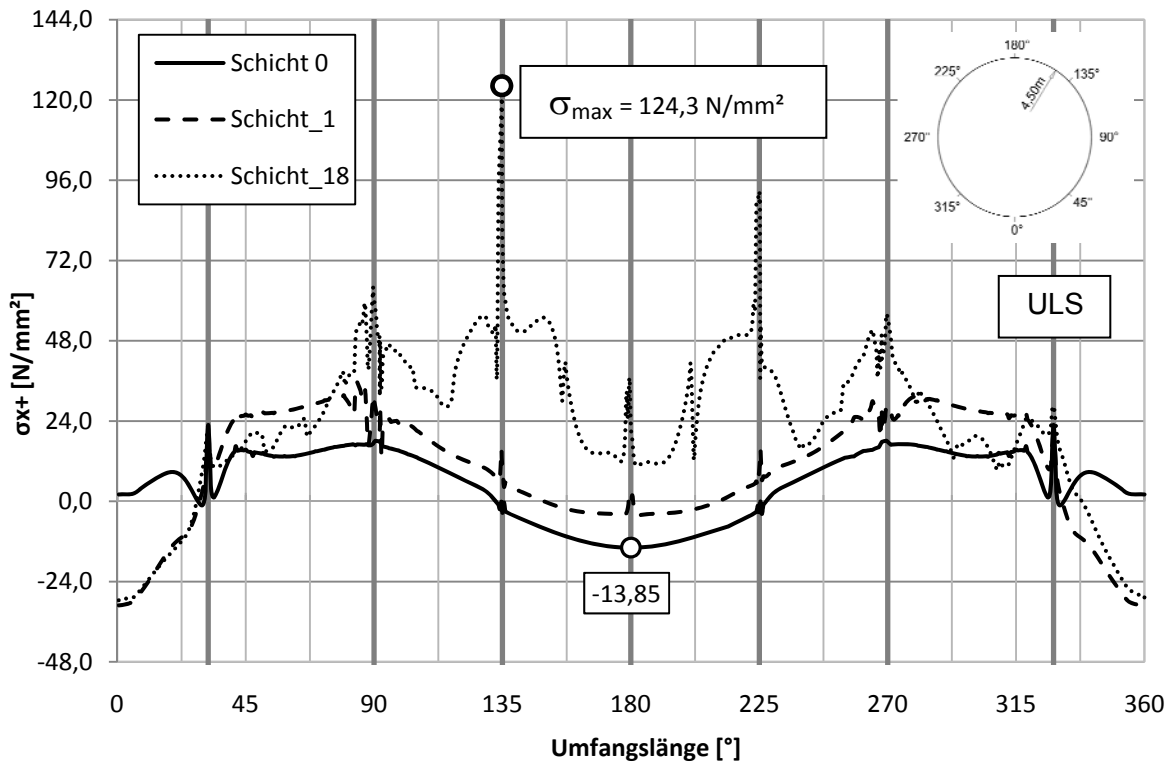


Abb. 61 Variante 5a: Rohr / S1 / Längsspannung/innen σ_{x+} [N/mm²]

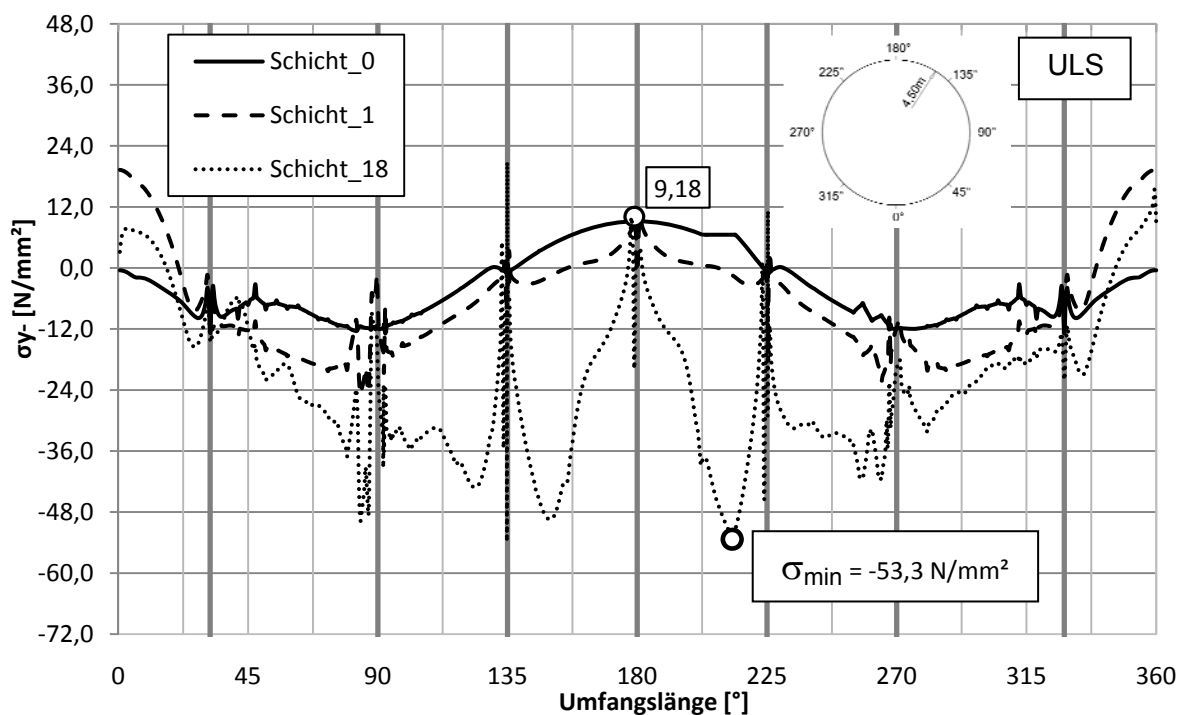


Abb. 62 Variante 5a: Rohr / S1 / Umfangsspannung/außen σ_y^- [N/mm²]

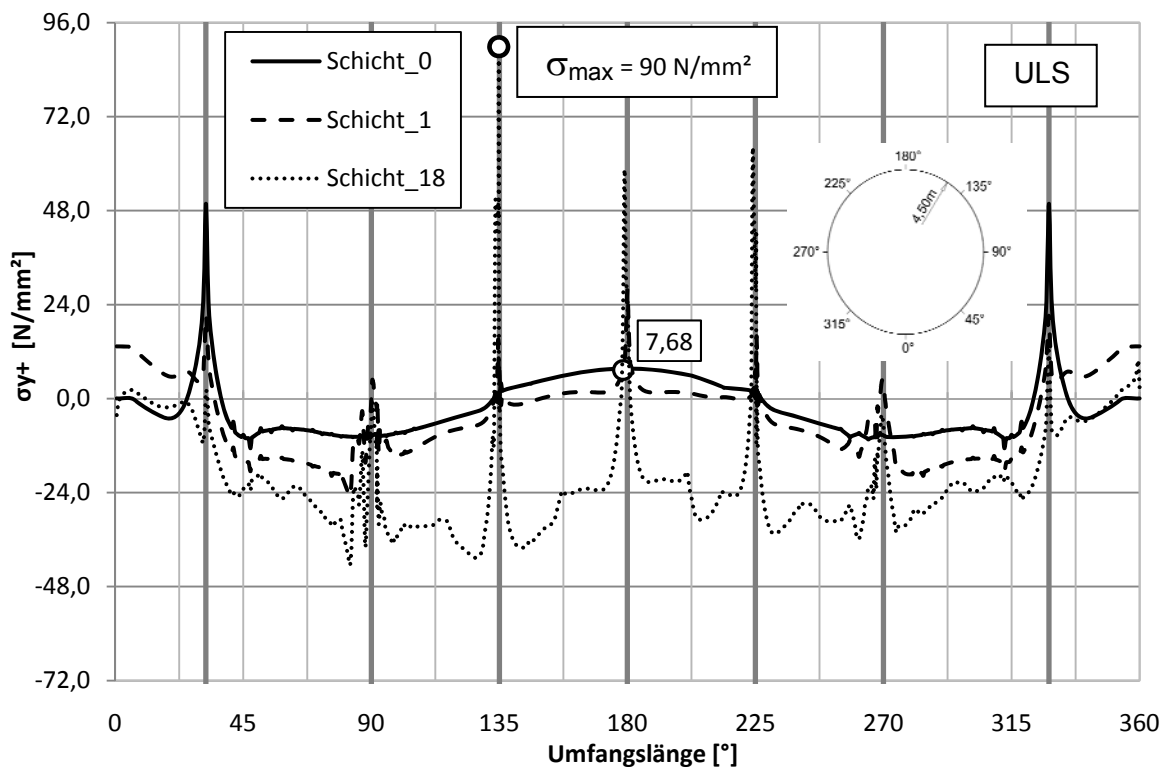


Abb. 63 Variante 5a: Rohr / S1 / Umfangsspannung / innen σ_{y+} [N/mm²]

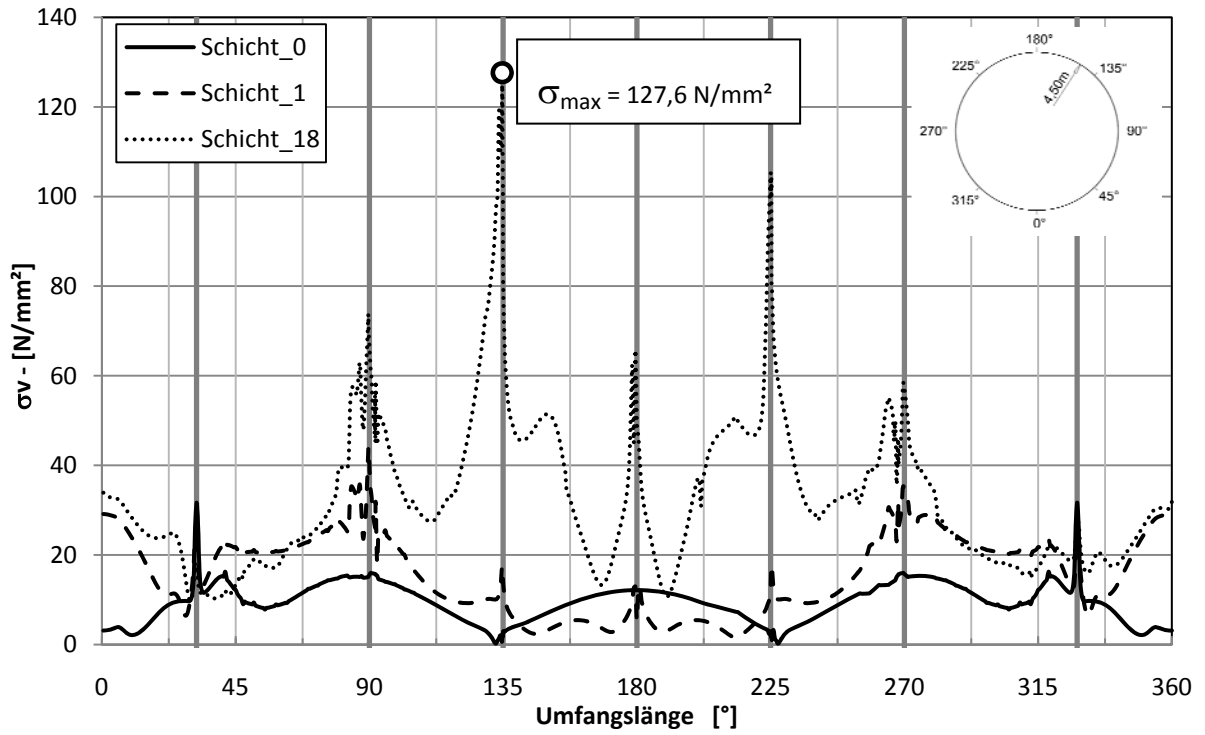


Abb. 64 Variante 5a: Rohr/S1/Vergleichsspannung/außen σ_v- [N/mm²]

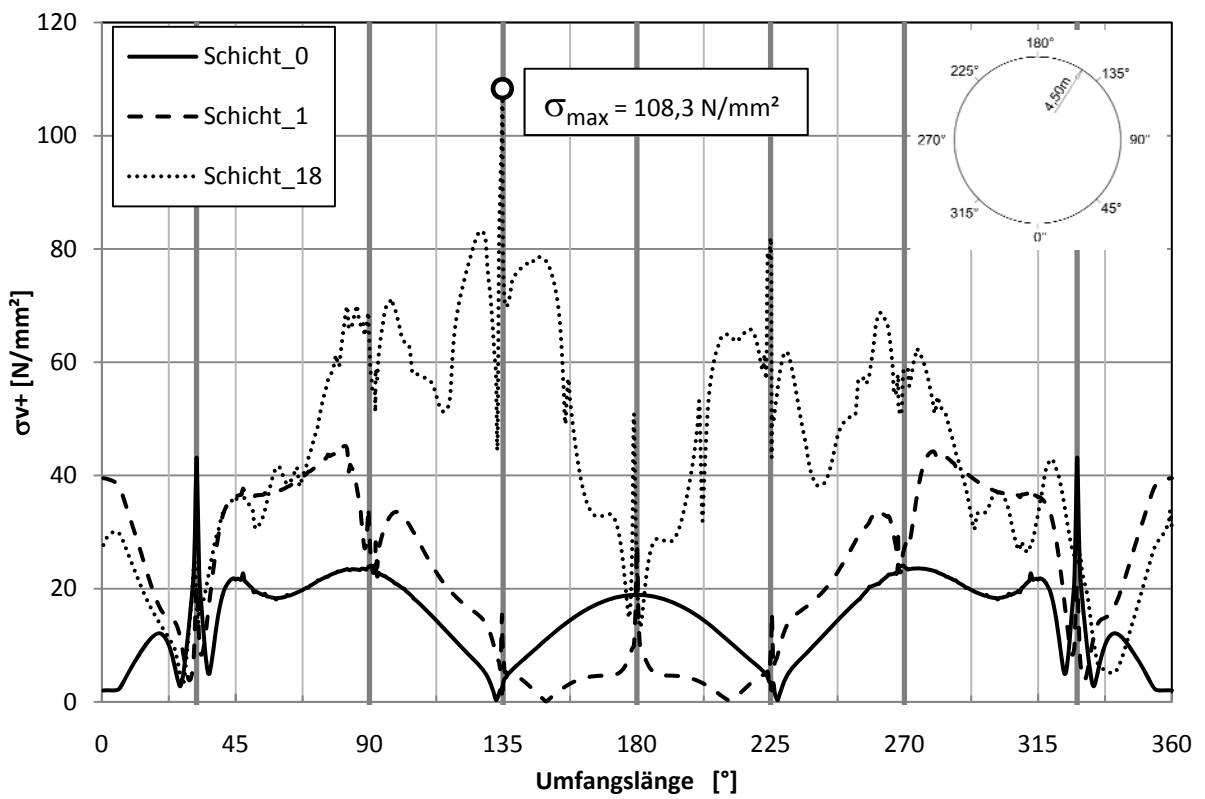


Abb. 65 Variante 5a: Rohr/S1/Vergleichsspannung/innen σ_v+ [N/mm²]

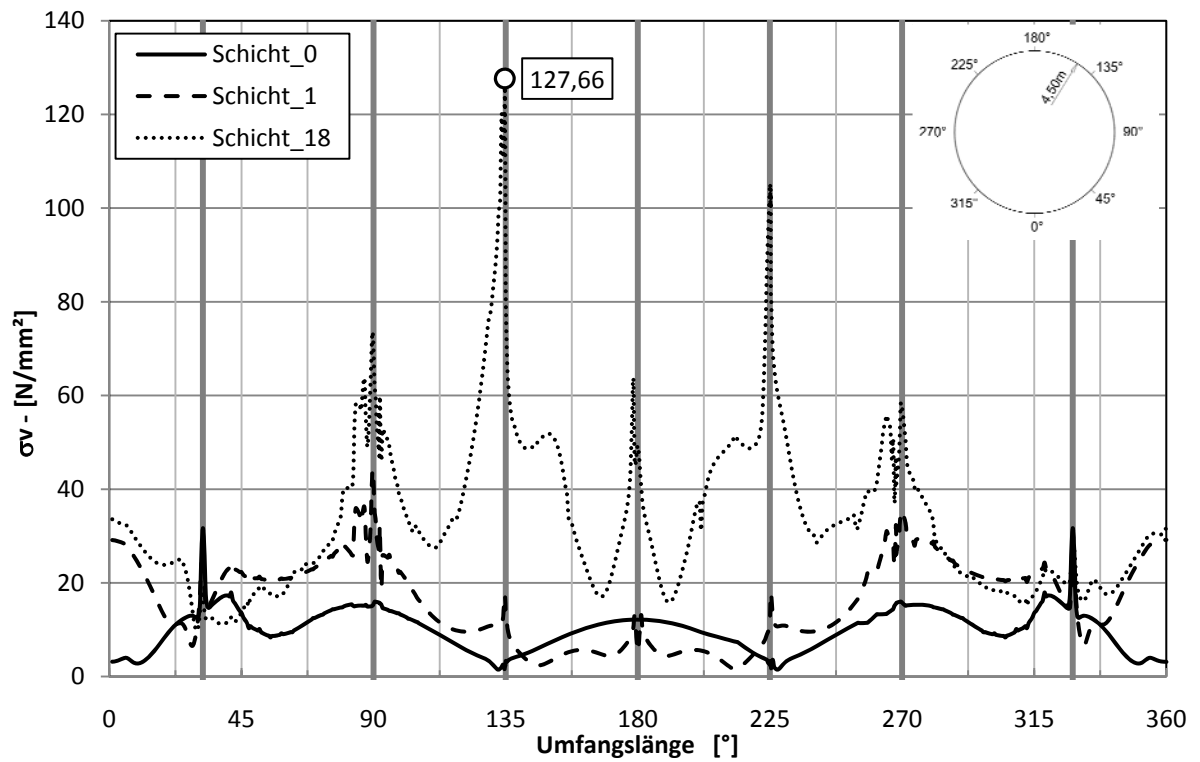


Abb. 66 Variante 5a: Rohr/ S1a / Vergleichsspannung mit Schubspannungswirkung /außen σ_v^- [N/mm^2]

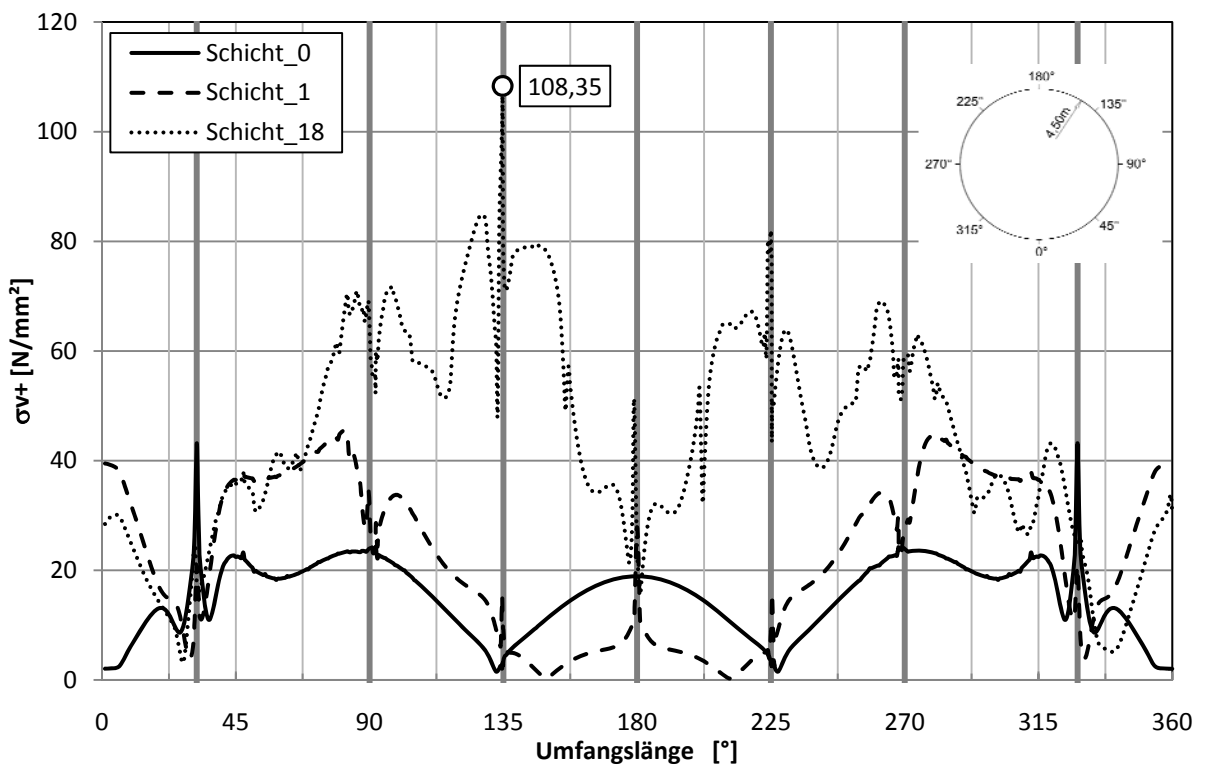


Abb. 67 Variante 5a: Rohr/ S1a / Vergleichsspannung mit Schubspannungswirkung /innen σ_v^+ [N/mm^2]

5.4.5 Spannungen im Rohr Schnitt S2

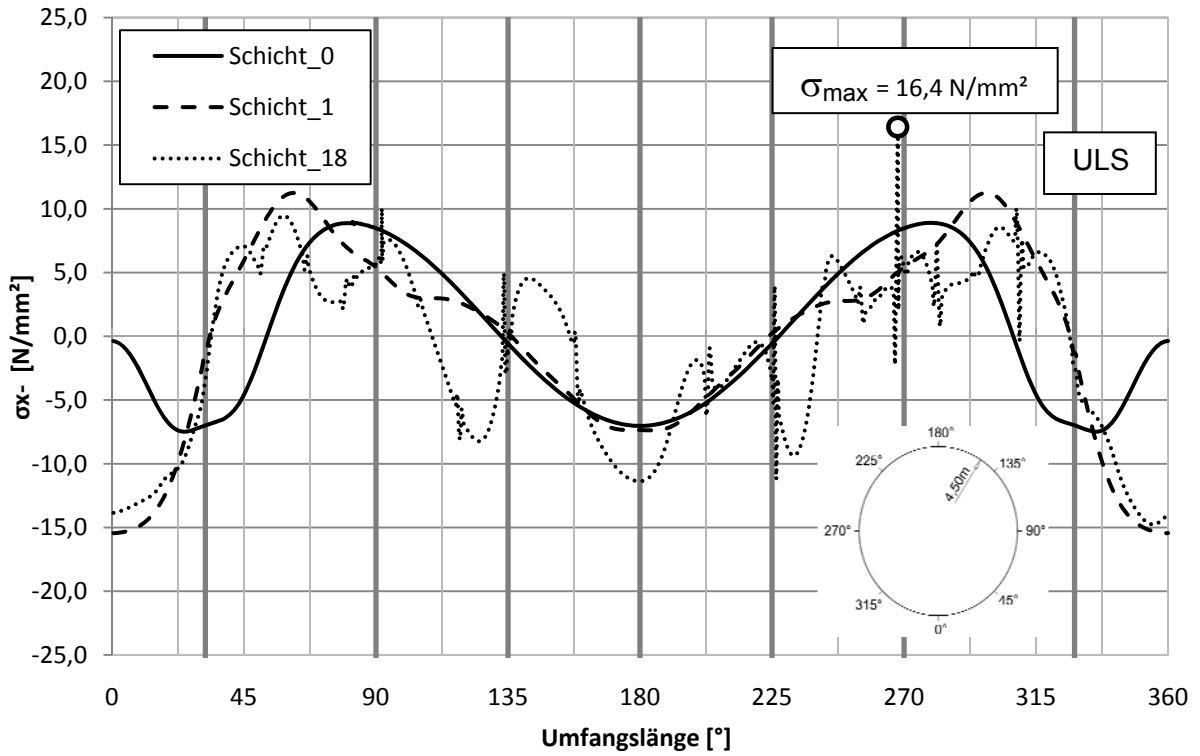


Abb. 68 Variante 5a: Rohr / S2 / Längsspannung/außen σ_{x-} [N/mm^2]

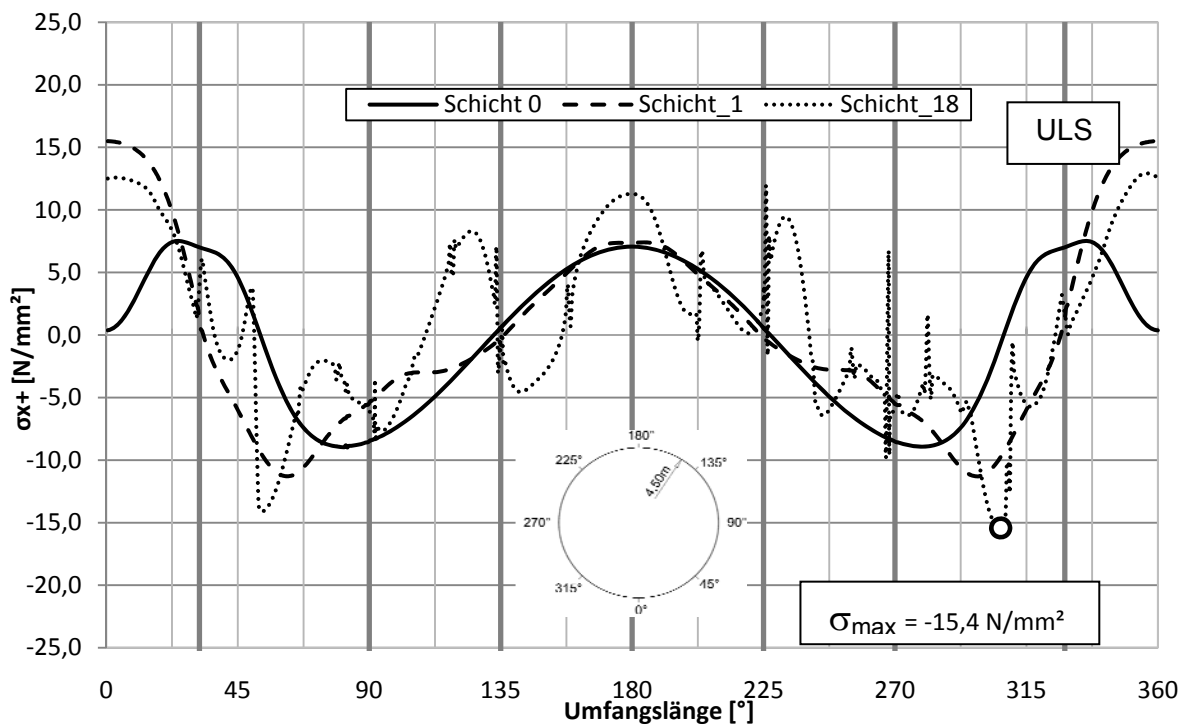


Abb. 69 Variante 5a: Rohr / S2 / Längsspannung/innen σ_{x+} [N/mm^2]

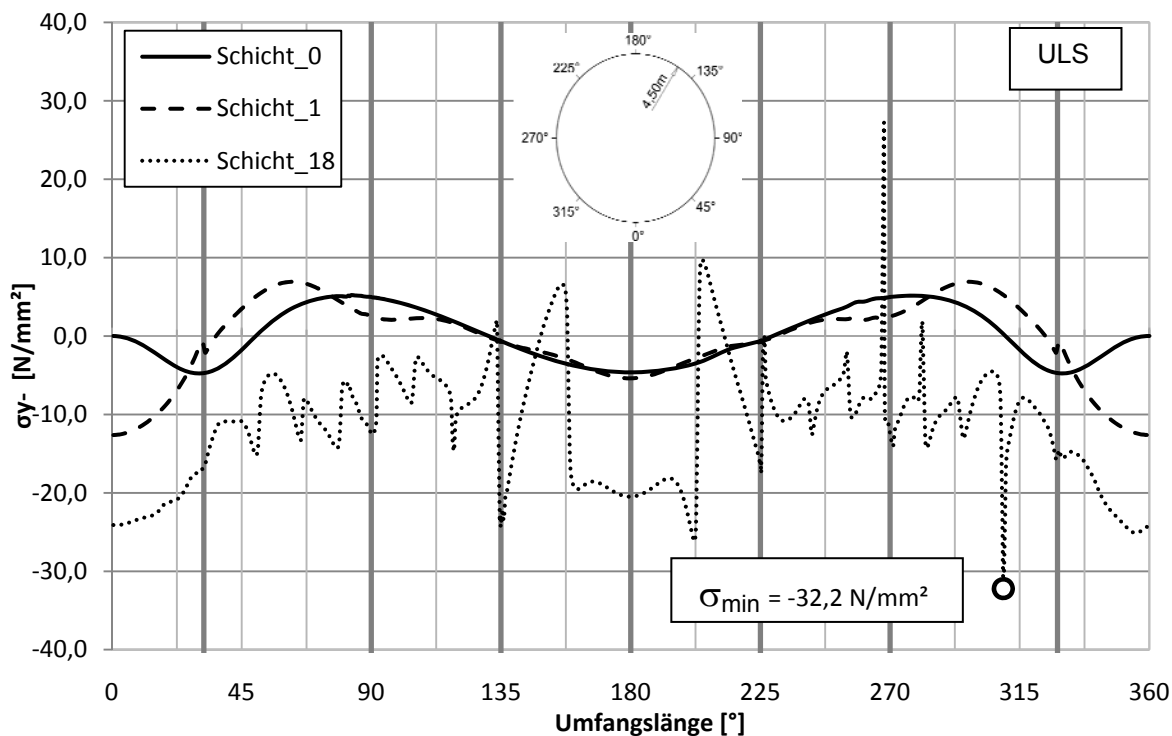


Abb. 70 Variante 5a: Rohr / S2 / Umfangsspannung/außen σ_{y-} [N/mm²]

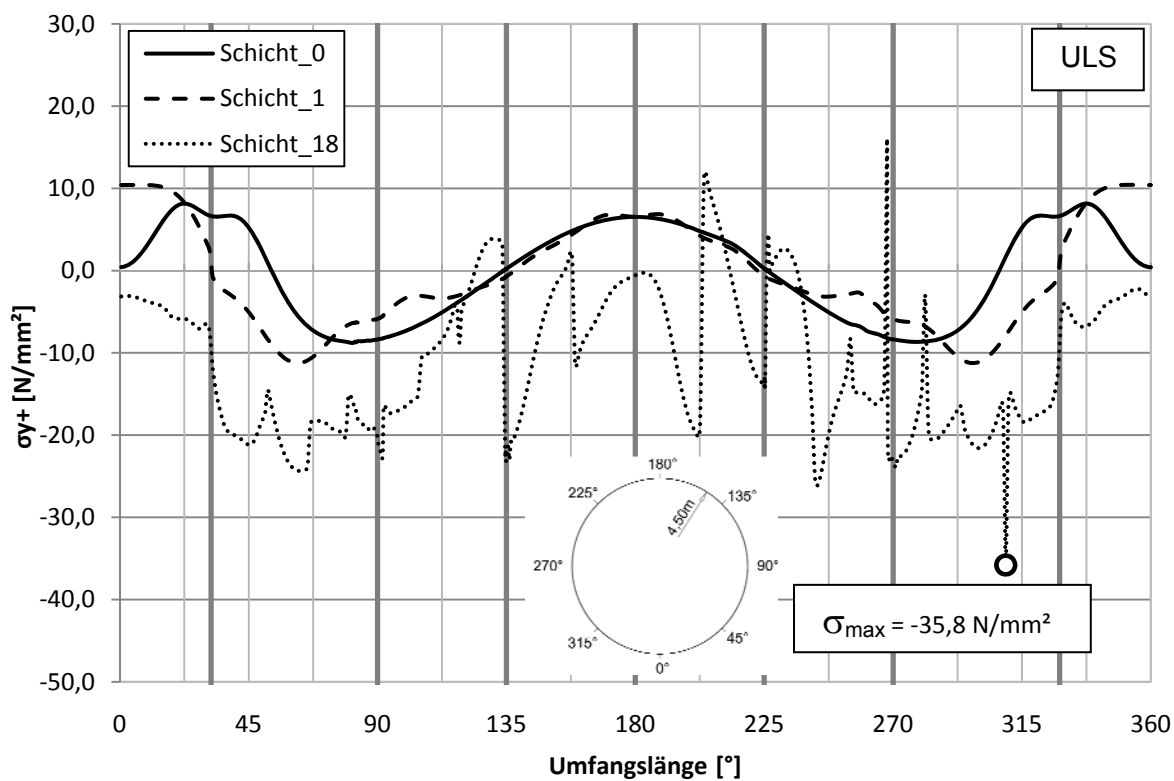


Abb. 71 Variante 5a: Rohr / S2 / Umfangsspannung / innen σ_{y+} [N/mm²]

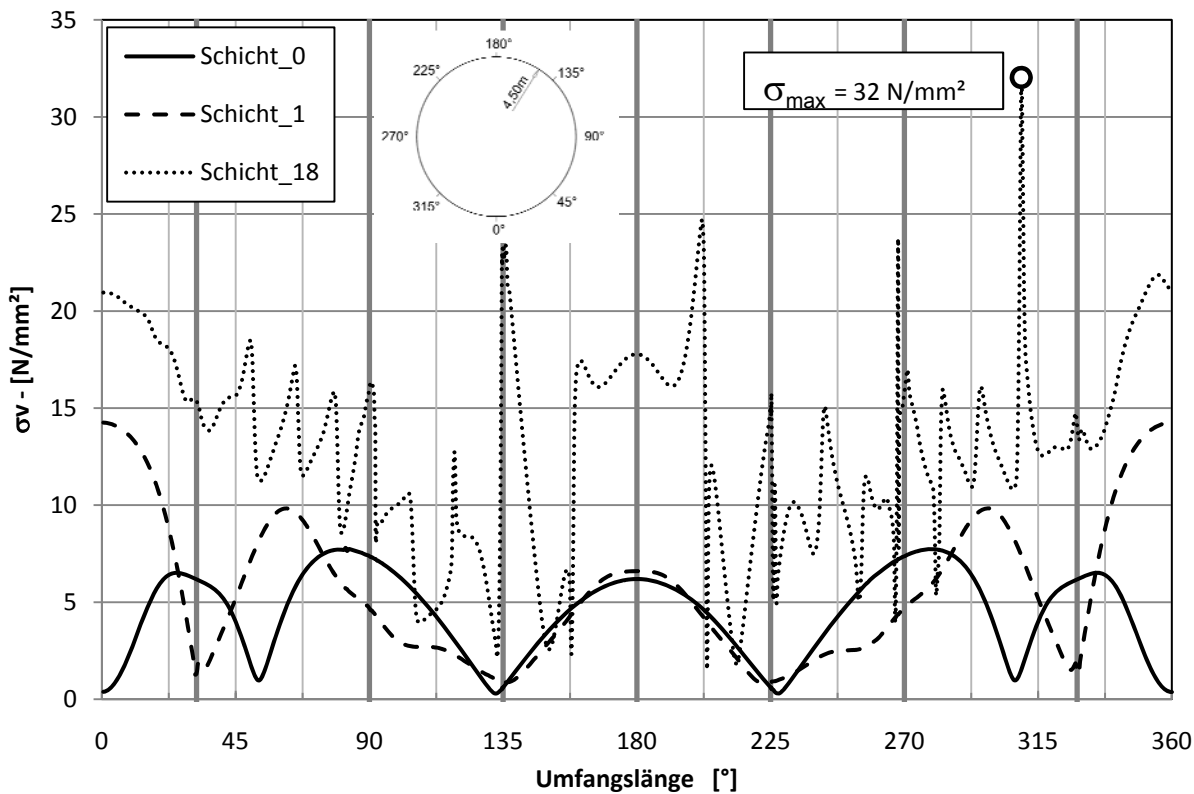


Abb. 72 Variante 5a: Rohr/S2/Vergleichsspannung/außen σ_v- [N/mm²]

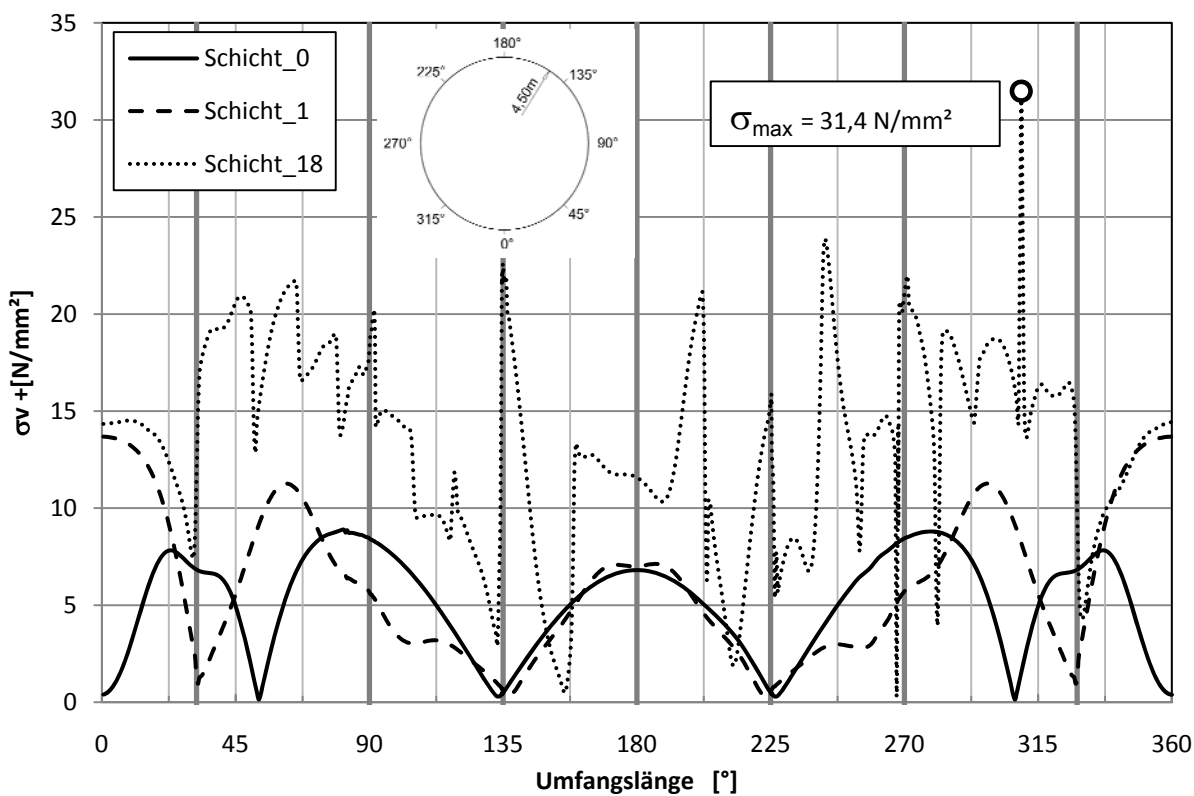


Abb. 73 Variante 5a: Rohr/S2/Vergleichsspannung/innen σ_v+ [N/mm²]

5.5 Schnittkräfte im Stahlrohr Konturplot

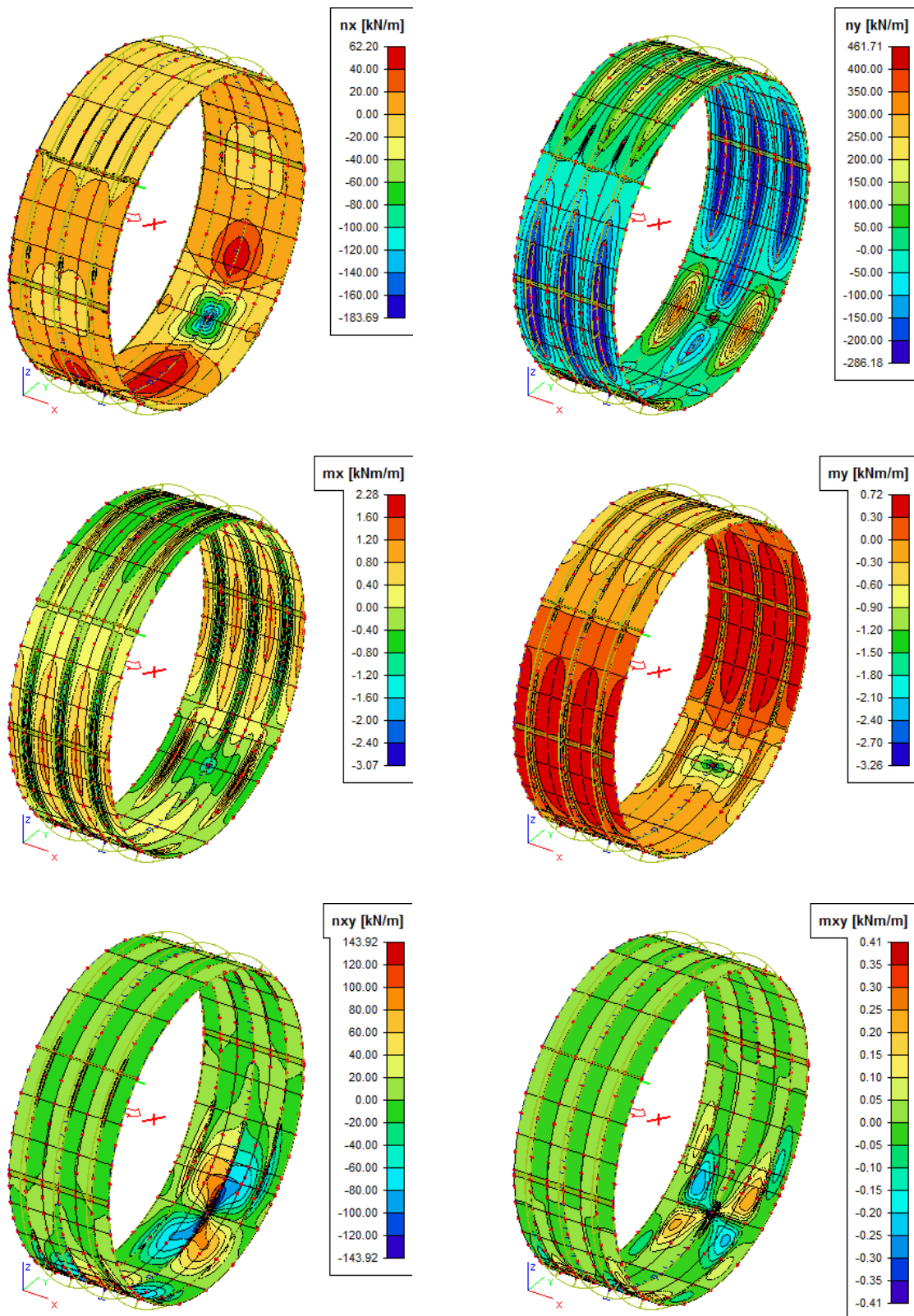


Abb. 74 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_0

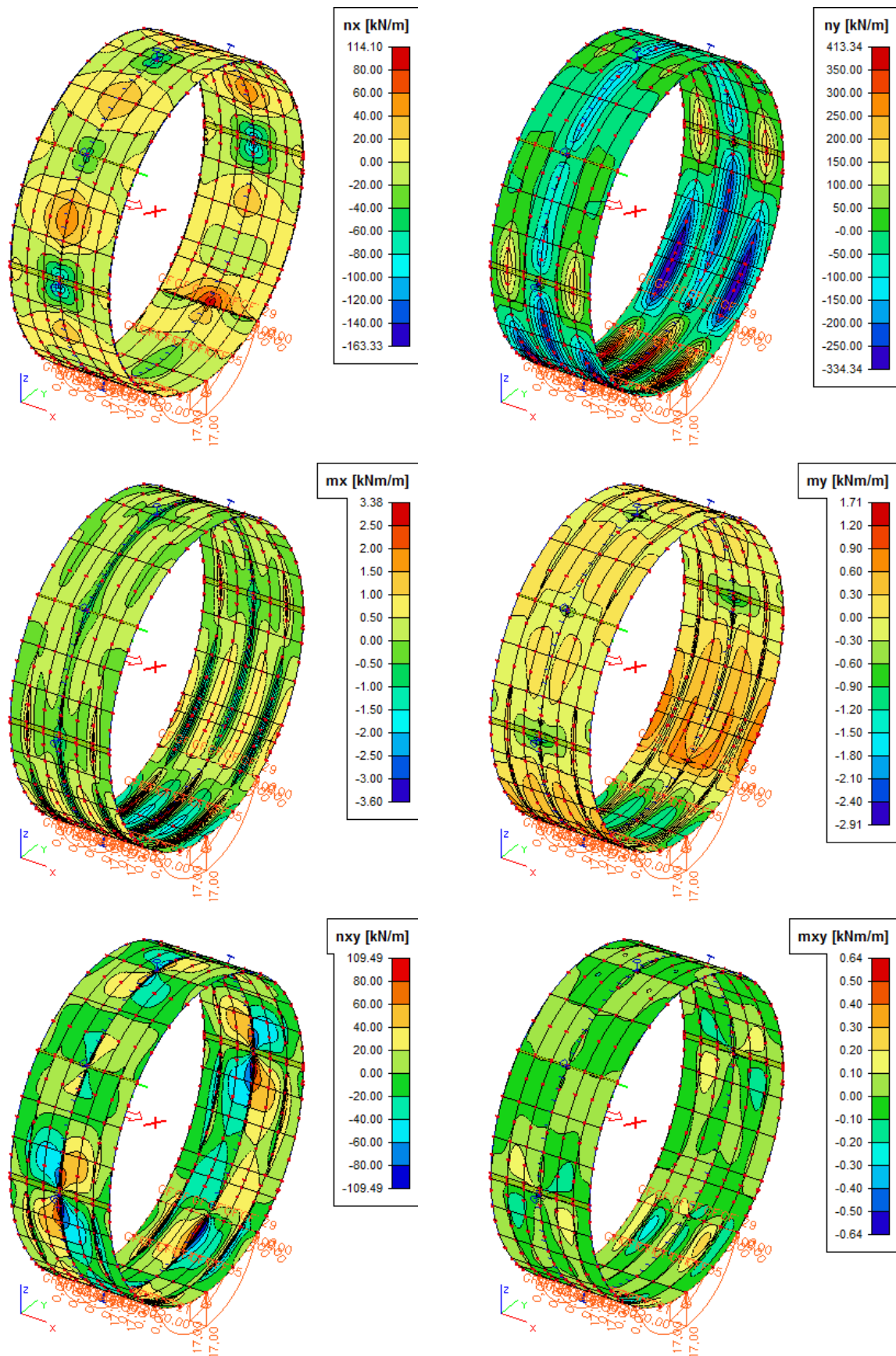


Abb. 75 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_1

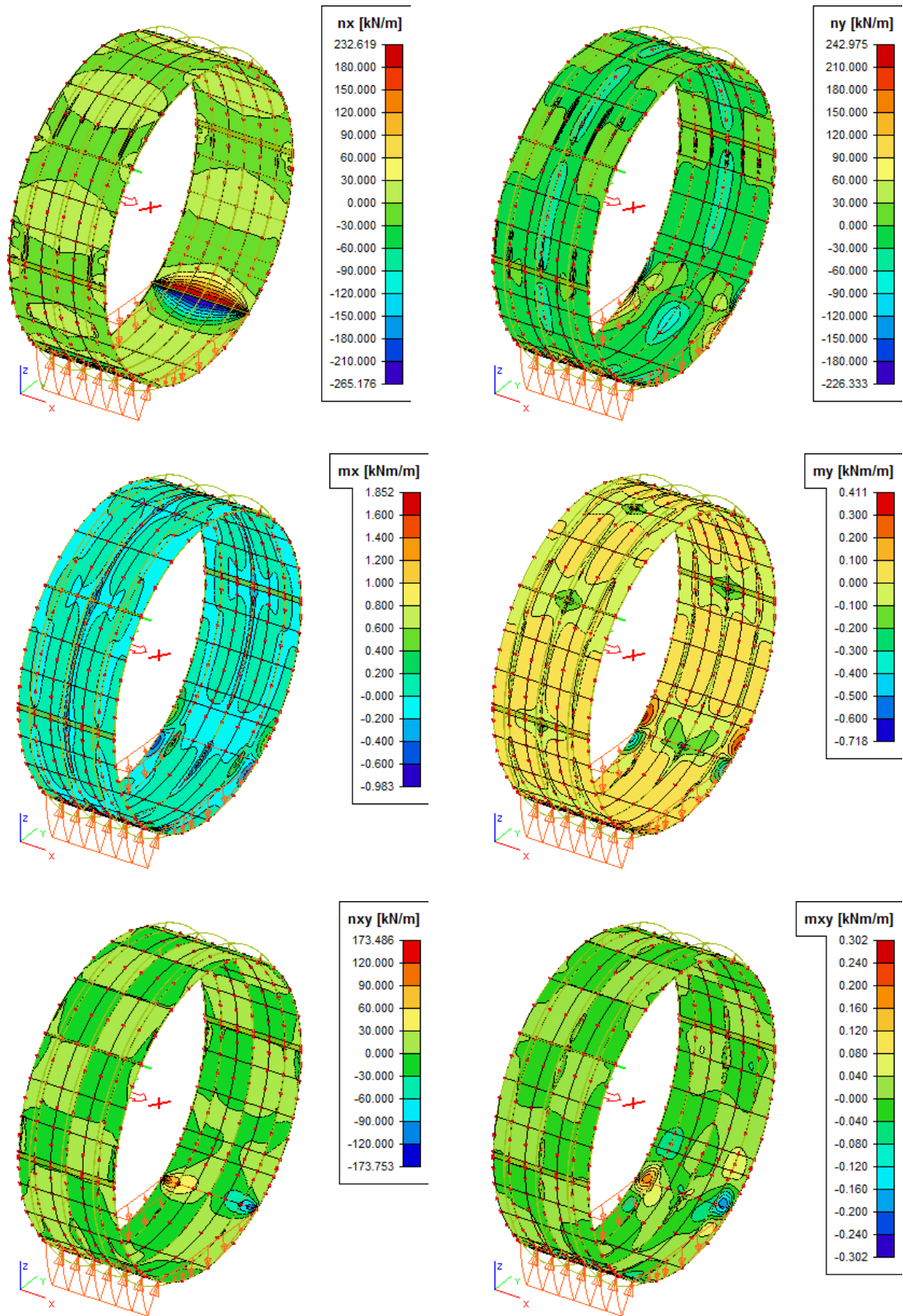


Abb. 76 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_2

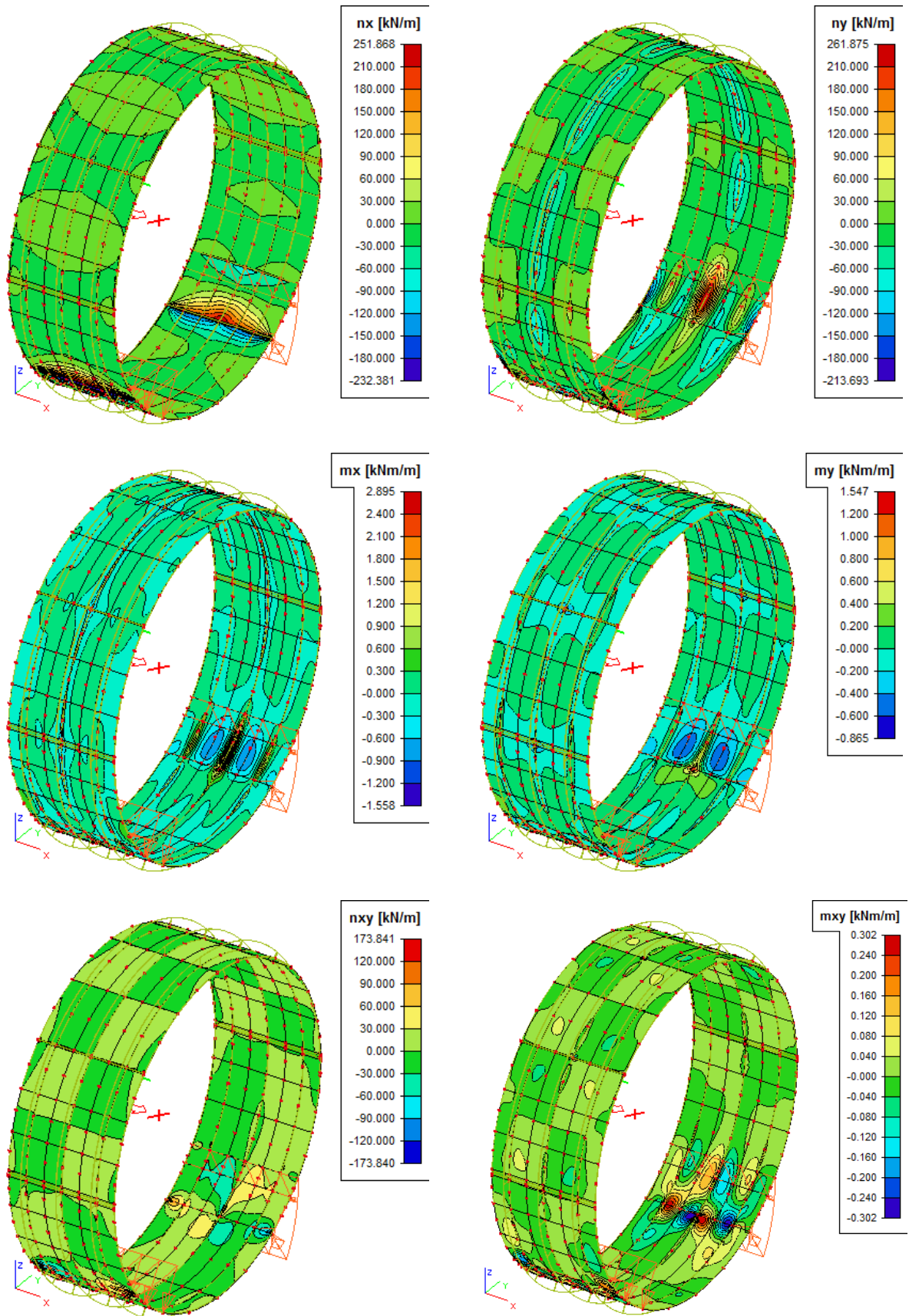


Abb. 77 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_3

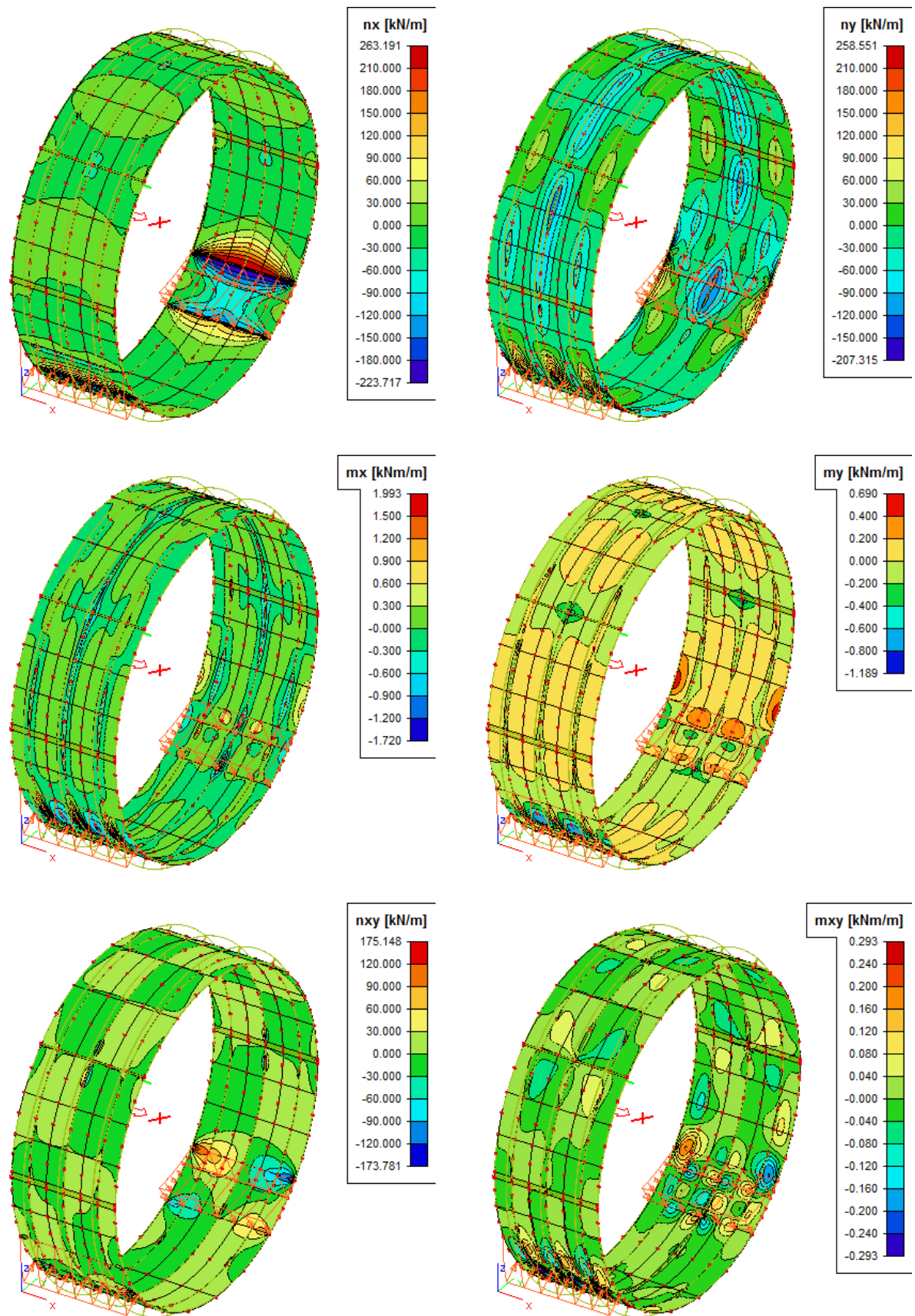


Abb. 78 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_4

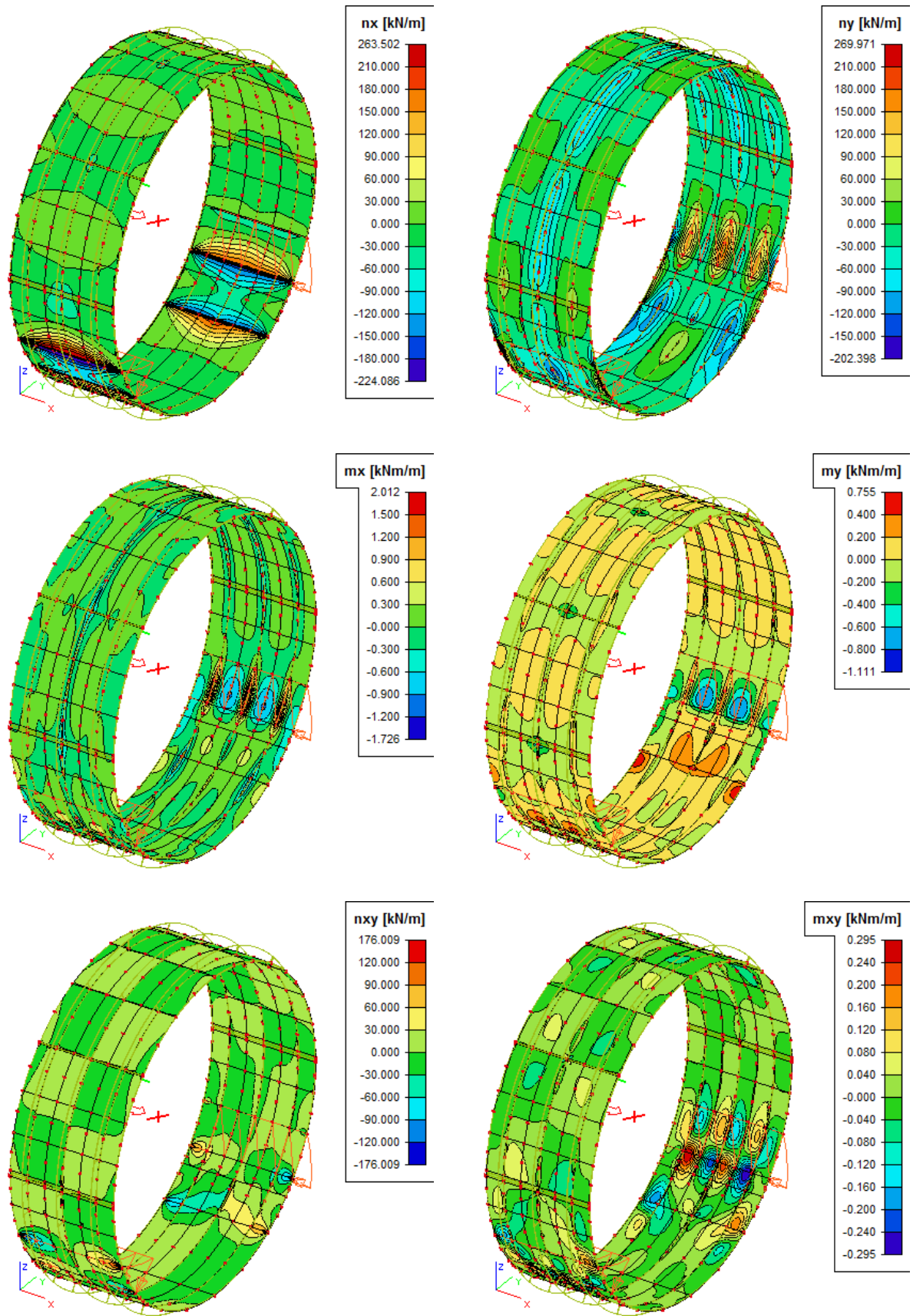


Abb. 79 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_5

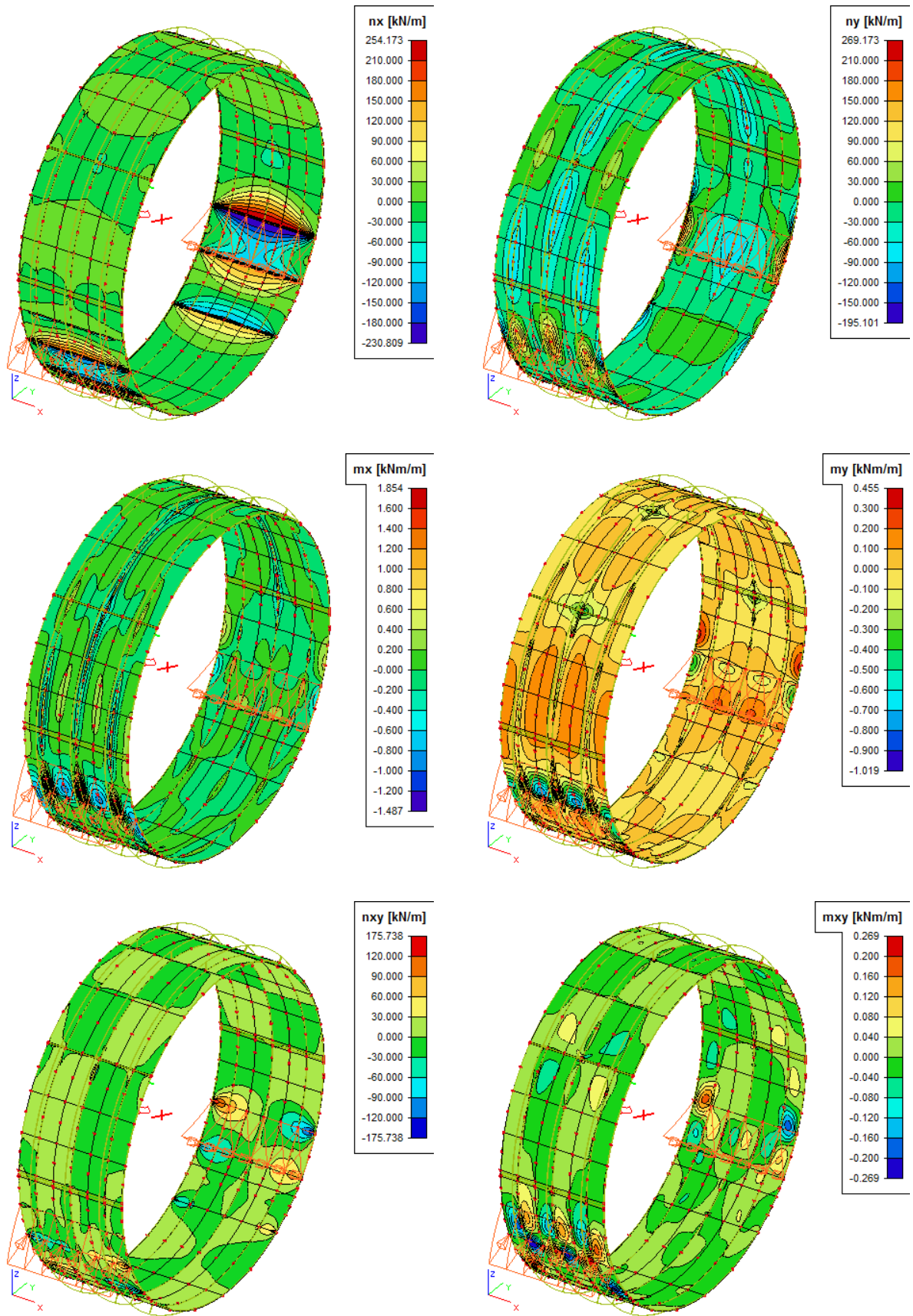


Abb. 80 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_6

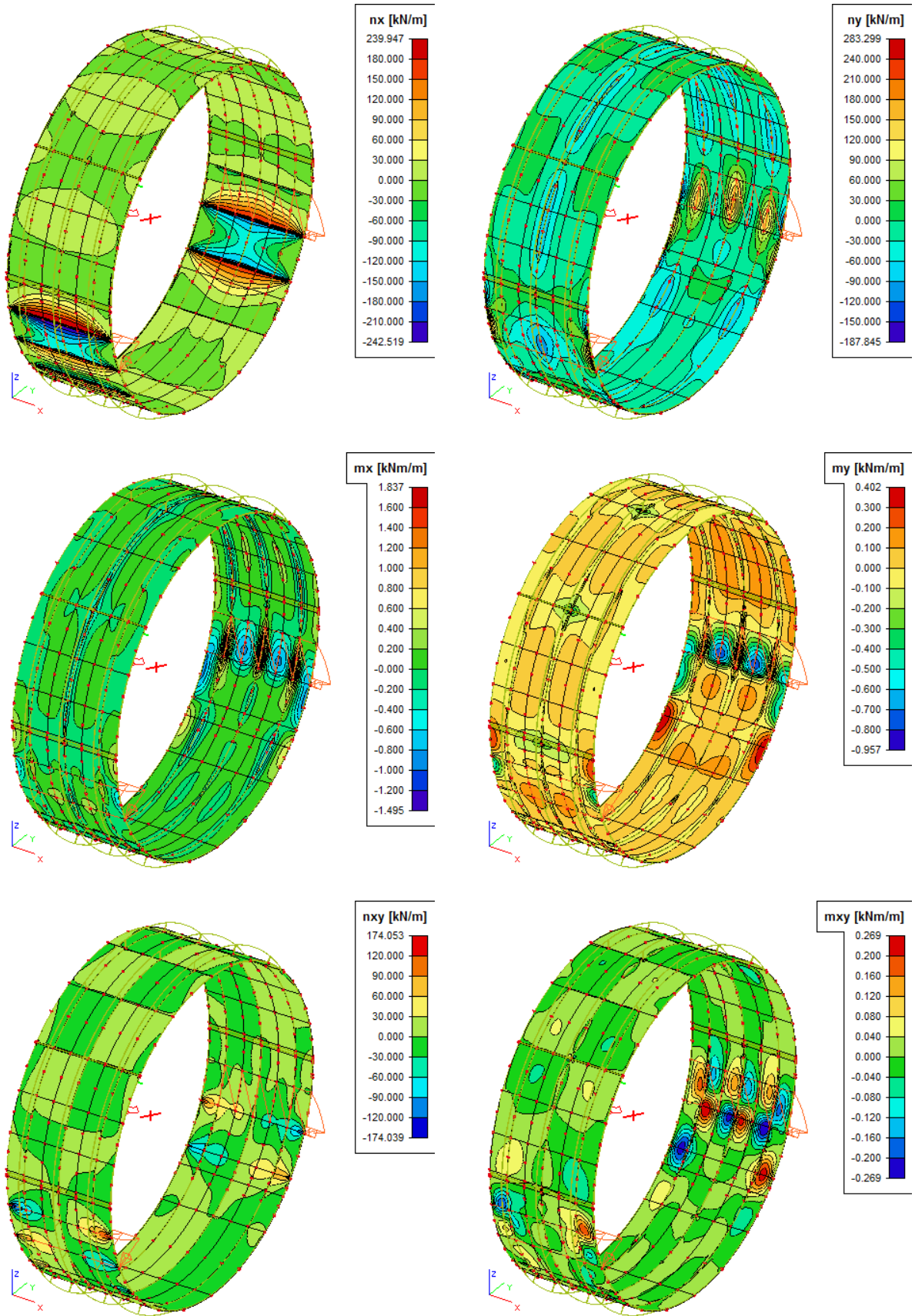


Abb. 81 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_7

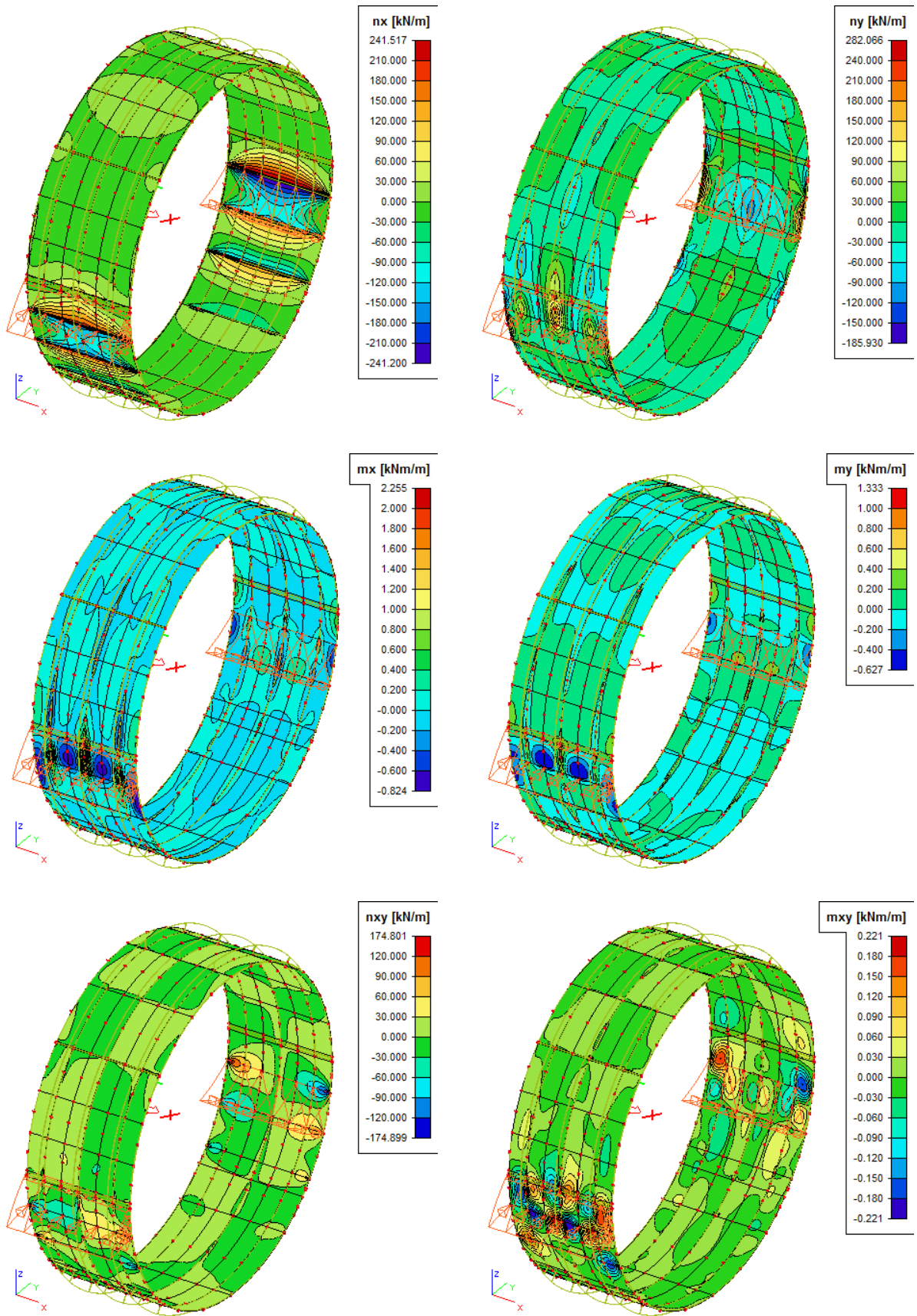


Abb. 82 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_8

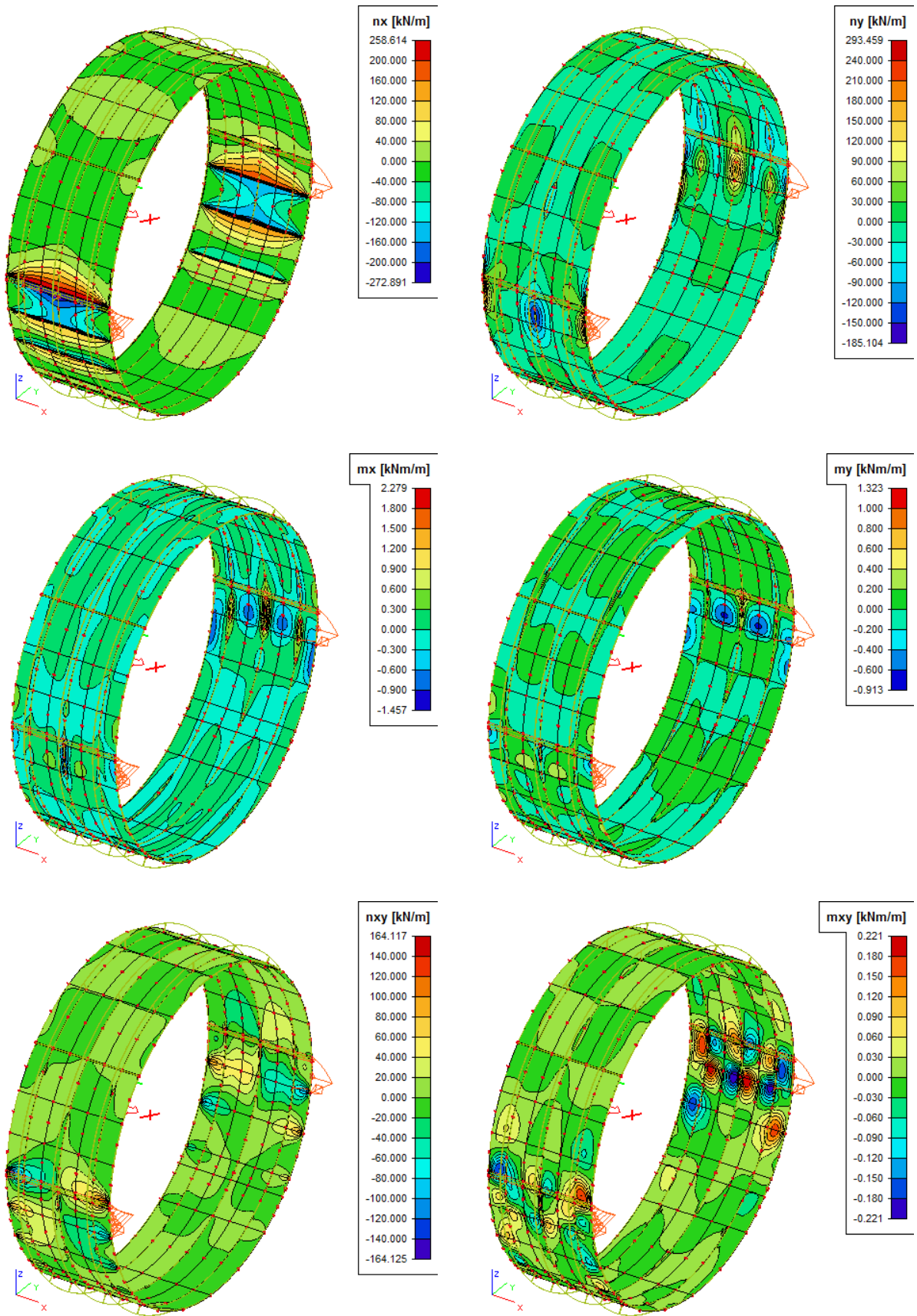


Abb. 83 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_9

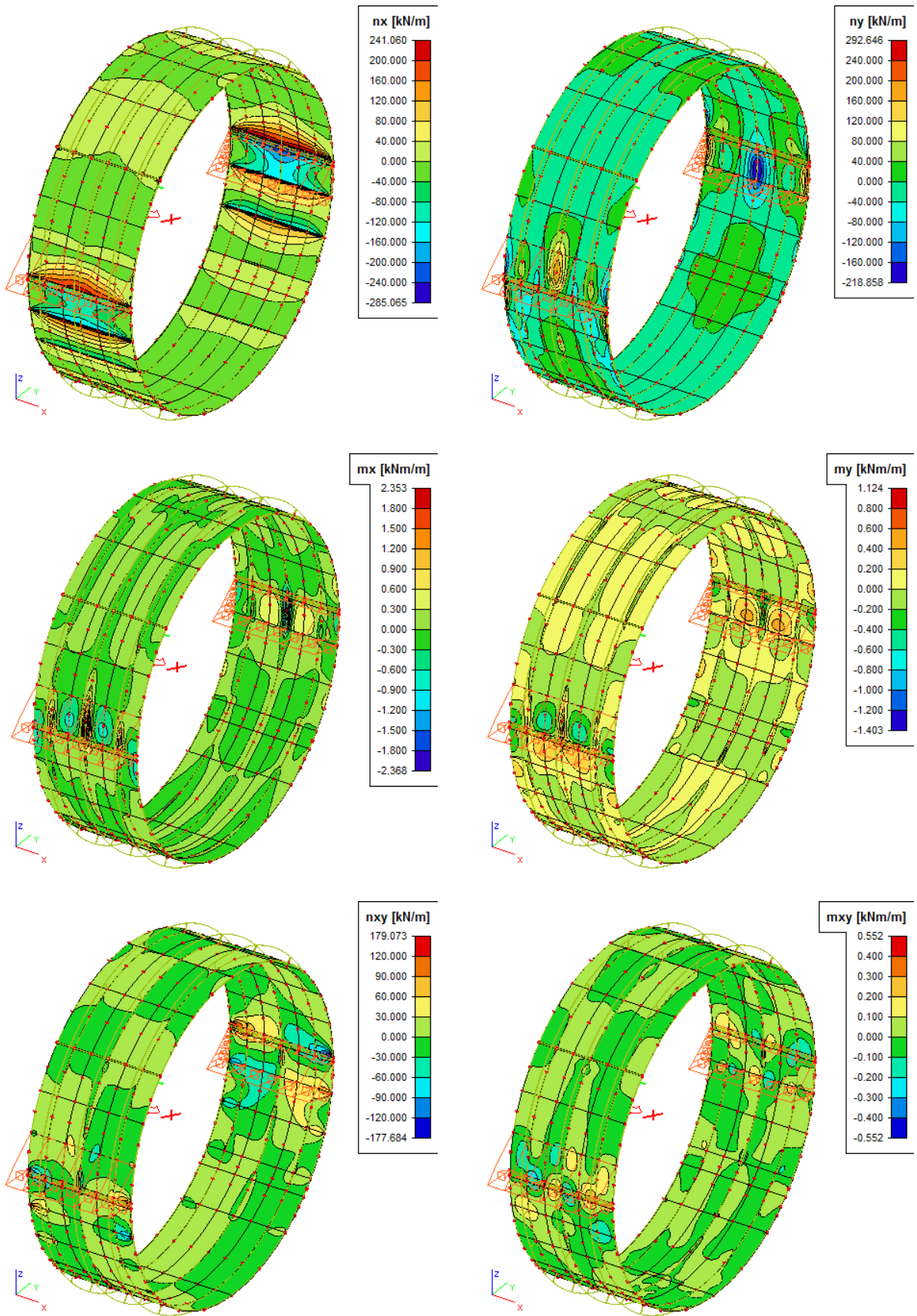


Abb. 84 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_10

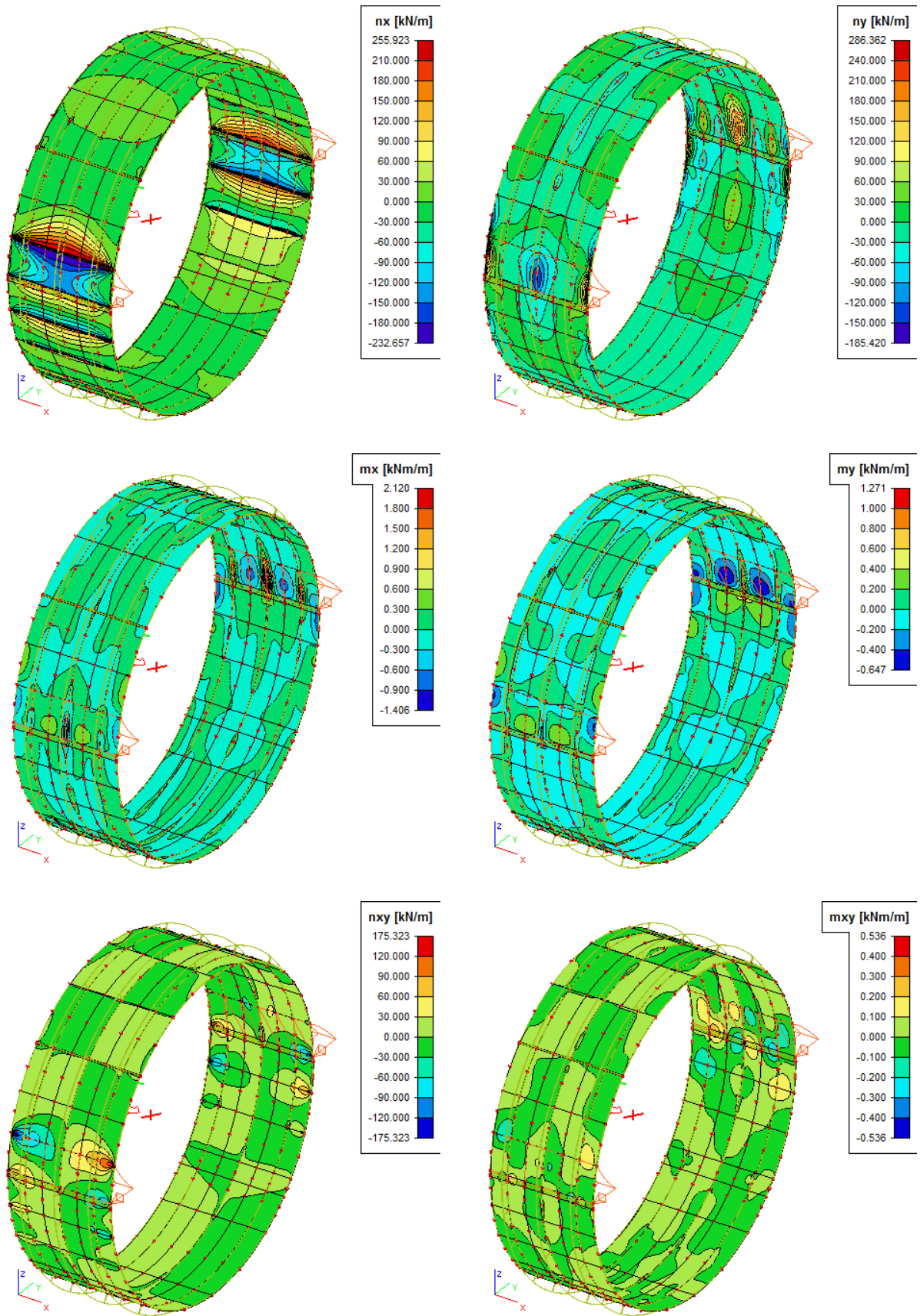


Abb. 85 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_11

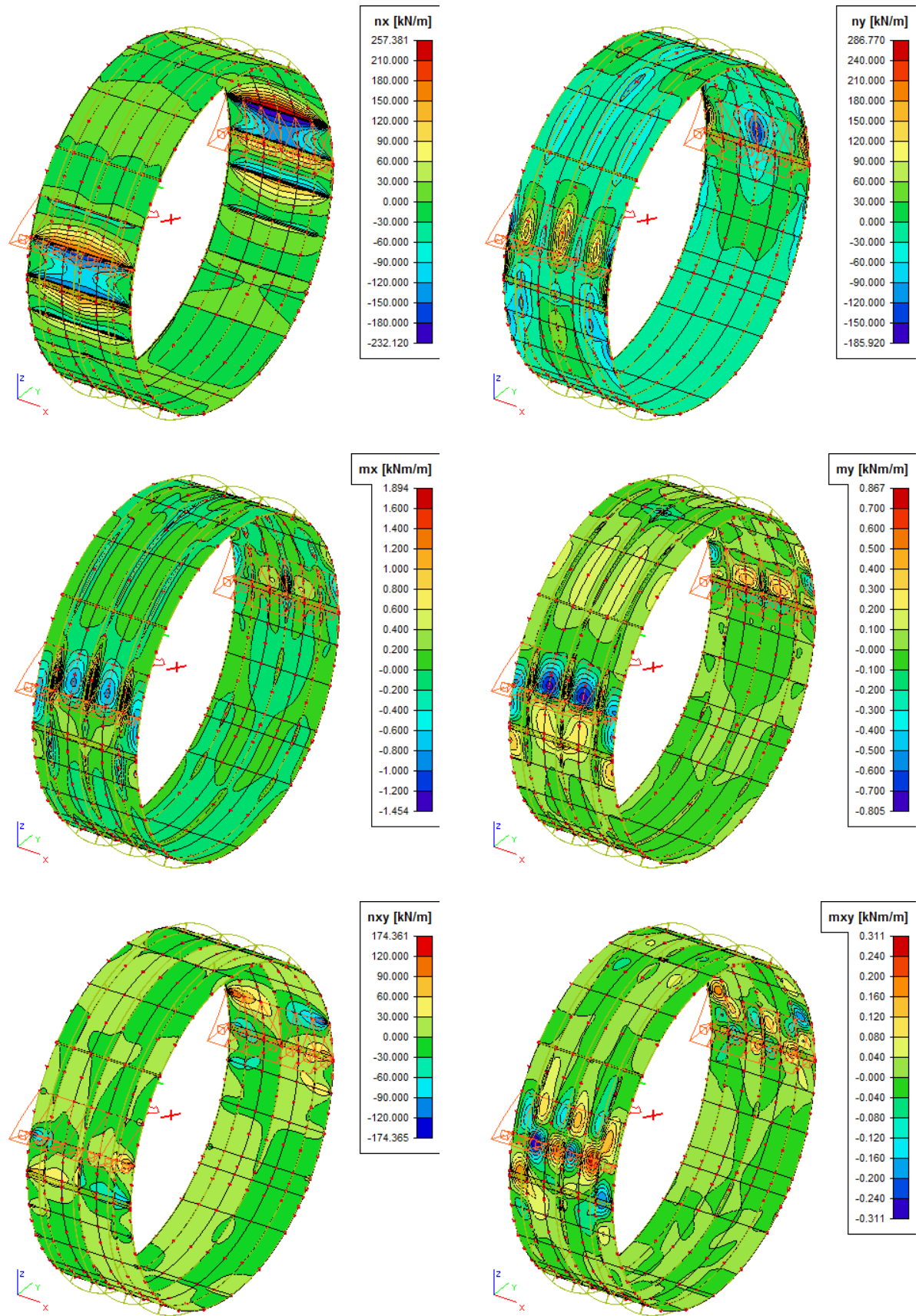


Abb. 86 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_12

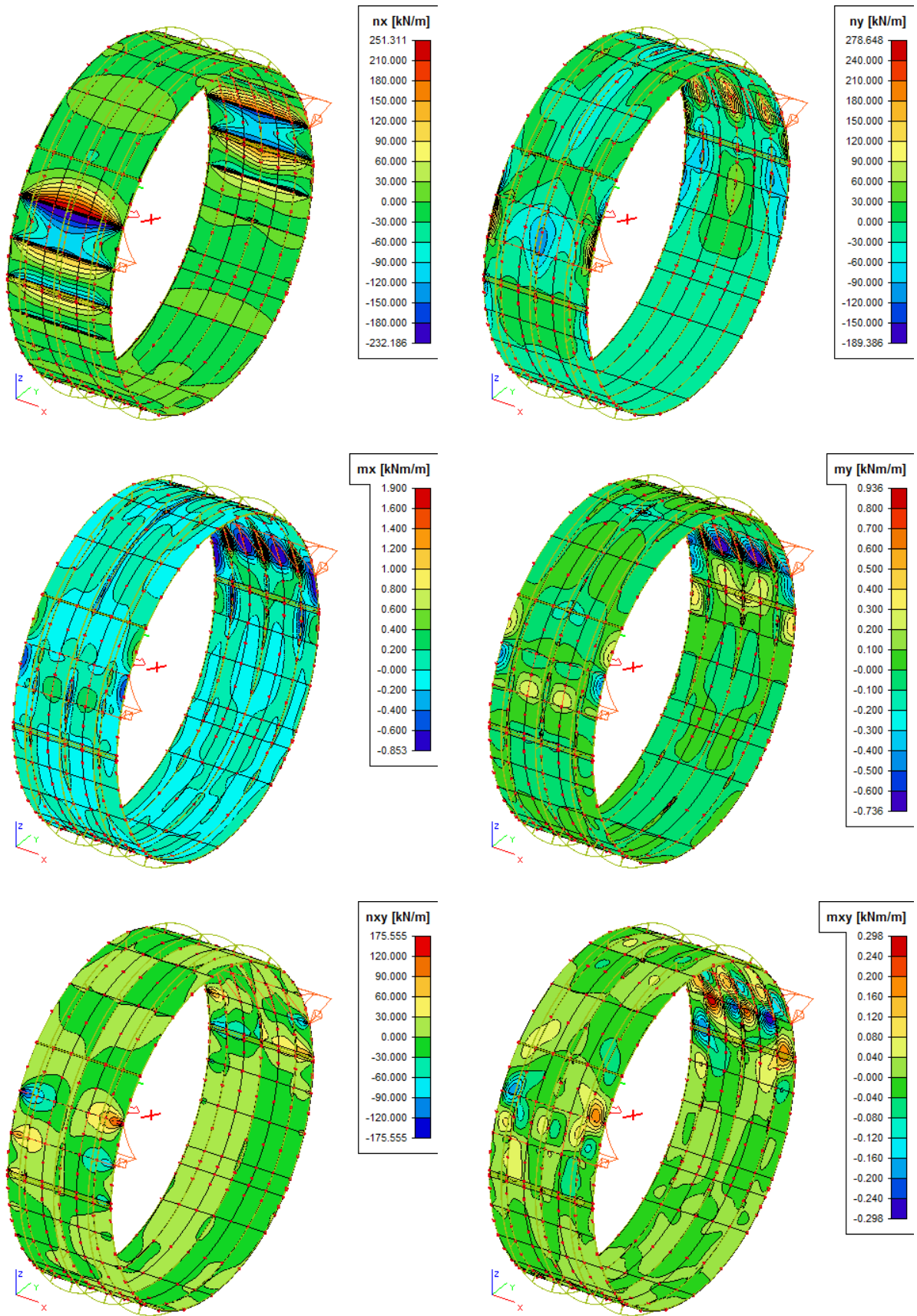


Abb. 87 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_13

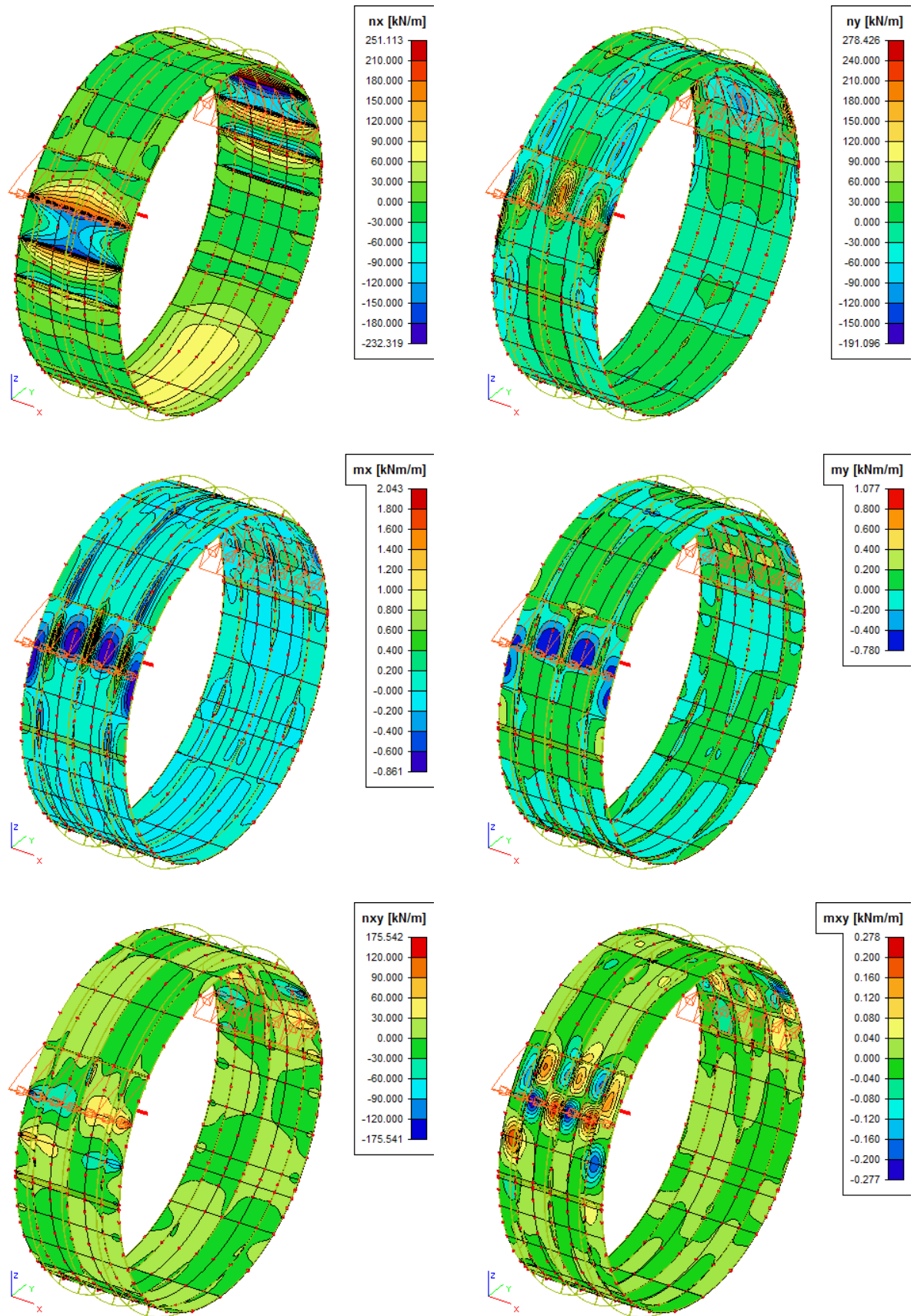


Abb. 88 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_14

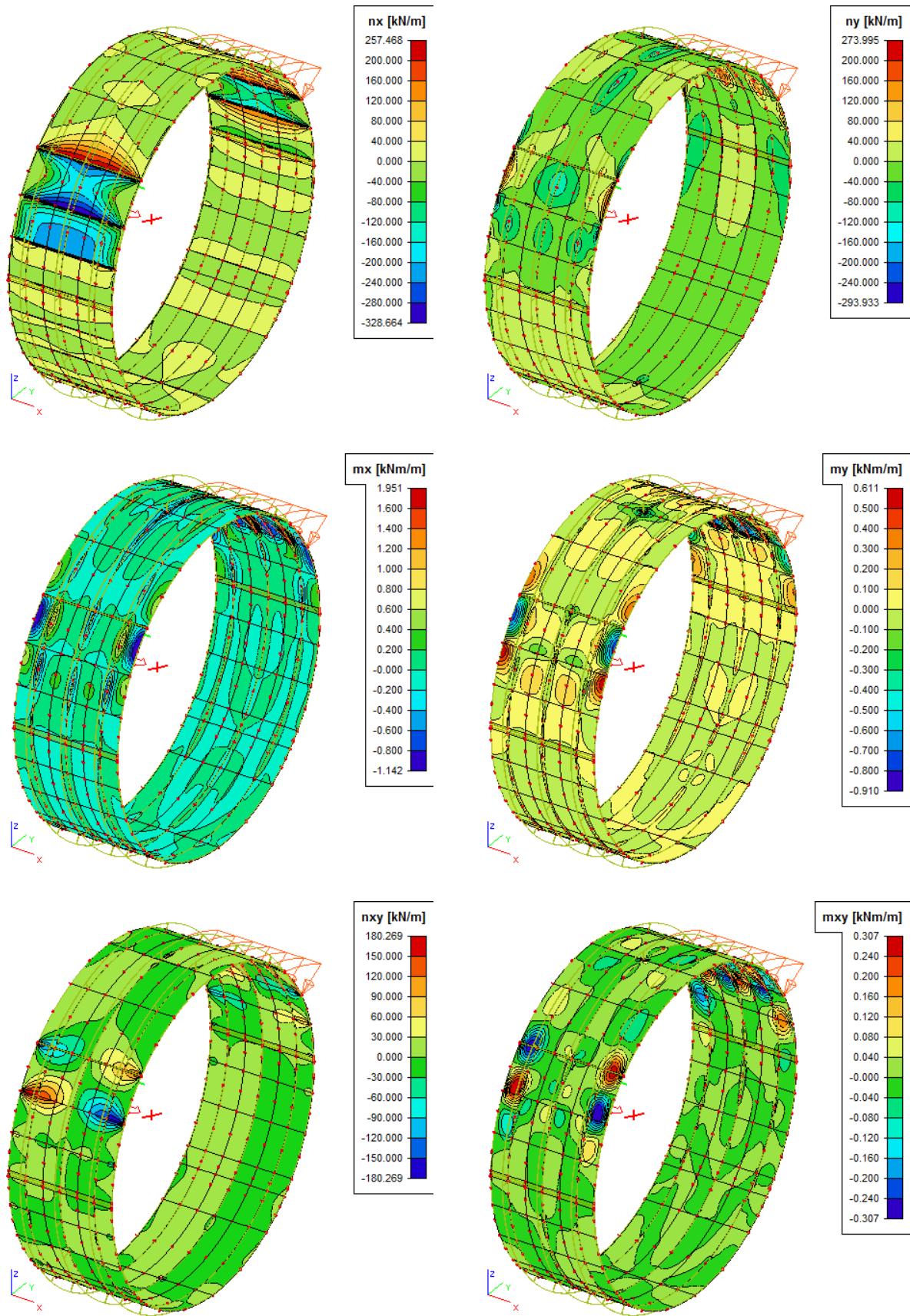


Abb. 89 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_15

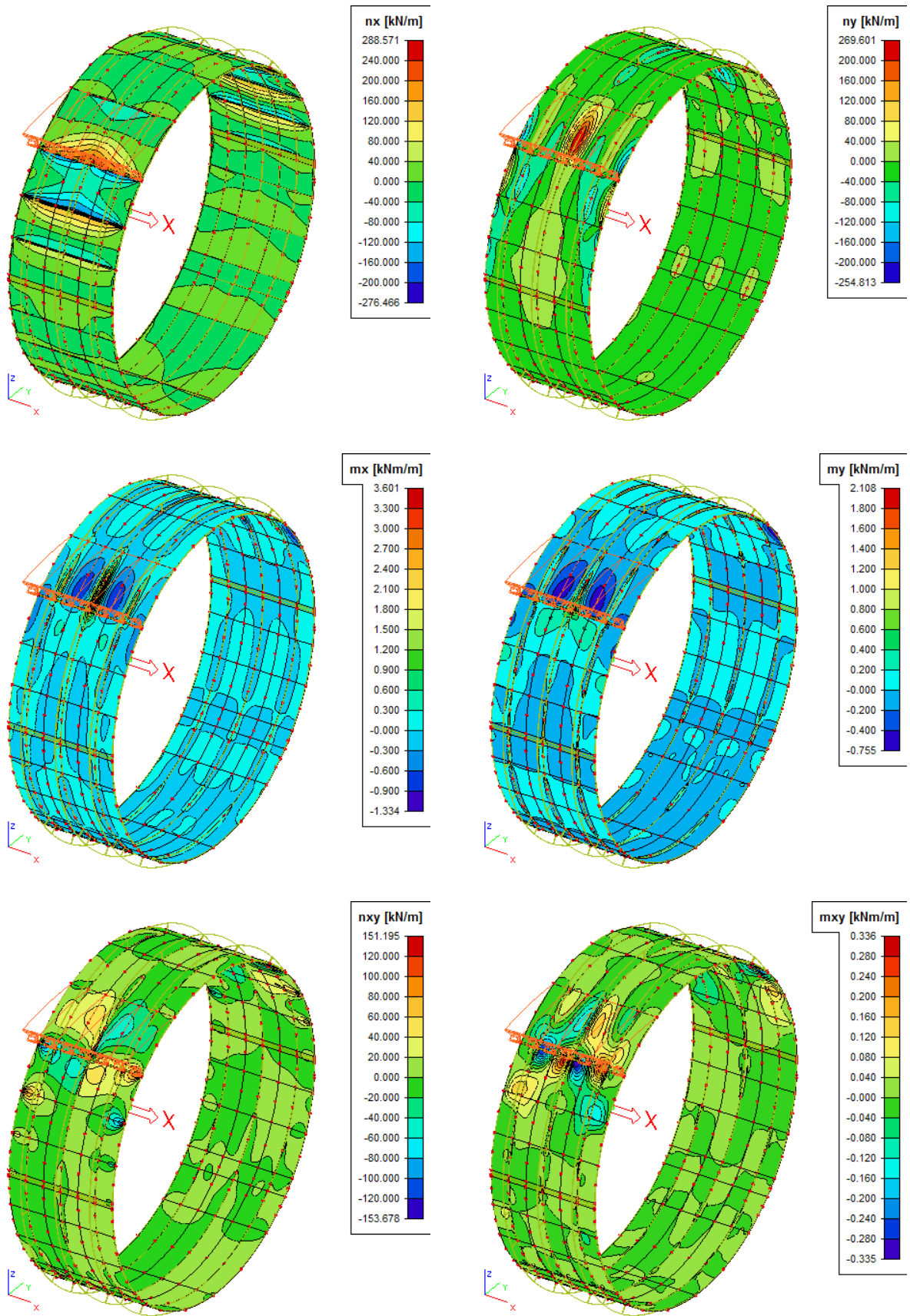


Abb. 90 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_16

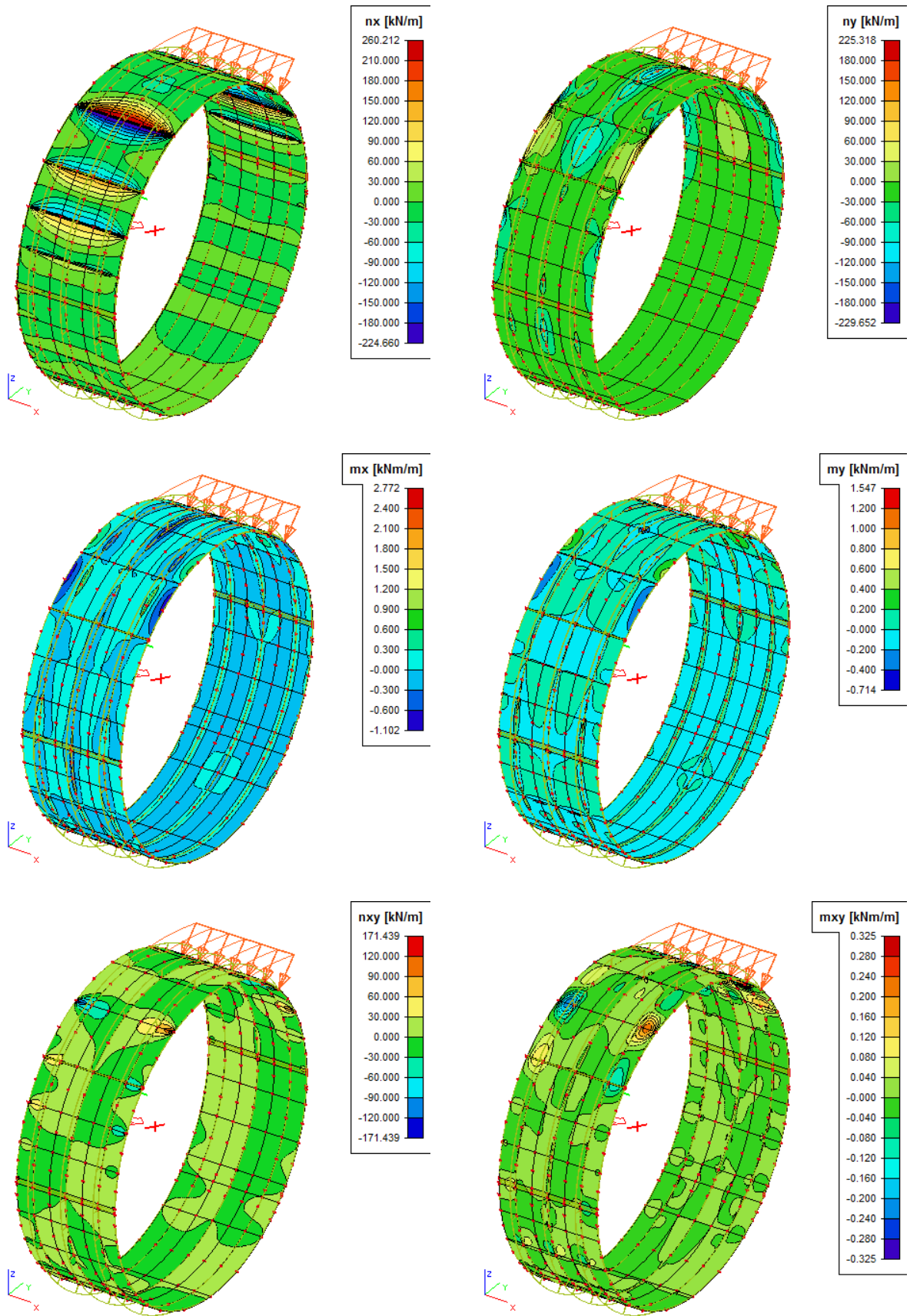


Abb. 91 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_17

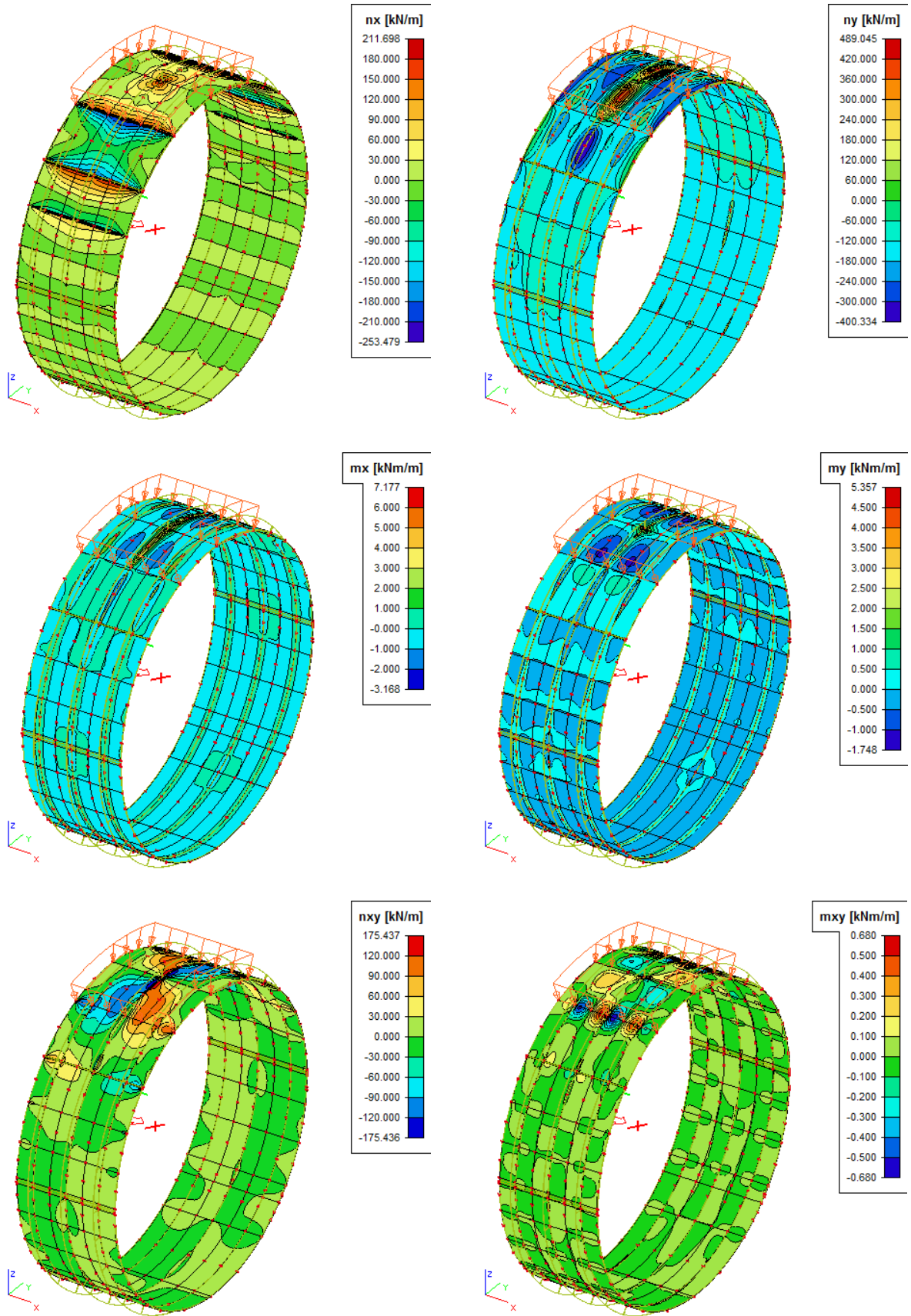


Abb. 92 Konturplot / Schnittkräfte im Rohr / n_x , n_y , m_x , m_y , n_{xy} , m_{xy} /Schicht_18

5.6 Variante 5b (C40/50) Verformungen Diagramme

5.6.1 Radialverformungen u_z im Beulring-2

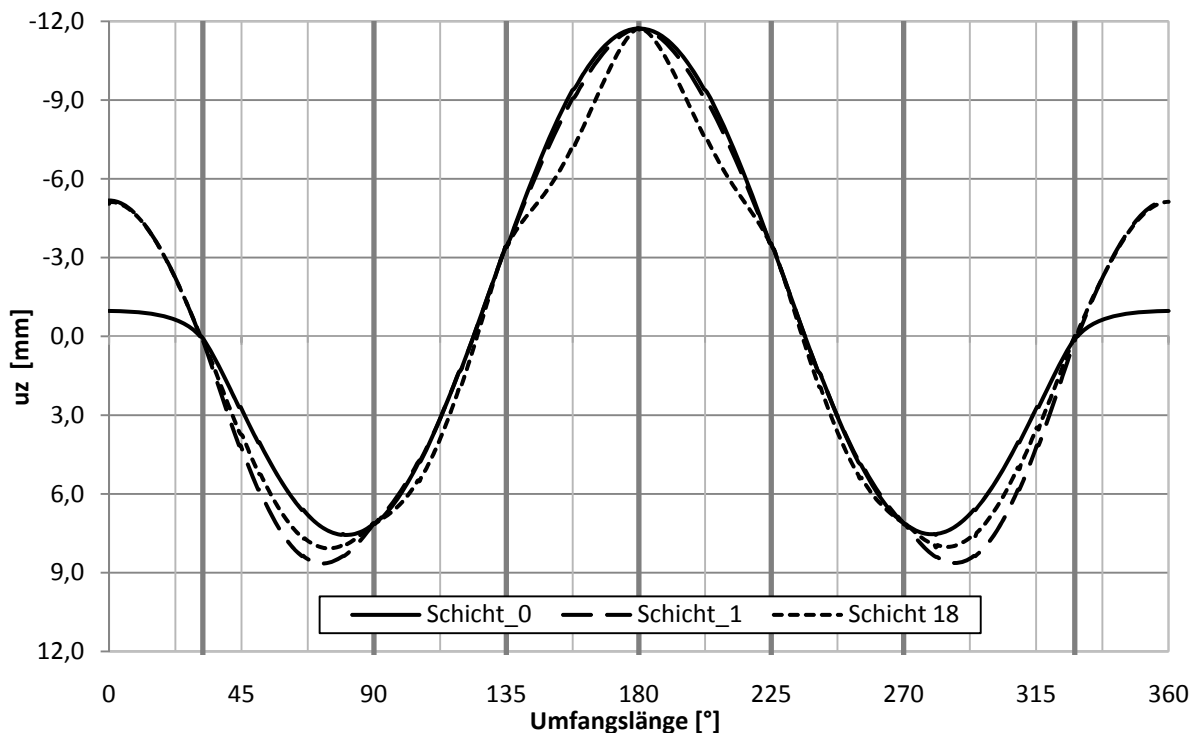


Abb. 93 Variante 5b: Beulring / Gesamtverformungen u_z [mm]

Die Untersuchungen mit der höheren Betongüte C40/50 zeigen, dass sich die Radialverformungen u_z des Beulringes für die Variante mit Beton C40/50 (Abb. 93) im Vergleich zur Radialverformungen u_z des Beulringes bei der Variante mit Beton C20/25 (Abb. 26) kaum ändern. Daher werden hier nur die Verformungsverläufe für den Lastfall Eigengewicht, sowie die Gesamtverformungen für den ersten und den letzten Betonierschritt abgebildet. Es ist ersichtlich, dass eine Verwendung der Betonklasse C40/50 nahezu zu den selben Verformungswerten im Vergleich zur Betonklasse C20/25 führt. Im Weiteren werden keine detaillierten Beschreibungen der Verformungen weder im Beulring noch in der Rohrschale vorgenommen. Eine vollständige Darstellung der Einzelverformungen des Beulringes (Schnitt S1) für die Variante 5b wird im Anhang gezeigt.

5.7 Spannungen Diagramme C40/50

Auf den folgenden Seiten wird die Darstellung der Spannungsverläufe sowohl im Beulring-2 (Schnitt S1) als auch in der Rohrschale (Schnitt S1 und S2) für die Variante 5b (C40/50) gezeigt. In der Abb. 94 ist ersichtlich, dass sich der Verlauf der Spannungen im Beulring $\sigma_{\text{außen}}$ im Vergleich zur Variante 5a ähnlich entwickelt. Allerdings entsteht in Variante 5b als minimale Gesamtspannung etwa 42N/mm^2 (+13%) mehr Beanspruchung bei Auflager bei 180° als bei der Variante 5a. Dieser Unterschied der Spannungen resultiert aus der Tatsache, dass sich bei dem Beton C40/50 im Vergleich zum Beton C20/25 die doppelte Festigkeit und auch somit die doppelte Betonbettung im gleichen Zeitpunkt entwickelt. Daher entstehen größere lokale Verformungen nach oben in den noch nicht einbetonierten Rohrbereich bei unveränderter Umfangslänge. Dadurch erfährt der Beulring-2 mehr Spannungen am Firstauflager. In der Abb. 95 werden die Spannungen σ_{innen} im Beulring-2 dargestellt. Auch hier hat sich der Verlauf der Spannungen σ_{innen} zwischen Variante 5a und 5b kaum verändert.

Bei den Spannungen in der Rohrschale werden ähnlich wie bei den Spannungen im Beulring-2 keine Unterschiede in Verlauf zwischen Variante 5a und 5b getroffen. Im Unterschied zur Variante 5a wird hier mit mehr Spannungen gerechnet. Deswegen wird im Weiteren nur eine nähere Beschreibung der Variante 5a erläutert, weil die Variante 5b nicht relevant ist.

5.7.1 Spannungen im Beulring-2 außen-innen

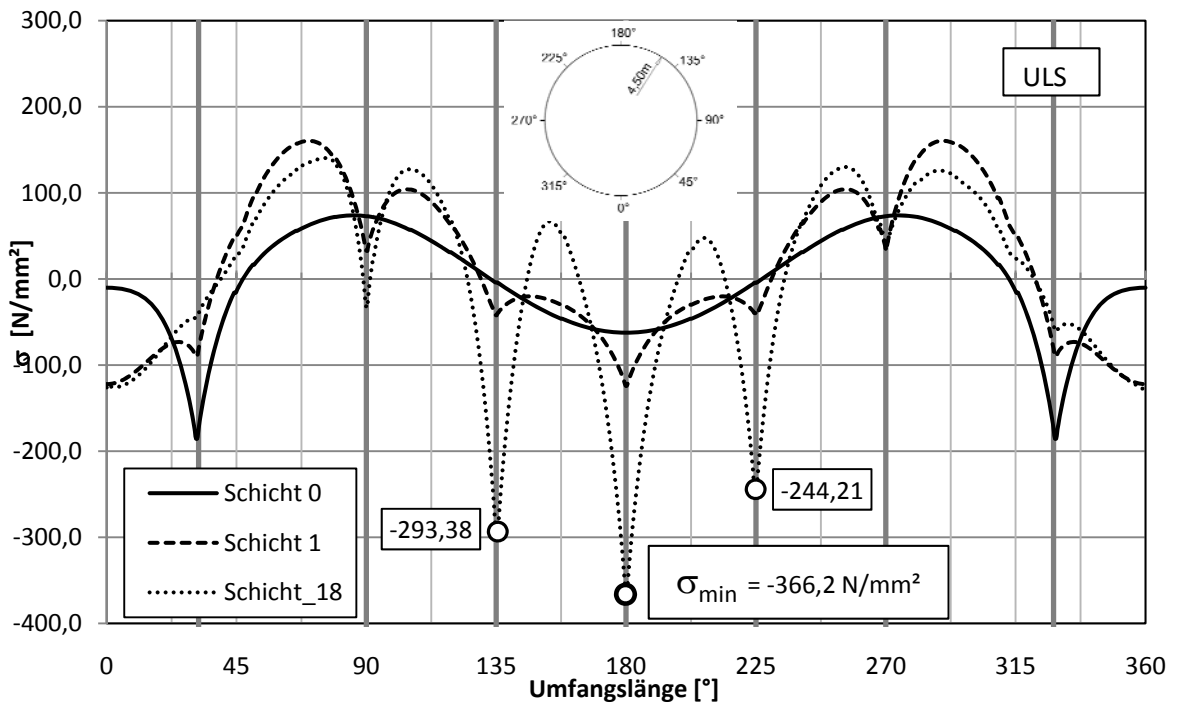


Abb. 94 Variante 5b: Beulring 2 / Spannungen außen σ [N/mm²]

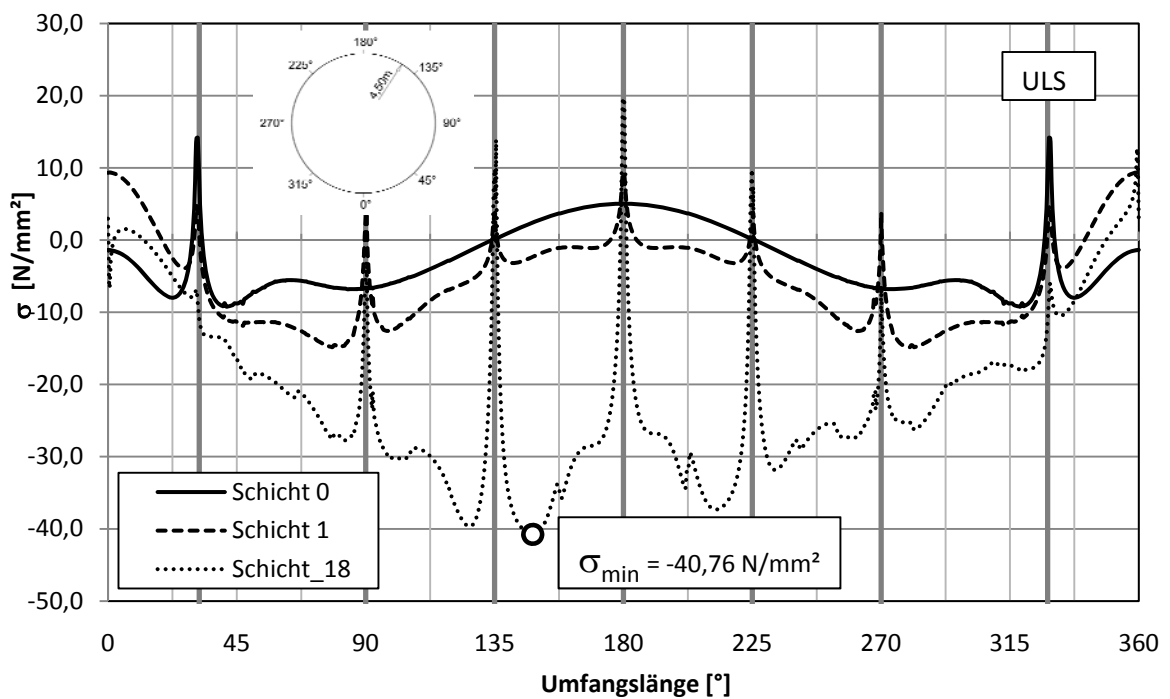


Abb. 95 Variante 2: Beulring 2 / Spannungen innen σ [N/mm²]

5.7.2 Spannungen im Rohr Schnitt S1

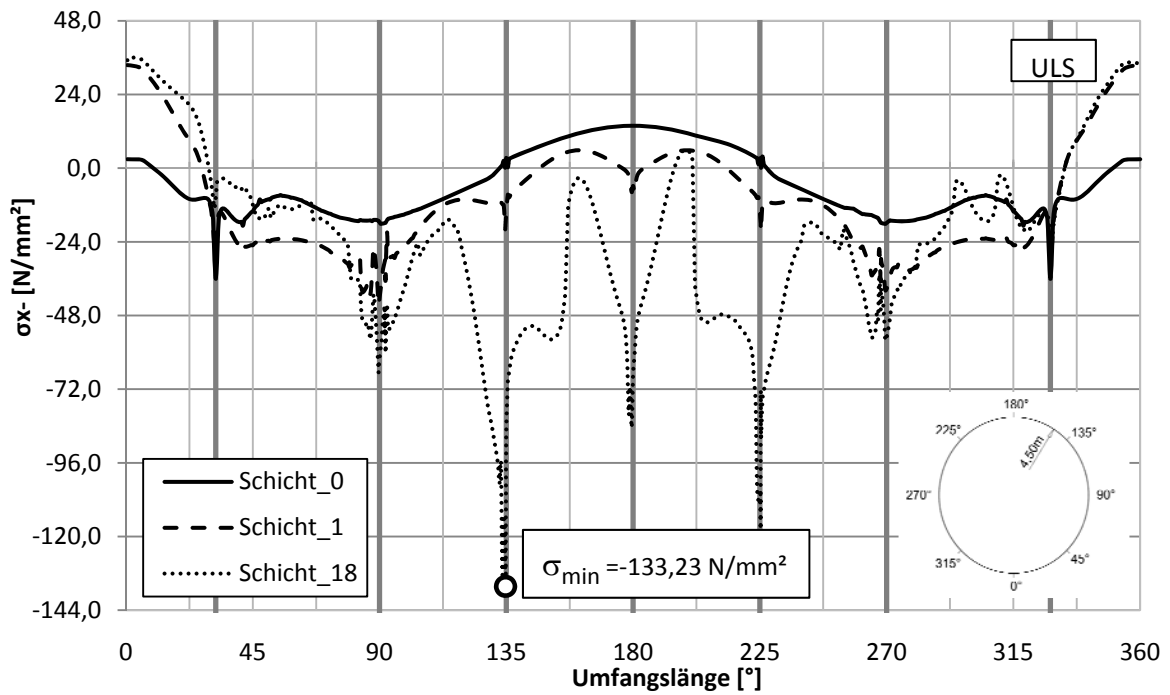


Abb. 96 Variante 2: Rohr / S1 / Längsspannung/außen σ_x^- [N/mm²]

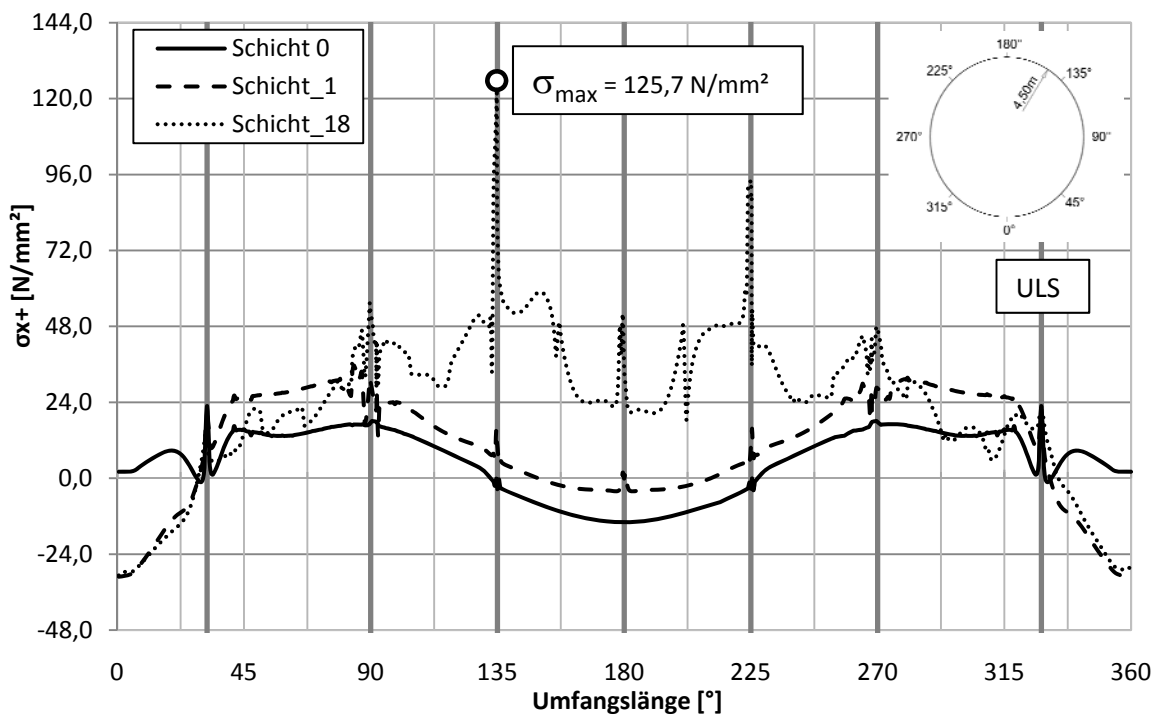


Abb. 97 Variante 2: Rohr / S1 / Längsspannung/innen σ_x^+ [N/mm²]

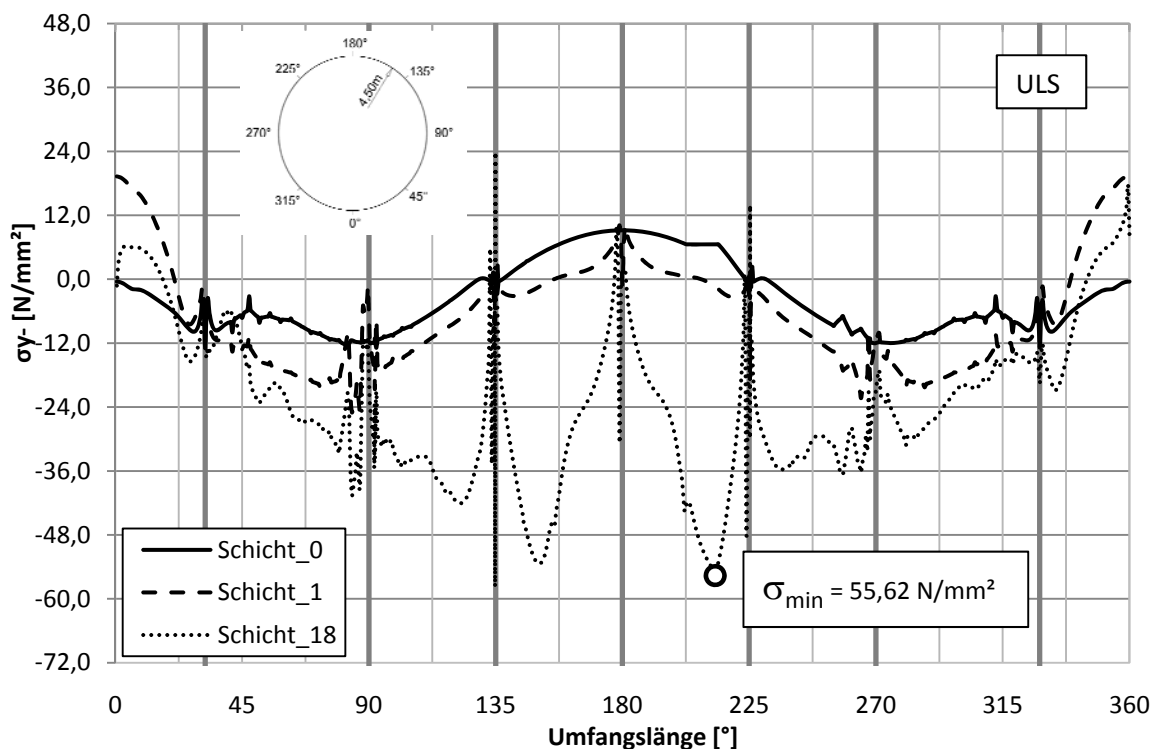


Abb. 98 Variante 2: Rohr / S1 / Umfangsspannung/außen σ_y^- [N/mm²]

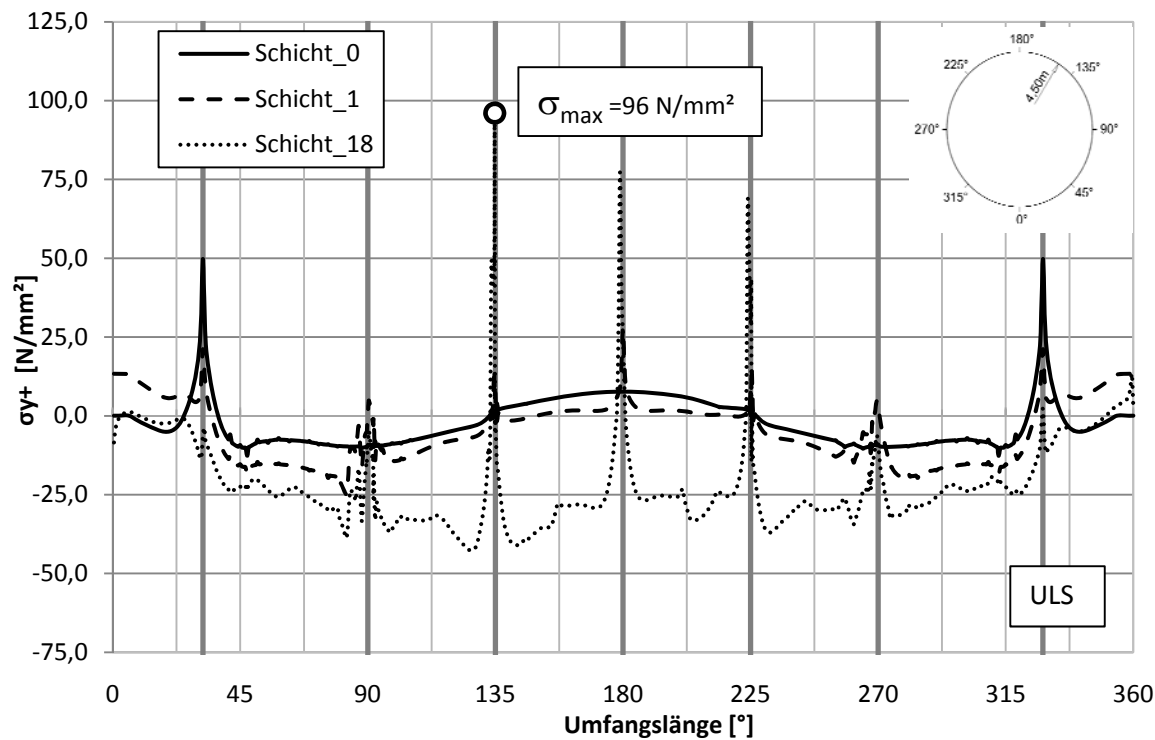


Abb. 99 Variante 2: Rohr / S1 / Umfangsspannung/innen σ_y^+ [N/mm²]

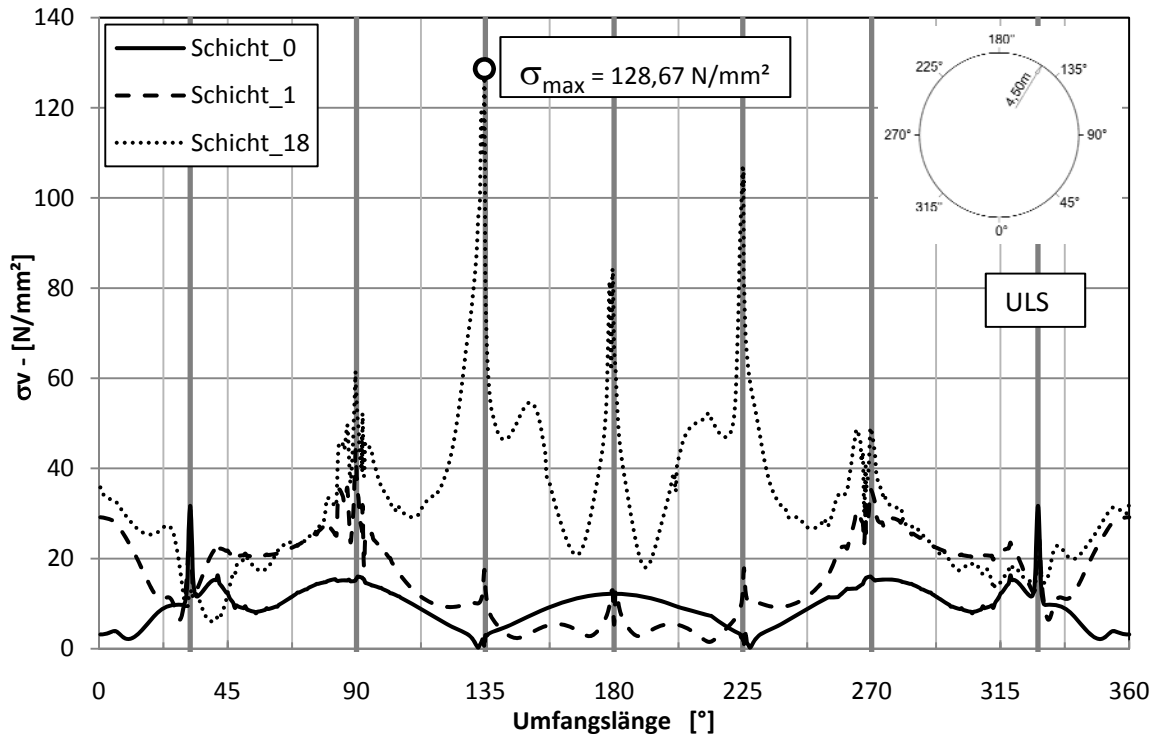


Abb. 100 Variante 2: Rohr/S1/Vergleichsspannung/außen σ_v- [N/mm²]

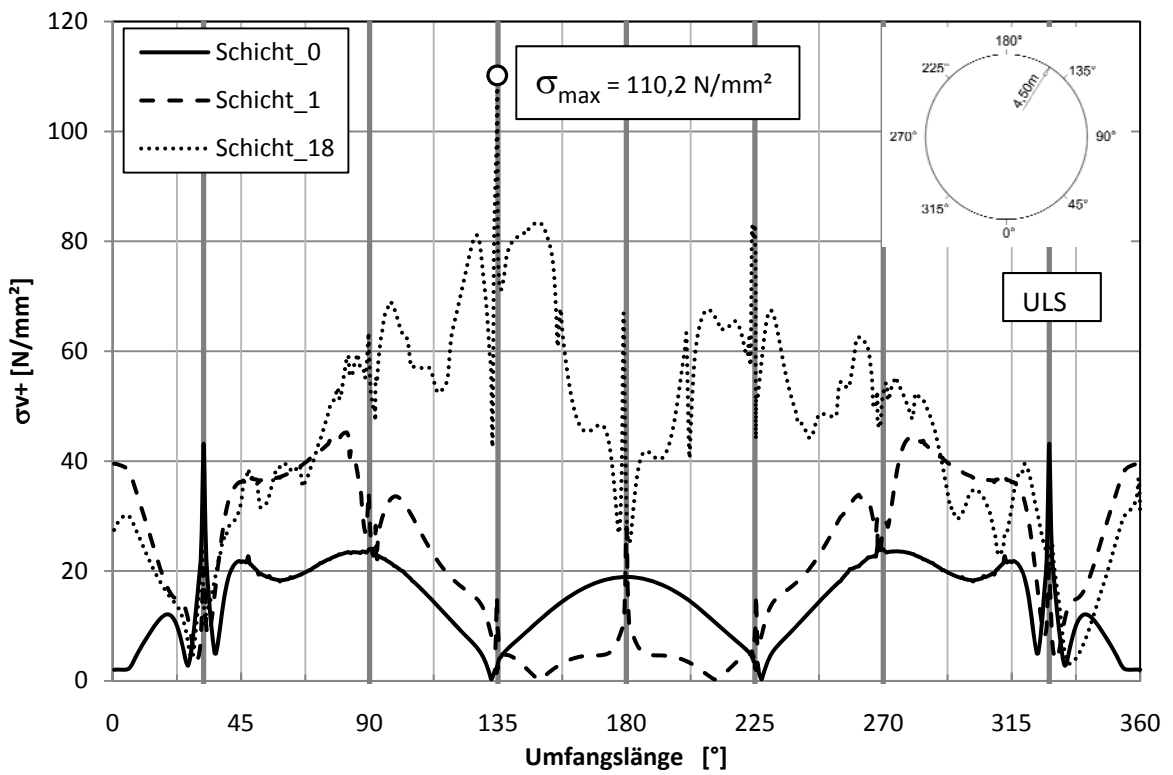


Abb. 101 Variante 2: Rohr/S1/Vergleichsspannung/innen σ_v+ [N/mm²]

5.7.3 Spannungen im Rohr Schnitt S2

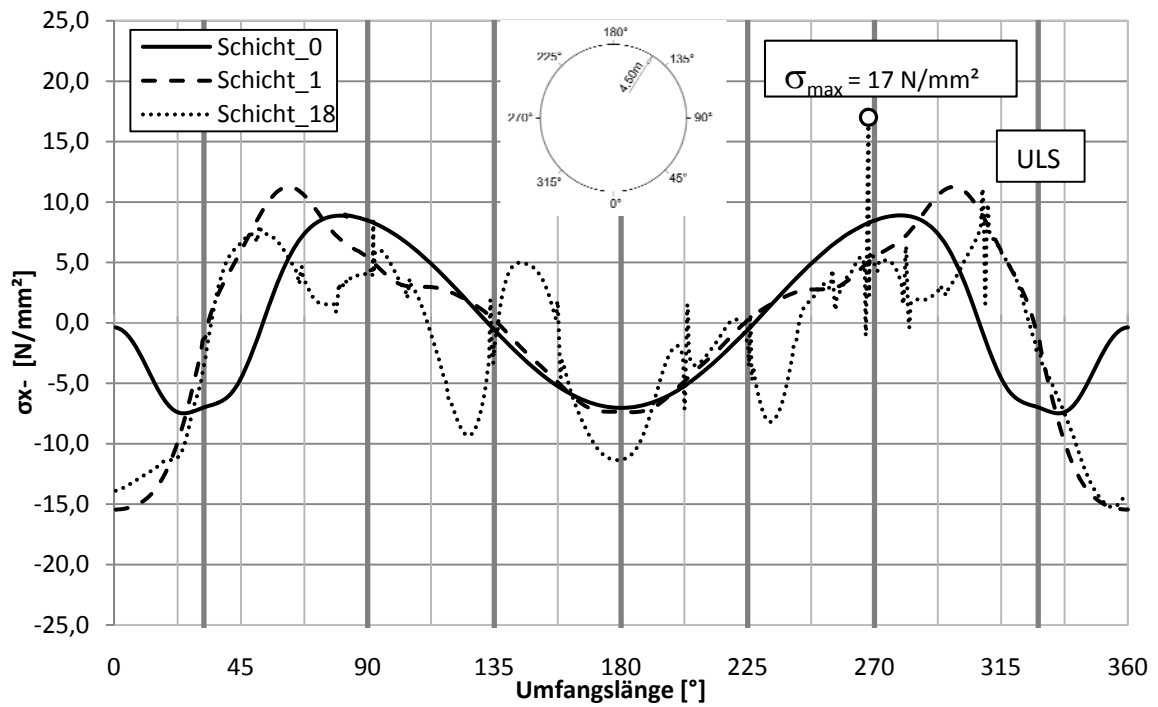


Abb. 102 Variante 2: Rohr / S2 / Längsspannung/außen σ_x^- [N/mm²]

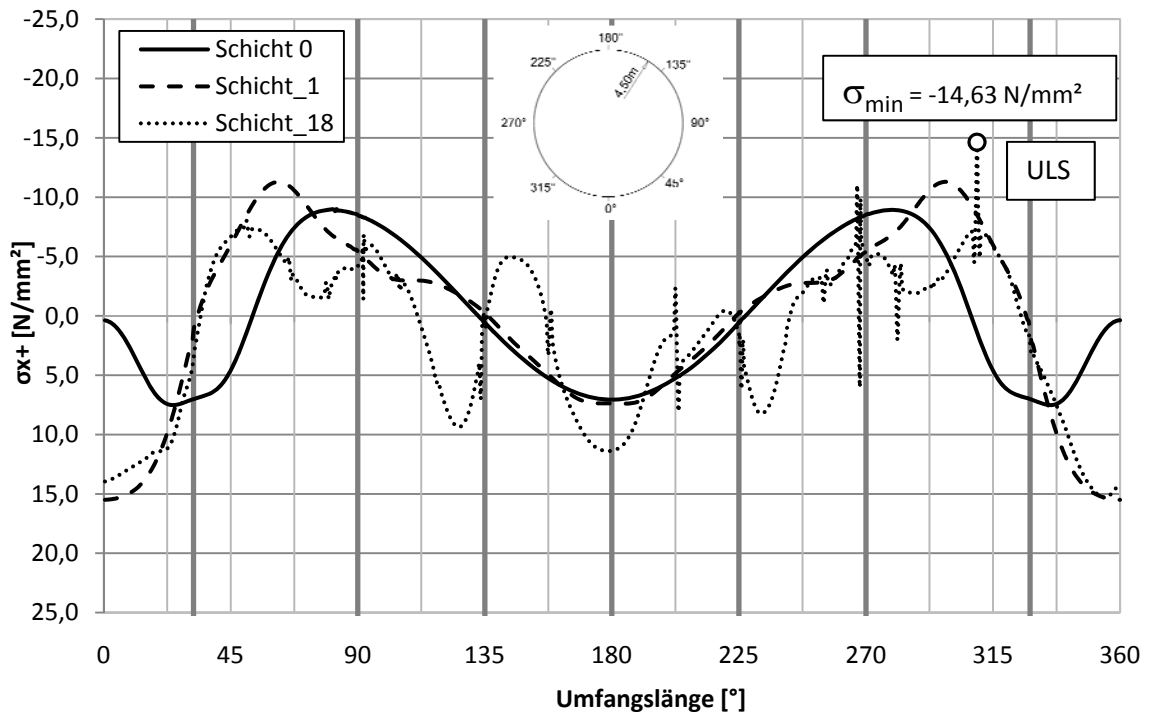


Abb. 103 Variante 2: Rohr / S2 / Längsspannung/innen σ_x^+ [N/mm²]

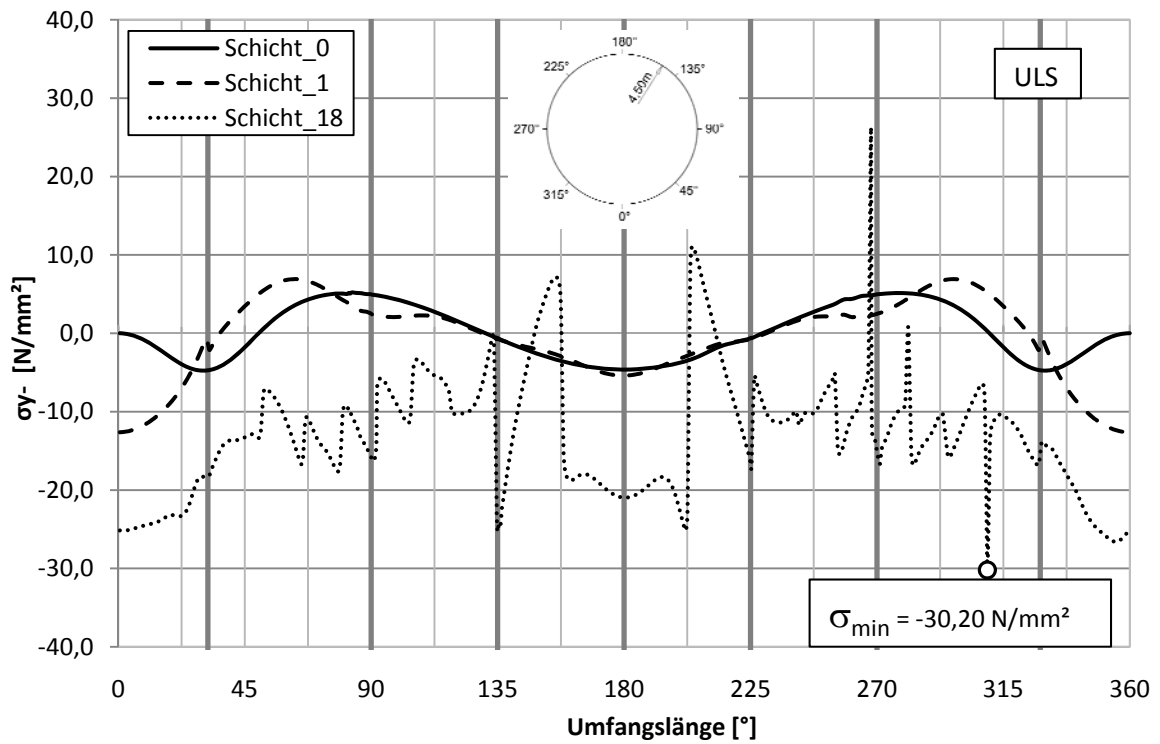


Abb. 104 Variante 2: Rohr / S2 / Umfangsspannung/außen σ_{y-} [N/mm^2]

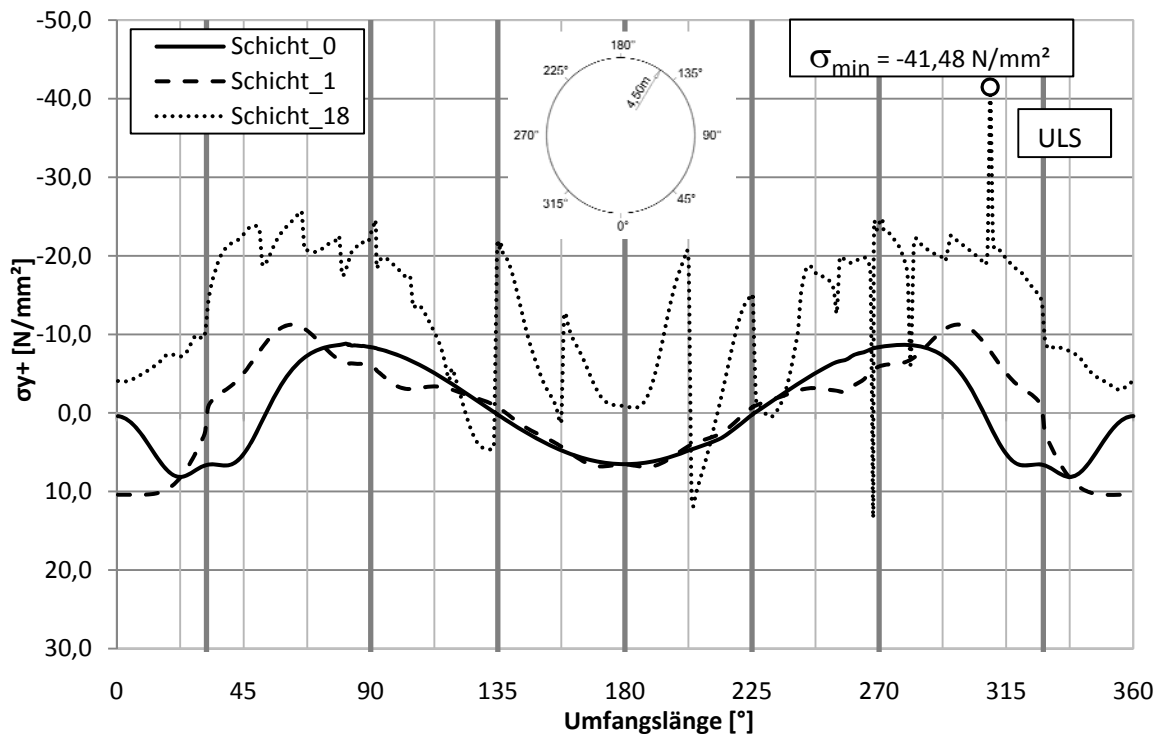


Abb. 105 Variante 2: Rohr / S2 / Umfangsspannung/innen σ_{y+} [N/mm^2]

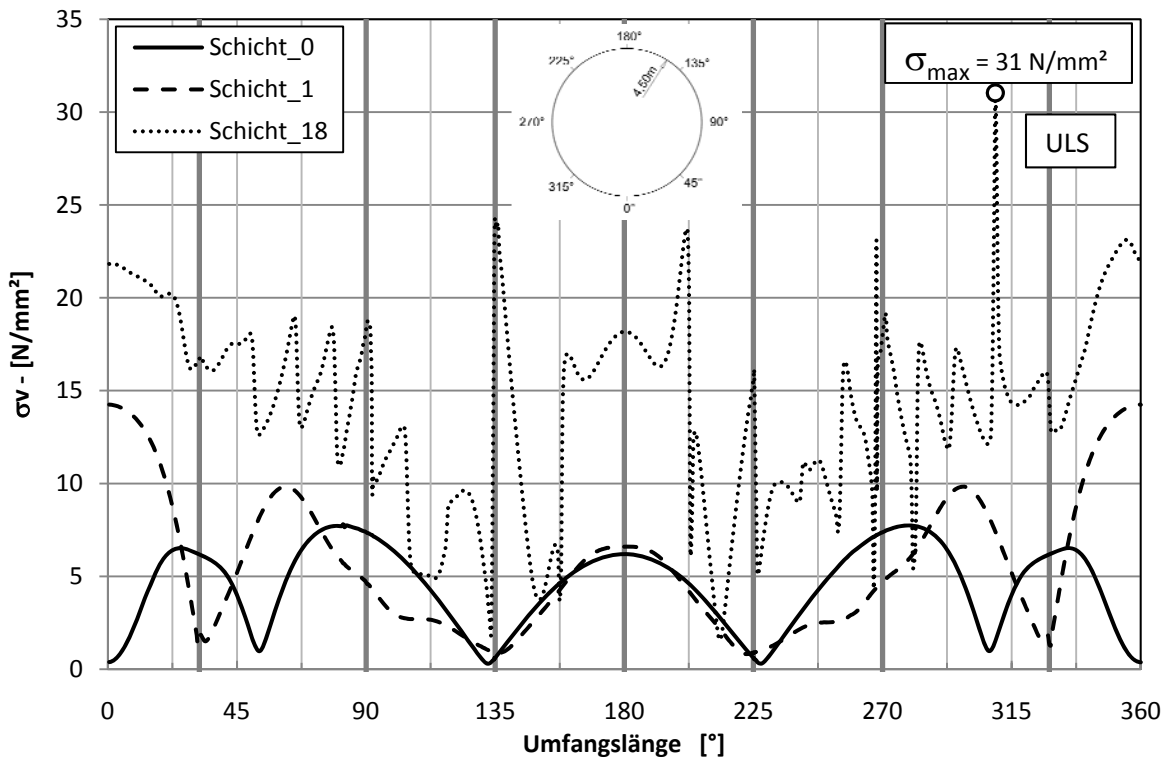


Abb. 106 Variante 2: Rohr/S2/Vergleichsspannung/außen σ_v- [N/mm²]

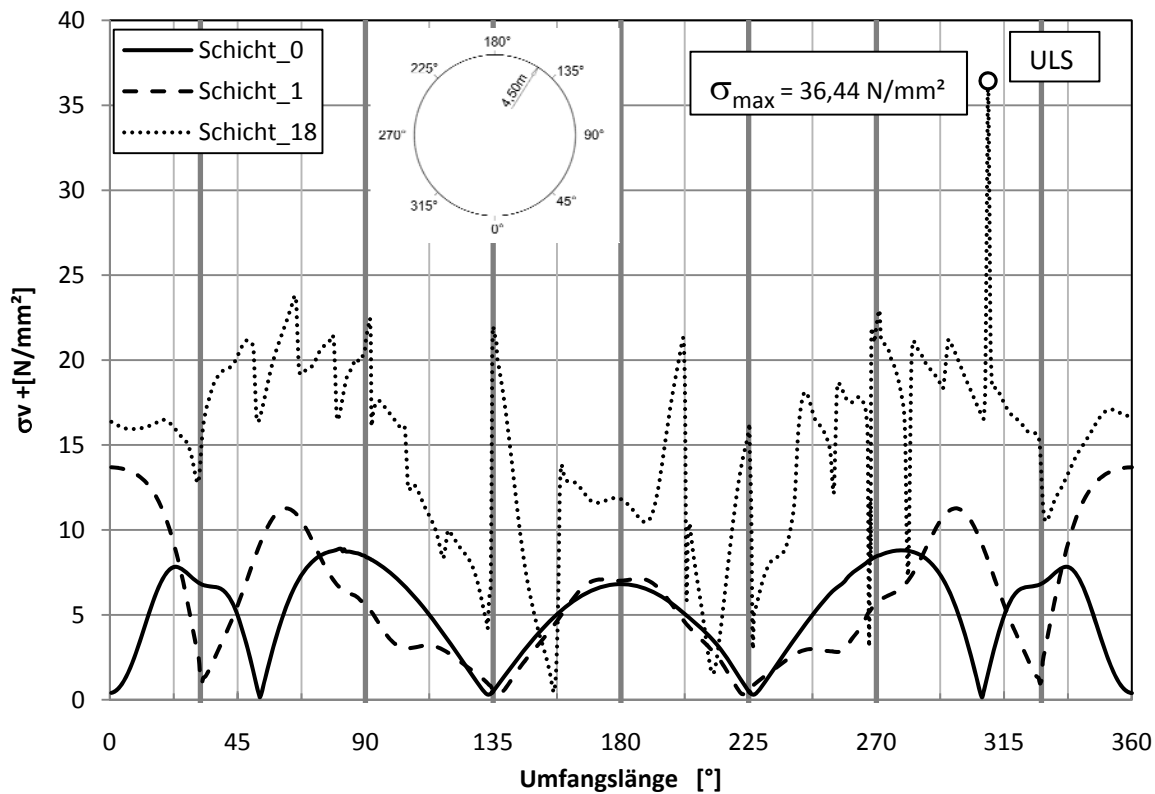


Abb. 107 Variante 2: Rohr/S2/Vergleichsspannung/innen σ_v+ [N/mm²]

6 Beschreibung der Ergebnisse Variante 5a

6.1 Allgemein

In den folgenden Abschnitten werden detailliert alle Ergebnisse für Variante 5a beschrieben, die für die Montage des Stahl-Liners von Bedeutung sind. Es wird Schritt für Schritt beginnend mit dem Eigengewicht des Stahlrohres bis hin zum letzten Betoniervorgang die Entwicklung der Verformungen und Spannungen erläutert, um zu verstehen, wie sich die einzelnen Betoniervorgänge und das Eigengewicht des Stahlrohres auf die Endergebnisse auswirken.

6.2 Beschreibung der Verformungen

Wie man aus der Abb. 26 erkennen kann, erzeugt das Eigengewicht des Stahlrohres den größten Anteil an die Radialverformungen u_z . Durch das Eigengewicht verformt sich das Stahlrohr in Eiform, und der größte Wert von 11,72mm tritt im Firstpunkt des Stahlrohres auf. Seitlich verformt sich das Stahlrohr um 7,6mm nach außen (Abb. 108).

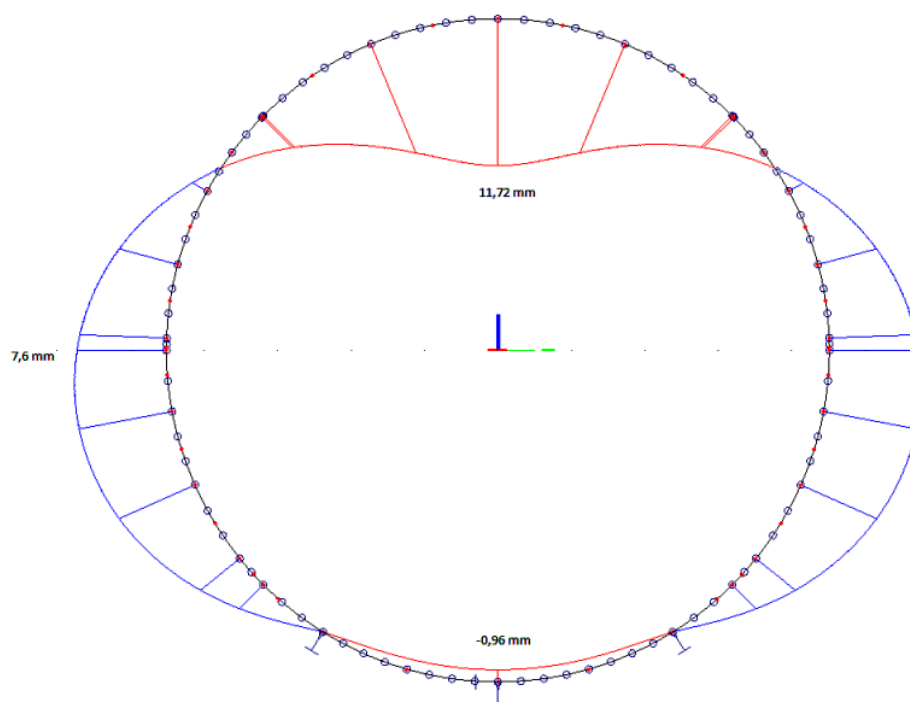


Abb. 108 Verformungsfigur unter Eigengewicht

Die erste Betonierphase erhöht die Verformungen am unteren Fußpunkt um 4,2mm (Abb. 109) aufgrund der hohen Auftriebskraft des Frischbetons, die auf das Stahlrohr einwirkt. Während der zweiten Betonierphase wirkt im Bereich des zuvor eingebrachten Betons bereits die Betonbettung. Durch die Betonbettung ist ein Rückverformen des Stahlrohres nicht mehr möglich. Ab der zweiten Betonierphase ergeben sich sehr kleine Verformungen (Abb. 110). Durch ein Aufsummieren der Verformungen bis zu Schicht-18 ergibt sich der Gesamtverformungsverlauf, der dem Verlauf der Verformungen nach der ersten Betonierphase der

Schicht-1 sehr ähnlich ist (Abb. 26). Die Einzelverformungen kann man in der Abb. 27 bis Abb. 31 sehen.

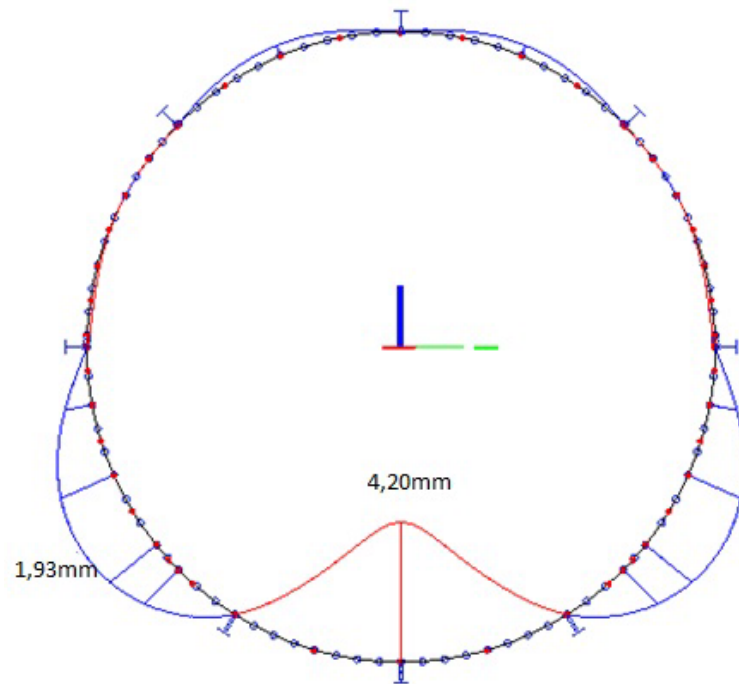


Abb. 109 Verformungsfigur während des ersten Betonierschrittes

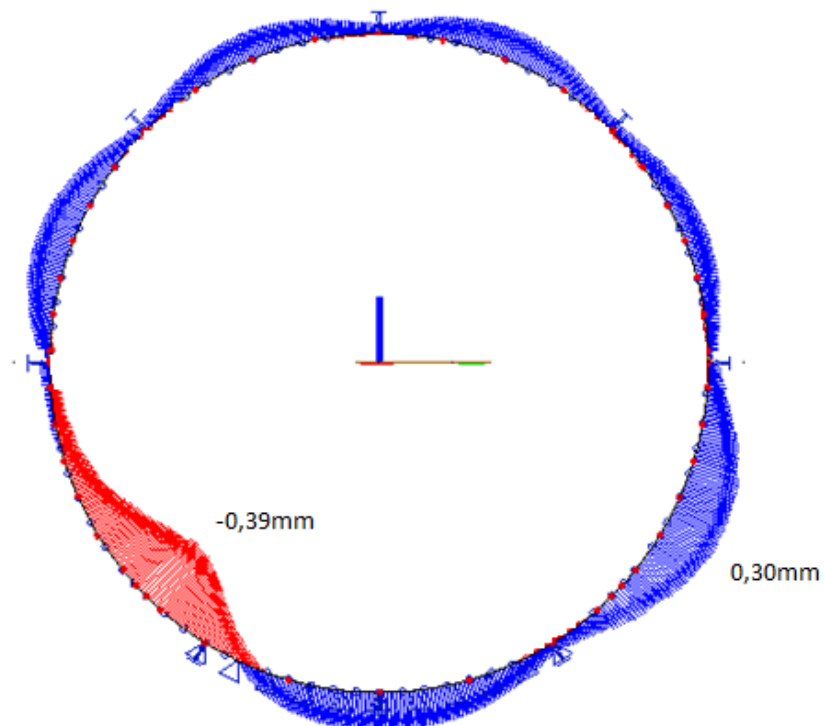


Abb. 110 Verformungsfigur während des zweiten Betonierschrittes

6.3 Beschreibung der Spannungen

Bei der Analyse der Spannungsverläufe erkennt man, dass Spannungen die einmal in das System aufgebracht werden, im Bereich der wirksamen Betonbettung, nicht mehr maßgeblich abgebaut werden. In der Abb. 54 sind die Spannungen σ am oberen Rand des Beulringes dargestellt. Die Spannungsspitzen treten bei den unter einer Reaktionskraft durch das Eigengewicht stehenden Auflagern bei $31,86^\circ$ und $328,14^\circ$, sowie am First der Schicht-17 bei 180° auf. In der Abb. 54 und Abb. 55 werden die Ringspannungen außen und innen dargestellt. Der Umfangsspannungsverlauf an der Innenseite des Beulringes ist affin zu den Spannungen σ_{y-} an der Rohraußenseite am Schnitt S1 (Abb. 70). Der nominelle Unterschied zwischen den Spannungsverläufen tritt durch den Poisson-Effekt zwischen Ring und Schale auf.

$$\sigma_{v,y} = \nu_{Stahl} * \sigma_x \quad (5)$$

$$\sigma_{y-,Vergleich} = \sigma_{R,innen} + \nu * \sigma_x - \quad (6)$$

$$\sigma_{y+,Vergleich} = \sigma_{R,innen} + \nu * \sigma_x + \quad (7)$$

In Glg. 5 eingesetzt, ergibt sich eine Spannungsdifferenz infolge des Poisson-Effekts, die in den Tab. 3 dargestellt wird.

Schicht_0	σ [N/mm ²]	180°
Beulring	$\sigma_{R,au\beta en}$	-62,31
	$\sigma_{R,innen}$	5,05
Rohrschale	extrap. $\sigma_{R,Schale,innen}$	11,78
	σ_{y-}	9,18
	σ_{y+}	7,68
	σ_{x-}	13,81
	σ_{x+}	-13,85
	$\nu * \sigma_{x-}$	4,14
	$\nu * \sigma_{x+}$	-4,16
	$\sigma_{y-,Vergleich}$	9,19
	$\sigma_{y+,Vergleich}$	7,63
	Unterschied σ_{y-} [%]	99,86%
	Unterschied σ_{y+} [%]	99,28%

Tab. 3 Spannungsdifferenz infolge des Poisson-Effekts /Schicht_0 / 180°

Berechnung zutreffend für das vorliegende Berechnungsmodell der ringversteiften Rohrschale. Aus der Tab. 3 ist ersichtlich, dass sich die Unterschiede innerhalb der Diskretisierungs-genauigkeit liegen.

Die maximale Spannung σ von -470N/mm^2 tritt im Beulring in der Betonierschicht 17 auf. Analysiert man den Verlauf und die Geschichte der Spannungen über den gesamten Beto-nierverlauf, erkennt man ein Einfrieren der Spannungen von Schicht zu Schicht. Dies ent-

steht durch die frühe Entwicklung der Betondruckfestigkeit und die damit zusammenhängende Betonbettung. Beim Einbetonieren der Schicht-18 erfolgt eine Reduktion der Spannungen durch die Betonauflast auf $-324,6\text{N/mm}^2$.

Nachweisführung:

$$\sigma_{Ed} = 470\text{N/mm}^2 > \sigma_{Rd} = \frac{355,0}{1,0} = 355\text{N/mm}^2 (\text{Ausnutzung : } 132\%)$$

Der Nachweis ist nicht erfüllt.

Im Nachstehenden wurden auch die Vergleichsspannungen im Rohr (Schnitt S1 und S2) ermittelt. Für die Nachweisführung der Spannungen im Stahlrohr werden im Stahlbau am häufigsten die Mises-Vergleichsspannungen eingesetzt. Für einen ebenen Spannungszustand werden die Vergleichsspannungen mittels folgender Formel berechnet:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

Die Schubspannungen τ_{xy} sind in der vorliegenden Berechnung kleiner als $0,5 \tau_{Rd}$ und vernachlässigbar. In der vorliegenden Ermittlung der Vergleichsspannungen wurde der Einfluss der Plattenschubspannung τ_{xy} der Vollständigkeit halber dennoch berücksichtigt. Zu Vergleichszwecken sind in den zwei Diagrammen Abb. 64 und Abb. 65 die ursprünglich ermittelten Vergleichsspannungen ohne Schubfluss dargestellt. Wie ersichtlich sind die Ergebnisse nahezu ident zu den Abb. 66 und Abb. 67 für die Vergleichsspannungsberechnung und Schubspannungswirkung.

In der Tab. 8 wird die Entwicklung der Verformungen und Spannungen mit ihren maximalen Werten über alle Betonierphasen hindurch dargestellt.

6.4 Momentenreduktion im Auflagerbereich

6.4.1 Allgemein

In der Tab. 8 ist zu sehen, dass die Spitzenspannungen im Beulring-2 ab der Betonierschicht 12 über den zulässigen Wert der Spannungen liegen. Da für die Modellierung des Stahl-Liners frei drehbare Punktlager als Stützung verwendet wurden, ergeben sich nach der Berechnung zu hohe Stützmomente bzw. Spannungen im Beulring-2. Wie im Betonbau darf man diese Momente über dem Auflager für die Bemessung abmindern, wenn die Auflagerbreite in Rechnung gestellt wird. Dadurch können auch die Spannungsspitzen reduziert werden. Somit können diese Spannungsspitzen, die ab der Betonierschicht 12 über den zulässigen Werten liegen, durch eine Reduktion der Momente vermindert werden. Dadurch, dass die Modellierung einer Auflagerbreite am Schalenmodell im SCIA-Engineer [9] einen äußerst aufwendigen Prozess darstellt, wird im Weiteren mit dem Programm *RuckZuck* [10] ein mögliches Ersatzmodell für den Beulring-2 untersucht, welches einen möglichst gleichen Momentenverlauf für den oberen Teil des Beulringes aufweist. Mit dem Programm *RuckZuck* werden zwei Durchlaufträger modelliert. Dabei wird der erste Durchlaufträger mit punktuell eingebrachten Auflagern modelliert und der zweite mit einer Auflagerbreite von 20cm gebildet (Abb. 114 und Abb. 117). Dadurch wird gezeigt, in welchem Ausmaß die Stützmomente reduziert werden, wenn die Auflagerbreite in die Berechnung miteinbezogen wird. Dieses Ersatzmodell wird für die Schicht-17 und die Schicht-18 angewandt. Laut Sparowitz (2004), kann das Stützmoment gemäß der nachstehenden Gleichung (9) um den Betrag von ΔM_{Ed} reduziert werden.

$$\Delta M_{Ed} = \frac{F_{Ed} * b}{8} \quad (9)$$

Mit:

ΔM_{Ed} Ausrundungsmoment

F_{Ed} Auflagerkraft unter dem maximalen Stützmoment

b Auflagerbreite

Die Anwendung der Gleichung (9) führt zum Ausrunden des Stützmomentes und somit zu einer Reduktion der Stützmomente bzw. Stützspannungen. Auf den folgenden Seiten wird die Entwicklung des Momentenverlaufs von Schicht-0 bis Schicht-18 dargestellt (Abb. 111 und Abb. 112). Anschließend wird überprüft, ob Gleichung (9), welche für den Betonbau entwickelt abgestimmt ist, auch für die vorliegende Stahl-Liner Konstruktion anwendbar ist.

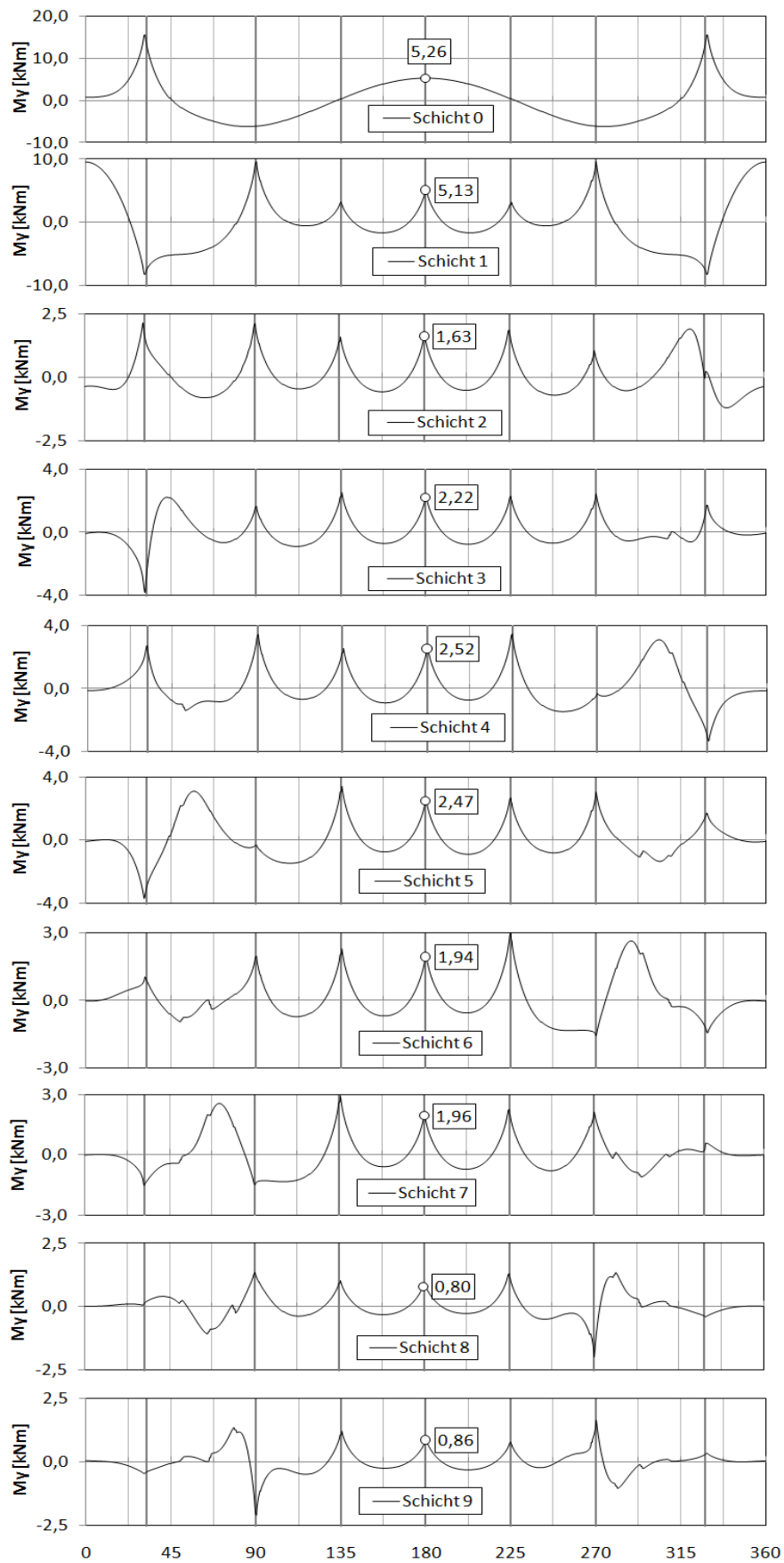


Abb. 111 Momentenverlauf einzeln/Schicht-0 bis Schicht 9 [kNm]

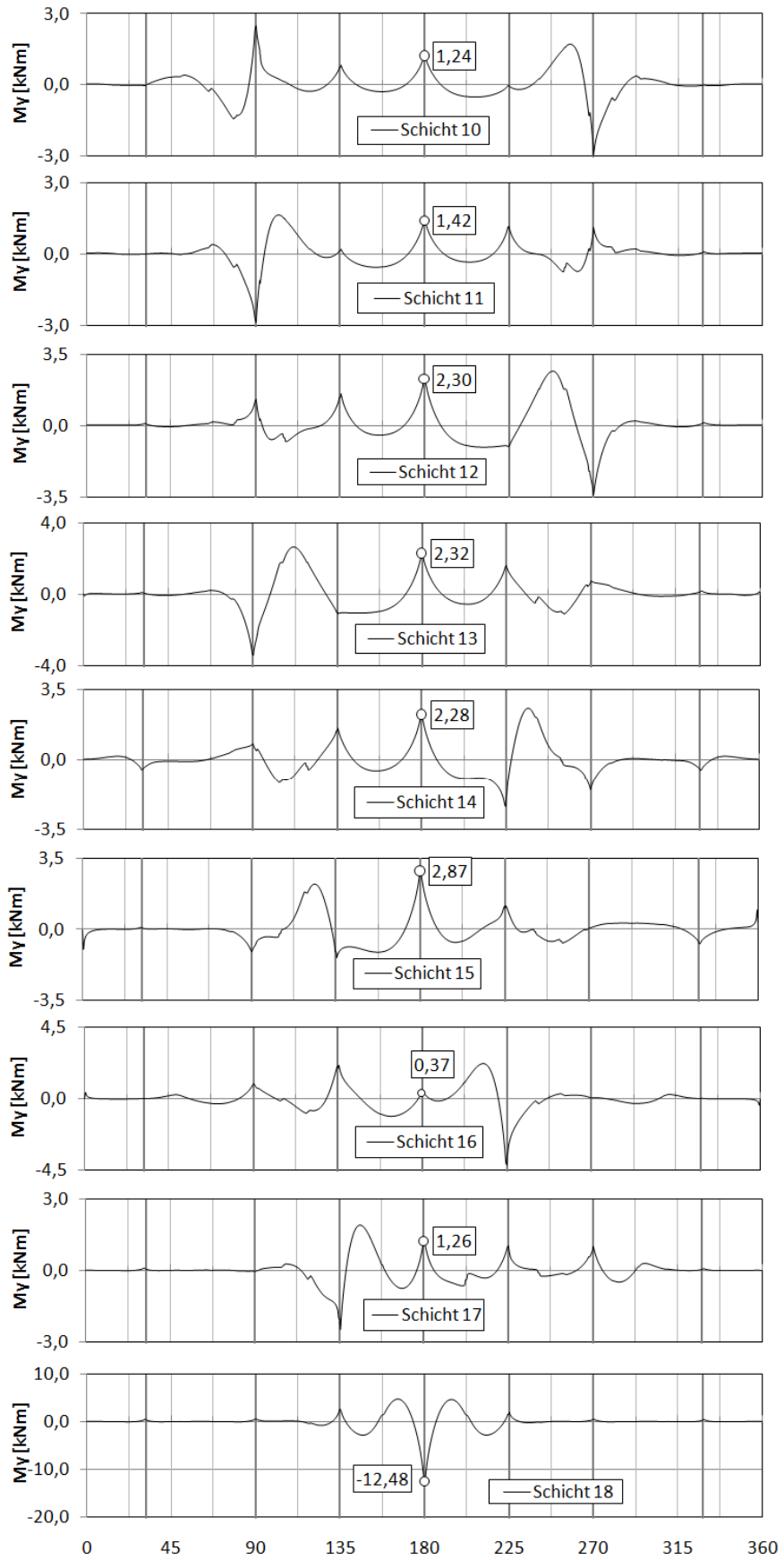


Abb. 112 Momentenverlauf einzeln/Schicht-10 bis Schicht-18 [kNm]

In der Abb. 113 ist noch die mitwirkende Schalenbreite für das ringversteifte Rohr dargestellt. Nach der Berechnung der mitwirkenden Schalenbreite werden für diesen Querschnitt der Schwerpunkt, das Trägheitsmoment und das Widerstandsmoment ermittelt (Abb. 113).

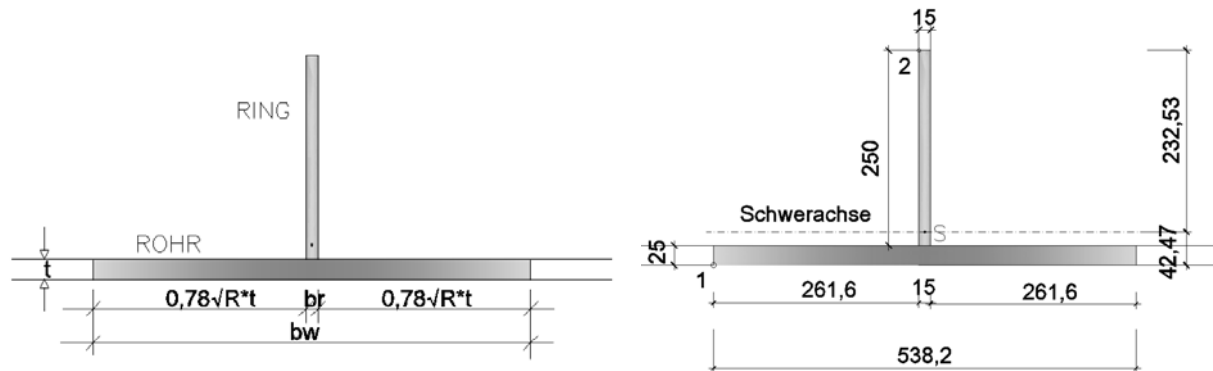


Abb. 113 Mitwirkende Schalenbreite für ringversteiften Querschnitt [mm]

$$I_{\text{Ring}} = 1953,13 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{Ring}} = 156,25 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$A_{\text{Ring}} = 37,5 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$I = 7567,75 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_1 = 1781,93 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_2 = 325,452 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

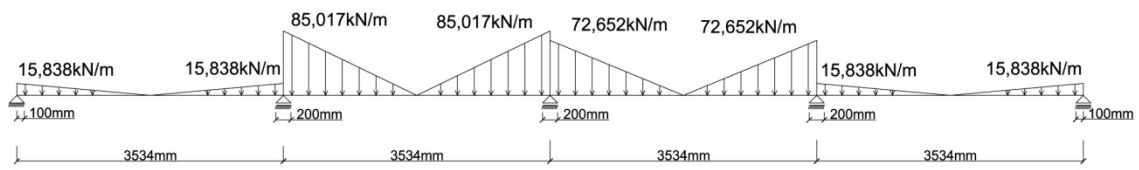
6.4.2 Ersatzmodell Schicht 17

In der Abb. 115 ist der Momentenverlauf im Beulring-2 für Schicht-17 gezeigt, der anhand Schalenmodells berechnet wurde. Aus der Ersatzberechnung mittels RuckZuck [10] (Abb. 114) sind die Auflagerkräfte und Biegemomente dargestellt. In der Abb. 114 a) ist das System eines gelenkig gelagerten 4-Feldträgers gezeigt, welches nahezu idente Stütz- und Feldmomente wie für den Stahl-Liner angibt (Abb. 115). Die zugehörigen Auflagerkräfte sind ebenfalls eingetragen. Diese Auflagerkräfte stellen nur den für den Biegemomentenverlauf zugehörigen Anteil an den Gesamtauflagerkräften dar. Somit dürfen nur diese Auflagerkraftanteile der Momenten- und Spannungsreduktion in den Stützenbereichen zugrunde gelegt werden. In der Abb. 114 c) sind die reduzierten Stützmomente unter Berücksichtigung der halben Auflagerbreite $b/2$ gezeigt. Die Reduktion für die Stützmomente beträgt am 4-Feldträger zwischen 9,8% (A2) und 17,4% (A3).

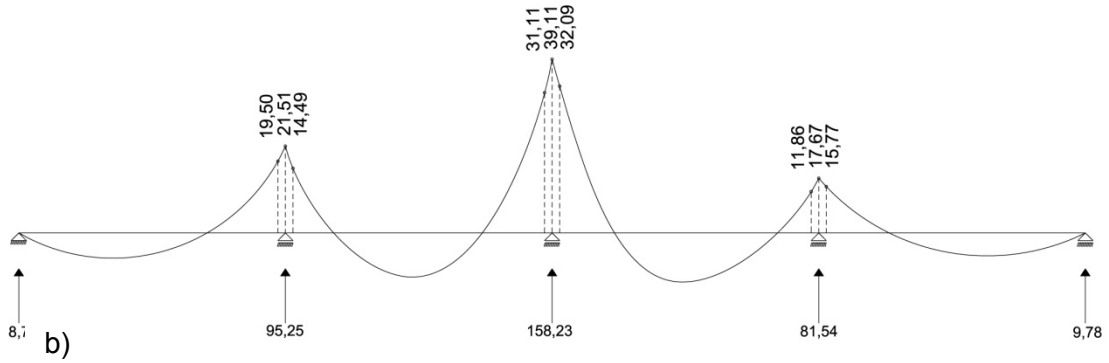
Die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen mit Gleichung (9) sind in Tab. 4 den genaueren Werten gegenübergestellt. Es zeigen sich bei A2 und A4 sehr ähnliche Werte, lediglich beim Mittelauger A3 liefert Gleichung (9) konservative Werte. Dadurch ist gezeigt, dass für die folgende Abminderung der Spannungsspitzen im Beulring-2 Gleichung (9) anwendbar ist. Somit darf man die Spitzenspannungen um den Betrag ΔM reduzieren.

Schicht 17	135°	180°	225°
b [m]	0,2	0,2	0,2
F_{Ed} [kN]	95,25	158,23	81,54
ΔM [kNm]	2,38	3,96	2,04
ΔM [%]	11,12%	10,11%	11,21%
ΔM [kNm][%] Ruckzuck	2,09 (9,8%)	6,78 (17,4%)	2,02 (11,5%)
M [kNm]	21,42	39,11	18,18
M_R [kNm]	19,04	35,15	16,14

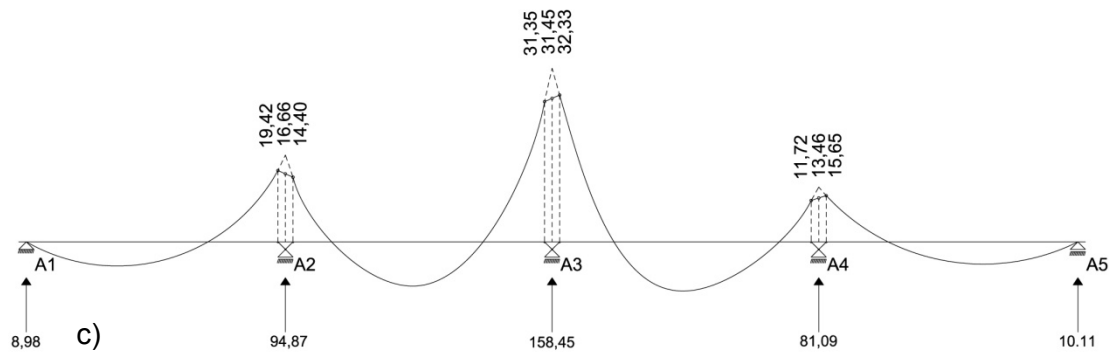
Tab. 4 Reduzierende Werte der Momente/Schicht 17



a)



b)



c)

Abb. 114 Ersatzmodell / Beulring/ Schicht-17

Auflager A2

$$\frac{19,42}{21,51} * 100\% = 90,2\%$$

$$\Delta M = 21,51 - 19,42 = 2,09\text{kNm} (9,8\%)$$

Auflager A3

$$\frac{32,33}{39,11} * 100\% = 82,6\%$$

$$\Delta M = 39,11 - 32,33 = 6,78\text{kNm} (17,4\%)$$

Auflager A3

$$\frac{15,65}{17,67} * 100\% = 88,5\%$$

$$\Delta M = 17,67 - 15,65 = 2,02\text{kNm} (11,5\%)$$

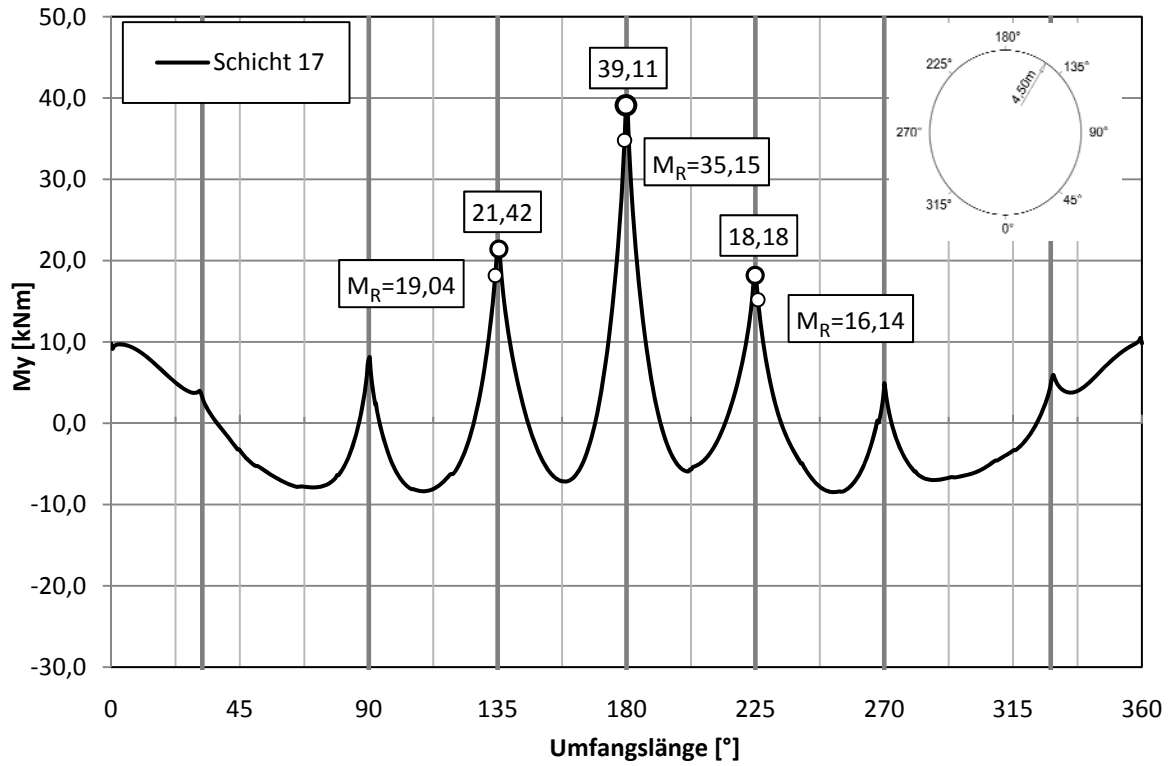


Abb. 115 Variante 5a: Beulring 2 / Momente My [kNm] / Schicht 17

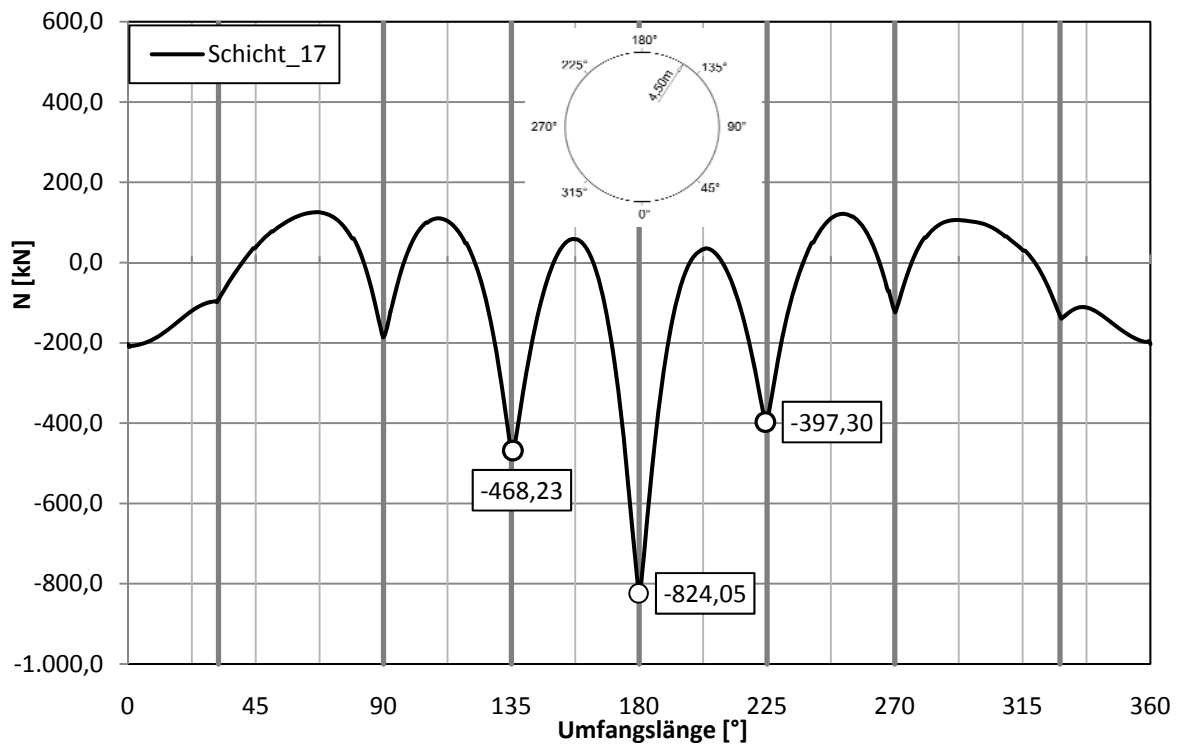


Abb. 116 Variante 5a: Beulring 2 / Normalkraft N [kN] / Schicht 17

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{N_{Ring}}{A_{Ring}} + \frac{M_{Ring}}{W_{ring}} \quad (10)$$

$$\Delta\sigma_M = \frac{\Delta M}{W_{ring}} \quad (11)$$

$$\sigma_R = \left(\frac{N_{Ring}}{A_{Ring}} + \frac{M_{Ring}}{W_{ring}} \right) * \left(1 - \frac{\Delta M}{M_{Ring}} \right) \quad (12)$$

σ_N Spannungsanteil aus der Normalkraft [N/mm²]

σ_M Spannungsanteil aus dem Moment [N/mm²]

$\Delta\sigma_M$ Reduzierter Spannungsanteil aus dem Moment [N/mm²]

N_{Ring} Normalkraft im Beulring [kN]

M_{Ring} Moment im Beulring [kNm]

A_{Ring} Querschnittsfläche des Beulringes [m²]

W_{ring} Widerstandsmoment des Beulringes [m³]

In der Tab. 5 wird die Reduktion der Spannungen für die Schicht-17 bei den Auflagern 135°, 180° und 225° tabellarisch dargestellt. Daraus resultiert, dass die Spannungen im Beulring-2 beim Auflager 135° um 29,11N/mm² oder etwa um 11,11%, beim Auflager 180° um 47,59N/mm² oder etwa um 10,13% und beim Auflager 225° um 24,94N/mm² oder etwa um 11,22% kleiner werden.

Schicht 17	N _{Ring} [kN]	M _{Ring} [kNm]	ΔM [kNm]	A _{Ring} [mm ²]	W _{Ring} [mm ³]	σ _N [N/mm ²]	σ _M [N/mm ²]	σ [N/mm ²]	σ _R [N/mm ²]	Δσ [N/mm ²]	Δσ [%]
135°	-468,23	-21,42	-2,38	3750	156250	-124,86	-137,09	-261,95	-232,84	-29,11	11,11%
180°	-824,00	-39,11	-3,96	3750	156250	-219,73	-250,30	-470,04	-422,44	-47,59	10,13%
225°	-397,30	-18,18	-2,04	3750	156250	-105,95	-116,35	-222,30	-197,35	-24,94	11,22%

Tab. 5 Reduzierung der Spannungen im Beulring 2/Schicht -17

6.4.3 Ersatzmodell Schicht 18

In der Abb. 119 ist der Momentenverlauf für Schicht-18 dargestellt, der anhand des Schalenmodells berechnet wurde. Aus der Ersatzberechnung mittels RuckZuck [10] (Abb. 117) sind die Auflagerkräfte Biegemomente dargestellt. In der Abb. 117 a) ist das System eines gelenkig gelagerten 4-Feldträgers gezeigt, welches nahezu idente Stütz- und Feldmomente wie für den Stahl-Liner angibt (Abb. 119). Die zugehörigen Auflagerkräfte sind ebenfalls eingetragen. Diese Auflagerkräfte stellen nur den für den Biegemomentenverlauf zugehörigen Anteil an den Gesamtauflagerkräften dar. Somit dürfen nur diese Auflagerkraftanteile der Momenten- und Spannungsreduktion in den Stützbereichen zugrunde gelegt werden. In der Abb. 117 c) sind die reduzierten Stützmomente unter Berücksichtigung der halben Auflagerbreite $b/2$ gezeigt. Die Reduktion für die Stützmomente beträgt am 4-Feldträger zwischen 11,5% (A4) und 20,6% (A2). Die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen mit Gleichung (9) sind in den Tab. 6 den genaueren Werten gegenübergestellt. Bei den Auflagern A2 und A3 liefert Gleichung (9) zu konservative Werte, lediglich bei A4 sich sehr ähnlichen Wert zeigt. Dadurch ist gezeigt, dass für die folgende Abminderung der Spannungsspitzen im Beulring-2 Gleichung (9) anwendbar ist. Somit darf man die Spitzenspannungen um den Betrag ΔM reduzieren.

Schicht 18	135°	180°	225°
b [m]	0,2	0,2	0,2
F_{ed} [kN]	108,91	114,25	87,75
ΔM [kNm]	2,72	2,86	2,19
ΔM [%]	11,54%	10,74%	11,10%
ΔM [kNm][%] Ruckzuck	4,98 (20,6%)	5,03 (17,4%)	3,21 (11,5%)
M [kNm]	23,59	26,60	19,76
M_R [kNm]	20,87	23,74	17,57

Tab. 6 Reduzierte Werte der Momente/Schicht 18

Ähnlich wie bei der Schicht-17 wird hier auch in der Tab. 7 die Reduktion der Spannungen für die Schicht-18 bei den Auflagern 135°, 180° und 225° tabellarisch dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die Spannungen im Beulring-2 beim Auflager 135° um 33,94N/mm² oder etwa 11,53%, beim Auflager 180° um 34,88N/mm² oder etwa 10,75% und beim Auflager 225° um 27,19N/mm² oder etwa 11,08% reduzieren.

Schicht 18	N _{Ring} [kN]	M _{Ring} [kNm]	ΔM [kNm]	A _{Ring} [mm ²]	W _{Ring} [mm ³]	σ _N [N/mm ²]	σ _M [N/mm ²]	σ [N/mm ²]	σ _R [N/mm ²]	Δσ [N/mm ²]	Δσ [%]
135°	-537,53	-23,59	-2,72	3750	156250	-143,34	-150,98	-294,32	-260,38	-33,94	11,53%
180°	-578,20	-26,60	-2,86	3750	156250	-154,19	-170,24	-324,43	-289,54	-34,88	10,75%
225°	-445,62	-19,76	-2,19	3750	156250	-118,83	-126,46	-245,30	-218,11	-27,19	11,08%

Tab. 7 Reduzierung der Spannungen im Beulring 2/Schicht -18

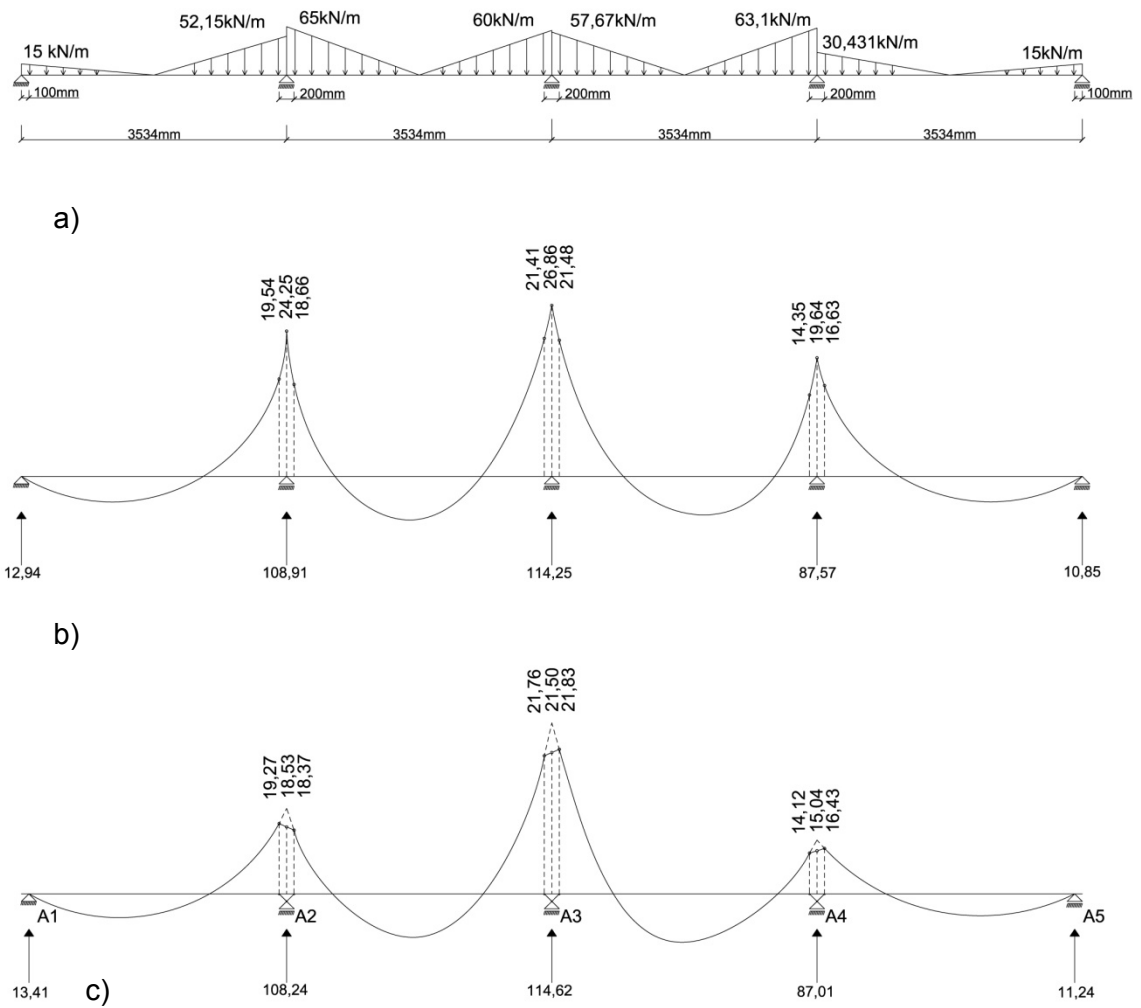


Abb. 117 Ersatzmodell / Beulring / Schicht 18

Auflager A2

$$\frac{19,27}{24,25} * 100\% = 79,4\%$$

$$\Delta M = 24,25 - 19,27 = 4,98\text{kNm} (20,6\%)$$

Auflager A3

$$\frac{21,83}{26,86} * 100\% = 81,2\%$$

$$\Delta M = 26,86 - 21,83 = 5,03\text{kNm} (17,4\%)$$

Auflager A3

$$\frac{16,43}{19,64} * 100\% = 83,6\%$$

$$\Delta M = 19,64 - 16,43 = 3,21\text{kNm} (11,5\%)$$

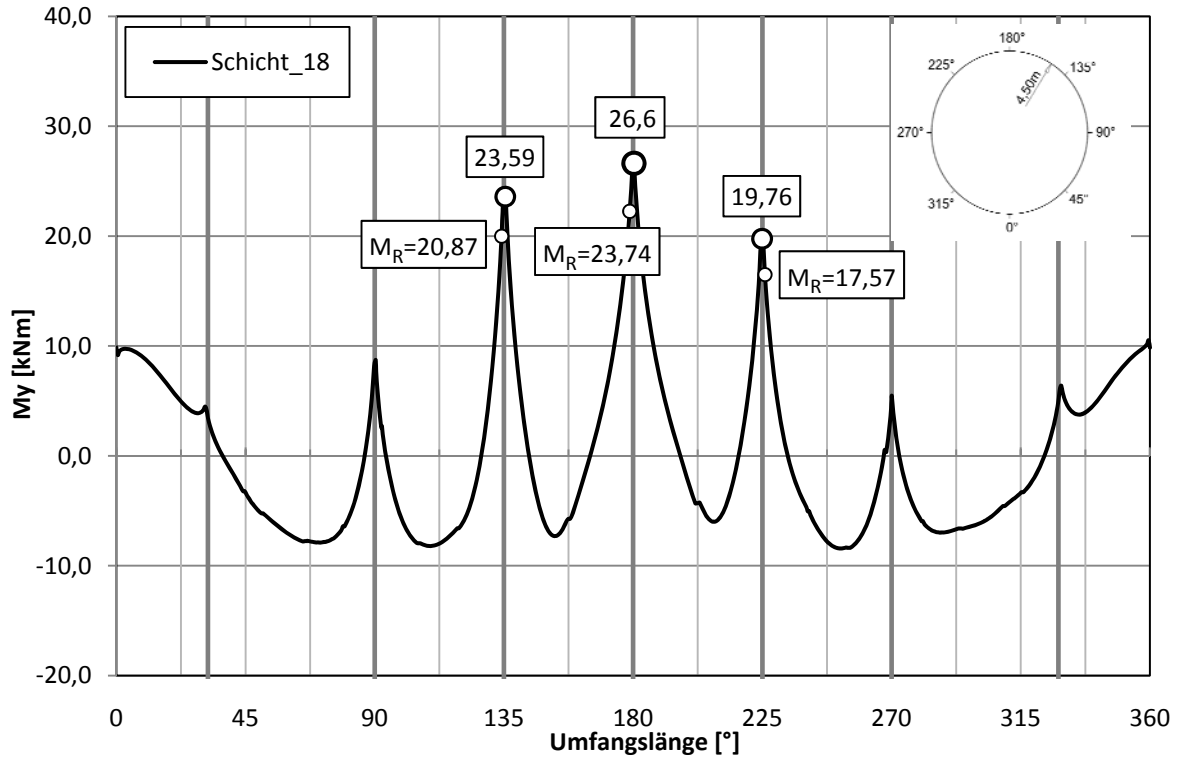


Abb. 118 Variante 5a: Beulring 2 / Momente My [kNm] / Schicht 18

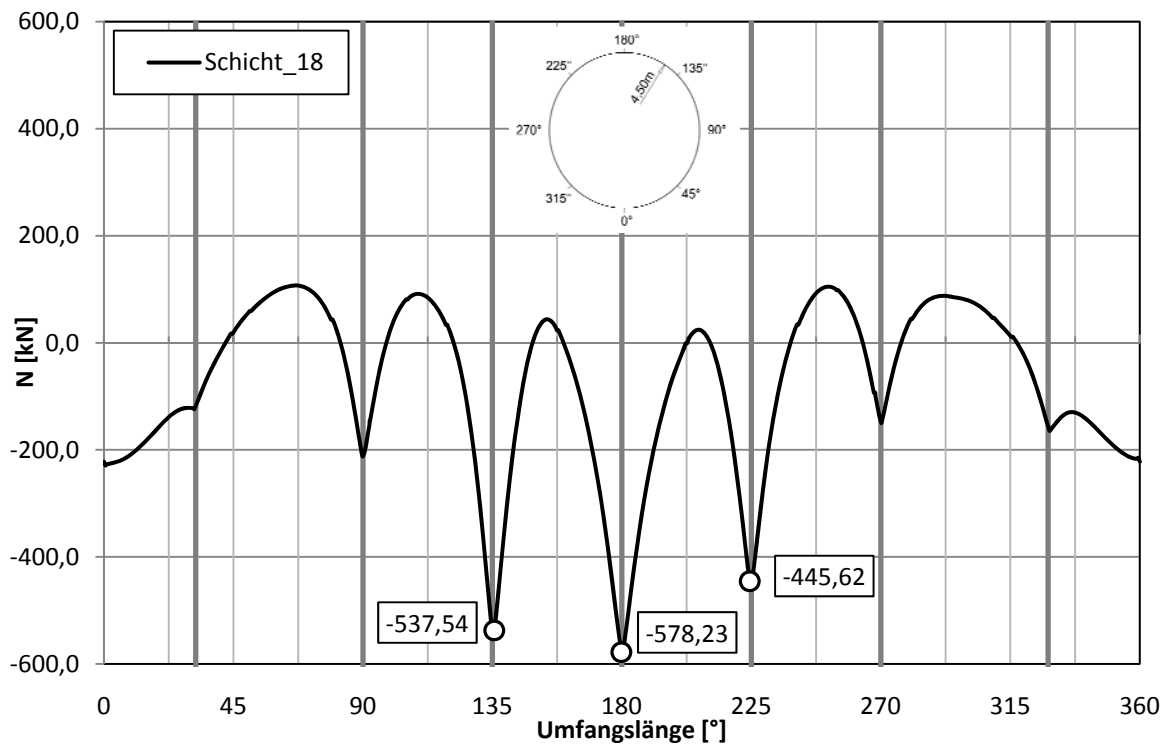


Abb. 119 Variante 5a: Beulring 2 / Normalkraft N [kN] / Schicht 18

	Schicht 0	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4	Schicht 5	Schicht 6	Schicht 7	Schicht 8	Schicht 9	Schicht 10	Schicht 11	Schicht 12	Schicht 13	Schicht 14	Schicht 15	Schicht 16	Schicht 17	Schicht 18	MAX
Beurling																				
σ_{oben} [N/mm ²]	-185,09	-123,78	-143,31	-169,92	-200,16	-229,83	-253,19	-276,74	-287,76	-298,11	-312,94	-329,93	-357,50	-385,22	-412,45	-446,87	-453,85	-470,03	-324,61	-470,03
σ_{unten} [N/mm ²]	-9,19	-14,83	-17,01	-20,04	-23,84	-25,80	-27,40	-27,46	-28,28	-26,70	-29,86	-28,84	-30,37	-29,78	-31,40	-32,88	-35,20	-39,39	-39,27	-39,39
u_z [mm]	-11,72	-11,72	-11,73	-11,73	-11,73	-11,73	-11,73	-11,72	-11,72	-11,72	-11,72	-11,72	-11,72	-11,72	-11,72	-11,71	-11,71	-11,71	-11,73	-11,73
Rohr																				
Schnitt S1 Ring 2																				
σ_x (außen) [N/mm ²]	-36,09	-44,69	-51,49	-60,12	-71,65	-78,28	-87,72	-104,09	-109,79	-117,03	-122,40	-126,56	-136,95	-137,90	-145,04	-130,33	-134,64	-140,35	-133,86	-145,04
σ_x (innen) [N/mm ²]	22,80	35,38	40,19	45,67	53,91	57,28	65,44	77,78	82,12	87,74	91,79	95,62	103,11	104,15	108,53	98,88	119,21	104,91	124,26	124,26
σ_y (außen) [N/mm ²]	-12,88	-24,95	-30,14	-35,12	-42,02	-44,68	-48,15	-47,37	-46,90	-44,07	-47,14	-43,92	-47,61	-47,31	-49,18	-48,88	-51,04	-56,54	-53,33	-56,54
σ_y (innen) [N/mm ²]	49,78	27,82	28,14	28,54	35,55	49,51	59,26	71,26	75,63	80,60	84,20	86,08	92,95	94,95	103,76	115,16	118,28	124,67	89,86	124,67
σ_v (außen) [N/mm ²]	31,68	44,07	50,77	59,04	70,29	75,86	84,67	96,71	101,99	108,63	113,26	116,61	125,93	127,08	133,94	120,70	124,59	134,14	127,62	134,14
σ_v (innen) [N/mm ²]	43,16	45,19	50,25	57,11	67,22	71,39	75,06	72,67	76,93	82,06	85,83	88,85	96,04	95,35	100,76	100,80	109,43	110,58	108,33	110,58
Schnitt S2 Symmetriebene außen																				
σ_x (außen) [N/mm ²]	-7,49	-15,45	-15,03	-15,28	-15,52	-15,82	-15,88	-15,64	-15,65	-15,65	-15,65	-15,44	-15,23	-15,08	-14,87	-14,74	-14,74	-14,75	-14,77	-15,88
σ_x (innen) [N/mm ²]	7,51	15,50	15,08	15,33	13,67	13,96	14,02	13,80	13,81	13,81	13,81	13,60	13,39	13,24	13,03	12,91	12,92	12,93	12,95	15,50
σ_y (außen) [N/mm ²]	-4,77	-12,63	-15,02	-21,94	-15,74	-16,22	-17,23	-17,83	-18,22	-19,52	-21,34	-21,96	-22,85	-23,37	-24,45	-24,82	-26,26	-27,04	-32,21	-32,21
σ_y (innen) [N/mm ²]	8,15	10,43	17,13	22,36	19,07	11,45	10,23	8,81	13,05	13,24	13,02	14,06	22,40	24,73	22,66	23,72	22,17	22,04	16,05	24,73
σ_v (außen) [N/mm ²]	7,80	14,25	13,97	20,20	18,91	19,93	19,18	19,65	20,38	19,93	22,13	24,88	26,16	28,75	30,84	31,91	30,56	28,56	32,03	32,03
σ_v (innen) [N/mm ²]	8,90	13,68	14,93	19,38	23,38	23,26	21,57	22,65	21,23	21,86	23,52	24,36	24,72	25,18	26,15	26,20	25,97	26,68	31,48	31,48
u_z [mm]	11,83	11,61	11,58	11,47	11,34	11,23	11,13	11,04	10,99	10,95	10,90	10,83	10,73	10,63	10,54	10,41	10,36	10,19	10,91	11,83
u_x [mm]	0,01	0,02	0,13	0,22	0,28	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33

Tab. 8 Tabelle der Hauptergebnisse

6.5 Berechnung der Ovalität

6.5.1 Allgemein

Unter Ovalität versteht man die Abweichung von der idealen Kreisform der Rohrschale. Dadurch, dass es sich hier um Stahlrohre handelt, die einen sehr großen Durchmesser besitzen, wird die Tatsache, wie groß diese Abweichung von der Kreisform tatsächlich ist, von wesentlicher Bedeutung sein. Für die Berechnung der Ovalität wurde [4] (*European Committee for Boilermaking and Kindred Steel Structures*) verwendet (Abb. 120). Laut [4] wird die maximale Ovalität folgendermaßen berechnet.

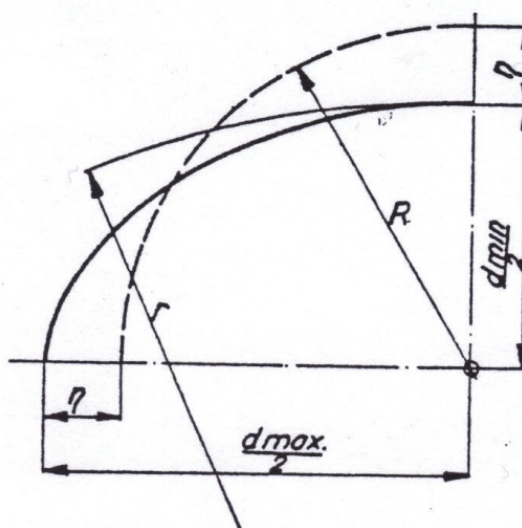


Abb. 120 Ovalität laut [4]

$$\eta_{\max} = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{4} < \eta_{\text{zul}} = 0,01 \cdot R_i [\text{mm}] \quad (13)$$

mit:

η_{\max}	maximale Ovalität
η_{zul}	zulässige Ovalität
d_{\max}	maximale Durchmesser
d_{\min}	minimale Durchmesser
R	Rohrdurchmesser

Die Berechnung der Ovalität wurde am Schnitt S2 für zwei verschiedene Fälle durchgeführt. Weil die Verformungen aus dem Eigengewicht den größten Anteil der gesamten Verformungen liefern, werden im ersten Fall die Verformungen aus dem Lastfall des Eigengewichtes berücksichtigt, während im zweiten Fall die Verformungen aus dem Eigengewicht ausgeschlossen werden. Die Verformungen werden in drei verschiedenen ungünstigsten Spannungsachsen abgelesen, um die Ovalität an den ungünstigsten Positionen zu ermitteln. Diese Achsen sind in Abb. 121 dargestellt.

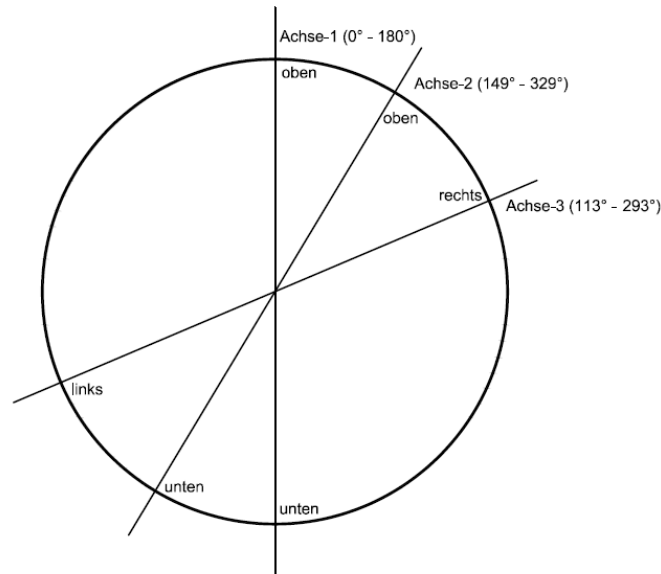


Abb. 121 Richtung der Achsen 1,2,3 zur Ermittlung der Ovalität

6.5.2 Ovalität inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht

Um die Ovalität zu berechnen, brauchen wir die Verformungen für die drei festgestellten (ungünstigsten) Achsen. In der Tab. 9 wird die Entwicklung der Verformungen für jeden Montagezustand inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht und auch die maximal und minimal auftretenden Werten dargestellt. Wie man aus der Tabelle sieht, tritt der größte Wert der Verformung in Achse_1 auf.

Für die Berechnung der Ovalität müssen wir für die drei Achsen einen maximalen und minimalen Durchmesser ermitteln (Tab. 10). Der maximale Wert der Ovalität wurde während des ersten Betonierschrittes gemessen. In die Gleichung (13) eingesetzt, ergibt sich eine maximale Ovalität von 7,6 mm, die deutlich kleiner ist als der zulässige Wert, der laut [4] auf 1% des Radius des Rohres begrenzt wurde.

$$d_{\max_1} = U_{1,\text{bott}} + U_{1,\text{top}} = 5,44\text{mm} + 11,53\text{mm} = 16,97\text{mm}$$

$$d_{\min_3} = U_{3,\text{bott}} + U_{3,\text{top}} = -8,633\text{mm} - (-4,73\text{mm}) = -13,42\text{mm}$$

$$\eta_{.13} = \frac{16,97 - (-13,42)}{4,0} = 7,6\text{mm} < \eta_{\text{zul}} = 0,01 \cdot 4500 = 45\text{mm} \dots (AN = 17\%)$$

Nach dem Einbau (Schicht_18) beträgt die Ovalität einen Wert von 7,28mm:

$$d_{\max_1} = U_{1,\text{bott}} + U_{1,\text{top}} = 5,11\text{mm} + 10,56\text{mm} = 15,67\text{mm}$$

$$d_{\min_3} = U_{3,\text{bott}} + U_{3,\text{top}} = -7,8\text{mm} - (-5,66\text{mm}) = -13,46\text{mm}$$

$$\eta_{.13} = \frac{15,67 - (-13,46)}{4,0} = 7,28\text{mm} < \eta_{\text{zul}} = 0,01 \cdot 4500 = 45\text{mm} \dots (AN = 16,2\%)$$

SLS	U _{r,cyl} [mm]					
	axis_1 = 0° - 180°		axis_2 = 149° - 329°		axis_3 = 113° - 293°	
	1_bottom	1_top	2_bottom	2_top	3_left	3_right
Schicht_0	1,05	11,83	-0,46	9,45	-7,70	-4,89
Schicht_1	5,44	11,53	1,33	9,15	-8,63	-4,79
Schicht_2	5,24	11,38	1,70	9,00	-8,48	-4,91
Schicht_3	5,18	11,26	1,64	8,88	-8,76	-5,09
Schicht_4	5,13	11,13	1,56	8,71	-8,16	-5,19
Schicht_5	5,08	11,01	1,51	8,60	-8,56	-5,51
Schicht_6	5,07	10,91	1,49	8,48	-7,86	-5,65
Schicht_7	5,07	10,81	1,56	8,39	-7,95	-5,96
Schicht_8	5,07	10,76	1,56	8,33	-7,54	-6,03
Schicht_9	5,07	10,72	1,56	8,29	-7,73	-6,14
Schicht_10	5,07	10,66	1,56	8,24	-7,75	-6,25
Schicht_11	5,06	10,59	1,56	8,11	-7,72	-5,91
Schicht_12	5,06	10,49	1,55	8,02	-7,73	-6,11
Schicht_13	5,06	10,39	1,53	7,78	-7,74	-5,55
Schicht_14	5,12	10,29	1,52	7,59	-7,75	-5,95
Schicht_15	5,11	10,16	1,55	7,31	-7,62	-5,50
Schicht_16	5,11	10,10	1,55	7,04	-7,69	-5,63
Schicht_17	5,11	9,85	1,55	7,30	-7,79	-5,64
Schicht_18	5,11	10,56	1,54	7,16	-7,80	-5,66
Min Uz,cyl	1,05	9,85	-0,46	7,04	-8,76	-6,25
Max Uz,cyl	5,44	11,83	1,70	9,45	-7,54	-4,79
Σ _{exkl. Schicht_0}	4,06	-1,27	2,00	-2,29	-0,10	-0,77
Σ _{inkl. Schicht_0}	5,11	10,56	2,50	7,16	-7,80	-6,38

Tab. 9 Radialverformungen im Schnitt S2 inkl. Eigengewicht

	Δ, Di_1	Δ, Di_2	Δ, Di_3	η_{12}	η_{13}	η_{23}	AN_12	AN_13	AN_23	η_{max}	AN
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]
Schicht_0	12,88	8,99	-12,59	0,973	6,368	5,395	0,022	0,142	0,120	6,368	0,142
Schicht_1	16,97	10,48	-13,42	1,623	7,598	5,975	0,036	0,169	0,133	7,598	0,169
Schicht_2	16,62	10,70	-13,39	1,480	7,503	6,023	0,033	0,167	0,134	7,503	0,167
Schicht_3	16,44	10,52	-13,85	1,479	7,572	6,093	0,033	0,168	0,135	7,572	0,168
Schicht_4	16,26	10,27	-13,35	1,497	7,402	5,905	0,033	0,164	0,131	7,402	0,164
Schicht_5	16,09	10,11	-14,07	1,494	7,539	6,045	0,033	0,168	0,134	7,539	0,168
Schicht_6	15,98	9,97	-13,51	1,502	7,372	5,870	0,033	0,164	0,130	7,372	0,164
Schicht_7	15,88	9,95	-13,91	1,482	7,447	5,965	0,033	0,165	0,133	7,447	0,165
Schicht_8	15,83	9,89	-13,57	1,485	7,349	5,864	0,033	0,163	0,130	7,349	0,163
Schicht_9	15,79	9,85	-13,87	1,485	7,414	5,929	0,033	0,165	0,132	7,414	0,165
Schicht_10	15,73	9,80	-14,00	1,482	7,432	5,949	0,033	0,165	0,132	7,432	0,165
Schicht_11	15,65	9,67	-13,63	1,497	7,321	5,824	0,033	0,163	0,129	7,321	0,163
Schicht_12	15,55	9,57	-13,84	1,496	7,347	5,852	0,033	0,163	0,130	7,347	0,163
Schicht_13	15,45	9,31	-13,29	1,534	7,184	5,649	0,034	0,160	0,126	7,184	0,160
Schicht_14	15,41	9,11	-13,70	1,574	7,276	5,702	0,035	0,162	0,127	7,276	0,162
Schicht_15	15,27	8,86	-13,12	1,602	7,096	5,494	0,036	0,158	0,122	7,096	0,158
Schicht_16	15,21	8,59	-13,32	1,654	7,131	5,476	0,037	0,158	0,122	7,131	0,158
Schicht_17	14,96	8,85	-13,43	1,527	7,096	5,569	0,034	0,158	0,124	7,096	0,158
Schicht_18	15,67	8,70	-13,46	1,741	7,281	5,540	0,039	0,162	0,123	7,281	0,162
Min	12,88	8,59	-14,07	0,973	6,368	5,395	0,022	0,142	0,120	6,368	0,142
Max	16,97	10,70	-12,59	1,741	7,598	6,093	0,039	0,169	0,135	7,598	0,169

Tab. 10 Die Ovalität inkl. Eigengewicht

6.5.3 Die Ovalität exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht

In der Tab. 11 wird die Entwicklung der Verformungen für jeden Montagezustand exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht und der maximalen und minimalen auftretenden Werte dargestellt. Aus der Tab. 11 ist ersichtlich, dass der größte Wert der Verformung in Achse-1 auftritt. Der maximale Wert der Ovalität wurde sowohl für die Verformungen inkl. Eigengewicht als auch für die Verformungen exkl. Eigengewicht während des ersten Betonierschrittes gemessen. Der maximale Wert der Ovalität bleibt auch unter dem zulässigen Wert laut [4]

$$d_{\max_1} = U_{1, \text{bott}} + U_{1, \text{top}} = 4,39\text{mm} + (-0,3\text{mm}) = 4,09\text{mm}$$

$$d_{\min_3} = U_{3, \text{bott}} + U_{3, \text{top}} = -0,93\text{mm} + 0,1\text{mm} = -0,83\text{mm}$$

$$\eta_{-13} = \frac{4,09 - (-0,83)}{4,0} = 1,23\text{mm} < \eta_{zul} = 0,01 \cdot 4500 = 45\text{mm} (AN = 3\%)$$

Nach dem Einbau (Schicht_18) beträgt die Ovalität einen Wert von 1,18mm:

$$d_{\max_1} = U_{1,bott} + U_{1,top} = 4,057\text{ mm} + (-1,27\text{ mm}) = 2,79\text{ mm}$$

$$d_{\min_2} = U_{2,bott} + U_{2,top} = 0,364\text{ mm} - 2,29\text{ mm} = -1,93\text{ mm}$$

$$\eta_{-12} = \frac{2,79 - (-1,93)}{4,0} = 1,18\text{ mm} < \eta_{zul} = 0,01 \cdot 4500 = 45\text{ mm} (AN = 2,6\%)$$

SLS	U _{r,cyl} [mm]					
	axis_1 = 0° - 180°		axis_2 = 149° - 329°		axis_3 = 113° - 293°	
	1_bottom	1_top	2_bottom	2_top	3_left	3_right
Schicht_0	1,050	11,830	-0,460	9,450	-7,700	-4,890
Schicht_1	4,390	-0,300	0,150	-0,300	-0,930	0,100
Schicht_2	4,190	-0,450	0,520	-0,450	-0,780	-0,020
Schicht_3	4,126	-0,570	0,460	-0,570	-1,060	-0,200
Schicht_4	4,076	-0,700	0,380	-0,740	-0,460	-0,300
Schicht_5	4,026	-0,820	0,330	-0,850	-0,860	-0,620
Schicht_6	4,016	-0,920	0,310	-0,970	-0,160	-0,760
Schicht_7	4,016	-1,020	0,380	-1,060	-0,250	-1,070
Schicht_8	4,016	-1,070	0,377	-1,120	0,160	-1,140
Schicht_9	4,016	-1,110	0,377	-1,160	-0,030	-1,250
Schicht_10	4,016	-1,170	0,377	-1,210	-0,050	-1,360
Schicht_11	4,012	-1,240	0,375	-1,340	-0,020	-1,020
Schicht_12	4,012	-1,340	0,370	-1,430	-0,027	-1,220
Schicht_13	4,007	-1,440	0,350	-1,670	-0,037	-0,660
Schicht_14	4,067	-1,540	0,340	-1,860	-0,047	-1,060
Schicht_15	4,057	-1,670	0,370	-2,140	0,085	-0,610
Schicht_16	4,057	-1,730	0,370	-2,410	0,015	-0,740
Schicht_17	4,057	-1,980	0,370	-2,150	-0,085	-0,750
Schicht_18	4,057	-1,270	0,364	-2,290	-0,095	-0,770
Min Uz,cyl	4,0	-2,0	0,2	-2,4	-1,1	-1,4
Max Uz,cyl	4,4	-0,3	0,5	-0,3	0,2	0,1
Σ exkl. Schicht_0	4,0	-2,0	0,2	-2,4	-1,1	-1,4
Σ exkl. Schicht_0	4,4	-0,3	0,5	-0,3	0,2	0,1

Tab. 11 Radialverformungen im Schnitt S2 exkl. Eigengewicht

	Δ, Di_1	Δ, Di_2	Δ, Di_3	η_{12}	η_{13}	η_{23}	AN_12	AN_13	AN_23	η_{max}	AN
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]
Schicht_0	12,88	8,99	-12,59	0,973	6,368	5,395	0,022	0,142	0,120	6,368	0,142
Schicht_1	4,09	-0,15	-0,83	1,060	1,230	0,170	0,024	0,027	0,004	1,230	0,027
Schicht_2	3,74	0,07	-0,80	0,918	1,135	0,218	0,020	0,025	0,005	1,135	0,025
Schicht_3	3,56	-0,11	-1,26	0,917	1,204	0,288	0,020	0,027	0,006	1,204	0,027
Schicht_4	3,38	-0,36	-0,76	0,934	1,034	0,100	0,021	0,023	0,002	1,034	0,023
Schicht_5	3,21	-0,52	-1,48	0,932	1,172	0,240	0,021	0,026	0,005	1,172	0,026
Schicht_6	3,10	-0,66	-0,92	0,939	1,004	0,065	0,021	0,022	0,001	1,004	0,022
Schicht_7	3,00	-0,68	-1,32	0,919	1,079	0,160	0,020	0,024	0,004	1,079	0,024
Schicht_8	2,95	-0,74	-0,98	0,922	0,982	0,059	0,020	0,022	0,001	0,982	0,022
Schicht_9	2,91	-0,78	-1,28	0,922	1,047	0,124	0,020	0,023	0,003	1,047	0,023
Schicht_10	2,85	-0,83	-1,41	0,920	1,064	0,144	0,020	0,024	0,003	1,064	0,024
Schicht_11	2,77	-0,97	-1,04	0,934	0,953	0,019	0,021	0,021	0,000	0,953	0,021
Schicht_12	2,67	-1,06	-1,25	0,933	0,980	0,047	0,021	0,022	0,001	0,980	0,022
Schicht_13	2,57	-1,32	-0,70	0,972	0,816	-0,156	0,022	0,018	0,003	0,972	0,022
Schicht_14	2,53	-1,52	-1,11	1,012	0,909	-0,103	0,022	0,020	0,002	1,012	0,022
Schicht_15	2,39	-1,77	-0,53	1,039	0,728	-0,311	0,023	0,016	0,007	1,039	0,023
Schicht_16	2,33	-2,04	-0,73	1,092	0,763	-0,329	0,024	0,017	0,007	1,092	0,024
Schicht_17	2,08	-1,78	-0,84	0,964	0,728	-0,236	0,021	0,016	0,005	0,964	0,021
Schicht_18	2,79	-1,93	-0,87	1,178	0,913	-0,265	0,026	0,020	0,006	1,178	0,026
Min	2,08	-2,04	-1,48	0,917	0,728	-0,329	0,020	0,016	0,000	0,953	0,021
Max	4,09	0,07	-0,53	1,178	1,230	0,288	0,026	0,027	0,007	1,230	0,027

Tab. 12 Ovalität exkl. Eigengewicht

Aus dem Vergleich der oben ermittelten Ovalitäten inkl. bzw. exkl. des Eigengewichts ist ersichtlich, dass eine Kompensation der Eigengewichtsverformung vor Beginn der Betonierarbeiten zu deutlich kleineren Werten der Ovalität führt. Somit ist für die praktische Ausführung eine Kompensation der Eigengewichtsverformungen sehr empfohlen.

6.6 Berechnung der Unrundheit

6.6.1 Allgemein

Eine weitere und auch wichtige Aufgabe ist die Berechnung der Unrundheit des Stahlrohres. Laut [4] (*European Committee for Boilermaking and Kindred Steel Structures*) wird die Unrundheit mittels einer Schablone gemäß Abb. 122 mit einer Länge von nicht weniger als $b=R/2$ jedoch nicht mehr als $b=400\text{mm}$ geprüft.

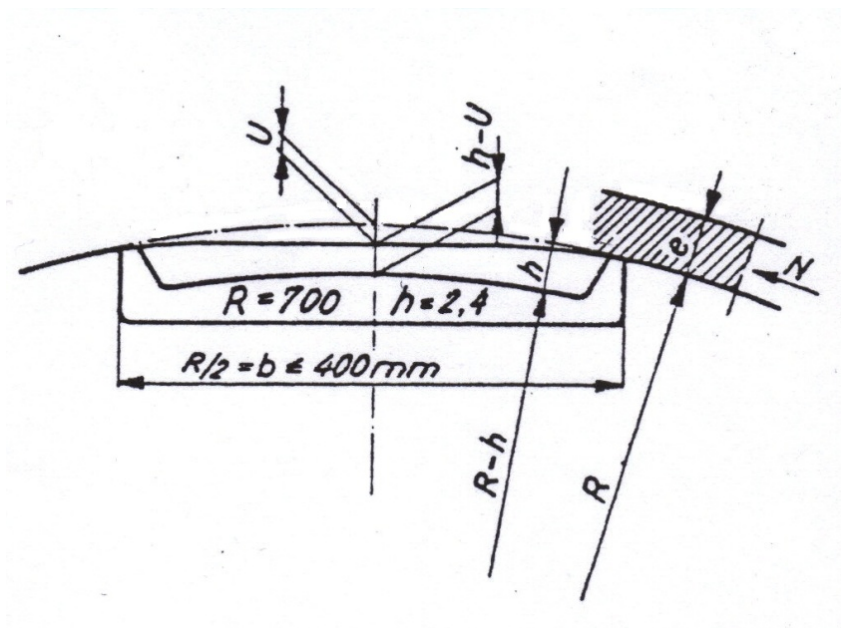


Abb. 122 Die Unrundheit laut [4]

In unserem Fall besitzt unser Stahlrohr einen Radius von $R=4500\text{mm}$ und die Hälfte davon beträgt $2250\text{mm} > 400\text{mm}$. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden wir zwei Schablonen ermitteln:

- Fall 1. $b = 400\text{mm}$ (Schablone 1)
- Fall 2. $b = R/2 = 2250\text{mm}$ (Schablone 2)

Da die Ergebnisse in Abhängigkeit des Umfangswinkels auszuwerten sind, wurde für die beiden Fälle jeweils ein bestimmter Winkel berechnet. Aus dem Fall 1 bekommen wir einen Winkel von etwa 5° , und aus dem Fall 2 bekommen wir einem größeren Winkel von ca. 29° . Mit diesen zwei ermittelten Winkeln (Schablone) wird auf dem Endverformungsdiagramm in Umfangsrichtung iteriert, um die maximale Unrundheit zu bestimmen (Abb. 123). Die ermittelte Unrundheit aus der ersten Schablone ergibt im Vergleich zur Unrundheit aus der zweiten Schablone deutlich kleinere Werte. Aus diesem Grund wird im Weiteren nur die Unrundheit aus der zweiten Schablone näher erläutert. Ähnlich wie bei der Ermittlung der Ovalität, welche für zwei verschiedene Fälle erläutert wurde, wird auch die Bestimmung der Unrundheit zweimal durchgeführt. Im ersten Fall werden auch die Verformungen aus dem Eigenwicht mitberücksichtigt, während diese im zweiten Fall ausgeschlossen werden.

Der maximale Wert der Unrundheit laut [4] darf nicht den Wert von $0,1 \cdot t$ Dicke des Rohres überschreiten. Andernfalls sind lokalen Wirkungen aus erhaltener Unrundheit in den zulässigen Spannungsbemessungswerten zusätzlich zu berücksichtigen, was jedoch baupraktisch weder von Bauherren noch Auftragnehmer gewünscht ist.

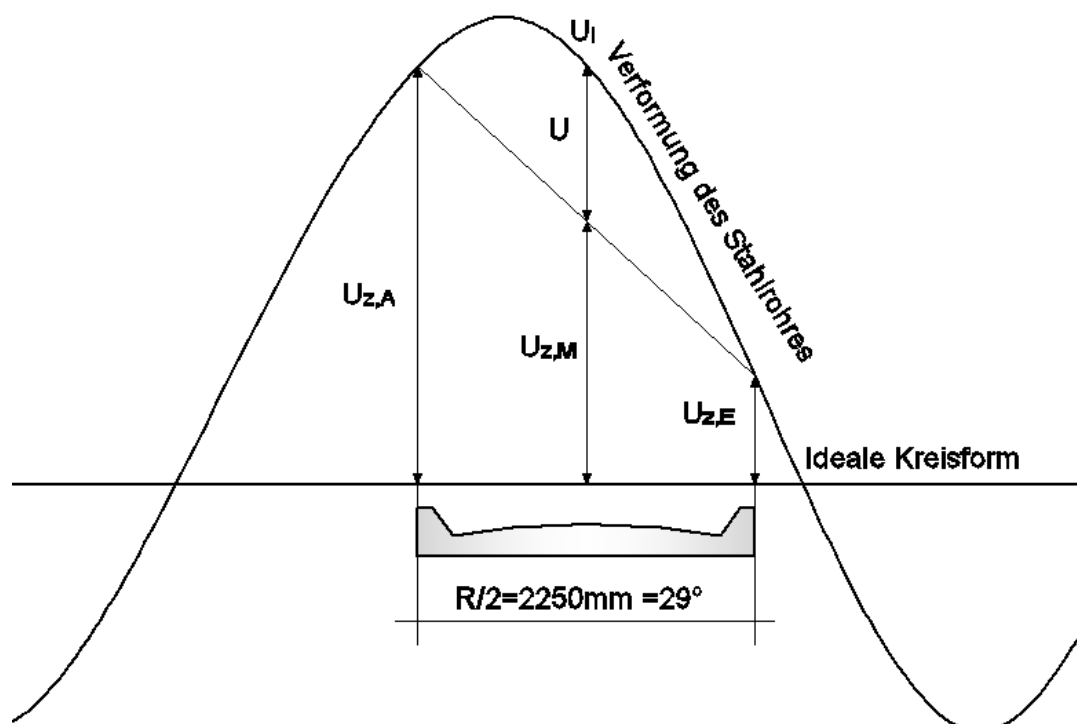


Abb. 123 Bestimmung der Unrundheit des Stahlrohres

$$U_{z,M} = \frac{U_{z,A} + U_{z,E}}{2} \quad (14)$$

$$U = U_{,i} - U_{z,M} \quad (15)$$

$U_{z,A}$ Anfangsverformung

$U_{z,E}$ Endverformung

$U_{z,M}$ Verformung im Mittelpunkt

$U_{,i}$ Verformung im Punkt der gesuchten Unrundheit

U Unrundheit im Punkt M

6.6.2 Unrundheit inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht mit Schablone $b=R/2$

Wenn wir für die Ermittlung der Unrundheit auch die Verformungen aus dem Eigengewicht berücksichtigen, kommt man für den Endzustand (Schicht_18) auf einen maximalen Wert von 1,45mm, der beim Winkel von 179° auftritt (Abb. 124). Warum dieser maximale Wert bei einem Winkel von 179° auftritt, erklärt sich als Folge des Eigengewichtes, währenddessen sich das Stahlrohr in eine Ei-Form verformt. Am Firstpunkt werden Verformungen von 11,7mm gemessen. Der zulässige Wert der Unrundheit beträgt 2,5mm.

$$U_{zul} = 0,1 * t_{rohr} = 0,1 * 25mm = 2,5mm$$

$$U_{max} = 1,45mm < U_{zul} = 2,5[mm]$$

Der Nachweis wurde erfüllt.

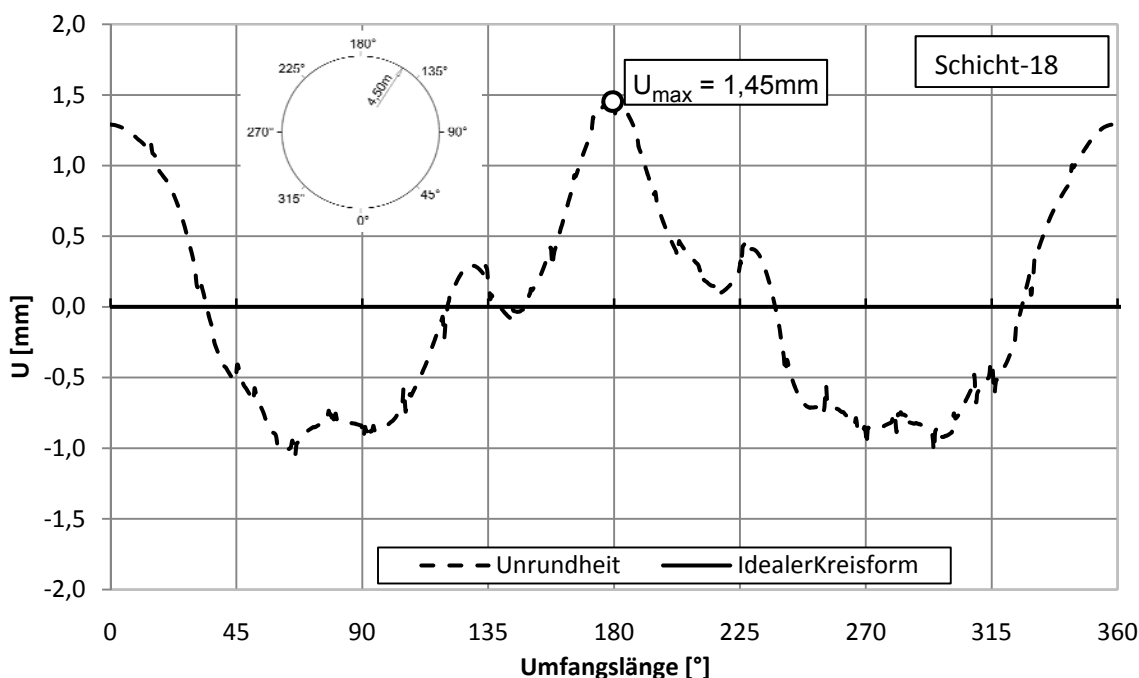


Abb. 124 Die maximale Stelle der Unrundheit inkl. Eigengewicht

UNRUNDHEIT INKL. VERFORMUNGEN AUS DEM EIGENGEWICHT														
Position	0°	30°	60°	90°	120°	150°	179°	210°	240°	270°	300°	330°	360°	Max
$U_{z,A}$ [mm]	3,94	3,82	-4,05	-8,42	-5,47	2,35	9,17	9,35	2,53	-5,44	-8,13	-3,74	3,94	9,35
$U_{z,E}$ [mm]	4,00	-3,93	-8,40	-5,53	2,24	9,17	9,71	2,78	-5,30	-8,15	-3,89	3,75	4,00	9,71
$U_{z,M}$ [mm]	3,97	-0,06	-6,23	-6,98	-1,62	5,76	9,44	6,07	-1,39	-6,80	-6,01	0,00	3,97	9,44
U_i [mm]	5,26	0,24	-7,23	-7,86	-1,67	5,86	10,89	6,37	-1,61	-7,70	-6,92	0,26	5,26	10,89
U [mm]	1,29	0,30	-1,00	-0,89	-0,06	0,10	1,45	0,31	-0,23	-0,91	-0,91	0,26	1,29	1,45

Tab. 13 Unrundheit inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht an verschiedenen Stellen

6.6.3 Unrundheit exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht mit Schablone $b=R/2$

Im Unterschied zur Unrundheit inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht bei Schicht_18, tritt hier eine andere Stelle der für die maximale Unrundheit auf (Abb. 125). Während der ersten Betonierphase wird eine Verformung von 4,2mm nach innen im unteren Teil des Rohres gemessen. Aufgrund dessen tritt auch die größte gemessene Unrundheit am Fußpunkt auf. Der maximale Wert der Unrundheit beträgt 1,15mm.

$$U_{zul} = 0,1 * t_{,rohr} = 0,1 * 25mm = 2,5mm$$

$$U_{max} = 1,15mm < U_{zul} = 2,5[mm]$$

Der Nachweis wurde erfüllt.

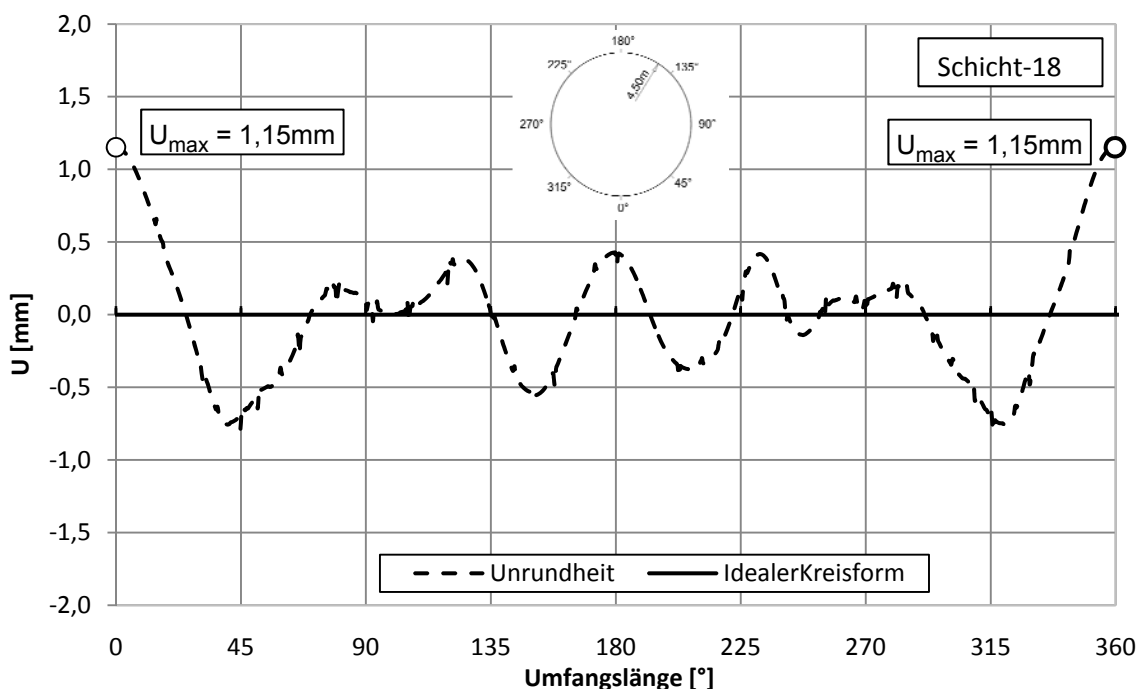


Abb. 125 Die maximale Stelle der Unrundheit exkl. Eigengewicht

UNRUNDHEIT EXKL. VERFORMUNGEN AUS DEM EIGENGEWICHT														
Position	0°	30°	60°	90°	120°	150°	179°	210°	240°	270°	300°	330°	360°	Max
U _{z,A} [mm]	3,02	2,94	-1,15	-0,83	-0,58	-1,17	-1,45	-1,32	-0,84	-0,44	-0,62	-1,00	3,02	3,02
U _{z,E} [mm]	3,08	-1,20	-0,86	-0,47	-1,09	-1,45	-1,25	-0,79	-0,43	-0,59	-0,99	2,87	3,08	3,08
U _{z,M} [mm]	3,05	0,87	-1,01	-0,65	-0,84	-1,31	-1,35	-1,06	-0,64	-0,52	-0,81	0,94	3,05	3,05
U _i [mm]	4,20	0,58	-1,42	-0,58	-0,46	-1,85	-1,85	-1,42	-0,50	-0,45	-1,14	0,60	4,20	4,20
U [mm]	1,15	-0,29	-0,41	0,07	0,37	-0,54	-0,50	-0,37	0,14	0,07	-0,33	-0,33	1,15	1,15

Tab. 14 Unrundheit exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht an verschiedenen Stellen

6.7 Beschreibung der Auflagerkräfte

Für die gesamte Hinterfüllung der Stahl-Liner-Konstruktion mit Beton sind wie beschrieben insgesamt 18 Betonierphasen erforderlich. Jede Betonierphase hat ein eigenes Berechnungsmodell, das mit dem Programm SCIA-Engineer [9] modelliert wurde. Auf diese Weise können für jede Betonierphase die maximal auftretenden Auflagerkräfte getrennt ermittelt werden. Um die endgültigen Auflagerkräfte zu ermitteln, werden die Auflagerkräfte des vorherigen Betoniervorganges im Modell in den nächsten Betonierschritt über eine nichtlineare Eingabe als Vorspannung eingegeben. Durch diese Koppelung erreicht man eine kontinuierliche Rechenvorschrift und eine Abhängigkeit zwischen den einzelnen Modellen. In den folgenden Tabellen Tab. 15 und Tab. 16 wird die Entwicklung der Auflagerkräfte von Schicht-0 bis Schicht-18 sowohl für die ULS- als auch für die SLS-Nachweise dargestellt. Aus der Tab. 15 und Tab. 16 ist zu erkennen, dass für die Aufnahme des Eigengewichtes des Stahlrohres nur 2 Auflager (31° und 329°) wirksam sind. Das Auflager am Fußpunkt nimmt im Modell keine Kraft auf, sondern erfährt eine Abhebung, die in den Betonierphasen dann mitberücksichtigt wird. Ab der ersten Betonierphase werden alle weiteren fünf Auflager (90°, 135°, 180°, 225°, 270°) wirksam. Innerhalb der gesamten Baugeschichte tritt der maximale Wert der Auflagerkraft beim Auflager am Firstpunkt (180°) auf.

	Auflagerkraft [KN]									
	Schicht 0	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4	Schicht 5	Schicht 6	Schicht 7	Schicht 8	Schicht 9
[°]										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	152,53	80,95	105,25	40,763	79,907	45,059	54,933	42,995	40,517	37,585
90	0	105,11	131,07	156,73	199,41	207,8	233,284	219,71	232,3	190,44
135	0	44,78	65,691	97,873	131,2	174,12	203,542	240,65	253,83	269,89
180	0	67,37	89,204	118,95	152,89	186,25	212,633	239,22	251,62	263,24
225	0	44,81	68,861	98,489	141,71	176,16	213,455	243,02	260,16	271,19
270	0	105,09	123,07	155,12	163,42	200,94	186,274	209,86	169,2	198,12
329	152,53	80,96	68,202	101,76	71,546	89,369	76,997	79,379	76,96	80,413
Max	152,53	105,11	131,07	156,73	199,41	207,8	233,284	243,02	260,16	271,19

	Auflagerkraft [KN]									
	Schicht 10	Schicht 11	Schicht 12	Schicht 13	Schicht 14	Schicht 15	Schicht 16	Schicht 17	Schicht 18	max P,k (NC2)
[°]										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	36,279	36,201	37,943	39,392	34,6	36,143	36,407	38,211	47,983	152,53
90	234,09	190	218,1	183,53	191,46	180,21	191,861	191,25	202,81	234,09
135	281,33	288,853	310,38	303,27	320,6	295,45	326,417	283,02	345,71	345,71
180	279,32	297,714	327,23	356,7	386,09	424,8	439,669	466,83	253,52	466,83
225	275,88	291,815	285,51	303,43	266,91	287,2	220,838	235,79	283,4	303,43
270	153,11	179,369	145,2	152,61	136,39	137,44	136,027	152,45	163,9	209,86
329	81,12	82,65	84,576	87,108	82,166	75,21	75,679	77,081	85,779	152,53
Max	281,33	297,714	327,23	356,7	386,09	424,8	439,669	466,83	345,71	466,83

Tab. 15 Variante 5: Entwicklung der Auflagerkräfte ULS von Schicht 0-18

	Auflagerkraft [kN]									
	Schicht 0	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4	Schicht 5	Schicht 6	Schicht 7	Schicht 8	Schicht 9
[°]										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	112,99	65,45	82,57	41,18	68,18	44,75	51,56	43,66	42,32	39,9
90		70,23	88,77	107,9	138	143,32	160,86	152,43	160,77	132,68
135	0	29,98	44,83	67,8	91,39	119,78	140,2	165,36	174,57	185,18
180	0	45,05	60,61	82,11	106,21	128,35	146,67	164,84	173,44	181,12
225	0	30	46,91	68,28	98,43	120,63	146,22	166,41	178,23	185,17
270	0	70,22	83,54	106,64	113,91	140,62	131,76	147,35	120,6	140,38
329	112,99	65,46	57,48	80,73	62,15	76,77	68,67	71,43	69,51	72,66
Max	112,99	70,23	88,77	107,9	138	143,32	160,86	166,41	178,23	185,18

	Auflagerkraft [kN]									
	Schicht 10	Schicht 11	Schicht 12	Schicht 13	Schicht 14	Schicht 15	Schicht 16	Schicht 17	Schicht 18	max P,k (NC2)
[°]										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	38,65	38,51	39,72	40,75	36,99	38,09	38,29	39,55	46,17	112,99
90	165,84	137,01	156,42	133,79	139,09	131,47	139,24	138,39	146,06	165,84
135	192,54	198,3	213,16	208,61	220,34	204,66	226,16	198,14	241,09	241,09
180	192	205,06	225,35	245,33	265,52	292,33	303,05	321,83	182,46	321,83
225	188,33	199,67	195,99	207,97	183,98	198,26	154,51	165,19	197,85	207,97
270	110,5	128,66	106,5	111,45	100,34	101,15	99,69	112,36	117,01	147,35
329	73,08	74,19	75,56	77,46	73,58	68,19	68,52	69,48	75,36	112,99
Max	192,54	205,06	225,35	245,33	265,52	292,33	303,05	321,83	241,09	321,83

Tab. 16 Variante 5: Entwicklung der Auflagerkräfte SLS von Schicht 0-18

Die maximalen Auflagerkräfte betragen für:

- **ULS-Bemessung** 466,83kN, Auflager 180°, Schicht 17
- **SLS-Bemessung** 321,83kN, Auflager 180°, Schicht 17

Zusätzlich werden die maßgebenden Auflagerkräfte für den Endzustand (Schicht 18) wie folgt angegeben.

- **ULS-Bemessung** 345,71kN, Auflager 135°
- **SLS-Bemessung** 241,09kN, Auflager 135°

Aus der Tab. 15 und Tab. 16 ist ersichtlich, dass die letzte Betonierschicht für das Auflager bei 180° günstig wirkt, d.h. zu einer Minderung der Gesamtauflagerkraft führt, während es bei allen anderen Auflagern zu einer Erhöhung der Kräfte kommt. Maßgebend für Schicht_18 ist die Auflagerkraft beim Lager 135°.

7 Variantenvergleich

7.1 Allgemein

Wie schon erwähnt wurde, ist das Ziel dieser Masterarbeit die Optimierung des Montagefortschrittes (Hinterbetonierens) beim Einbau von Stahl-Linern. Um dieses Ziel zu erreichen, werden verschiedene Varianten untersucht, die unterschiedliche Auflagerabstände in Längsrichtung besitzen, in diesem Fall 1m und 3m Auflagerabstand. Um ein besseres Verständnis über die Unterschiede der zwei untersuchten Varianten zu erlangen, wird sowohl für die ULS-Nachweise als auch für die SLS-Nachweise aller relevanten Ergebnisse ein Vergleich erstellt.

7.2 Verformungsvergleich der Varianten

Im ersten Schritt werden die Verformungen aus der Variante 5 (1m und 3m Auflagerabstand) bei gleicher Betongüte C20/25 miteinander verglichen. Aus der Berechnung wurde gezeigt, dass den größten Anteil der Verformungen das Eigengewicht liefert. Deswegen werden die Vergleiche der Verformungen neben den Gesamtverformungen (Schicht-18) in Abb. 127 auch für den Lastfall Eigengewicht (Schicht-0) dargestellt (siehe Abb. 126). Wie man auf der Abb. 127 sieht, ist der Verlauf der Gesamtverformungen fast identisch, d.h., dass für die Verformungen eine Änderung des Auflagerabstandes in Längsrichtung von 1m auf 3m kaum einen Unterschied ergibt.

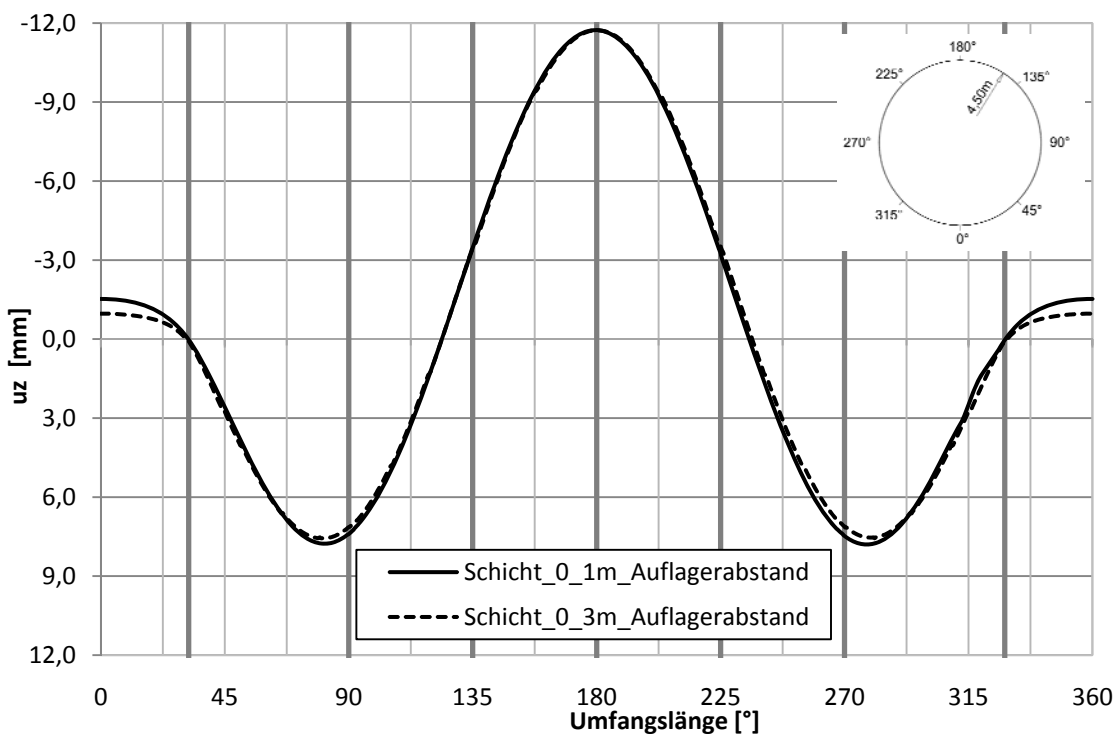


Abb. 126 Vergleich der Radialverformungen u_z [mm] des Eigengewichtes / Schnitt S1 (1m und 3m Auflagerabstand)

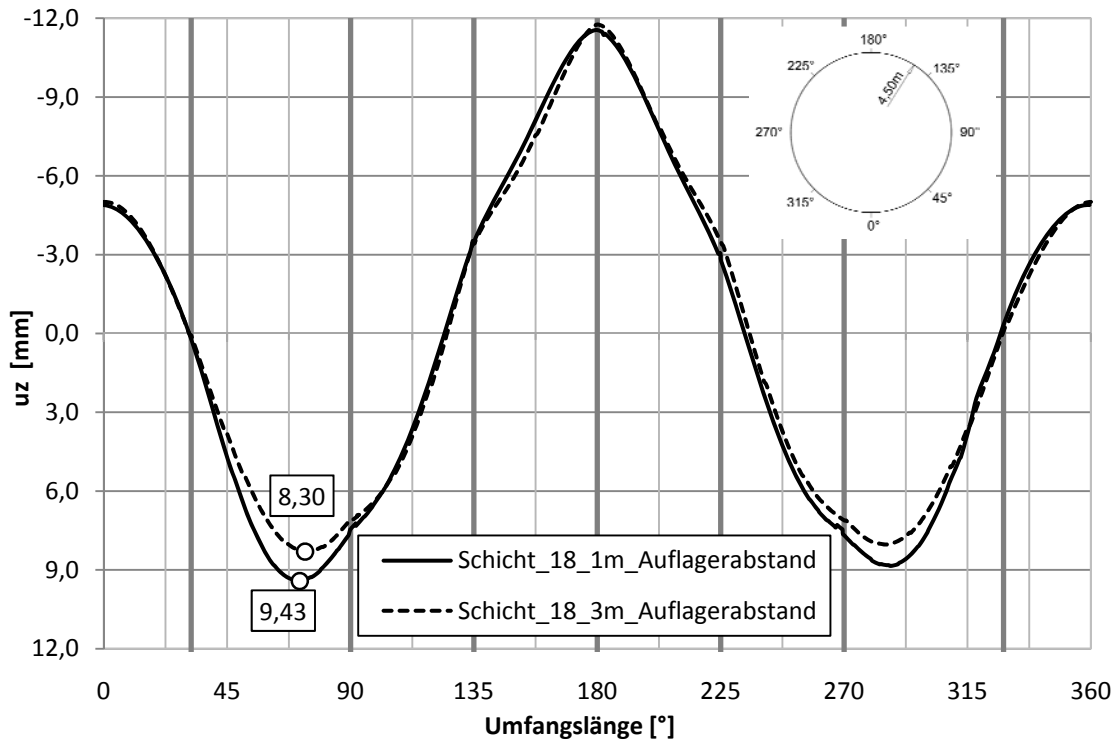


Abb. 127 Gesamtvergleich der Radialverformung u_z [mm] / schnitt S1 (1m und 3m Auflagerabstand)

Die maximalen Gesamtverformungen betragen für Schicht_18 $u_z = 11,73\text{mm}$ für das Modell mit 3m Auflagerabstand und $11,56\text{mm}$ für das Modell mit 1m Auflagerabstand.

Es wird erwähnt, dass bei 70° die Gesamtverformung für das 3m-Modell etwas günstiger liegt als für das 1m-Modell ($u_z = 8,3\text{mm}$ bzw. $u_z = 9,43\text{mm}$).

7.3 Spannungsvergleich der Varianten

Beim Vergleich der Spannungen σ_{oben} im Beulring-2 zwischen der Variante mit 1m Auflagerabstand und der Variante mit 3m Auflagerabstand zeigt sich ein anderes Bild als beim Verformungsvergleich. Obwohl der Verlauf der Spannungen für die beiden Varianten im Allgemeinen einen ähnlichen Verlauf hat, ist bei der Variante mit 3m Auflagerabstand mit höheren Werten zu rechnen (Abb. 129). Während des Lastfalls Eigengewicht erfahren die zwei unteren Auflager etwa 70% mehr Spannung (Tab. 17). Der größte Unterschied der Spannungen tritt bei der Schicht-17 mit etwa 180 N/mm² mehr Spannung auf, was auch zu einer Überschreitung der zulässigen Spannungen führt. Diese Überschreitung der Spannungen entsteht bei der Variante mit 3m Auflagerabstand ab der Betonierschicht 12. Nur während der letzten Betonierschicht, die sich günstig auf das Stahlrohr auswirkt, liegen die Spannungen unter dem Bemessungswert von $\sigma_{\text{Rd}} = 355 \text{ N/mm}^2$. Der maximale Wert der Spannung tritt sowohl bei der Variante mit 1m Auflagerabstand als auch bei der Variante mit 3m Auflagerabstand während der Betonierschicht 17 oben (180°) auf.

	Schicht 0	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4	Schicht 5	Schicht 6	Schicht 7	Schicht 8	Schicht 9
$\sigma_{\text{oben_1m}} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	-108,49	-109,85	-121,50	-136,11	-153,86	-171,55	-185,72	-200,14	-204,79	-208,64
$\sigma_{\text{oben_3m}} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	-185,09	-123,78	-143,31	-169,92	-200,16	-229,83	-253,19	-276,74	-287,76	-298,11
Unterschied $\text{ [N/mm}^2\text{]}$	-76,60	-13,93	-21,82	-33,81	-46,30	-58,29	-67,47	-76,59	-82,97	-89,47
Unterschied [%]	70,6%	12,7%	18,0%	24,8%	30,1%	34,0%	36,3%	38,3%	40,5%	42,9%

	Schicht 10	Schicht 11	Schicht 12	Schicht 13	Schicht 14	Schicht 15	Schicht 16	Schicht 17	Schicht 18
$\sigma_{\text{oben_1m}} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	-214,66	-220,46	-233,68	-246,82	-261,23	-280,95	-283,41	-290,68	-213,79
$\sigma_{\text{oben_3m}} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	-312,94	-329,93	-357,50	-385,22	-412,45	-446,87	-453,85	-470,03	-324,61
Unterschied $\text{ [N/mm}^2\text{]}$	-98,28	-109,47	-123,82	-138,40	-151,22	-165,92	-170,44	-179,35	-110,82
Unterschied [%]	45,8%	49,7%	53,0%	56,1%	57,9%	59,1%	60,1%	61,7%	51,8%

Tab. 17 Spannungsunterschied / Beulring σ_{oben} $\text{ [N/mm}^2\text{]}$ / (1m-3m Auflagerabstand)

Die Unterschiede der Spannungen treten auch im Vergleich der Spannungen σ_{unten} auf, aber diese bleiben jedoch deutlich unter dem Bemessungswert. Diese Unterschiede werden beginnend mit dem Lastfall Eigengewicht bis hin zur letzten Betonierschicht größer. Der größte Unterschied mit etwa 21 N/mm² mehr Spannung tritt jedoch während der vorletzten Betonierphase ein (Tab. 18).

Aus diesem Vergleich zeigt sich ein sehr günstiges Verhalten der ringversteiften Rohrschale hinsichtlich der lokalen Spannungen im Beulring. Obwohl die Lasten von Eigengewicht und Betonierlast den dreifachen Wert als beim 1m Modell annehmen, wird im die Spitzenspannung im Beulring Endzustand (Schicht_18) von -213,8N/mm² um 51,8% auf -324,61N/mm²

gesteigert. Dieses günstige Verhalten lässt sich vor allem durch die Schalenmembranwirkung erklären.

	Schicht 0	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3	Schicht 4	Schicht 5	Schicht 6	Schicht 7	Schicht 8	Schicht 9
$\sigma_{\text{unten_1m}} [\text{N/mm}^2]$	9,41	-13,61	-9,16	-9,54	-10,50	-10,57	-12,30	-12,86	-15,43	-16,89
$\sigma_{\text{unten_3m}} [\text{N/mm}^2]$	14,16	-14,83	-17,01	-20,04	-23,84	-25,80	-27,40	-27,46	-28,28	-26,70
Unterschied $[\text{N/mm}^2]$	4,75	-1,22	-7,85	-10,50	-13,34	-15,23	-15,10	-14,60	-12,85	-9,81
Unterschied [%]	50,4%	9,0%	85,7%	110,0%	127,1%	144,2%	122,7%	113,5%	83,2%	58,1%

	Schicht 10	Schicht 11	Schicht 12	Schicht 13	Schicht 14	Schicht 15	Schicht 16	Schicht 17	Schicht 18
$\sigma_{\text{unten_1m}} [\text{N/mm}^2]$	-18,92	-17,71	-19,41	-18,40	-19,85	-18,57	-18,69	-18,68	-23,98
$\sigma_{\text{unten_3m}} [\text{N/mm}^2]$	-29,86	-28,84	-30,37	-29,78	-31,40	-32,88	-35,20	-39,39	-39,27
Unterschied $[\text{N/mm}^2]$	-10,95	-11,13	-10,96	-11,38	-11,55	-14,31	-16,51	-20,72	-15,30
Unterschied [%]	57,9%	62,8%	56,4%	61,8%	58,2%	77,1%	88,4%	110,9%	63,8%

Tab. 18 Spannungsunterschied / Beulring $\sigma_{\text{unten}} [\text{N/mm}^2]$ / (1m-3m Auflagerabstand)

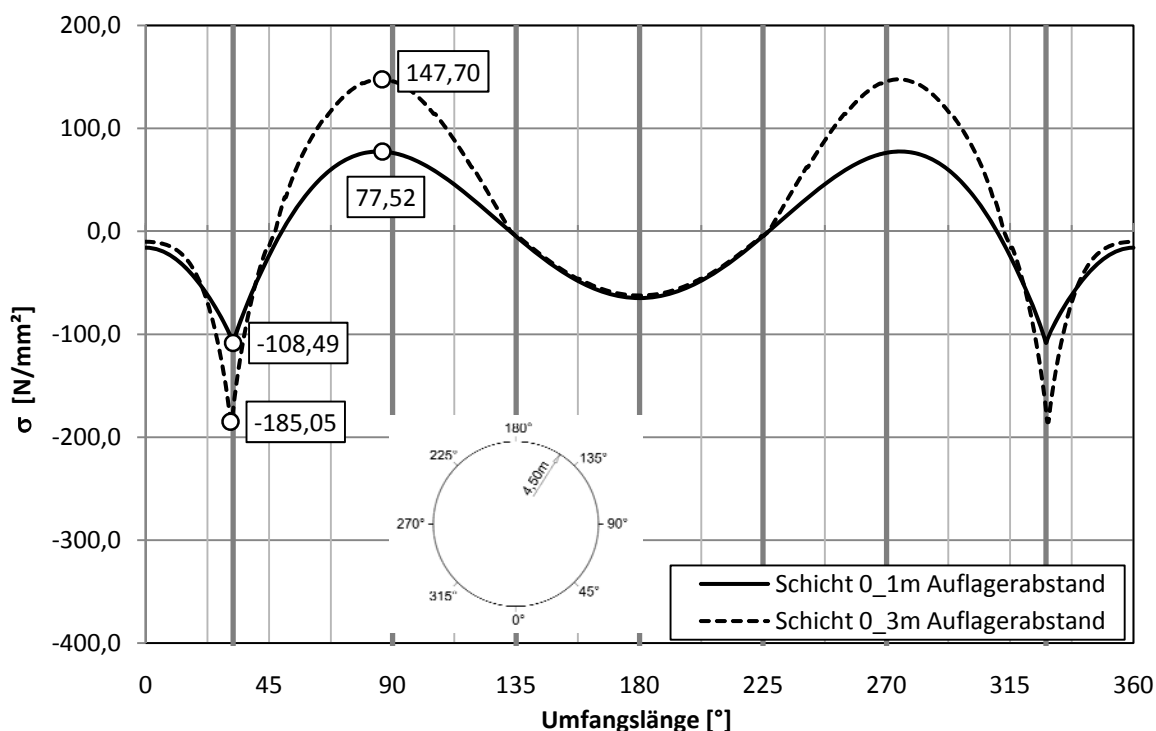


Abb. 128 Spannungsvergleich / Beulring / $\sigma_{\text{außen}} [\text{N/mm}^2]$ / Schicht 0 (1m und 3m Auflagerabstand)

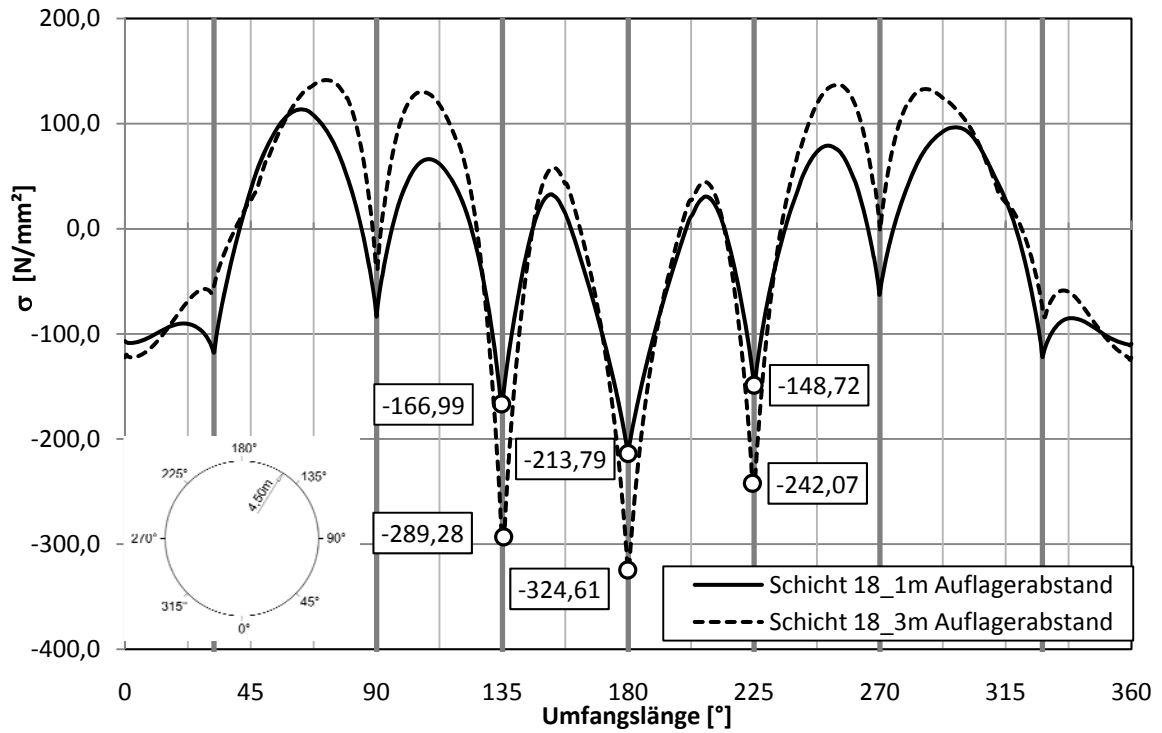


Abb. 129 Gesamtspannungsvergleich / Beulring / $\sigma_{\text{au\ss en}}$ [N/mm²] / Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)

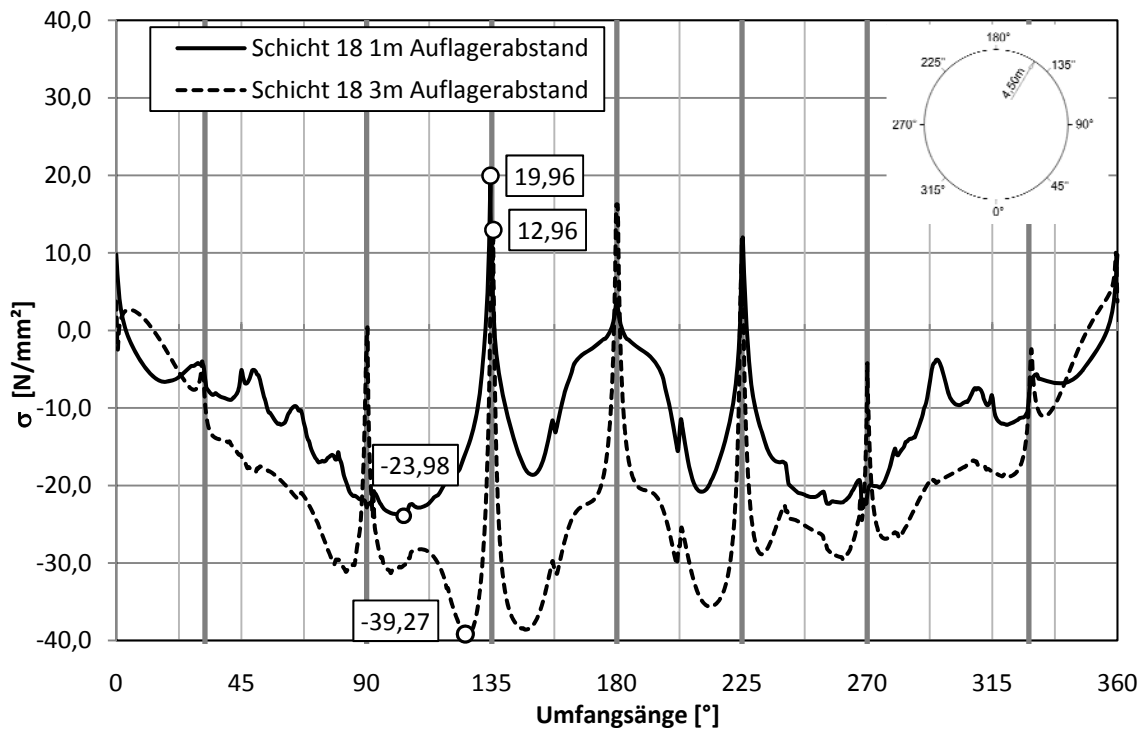


Abb. 130 Gesamtspannungsvergleich / Beulring / σ_{innen} [N/mm²] / Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)

7.4 Vergleich der Vergleichsspannungen im Rohr

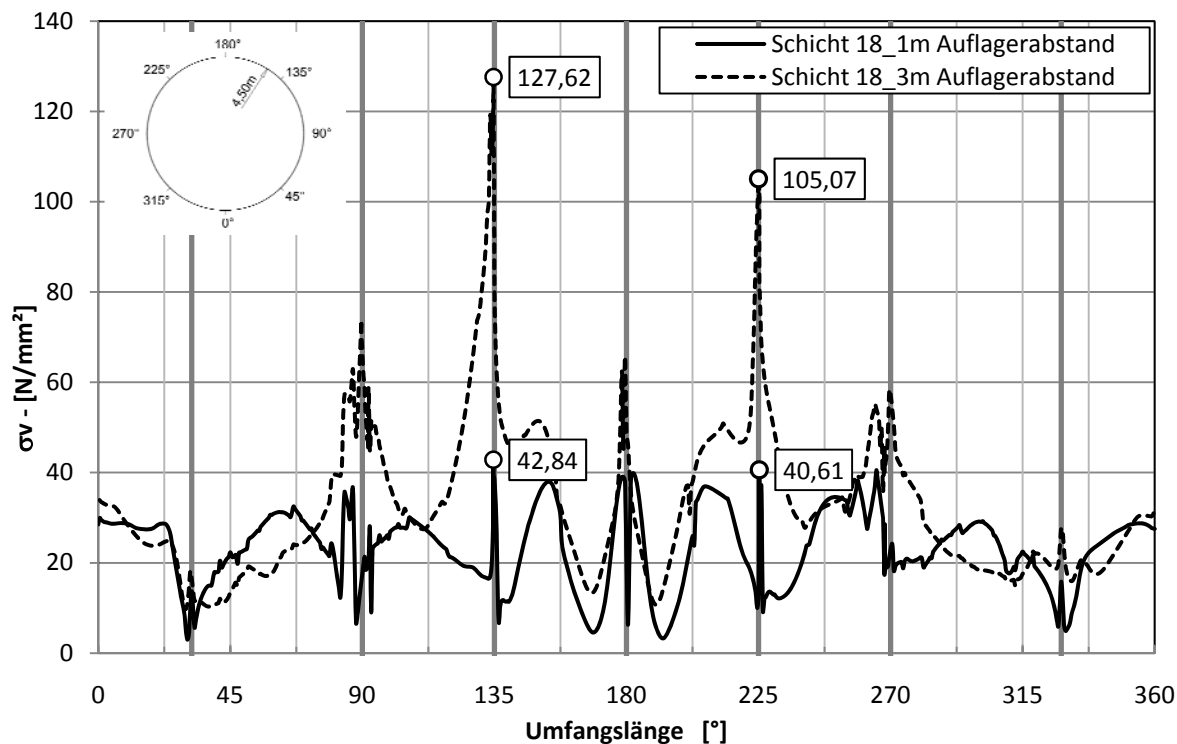


Abb. 131 Vergleich der Vergleichsspannungen/außen σ_{v-} [N/mm^2] /Rohr/S1 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)

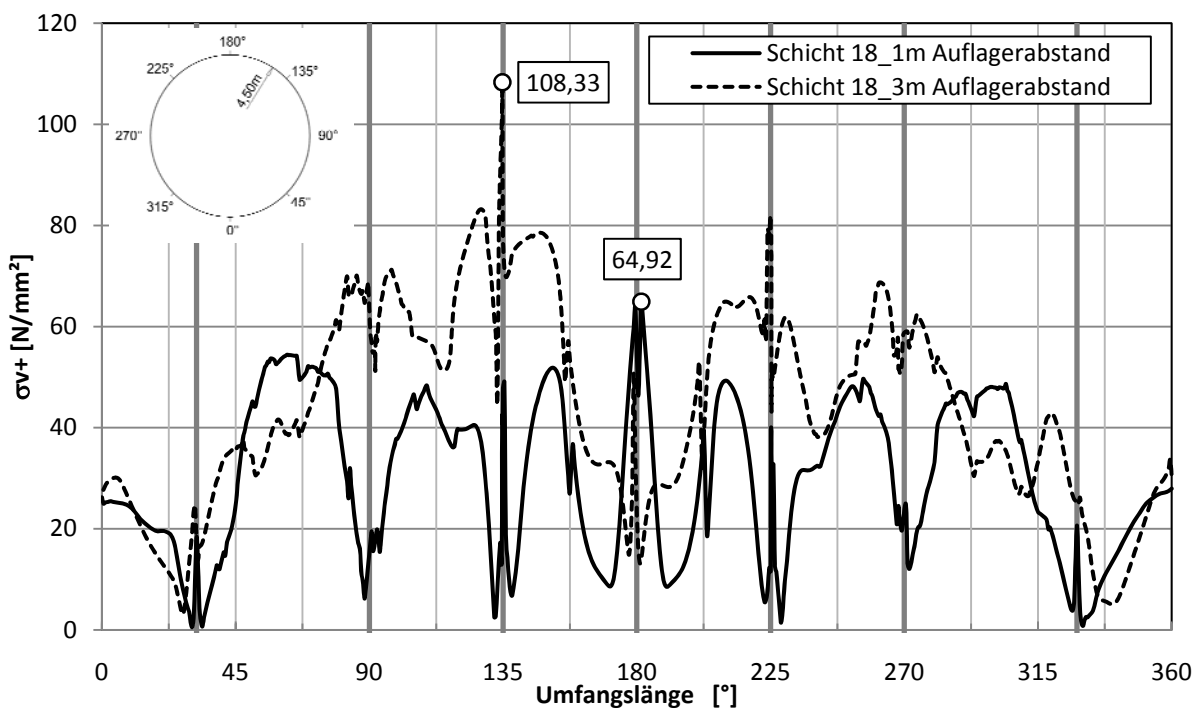


Abb. 132 Vergleich der Vergleichsspannungen/innen σ_{v+} [N/mm^2] /Rohr/S1 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)

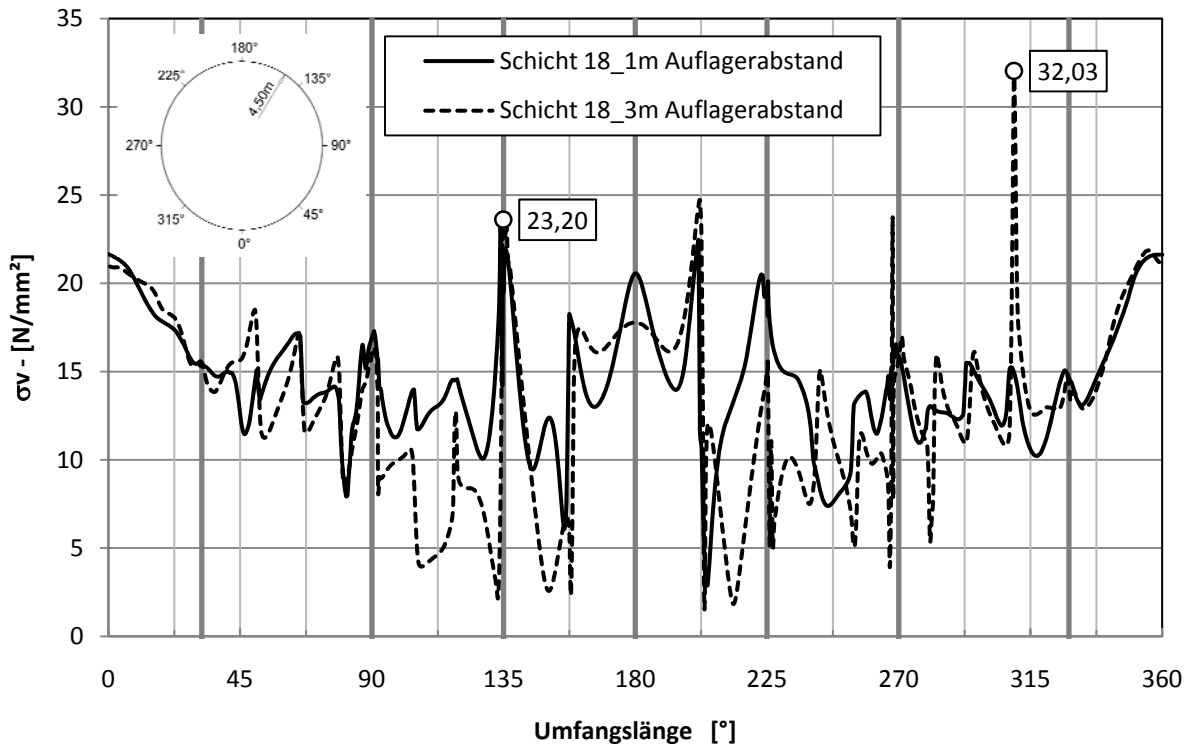


Abb. 133 Vergleich der Vergleichsspannungen/außen σ_v^- [N/mm²] /Rohr/S2 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)

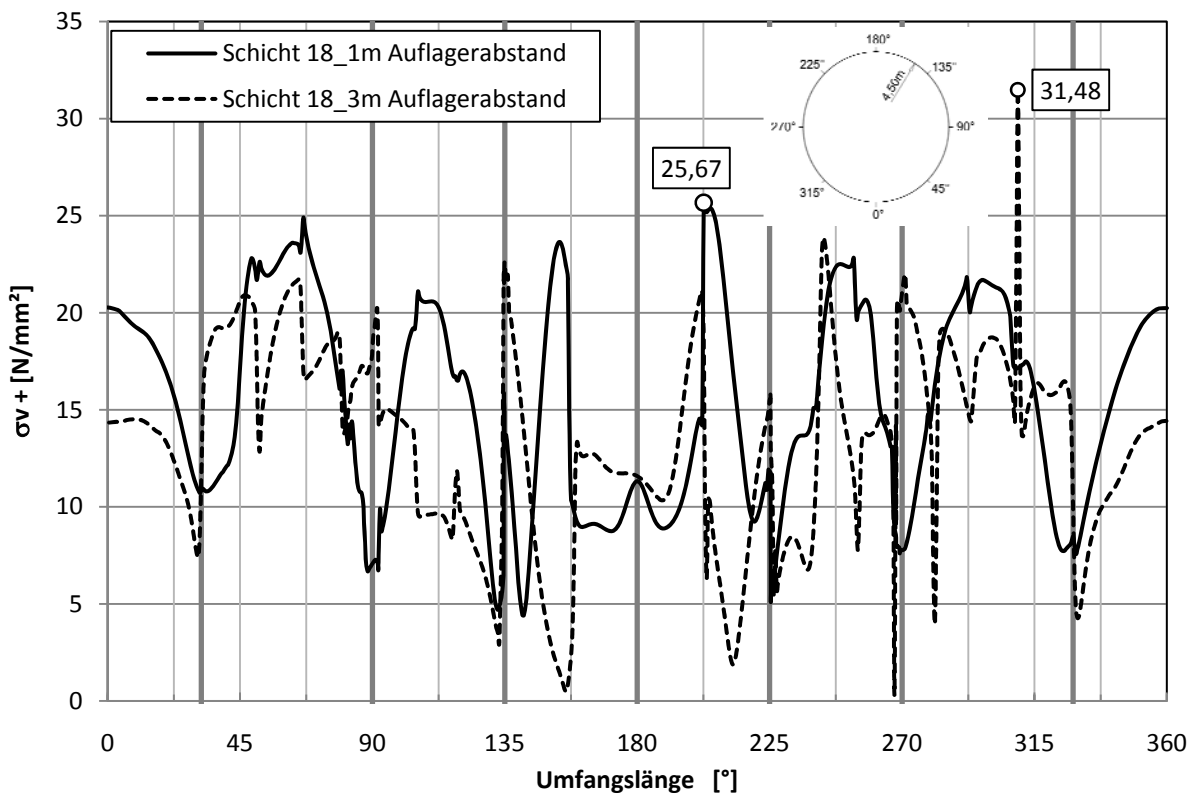


Abb. 134 Vergleich der Vergleichsspannungen/innen σ_v^+ [N/mm²] /Rohr/S2 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)

Rohr	Schicht_0	Schicht_1	Schicht_2	Schicht_3	Schicht_4	Schicht_5	Schicht_6	Schicht_7	Schicht_8	Schicht_9
S1 (innen)										
σ_{v+} [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	30,43	43,30	47,58	51,61	59,30	58,70	64,09	57,44	58,39	54,09
σ_{v+} [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	43,16	45,19	50,25	57,11	67,22	71,39	75,06	72,67	76,93	82,06
Unterschied [N/mm ²]	12,73	1,89	2,67	5,50	7,92	12,69	10,98	15,23	18,54	27,97
Unterschied [%]	41,8%	4,4%	5,6%	10,7%	13,4%	21,6%	17,1%	26,5%	31,7%	51,7%
S2 (innen)										
σ_{v+} [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	9,73	14,82	16,28	21,98	23,69	25,43	27,35	28,82	26,78	22,80
σ_{v+} [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	8,90	13,68	14,93	19,38	23,38	23,26	21,57	22,65	21,23	21,86
Unterschied [N/mm ²]	-0,83	-1,13	-1,36	-2,59	-0,31	-2,18	-5,78	-6,17	-5,55	-0,94
Unterschied [%]	-8,6%	-7,6%	-8,3%	-11,8%	-1,3%	-8,6%	-21,1%	-21,4%	-20,7%	-4,1%

Rohr	Schicht_10	Schicht_11	Schicht_12	Schicht_13	Schicht_14	Schicht_15	Schicht_16	Schicht_17	Schicht_18
S1 (innen)									
σ_{v+} [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	53,52	58,61	58,17	61,86	65,99	71,54	71,88	73,60	64,92
σ_{v+} [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	85,83	88,85	96,04	95,35	100,76	100,80	109,43	110,58	108,33
Unterschied [N/mm ²]	32,31	30,24	37,86	33,49	34,77	29,26	37,54	36,98	43,41
Unterschied [%]	60,4%	51,6%	65,1%	54,1%	52,7%	40,9%	52,2%	50,2%	66,9%
S2 (innen)									
σ_{v+} [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	21,19	28,02	24,52	23,63	22,51	23,50	23,23	21,91	25,67
σ_{v+} [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	23,52	24,36	24,72	25,18	26,15	26,20	25,97	26,68	31,48
Unterschied [N/mm ²]	2,33	-3,65	0,20	1,55	3,64	2,70	2,74	4,76	5,81
Unterschied [%]	11,0%	-13,0%	0,8%	6,6%	16,2%	11,5%	11,8%	21,7%	22,6%

Tab. 19 Unterschied der Vergleichsspannungen $\sigma_{v,innen}$ / 1m und 3m Auflagerabstand

Beim Vergleich der Spannungen im Stahlrohr zwischen Variante mit 1m Auflagerabstand und der Variante 3m Auflagerabstand wird nur der Unterschied der Vergleichsspannungen $\sigma_{v,innen}$ und $\sigma_{v,au\beta en}$ im Schnitt S1 und S2 für die Gesamtvergleichsspannungen in der Schicht-18 in Form von Diagrammen dargestellt. Die vollständige Darstellung der Unterschiede in jeder Betonierschicht wird tabellarisch gegeben.

In der Abb. 131 bis Abb. 134 ist ersichtlich, dass sich der Verlauf der Vergleichsspannungen im Stahlrohr zwischen den zwei untersuchten Varianten unterschiedlich entwickelt. Außerdem verändern sich auch die Stellen der maximal auftretenden Werte am Stahlrohr ergeben. Um einen besseren und klaren Überblick über die Unterschiede der Vergleichsspannungen sowohl in Werten als auch in Prozente zu bekommen, wird der Unterschied für jeden Montagezustand tabellarisch in den Tab. 19 und Tab. 20 ausgewiesen.

In der Tab. 19 sieht man, dass sowohl im Schnitt S1 als auch im Schnitt S2 die größten Unterschiede der Vergleichsspannungen $\sigma_{v,innen}$ während der letzten Betonierphase entstehen. Bei der Variante mit 3m Auflagerabstand im Schnitt S1 tritt etwa um 67% höhere Spannungen auf, während im Schnitt S2 nur etwa 23% höhere Spannungen erreicht werden. Im Gegensatz dazu wird beim Vergleich der Vergleichsspannungen $\sigma_{v,au\beta en}$ im Schnitt S1 ein Unterschied von etwa 260% mehr deutlich. Dieser Unterschied tritt während der vorletzten Betonierschicht ein. Im Schnitt S2 wird der größte Unterschied während der Betonierschicht

15 mit etwa 56% höheren Spannungen erzielt (Tab. 20). Insgesamt sind die ermittelten Werte deutlich unterhalb dem Bemessungslimit von $\sigma_{Rd} = 355 \text{ N/mm}^2$.

Rohr	Schicht_0	Schicht_1	Schicht_2	Schicht_3	Schicht_4	Schicht_5	Schicht_6	Schicht_7	Schicht_8	Schicht_9
S1 (außen)										
σ_v [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	16,58	27,45	30,20	33,03	38,72	40,00	43,26	39,58	39,98	40,98
σ_v [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	31,68	44,07	50,77	59,04	70,29	75,86	84,67	96,71	101,99	108,63
Unterschied [N/mm ²]	15,11	16,62	20,57	26,00	31,58	35,85	41,41	57,13	62,02	67,64
Unterschied [%]	91,1%	60,6%	68,1%	78,7%	81,6%	89,6%	95,7%	144,4%	155,1%	165,1%
S2 (außen)										
σ_v [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	8,28	13,45	15,17	22,14	22,07	22,87	23,83	25,28	22,55	20,10
σ_v [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	7,80	14,25	13,97	20,20	18,91	19,93	19,18	19,65	20,38	19,93
Unterschied [N/mm ²]	-0,48	0,80	-1,20	-1,94	-3,16	-2,93	-4,65	-5,63	-2,17	-0,18
Unterschied [%]	-5,8%	5,9%	-7,9%	-8,8%	-14,3%	-12,8%	-19,5%	-22,3%	-9,6%	-0,9%

Rohr	Schicht_10	Schicht_11	Schicht_12	Schicht_13	Schicht_14	Schicht_15	Schicht_16	Schicht_17	Schicht_18
S1 (außen)									
σ_v [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	41,90	43,51	45,58	48,61	49,39	48,11	41,25	37,49	42,84
σ_v [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	113,26	116,61	125,93	127,08	133,94	120,70	124,59	134,14	127,62
Unterschied [N/mm ²]	71,36	73,10	80,35	78,47	84,55	72,59	83,34	96,64	84,79
Unterschied [%]	170,3%	168,0%	176,3%	161,4%	171,2%	150,9%	202,1%	257,8%	197,9%
S2 (außen)									
σ_v [N/mm ²]/1m Auflagerabstand	22,67	31,74	26,14	21,60	19,52	20,47	30,77	25,28	23,20
σ_v [N/mm ²]/3m Auflagerabstand	22,13	24,88	26,16	28,75	30,84	31,91	30,56	28,56	32,03
Unterschied [N/mm ²]	-0,54	-6,86	0,02	7,15	11,32	11,44	-0,21	3,28	8,83
Unterschied [%]	-2,4%	-21,6%	0,1%	33,1%	58,0%	55,9%	-0,7%	13,0%	38,1%

Tab. 20 Unterschied der Vergleichsspannungen $\sigma_{v,au\beta en}$ / 1m und 3m Auflagerabstand

7.5 Ungünstigste Montagezustände

Die für die Bemessung relevantesten Ergebnisse treten am Ende des Montagezustandes (Schicht-17) auf. Nicht nur dieser Zustand muss normgerecht eingehalten werden, sondern auch alle Zwischenzustände. Die größten Verformungs- und Spannungszuwächse treten unter dem Lastfall Eigengewicht auf, da unter diesem Lastfall das Stahlrohr nur am unteren Teil des Rohres gelagert ist. Eine Möglichkeit diese Verformungen und Spannungen zu reduzieren wäre entweder durch eine Innenaussteifung oder eine Vorverformung des Rohres entgegen seine Eigengewichtsverformung einzubringen (Abb. 135).

Außer dem Lastfall Eigengewicht, der die größten Werte an Verformungen und Spannungen liefert, erzeugt auch das Einbringen der ersten Betonierschicht relativ große Werte. Durch die erste Betonierschicht wirkt auf das Rohr eine Auftriebskraft ein, die durch den Frischbetondruck entsteht.

Der Wert der weiteren Betonierschritte bewirkt zwar aufsummiert eine Steigerung der Spannungsspitzen, der Anstieg der einzelnen Werte von Schicht zu Schicht liegt jedoch deutlich niedriger als beim Eigengewichtslastfall. Die weiteren Montageschritte liefern ähnliche Verformungs- und Spannungsanteile, allerdings an unterschiedlichen Stellen im Rohr in Abhängigkeit der Frischbetonschichte. Es lässt sich kein bedeutsamer Montagezustand mehr erkennen.

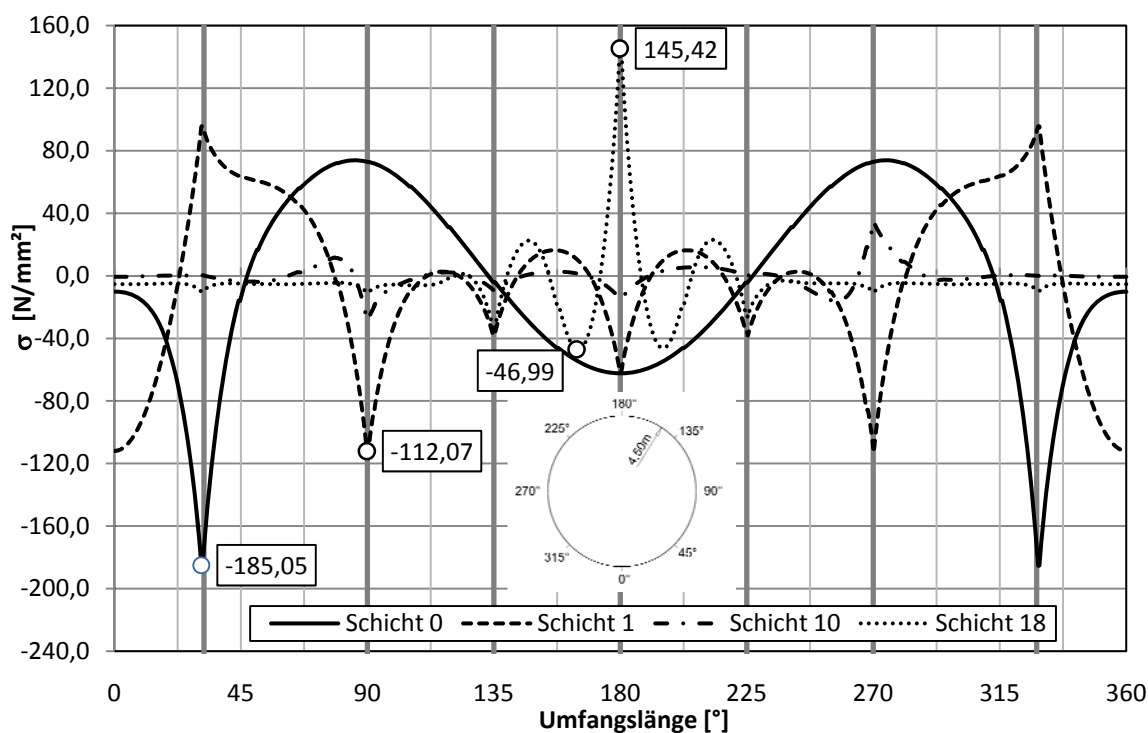


Abb. 135 Ringspannungen für einzelne Montageschritte oben σ_x [N/mm²]

In der letzten Betonierphase (Schicht-18) drückt der Frischbeton im obersten Bereich auf das Rohr. Es entstehen zwar nicht zu vernachlässigende Spannungsspitzen, jedoch wirken sich diese positiv auf den Spannungsverlauf aus. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass sie im wirksamen Bereich entgegen dem Spannungsverlauf wirken und damit reduziert sich der

maximal auftretende Wert der Spannung in der Schicht-17 beim Auflager 180° auf 145 N/mm^2 auf eine etwa 31% geringere Normalspannung (Abb. 136).

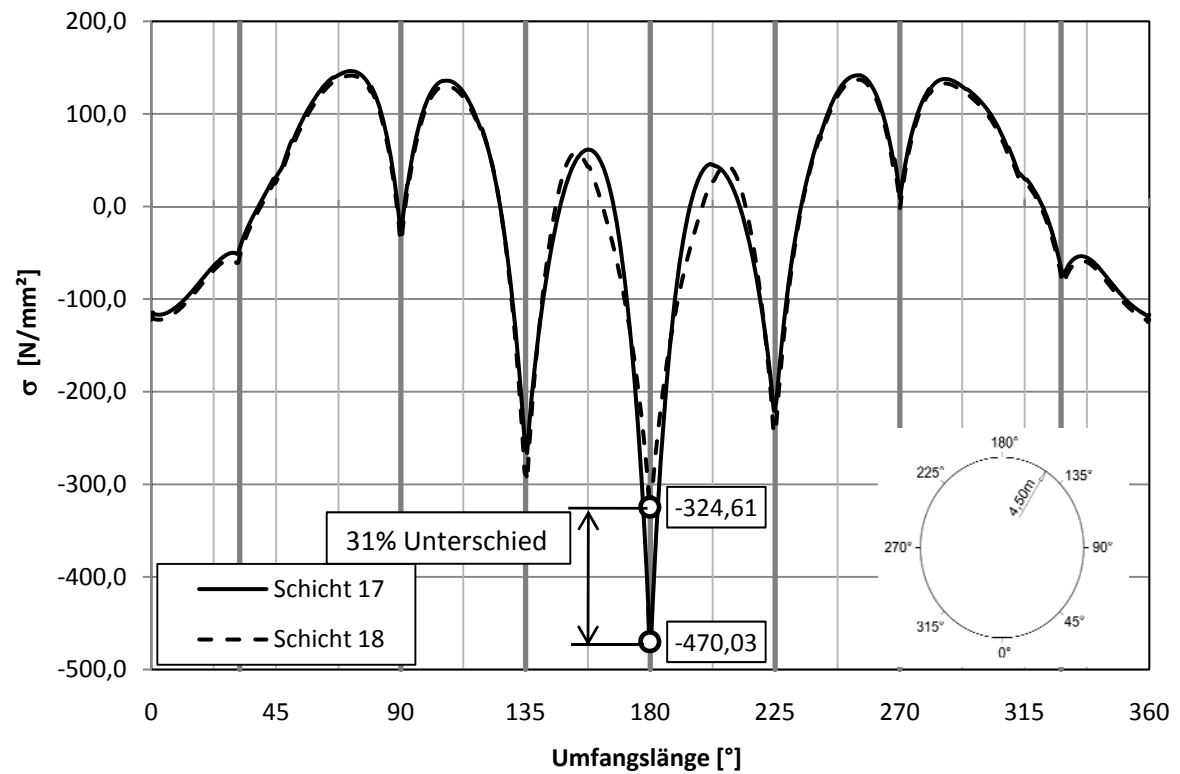


Abb. 136 Ringspannungen gesamt oben σ_x [N/mm²] (Schicht 17 und Schicht 18)

8 Zusammenfassung

Am Anfang dieser Masterarbeit wurde erwähnt, dass das Ziel dieser Arbeit eine Optimierung der Montagezustände und die erweiterte Untersuchung von Stahl-Linern von Druckschächten mit großem Durchmesser ist. In einer früheren Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Christoph Ott wurden fünf verschiedene Varianten, die aber durch das gleiche Tragsystem in Längsrichtung gekennzeichnet waren, untersucht. Von diesen fünf erwähnten Varianten wurde nur die Variante 5 herangezogen, weil sie als Berechnungsmodell am geeignetsten war. Anhand dieser Variante wurde ein anderes Modell erstellt, das aber die gleichen Stützungen in der Umfangsrichtung und die gleichen Berechnungsparameter besitzt. Der einzige Unterschied zwischen diesen beiden Modellen ist der unterschiedliche Auflagerabstand in Längsrichtung. In anderen Worten ausgedrückt, beim ersten Modell beträgt der Auflagerabstand 1m und beim zweiten Modell 3m. Allerdings wurden in Unterschied zu MA Ott vertiefende und ergänzende Auswertungen hinsichtlich des Verformungszustands (Ovalität und Unrundheit) und eine Untersuchung für eine höhere Betongüte durchgeführt.

Die Aufgabestellung wurde in zwei Teilbereiche aufgegliedert. Als erstes wurde die nichtlineare Berechnung des Modells mit dem 3m Auflagerabstand vorgenommen, um anschließend einen Vergleich zwischen diesen zwei Modellen aufzustellen.

Die Untersuchungen der beiden Modelle, d.h. sowohl das Modell mit dem 1m Auflagerabstand als auch das Modell mit dem 3m Auflagerabstand, zeigten im Allgemeinen sehr ähnliche Ergebnisse. Um ein besseres Verständnis dafür zu erhalten, welches von diesen zwei Modellen für die Montage des Stahlrohres geeigneter ist, wurde für alle Ergebnisse (Verformungen, Spannungen) im Rahmen dieser Arbeit ein Vergleich sowohl tabellarisch als auch in Form von Diagrammen durchgeführt.

Beim Vergleich der zwei untersuchten Modelle hinsichtlich der Verformungen zeigen beide Modelle in sämtlichen Montagezuständen und den Endergebnissen nur geringe Unterschiede auf. Daher zeigen die Verläufe eine sehr ähnliche Kontur mit etwas verschiedenen Werten.

Da es sich hierbei um ein Modell handelt, welches dreimal so breit ist wie das erste Modell, sind die Auflagerkräfte unter Lastfall Eigengewicht dreimal so groß. Die zwei unteren Auflager für die SLS-Bemessung, die zur Aufnahme des Eigengewichtes dienen, erfahren eine Normalkraft von 113kN. Die maximal auftretende Auflagerkraft tritt während der Betonierschicht 17 mit einem Wert von 321kN auf.

Beim Vergleich der Spannungen in den Beulringen, ist deutlich erkennbar, dass je größer der Auflagerabstand wird, desto höhere Spannungen in den Beulringen auftreten, allerdings nicht mit ihren 3-fachen Werten wie bei den Auflagerkräften für Lastfall Eigengewicht. Der größte Unterschied der Spannungen ist bei der Schicht 17 zu verzeichnen. Es werden etwa 180N/mm² oder etwa 61,7% mehr Spannungen vorgefunden. Die Spannungsspitzen in den Auflagern werden in jeder Betonierphase größer, was in der Nachweisführung im ULS zu einer Überlastung des Stahles führt (Ausnutzungsgrad 132%). Dieser maximale Wert der Spannungen von $\sigma=470\text{N/mm}^2$ tritt beim vorletzten Betonierschritt (Schicht-17) auf. Der letzte Betonierschritt jedoch wirkt sich positiv auf den Endwert der Verformungen aus und vermindert die Spannungen auf $\sigma=324,6\text{N/mm}^2$. Aber die Grenzwerte der Festigkeit müssen für alle Montagezustände eingehalten werden.

Anders sieht jedoch die Situation für die Spannungen im Stahlrohr aus. Dadurch, dass für die Bemessung im Stahlbau die Vergleichsspannungen von wesentlicher Bedeutung sind, wird der Vergleich nur für diese Spannungen erläutert. Die Änderung des Auflagerabstandes in Längsrichtung führt zu einer signifikanten Erhöhung der lokalen Spannungen im Rohr (im

Auflagerbereich). Im Schnitt S1 treten Spitzenspannungen von etwa 97N/mm^2 (258% Vergrößerung) im Außenbereich der Rohrschale auf. An der Innenfaser der Rohrschale treten etwa 44N/mm^2 (67% Erhöhung) als Vergleichsspannung auf. Im Vergleich dazu sind im Schnitt S2 kleinere Unterschiede vorhanden. An der Außenfaser betragen diese etwa $11,5\text{N/mm}^2$ (58% Vergrößerung), während innen etwa 6N/mm^2 (23%) höhere Vergleichsspannungen auftreten. Alle verbleibenden Spannungen im Stahlrohr liegen deutlich unterhalb des Bemessungswertes von $\sigma_{Rd} = 355\text{ N/mm}^2$. Wie groß die Unterschiede der Spannungen in den Beulringen und im Stahlrohr bei jeder Betonierphase sind, wird aus den Tabellen ersichtlich.

Eine weitere Aufgabe dieser Masterarbeit war auch die Berechnung der Ovalität und der Unrundheit des Rohres. Die Ergebnisse, die anhand dieser Berechnungen festgestellt wurden, bestätigen, dass die durch den Montagevorgang (Eigengewichtswirkung und Betoniervorgang) verursachte Ovalität und Unrundheit des Stahlrohres laut (C.E.C.T, 1979) die vorgeschriebenen Werten nicht überschreiten. Die maximale Ovalität wurde mit 7,6mm ermittelt, wobei auch die Verformungen aus dem Eigengewicht mitberücksichtigt wurden. Die maximale Unrundheit wurde für diesen Fall mit 1,45mm ausgewertet. Dennoch zeigen alle durchgeführten Untersuchungen, dass die Eigengewichtsverformungen den größten Verformungsanteil verursachen und daher vor Beginn des Betoniervorgangs des Hinterfüllbetons kompensiert werden sollten.

Aus dem Vergleich der Spannungen im Beulring geht hervor, dass die Variante mit 3m Auflagerabstand zu einer Überschreitung der zulässigen Spannungen führt. Um eine Reduktion dieser Spannungen zu erreichen, könnte man mehrere Auflager in Umfangsrichtung als Stützung oder eine lokale Ringverstärkung anordnen. Aufgrund dessen, dass die 8 Auflager als Punktlager modelliert wurden, könnte man die günstige Wirkung der Auflagerbreite in Berechnung einbringen und dadurch eine Reduktion Spannungsspitzen erzielen. Die lokale Spitzenspannung im Beulring wurde bei der Schicht_17 unter dem Auflager 135° um 11,11% vermindert. Unter dem Auflager 180° erhalten wir eine Reduktion um 10,13%. Beim Auflager 225° dürfen die Spitzenspannungen um 11,22% herabgesetzt. Bei der Schicht_18 unter Auflager 135° bekommen wir eine Reduktion der Spannung um 11,53%. Unter dem Auflager 180° reduziert sich die Spannung um 10,75% und schließlich unter dem Auflager 225° wird sich die Spannung um 11,08% verringern. Trotz Berücksichtigung des günstigen Effekts der Auflagerbreite ist eine Spannungsüberschreitung bei Schicht_17 für den Fall mit 3m Auflagerabstand zu verzeichnen. Eine lokale Ringverstärkung ist vorzunehmen, da plastische Reserven im Fall des Montagevorgangs hinsichtlich bleibender Verformungen nicht herangezogen werden können.

Die Berechnungen mit Betongüte C40/50 und dem 3m Auflagerabstand erzeugen etwas größere Zwängungsspannungen. Allerdings wird diese Betongüte nur in kleineren bewehrten Bereichen für die Hinterbetonierung von Stollenpanzerungen verwendet.

Insgesamt zeigt sich für die untersuchte Stahl-Liner-Konstruktion ein sehr gutes Trag- und Verformungsverhalten, obwohl ein sehr geringes Maß an Aussteifungskonstruktion (Abstreben) gewählt wurde.

9 Anhang

Anhang 1

Radialverformungen u_z einzeln im Beulring 2 Variante 5b

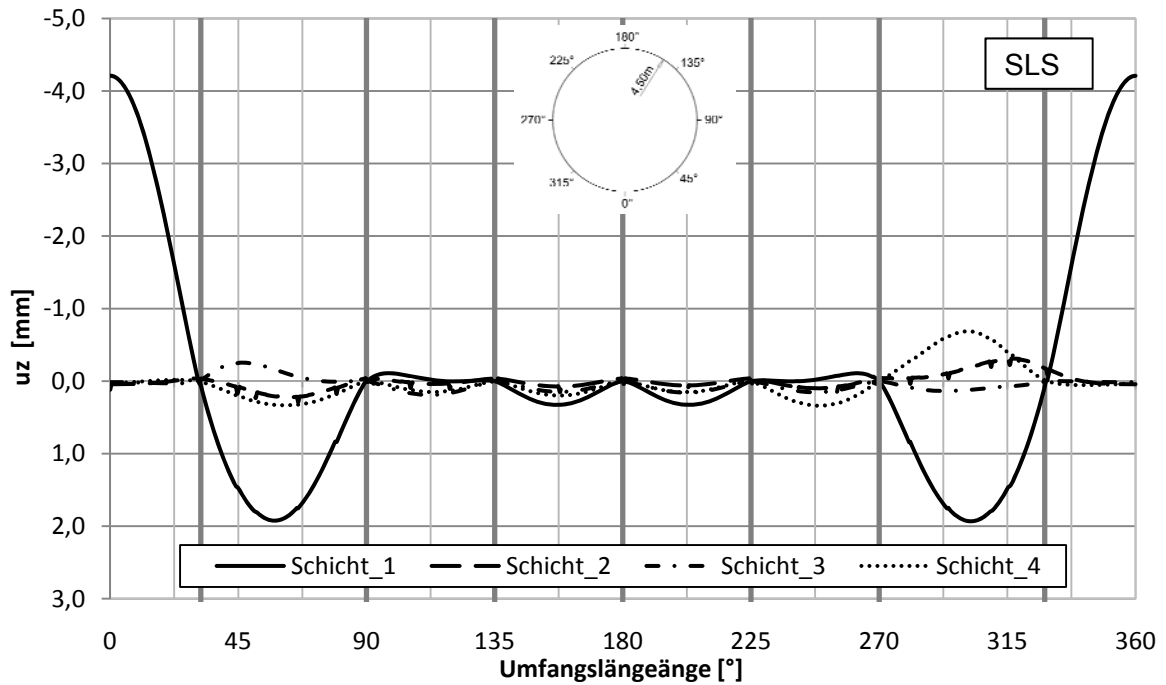


Abb. 137 Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln u_z [mm] /Schicht 1-4

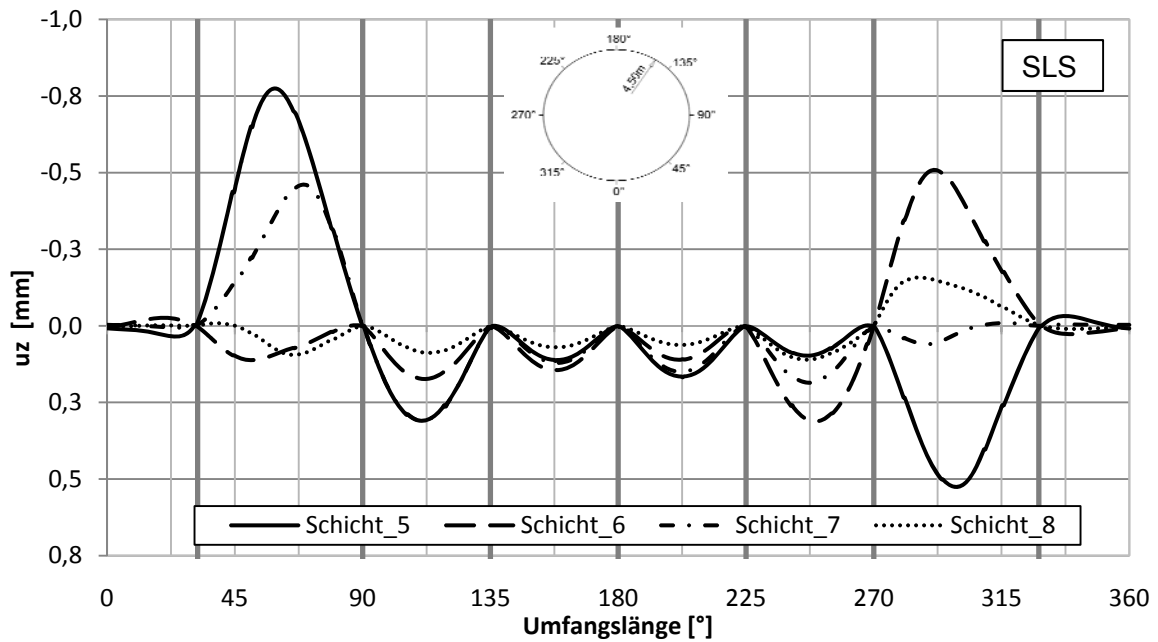


Abb. 138 Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln u_z [mm] /Schicht 5-8

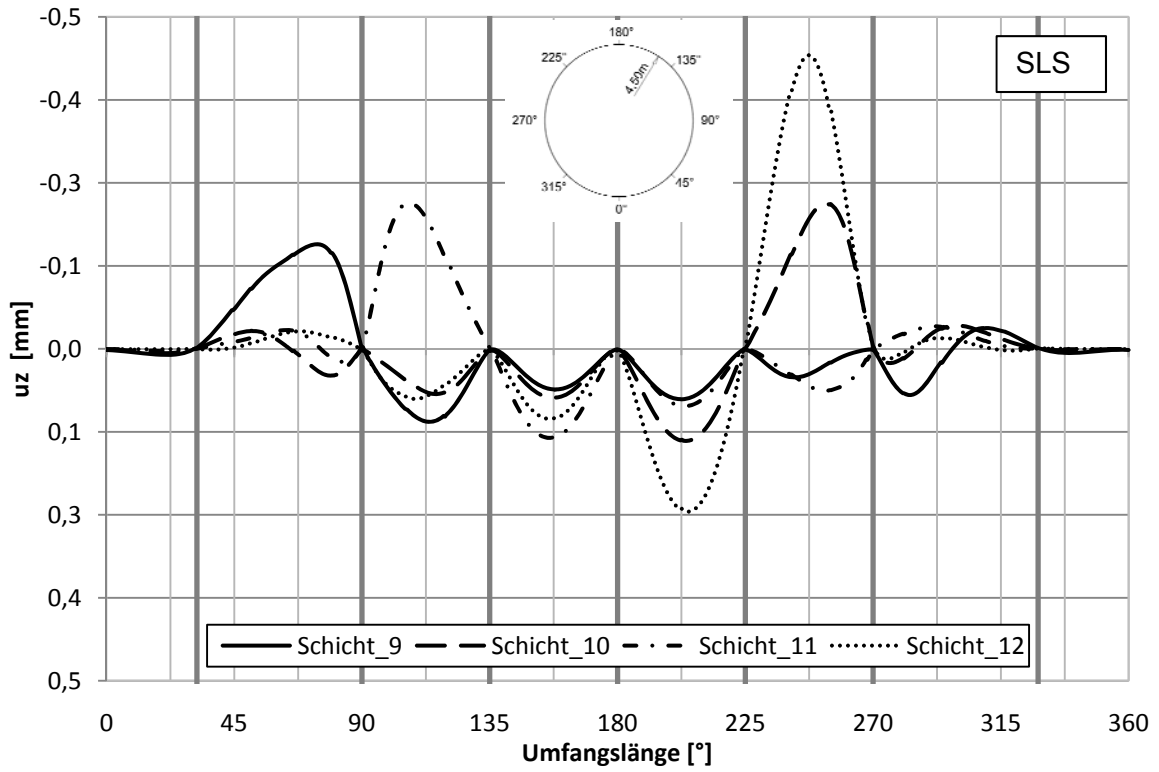


Abb. 139 Variante 5b : Beurling 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 9-12

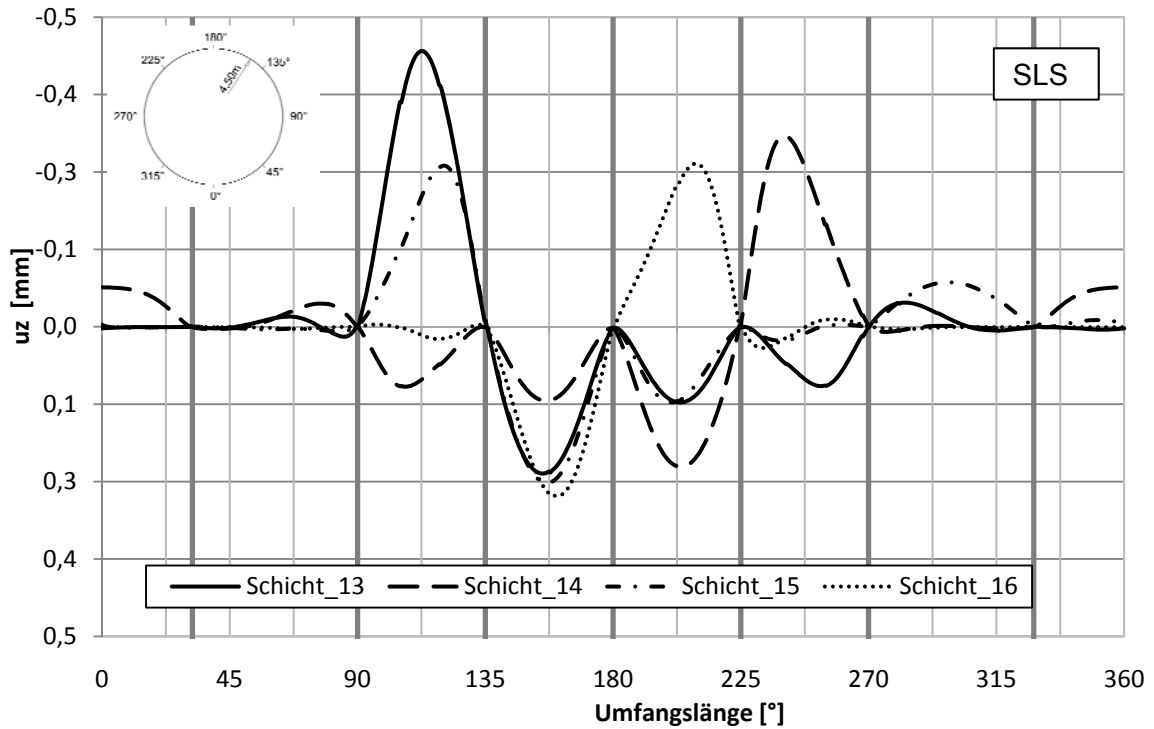


Abb. 140 Variante 5b : Beurling 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 13-16

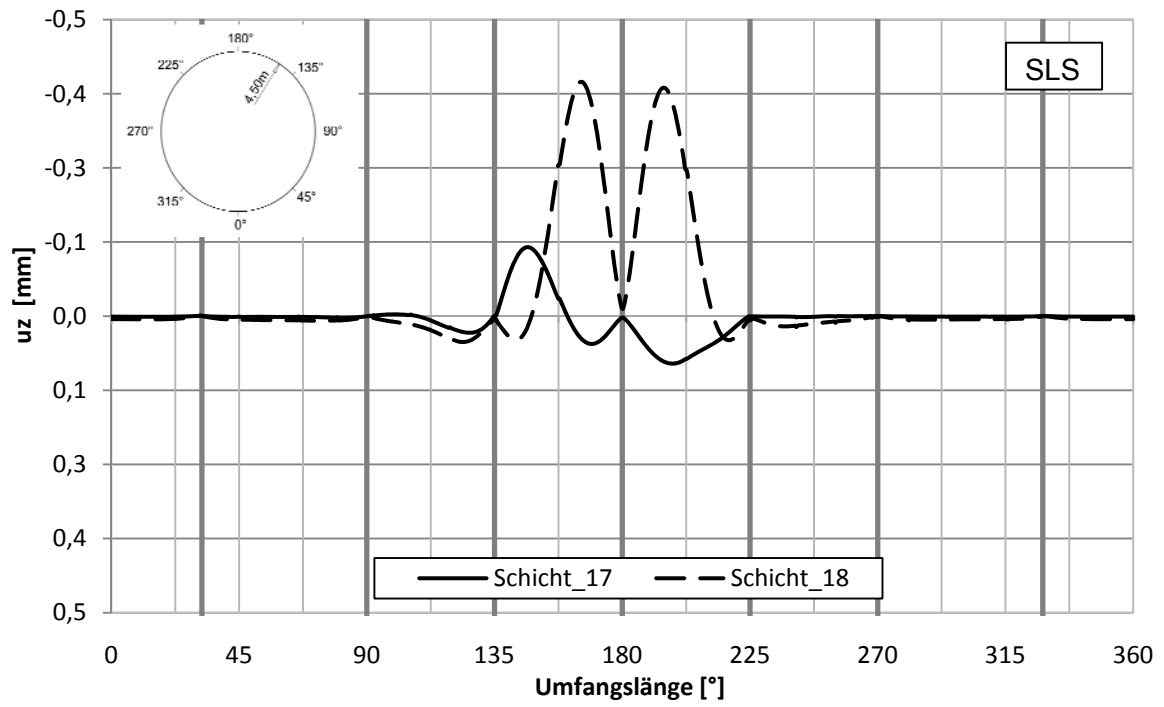


Abb. 141 Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 17-18

Anhang 2

Systemskizzen der Betonierstufen

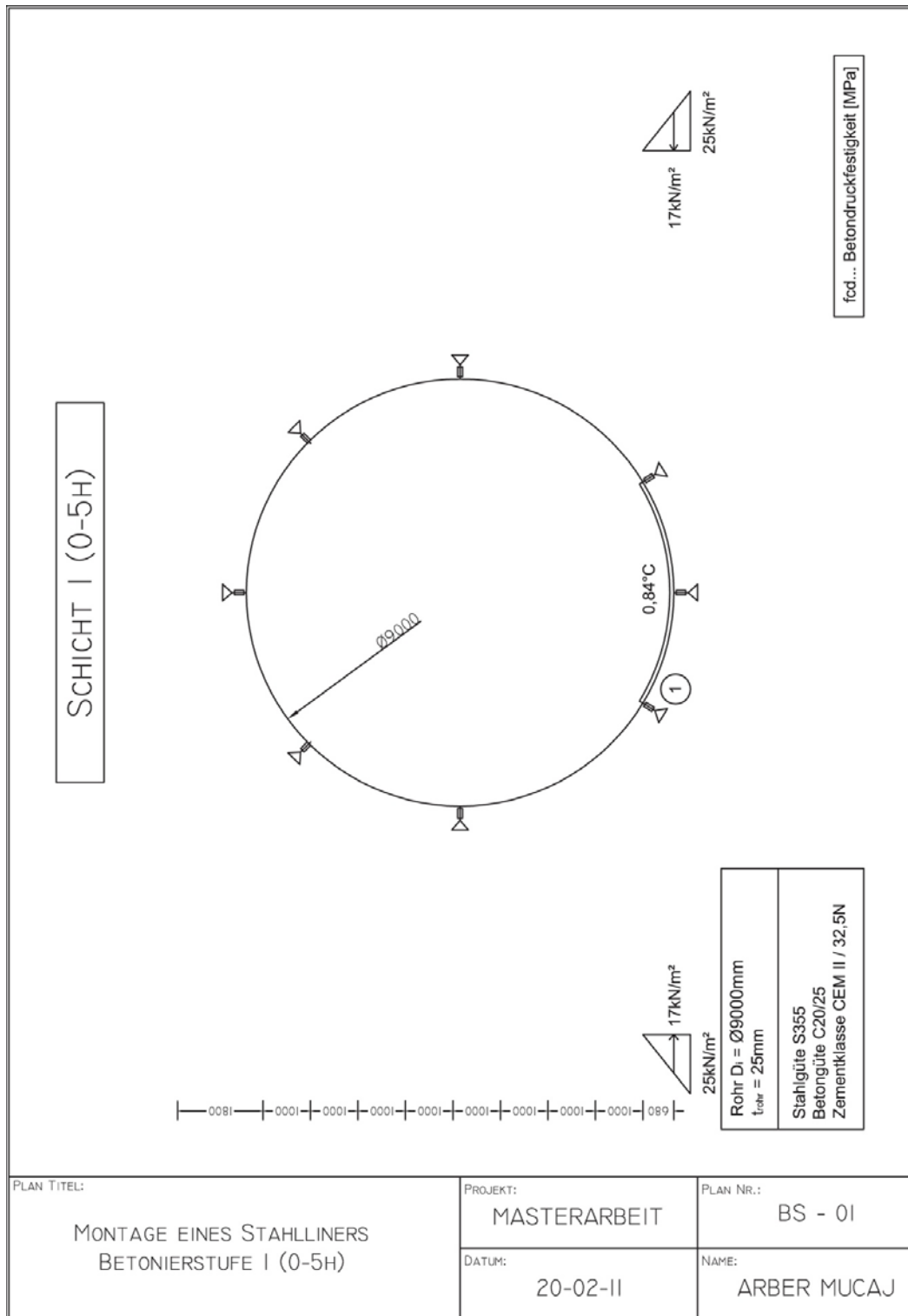


Abb. 142 Systemskizze der Betonierstufe 1 (0-5h)

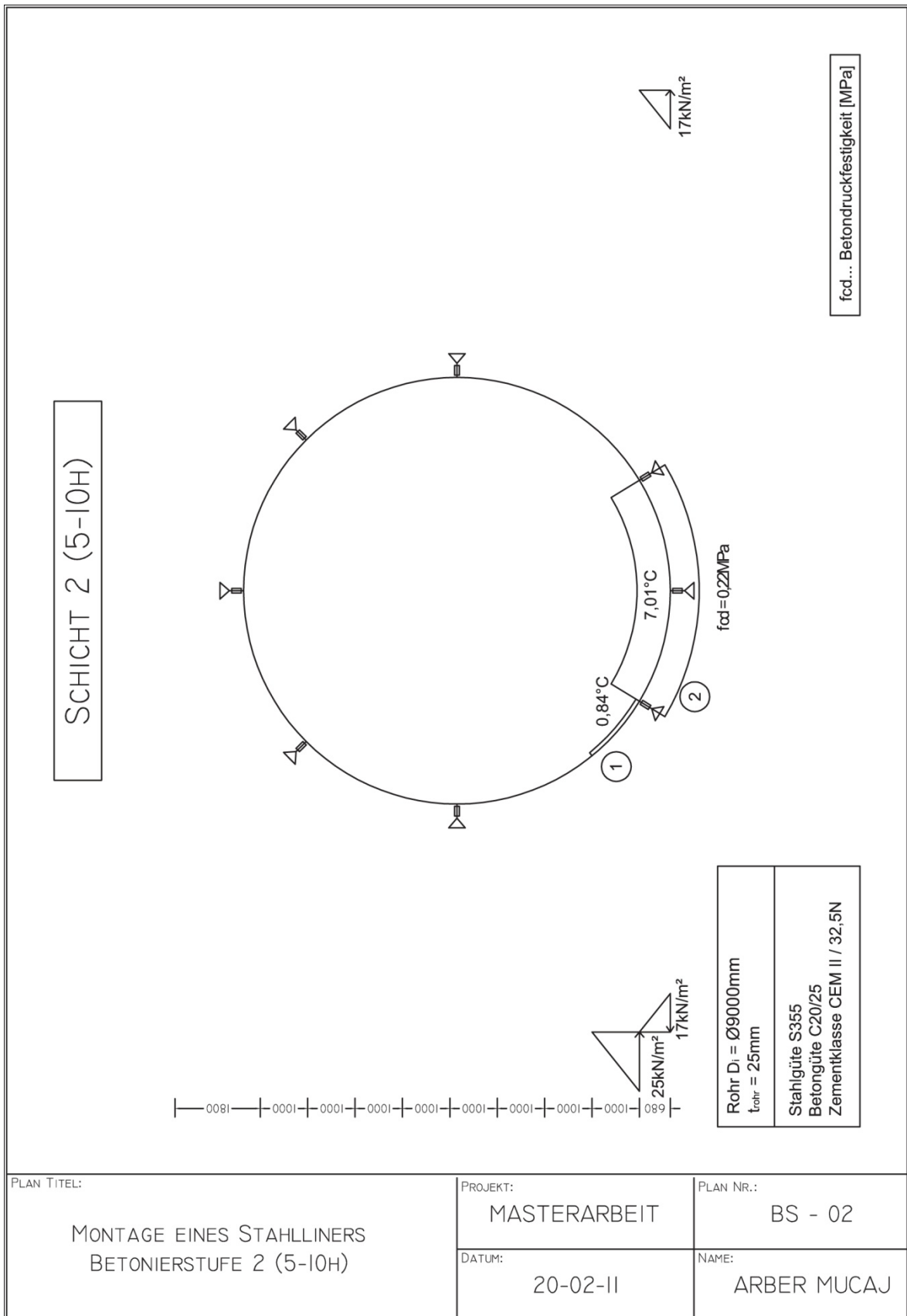
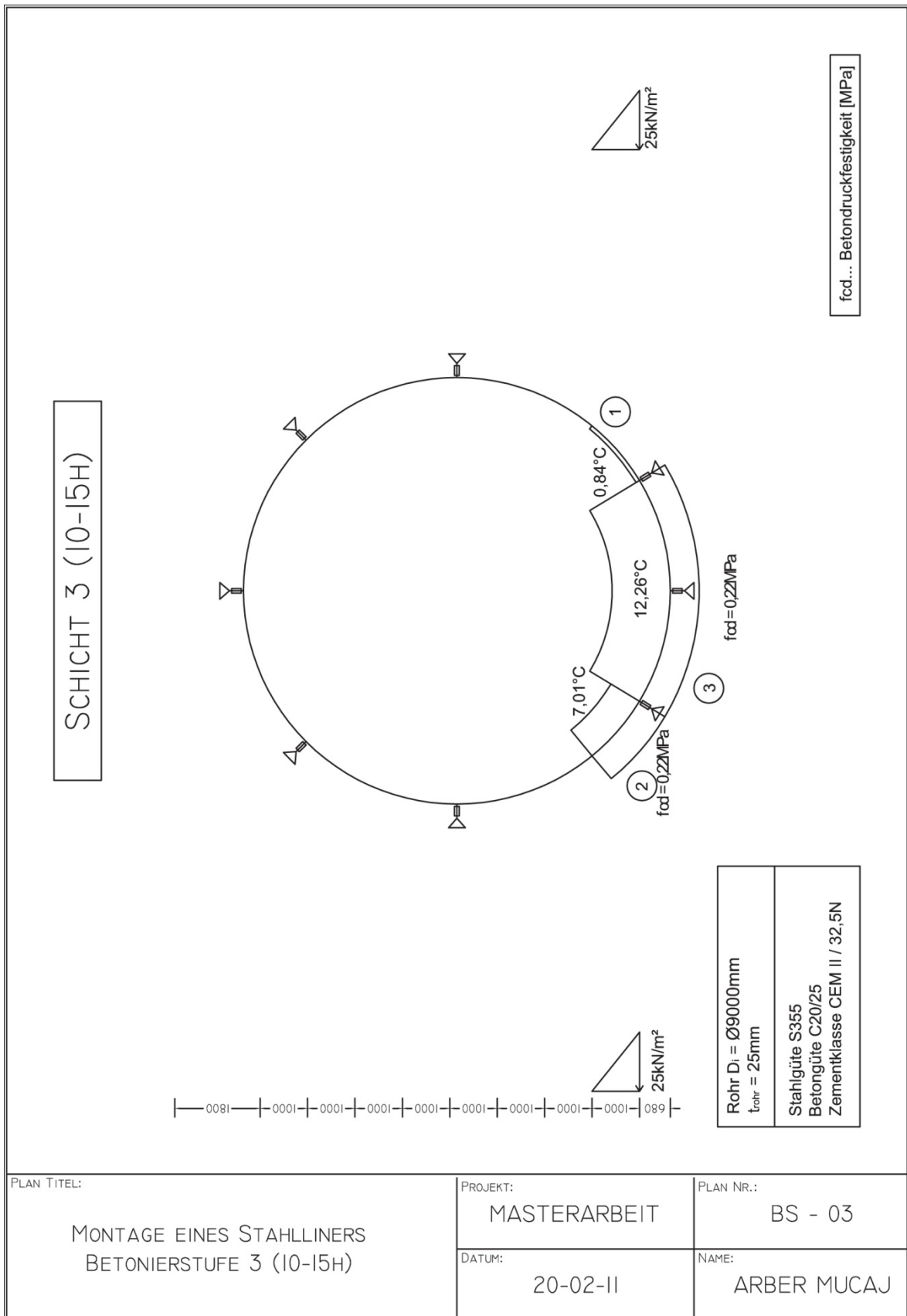


Abb. 143 Systemskizze der Betonierstufe 2 (5-10h)



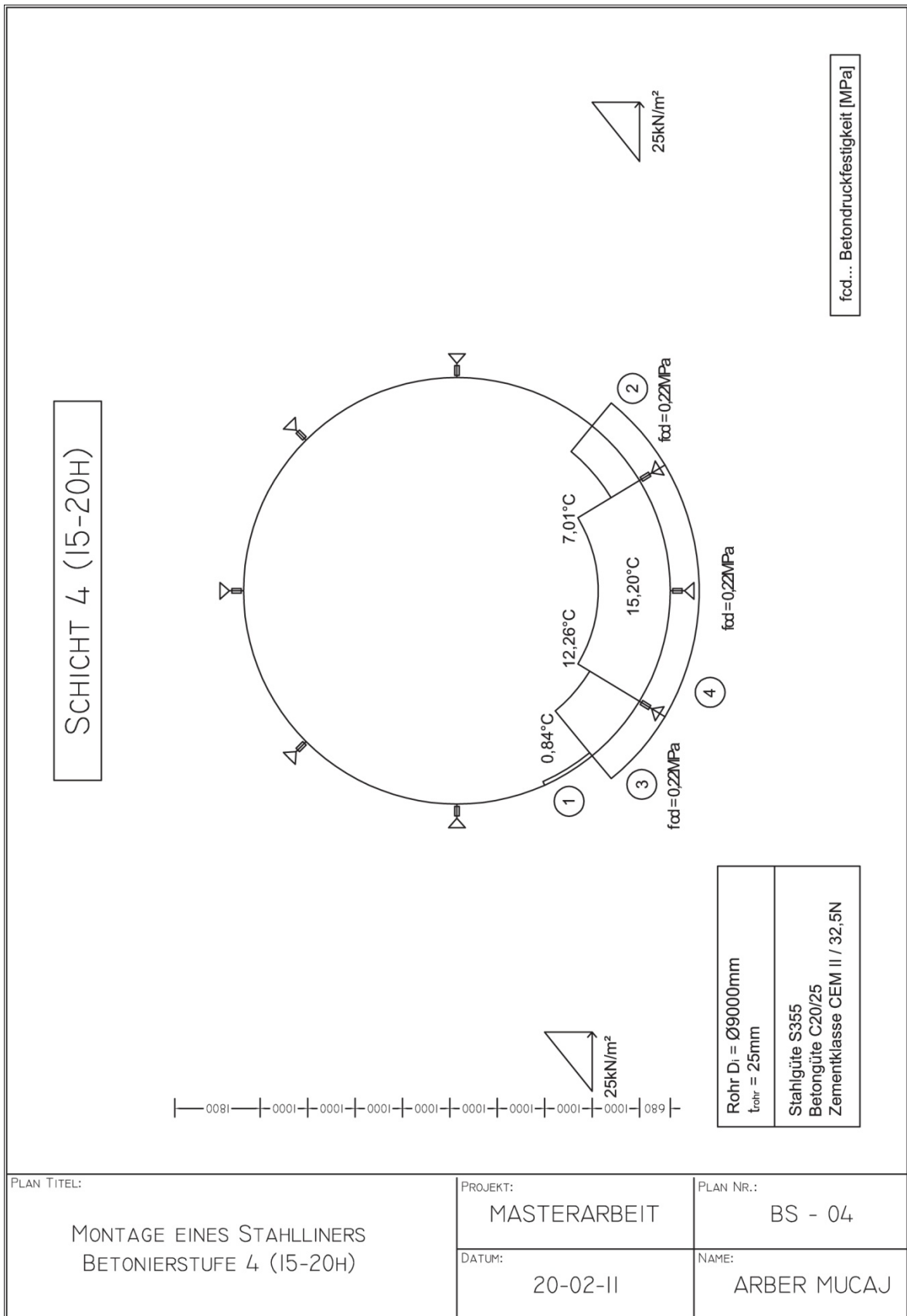


Abb. 145 Systemskizze der Betonierstufe 4 (15-20h)

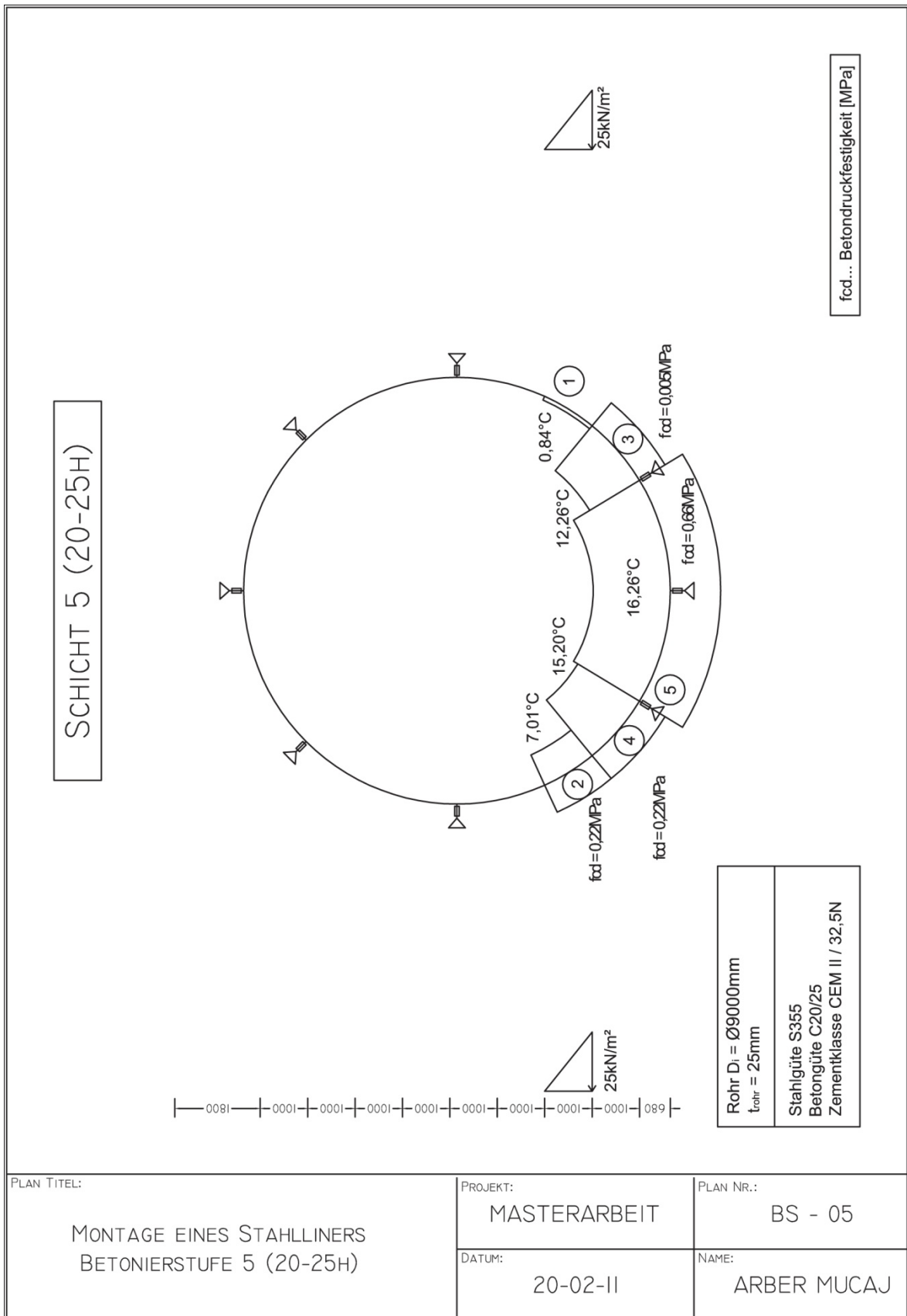


Abb. 146 Systemskizze der Betonierstufe 5 (20-25h)

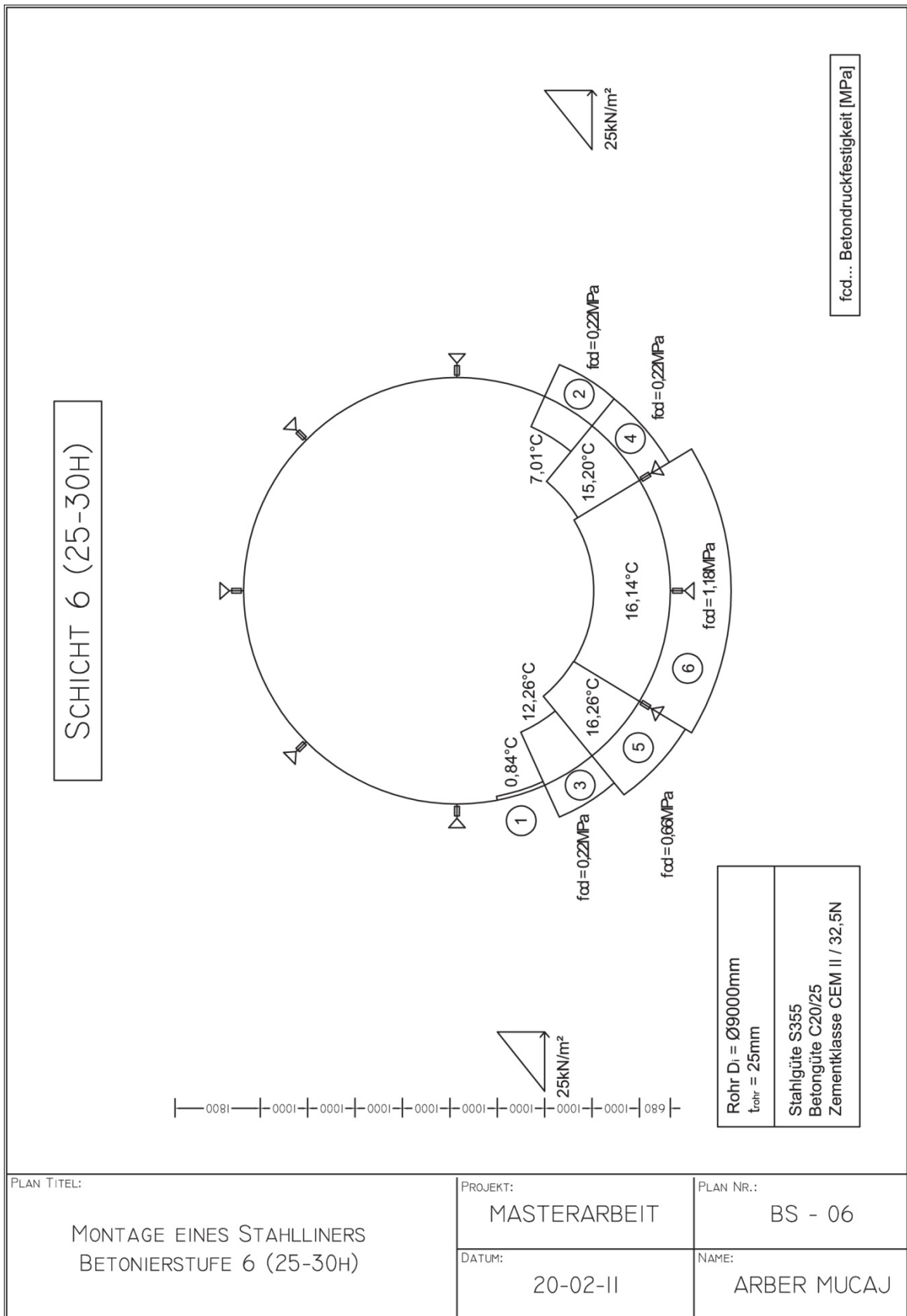


Abb. 147 Systemskizze der Betonierstufe 6 (25-30h)

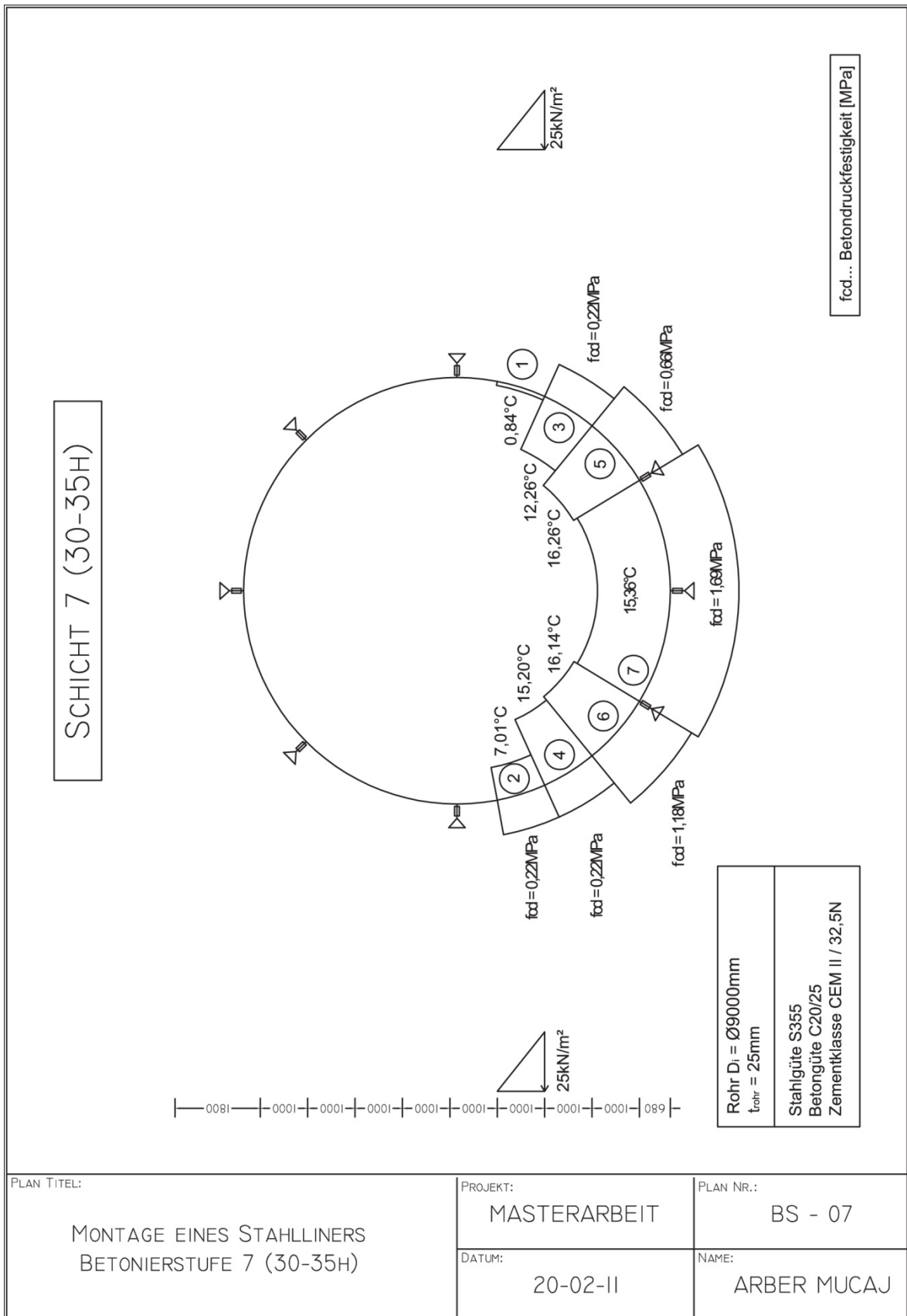


Abb. 148 Systemskizze der Betonierstufe 7 (30-35h)

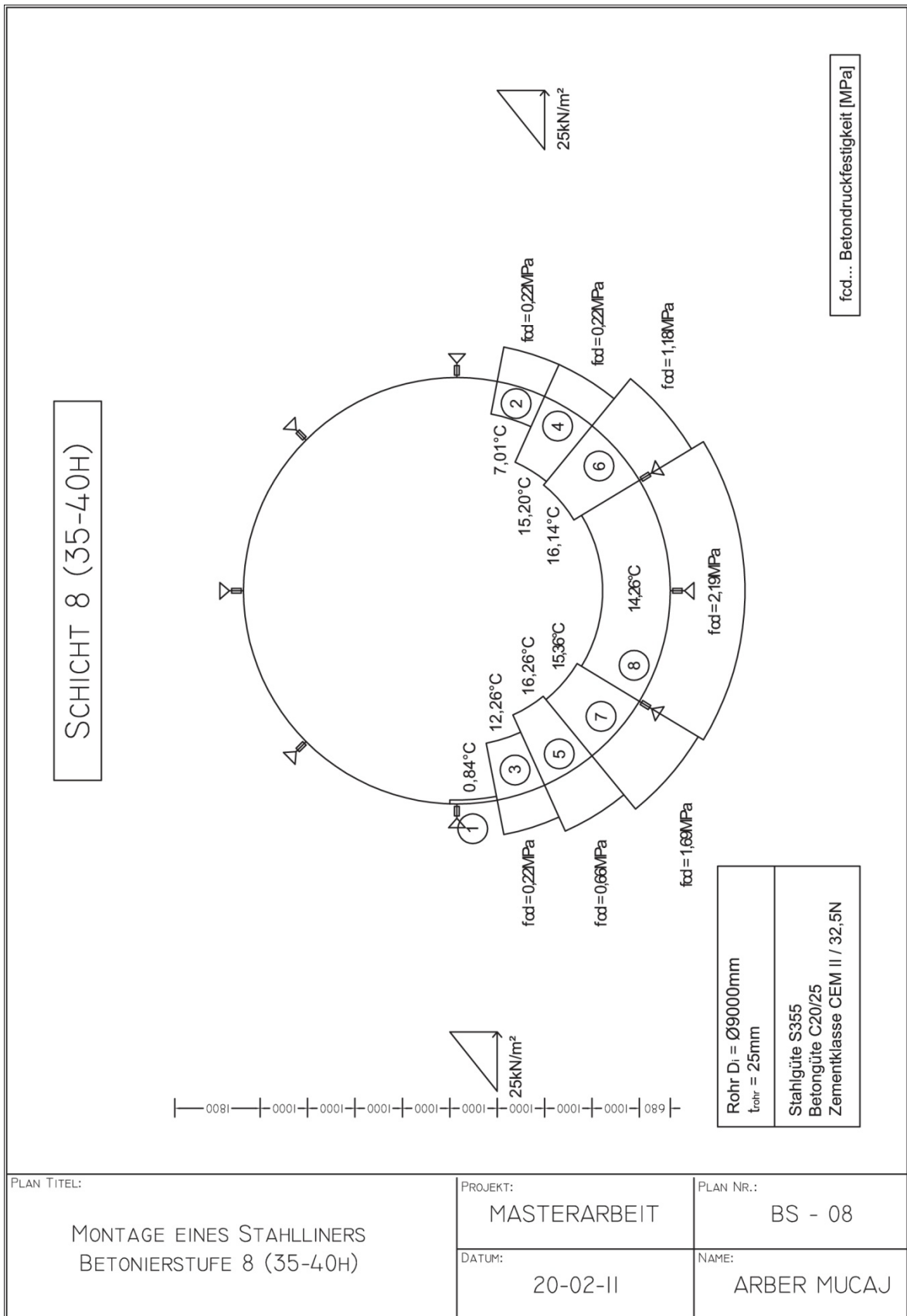


Abb. 149 Systemskizze der Betonierstufe 8 (35-40h)

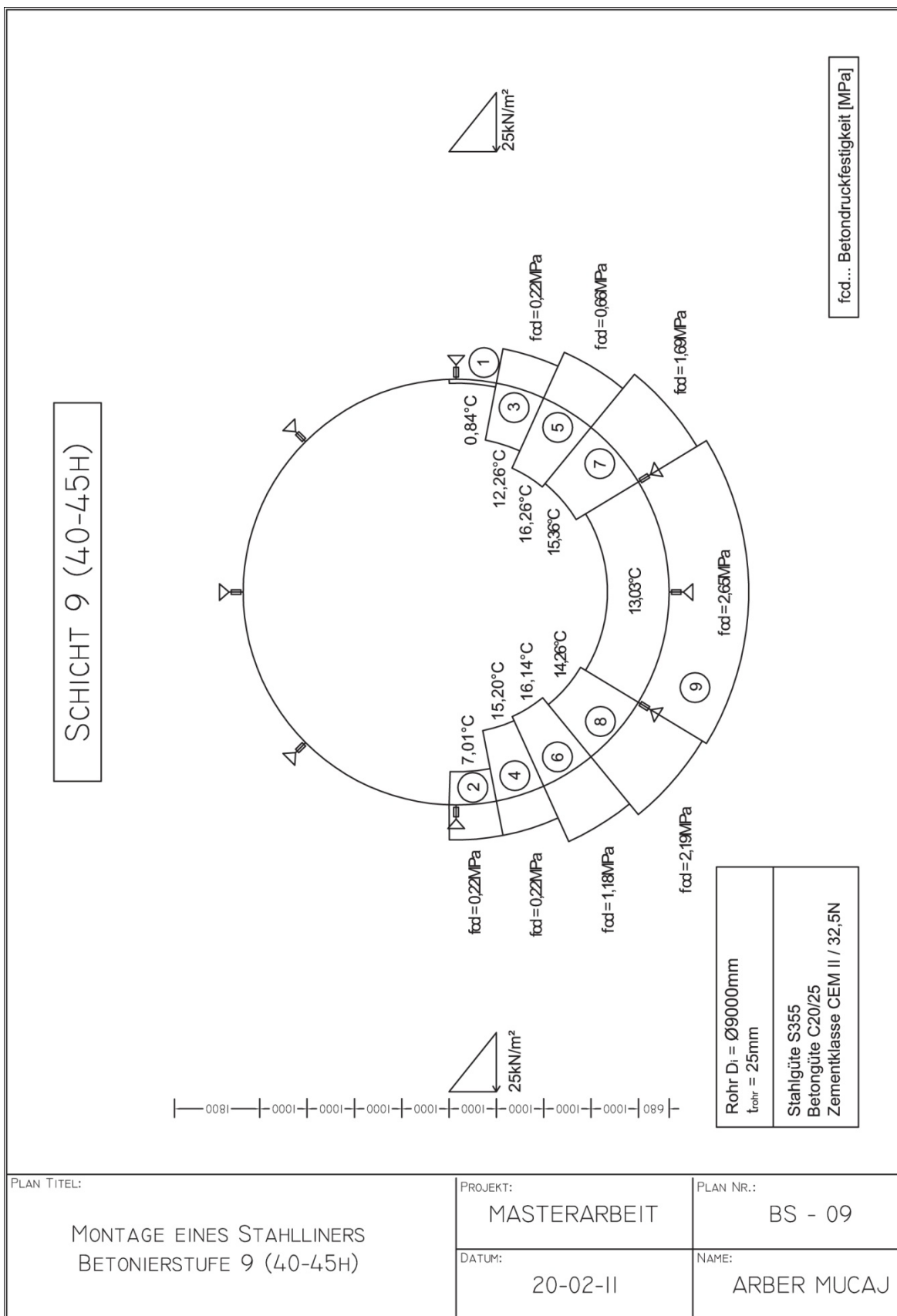


Abb. 150 Systemskizze der Betonierstufe 9 (40-45h)

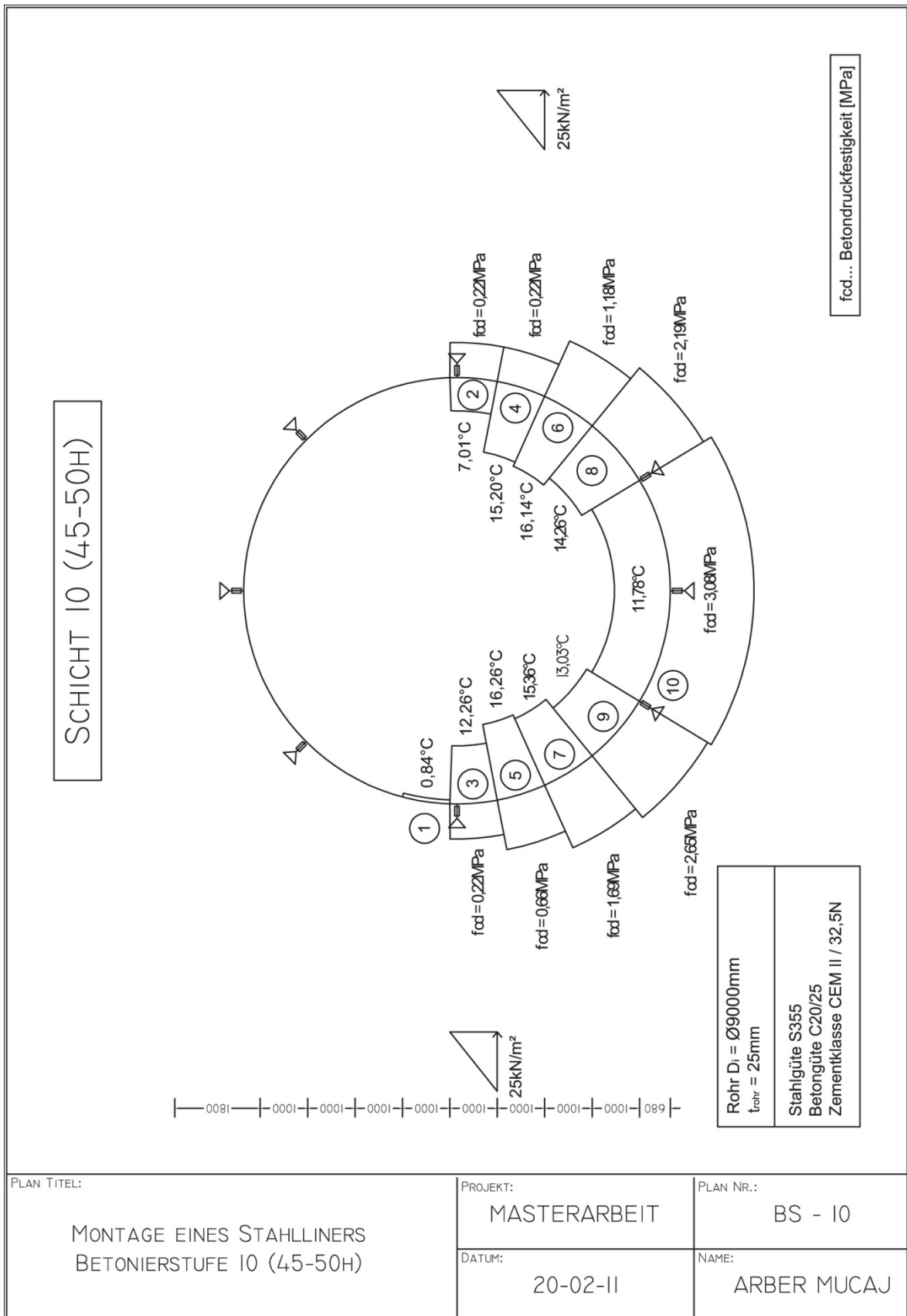


Abb. 151 Systemskizze der Betonierstufe 10 (45-50h)

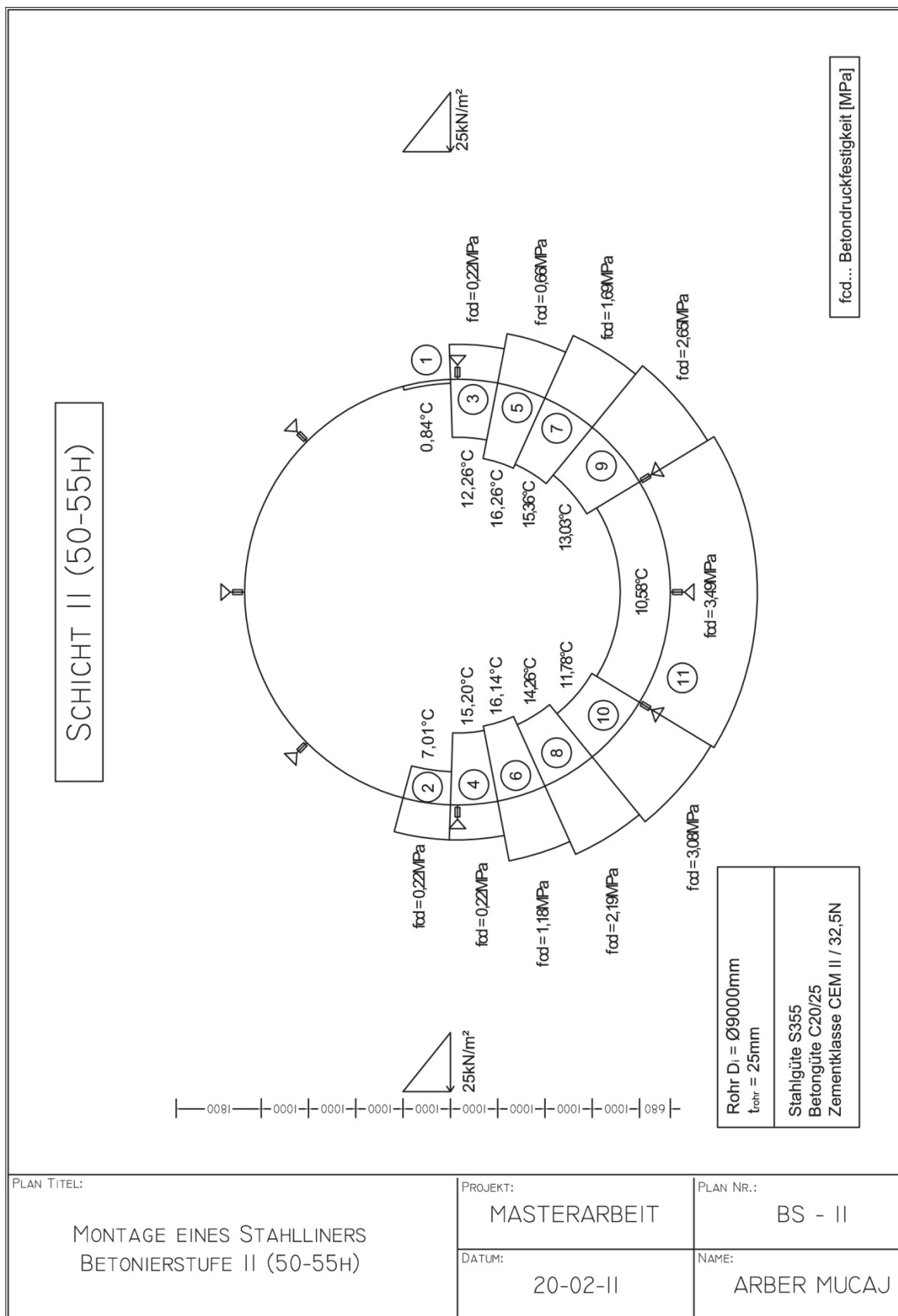
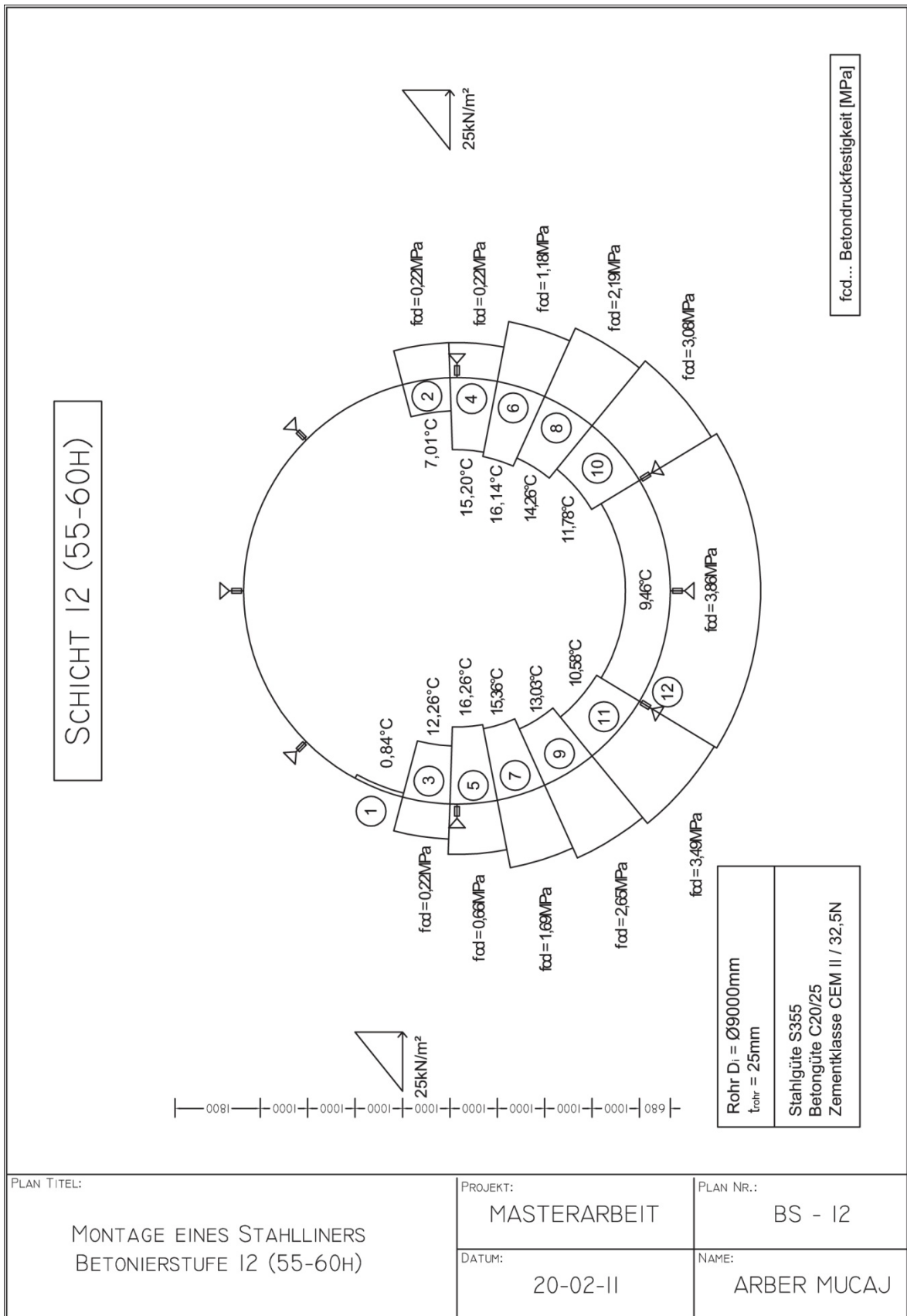


Abb. 152 Systemskizze der Betonierstufe 11 (50-55h)



PLAN TITEL:

MONTAGE EINES STAHLINERS
BETONIERSTUFE 12 (55-60H)

PROJEKT:

MASTERARBEIT

PLAN NR.:

BS - 12

DATUM:

20-02-II

NAME:

ARBER MUCAJ

Abb. 153 Systemskizze der Betonierstufe 12 (55-60h)

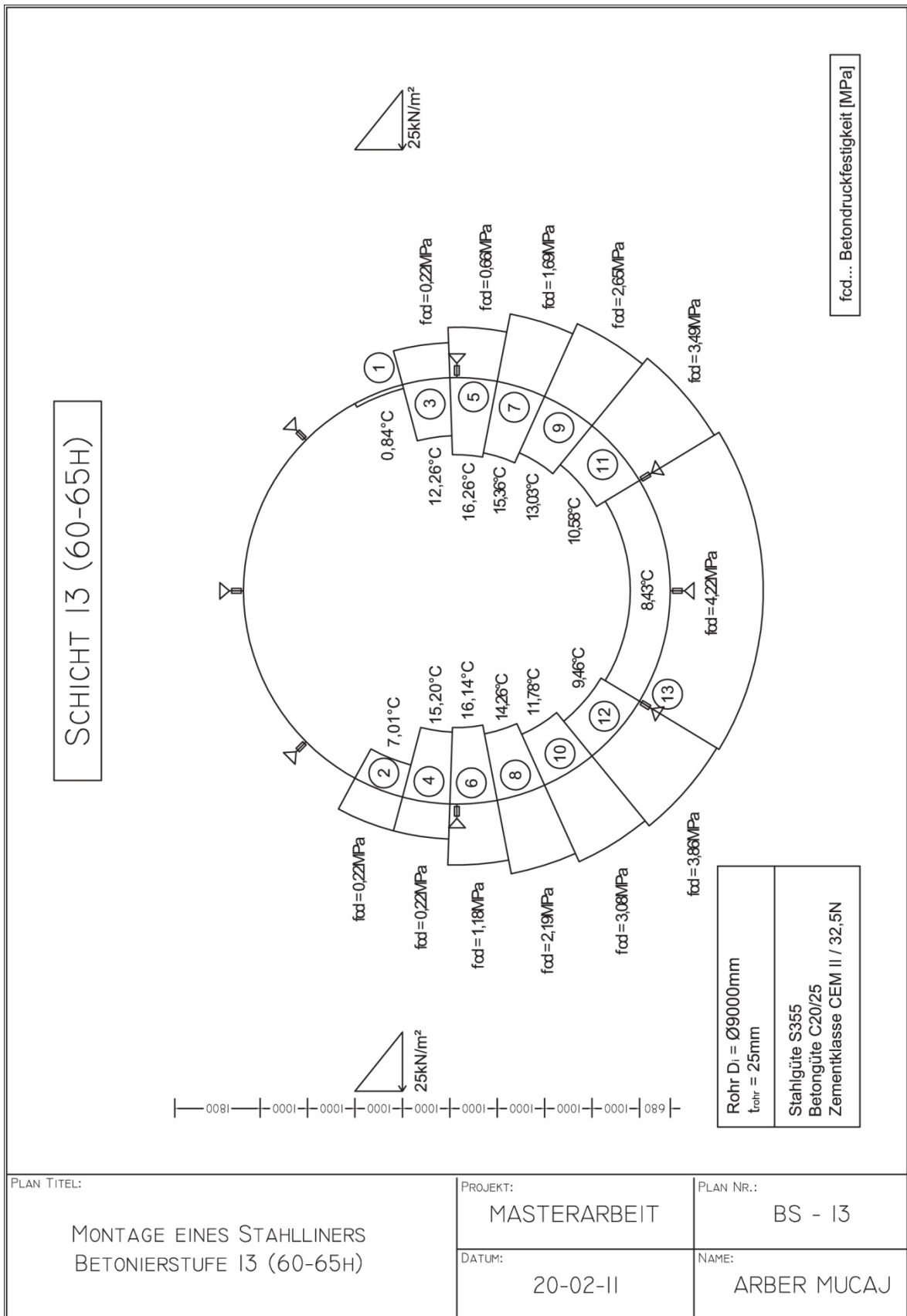


Abb. 154 Systemskizze der Betonierstufe 13 (60-65h)

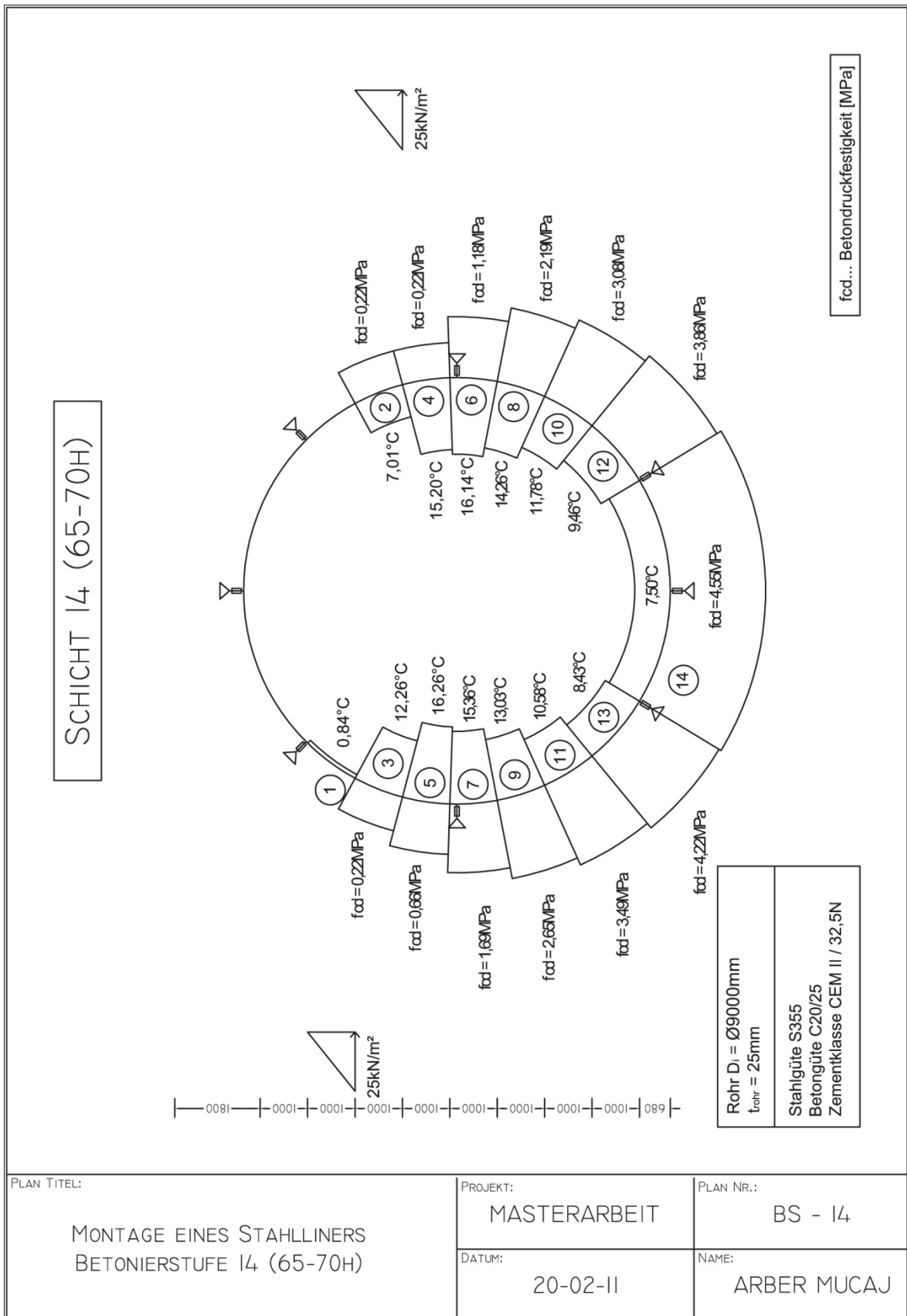


Abb. 155 Systemskizze der Betonierstufe 14 (65-70h)

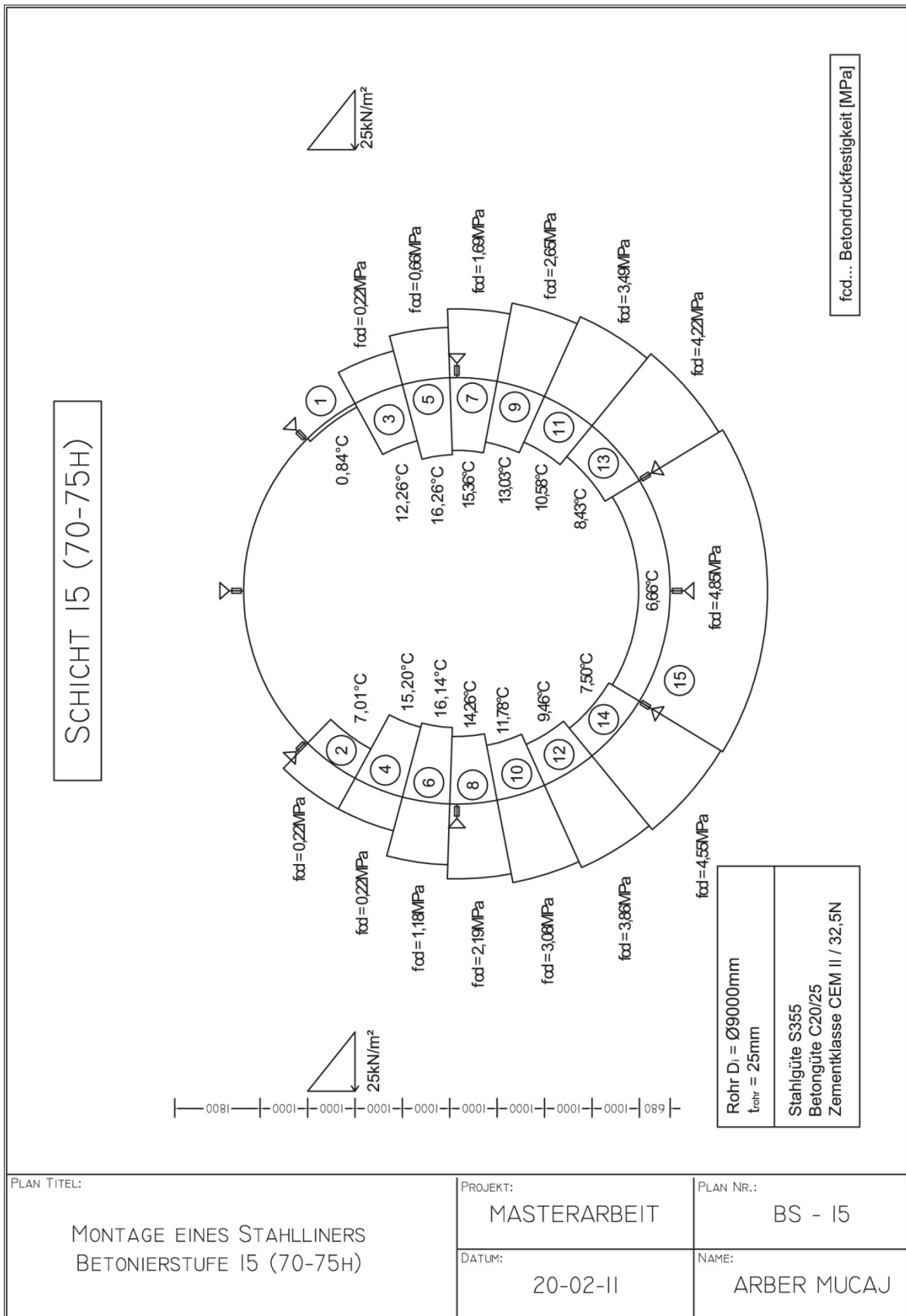


Abb. 156 Systemskizze der Betonierstufe 15 (70-75h)

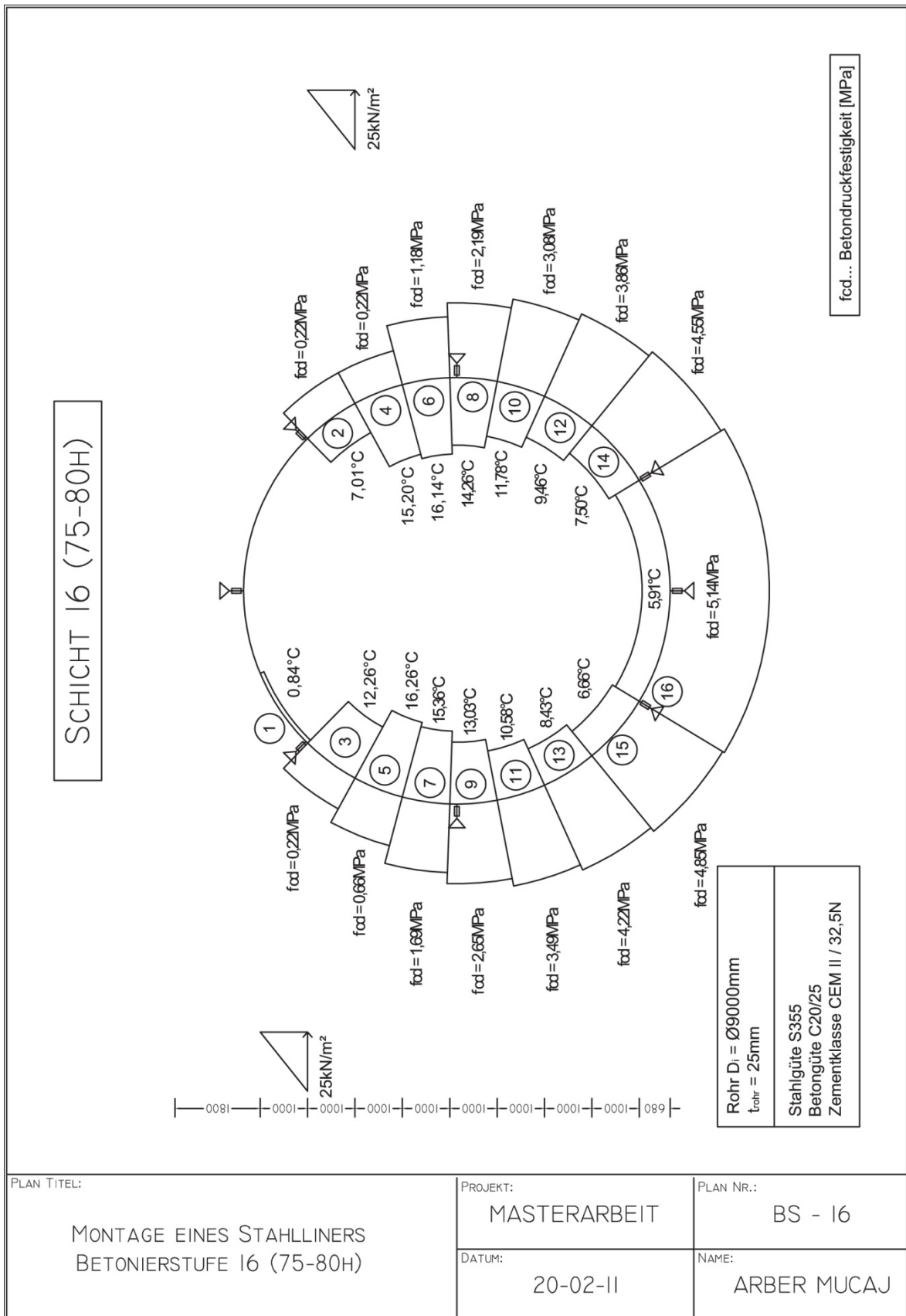


Abb. 157 Systemskizze der Betonierstufe 16 (75-80h)

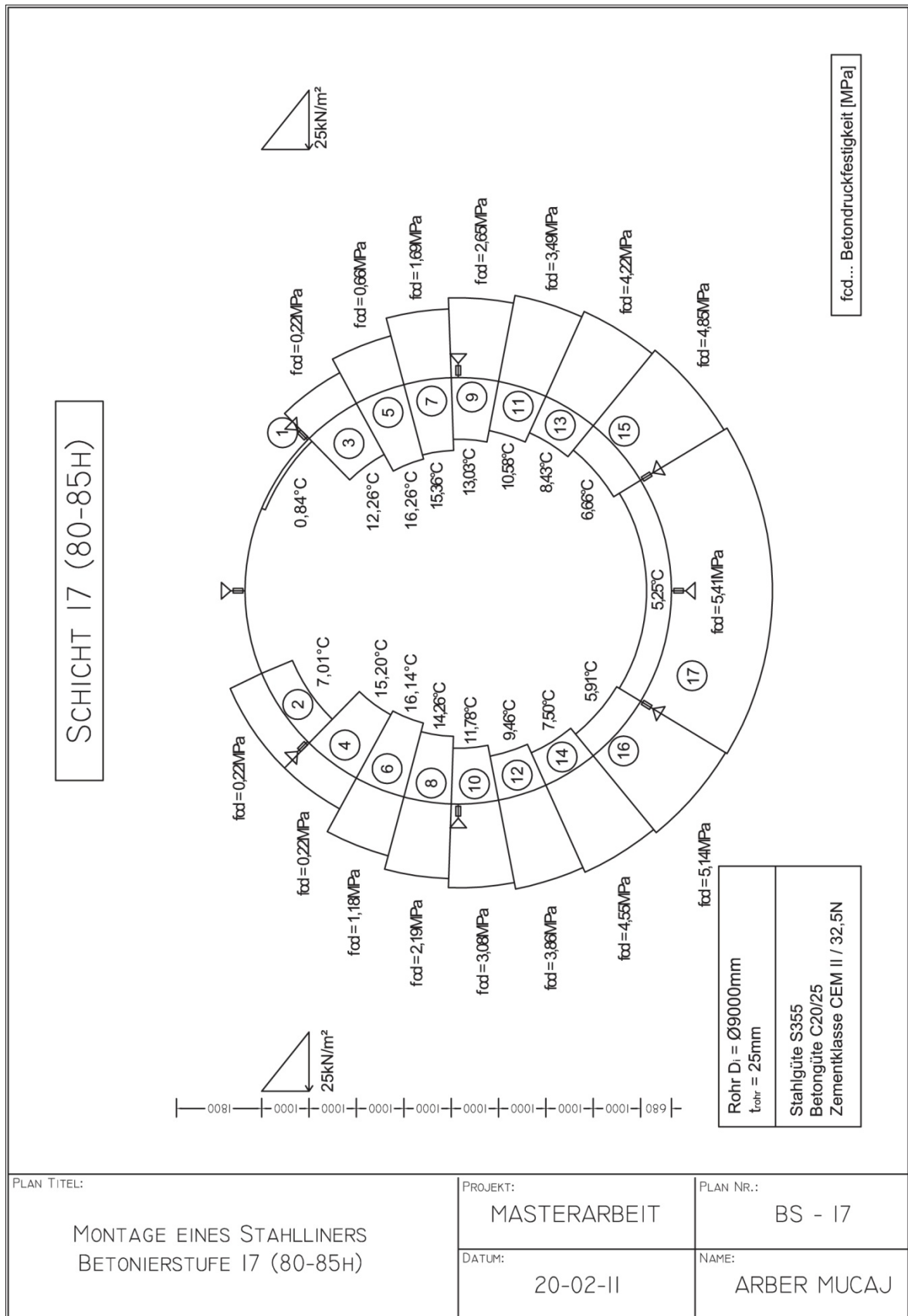


Abb. 158 Systemskizze der Betonierstufe 17 (80-85h)

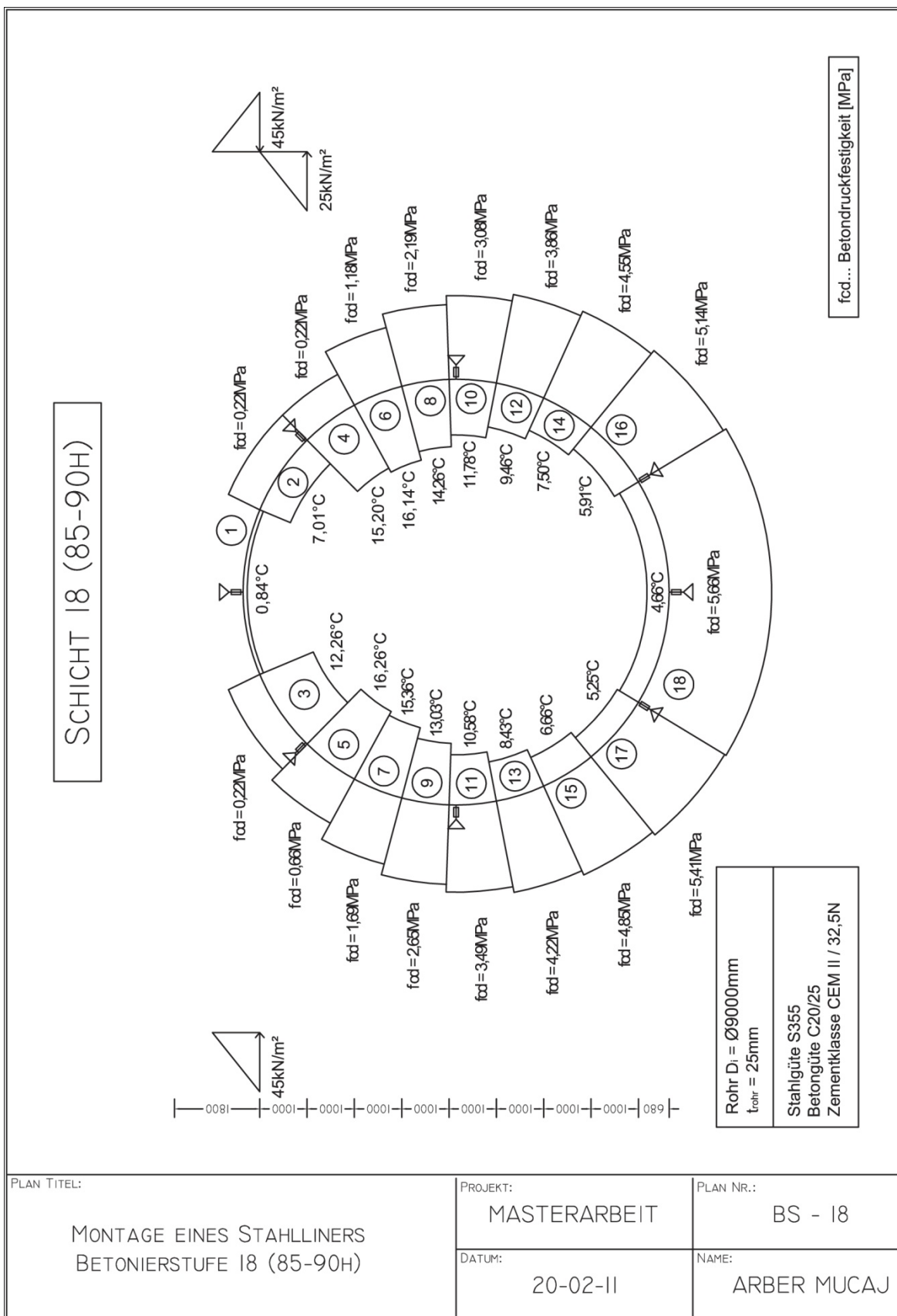


Abb. 159 Systemskizze der Betonierstufe 18 (85-90h)

10 Literaturverzeichnis

- [1] Ott, Christoph.: 2010. Nichtlineare Berechnung des Betoniervorganges eines Stahl-Liners mit großem Durchmesser, Masterarbeit am Institut für Stahlbau und Flächen-tragwerke, TU-GRAZ. 2010
- [2] Lechner, Andreas., Greiner R., Gänzle W. 2010.: Design and Load Carrying Behavior of steel Inlet – liners. 16th International Seminar on Hydropower Plants 2010, Vienna, Austria
- [3] ÖNORM EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbeton-tragwerken, Teil 1–1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Ös-terreichisches Normungsinstitut, Wien, 2009
- [4] C.E.C.T, European Committee for Boilermaking and Kindred Steel Structures. 1979. Recommendations for the Design, Manufacture and Erection of Steel Penstocks of Welded Construction for Hydro Electric Installations. Janvier : Penstock Section, 1979.
- [5] CEB-FIB Modell Code 1990: Bulletin D'Information no. 217. Lausanne, 1993
- [6] DIN 18218: Frischbetondruck auf lotrechte Schalung. Beuth Verlag, 2009
- [7] Kanstad, t, et al.: Mechanical properties of young concrete: Evaluation of test methods for tensile strength and modules of elasticity. Norwegian Inst. of Techn., Trondheim, 1999
- [8] Voith - Hydro. 2010.
- [9] SCIA - Engineer 9.0 Studentenversion Nemetschek, 2009
- [10] RuckZuck 6.0, Studentenversion, Mursoft GmbH
- [11] Microsoft Excel (Office), 2007, Microsoft Corporation, 2007

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Stahl-Liner mit unsymmetrische Kegel [2]	10
Abb. 2	Stahl-Liner Konstruktion [8]	11
Abb. 3	Belastungssituation und Eigenschaften des Betons/Schicht-1 und Schicht-2	12
Abb. 4	Belastungssituation und Eigenschaften des Betons Schicht-11	12
Abb. 5	Belastungssituation und Eigenschaften des Betons Schicht-17	13
Abb. 6	Hydratationswärme	14
Abb. 7	Temperaturverlauf bei $T_{luft} = 20^{\circ}\text{C}$	15
Abb. 8	Verlauf des E_{cc} – Moduls (C20/25)	16
Abb. 9	Verlauf der mittleren Betonzylinderdruckfestigkeit f_{cm} (C20/25)	16
Abb. 10	Zeitlicher Verlauf des Schwindens bei CEM 32,5N, Bauteildimension 1000/1500mm, relative Luftfeuchte 80%	17
Abb. 11	Zeitlicher Verlauf des Schwindens bei CEM 32,5N, Bauteildimension 1000/1500mm, relative Luftfeuchte 80% nach einem Jahr	17
Abb. 12	Darstellung der Betonierabschnitte am Rohr	18
Abb. 13	Modifizierte Entwicklung der Betondruckfestigkeit $f_{cd,mod}$	19
Abb. 14	Modellskizze mit Auflagerbedingungen und Position	20
Abb. 15	Lagerbedingungen des Stahl-Liners	21
Abb. 16	Verteilung des FE-Netzes im Bereich großer Elemente	23
Abb. 17	Verteilung des FE-Netzes im Bereich kleiner Elemente	23
Abb. 18	Ausschnitt des Stahlrohrs mit dargestellten positiven Lokalachsen	24
Abb. 19	Ausschnitt des Beulringes mit dargestellten positiven Lokalachsen	24
Abb. 20	Vorzeichenkonvention der Auflager	25
Abb. 21	Nichtlineare Auflagerbedingung am Bsp. einer Vorspannung und Verschiebung	26
Abb. 22	Bilineare Spannung – Dehnungslinie lt. ÖNORM 1992-1-1 [3]	27
Abb. 23	Nichtlinearer Bettungsverlauf nach 57,5h und einer eingebrachten Verschiebung von 0,3mm	28
Abb. 24	Umfangslänge $[\circ]$ des Stahlrohres	31
Abb. 25	Darstellung der Schnittführung und Definition der Beulringkante	32
Abb. 26	Variante 5a : Beulring 2 / Gesamtverformungen u_z [mm]	33
Abb. 27	Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 1-4	33
Abb. 28	Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 5-8	34
Abb. 29	Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 9-12	34
Abb. 30	Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 13-16	35
Abb. 31	Variante 5a: Beulring 2 / Verformung einzeln u_z [mm] / Schicht 17-18	35
Abb. 32	Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_0	36

Abb. 33	Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_1.....	37
Abb. 34	Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_5.....	37
Abb. 35	Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_12.....	38
Abb. 36	Variante 5a: Vergleich der Einzelverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_18.....	38
Abb. 37	Variante 5a: Vergleich der Gesamtverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_1.....	39
Abb. 38	Variante 5a: Vergleich der Gesamtverformungen zwischen Beulring 2 und Schnitt S2/Schicht_18.....	39
Abb. 39	Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 0-3.....	40
Abb. 40	Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 4-7.....	40
Abb. 41	Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 8-11.....	41
Abb. 42	Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 12-15.....	41
Abb. 43	Variante 5a: Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2 einzeln Schicht 16-18.....	42
Abb. 44	Variante 5a: Gesamt-Längsverformungen (Verwölbungen) u_x [mm] Schnitt S2.....	42
Abb. 45	Längsnormalspannungen $\sigma_{x,w}$ im Stahlrohr infolge Wölbbehinderung [N/mm ²]/Schicht_18.....	43
Abb. 46	Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 0-3.....	44
Abb. 47	Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 4-7.....	45
Abb. 48	Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 8-11.....	45
Abb. 49	Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 12-15.....	46
Abb. 50	Variante 5a: Beulring 2 / einzelnen Normalkraftverläufe N [kN] / Schicht 16-18.....	46
Abb. 51	Variante 5a: Beulring 2 / Gesamtnormalkraft N [kN].....	47
Abb. 52	Variante 5a: Beulring 2 / Gesamtquerkraft V_z [kN].....	48
Abb. 53	Variante 5a: Beulring 2 / Gesamtmoment M_y [kNm].....	48
Abb. 54	Variante 5a: Beulring 2 / Spannungen außen σ [N/mm ²].....	49
Abb. 55	Variante 5a: Beulring 2 / Spannungen innen σ [N/mm ²].....	49
Abb. 56	Variante 5a: Beulring 3 / Spannungen außen σ [N/mm ²].....	50
Abb. 57	Variante 5a: Beulring 3 / Spannungen innen σ [N/mm ²].....	50
Abb. 58	Gesamtmembranschnittkräfte n_x [kN/m] / Schnitt S1.....	51
Abb. 59	Gesamtmembranschnittkräfte n_y [kN/m] / Schnitt S1.....	51
Abb. 60	Variante 5a: Rohr / S1 / Längsspannung/außen σ_x^- [N/mm ²].....	52
Abb. 61	Variante 5a: Rohr / S1 / Längsspannung/innen σ_x^+ [N/mm ²].....	52

Abb. 62	Variante 5a: Rohr / S1 / Umfangsspannung/außen σ_y - [N/mm ²].....	53
Abb. 63	Variante 5a: Rohr / S1 / Umfangsspannung / innen σ_y + [N/mm ²]	53
Abb. 64	Variante 5a: Rohr/S1/Vergleichsspannung/außen σ_v - [N/mm ²]	54
Abb. 65	Variante 5a: Rohr/S1/Vergleichsspannung/innen σ_v + [N/mm ²].....	54
Abb. 66	Variante 5a: Rohr/ S1a / Vergleichsspannung mit Schubspannungswirkung /außen σ_v - [N/mm ²].....	55
Abb. 67	Variante 5a: Rohr/ S1a / Vergleichsspannung mit Schubspannungswirkung /innen σ_v + [N/mm ²].....	55
Abb. 68	Variante 5a: Rohr / S2 / Längsspannung/außen σ_x - [N/mm ²].....	56
Abb. 69	Variante 5a: Rohr / S2 / Längsspannung/innen σ_x + [N/mm ²].....	56
Abb. 70	Variante 5a: Rohr / S2 /Umfangsspannung/außen σ_y - [N/mm ²].....	57
Abb. 71	Variante 5a: Rohr / S2 / Umfangsspannung / innen σ_y + [N/mm ²]	57
Abb. 72	Variante 5a: Rohr/S2/Vergleichsspannung/außen σ_v - [N/mm ²]	58
Abb. 73	Variante 5a: Rohr/S2/Vergleichsspannung/innen σ_v + [N/mm ²].....	58
Abb. 74	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_0.....	59
Abb. 75	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_1.....	60
Abb. 76	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_2.....	61
Abb. 77	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_3.....	62
Abb. 78	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_4.....	63
Abb. 79	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_5.....	64
Abb. 80	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_6.....	65
Abb. 81	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_7.....	66
Abb. 82	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_8.....	67
Abb. 83	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_9.....	68
Abb. 84	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_10.....	69
Abb. 85	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_11.....	70
Abb. 86	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_12.....	71
Abb. 87	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_13.....	72
Abb. 88	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_14.....	73
Abb. 89	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_15.....	74
Abb. 90	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_16.....	75
Abb. 91	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_17.....	76
Abb. 92	Konturplot / Schnittkräfte im Rohr /nx, ny, mx, my, nxy, mxy /Schicht_18.....	77
Abb. 93	Variante 5b: Beulring / Gesamtverformungen u_z [mm]	78
Abb. 94	Variante 5b: Beulring 2 / Spannungen außen σ [N/mm ²].....	80
Abb. 95	Variante 2: Beulring 2 / Spannungen innen σ [N/mm ²]	80
Abb. 96	Variante 2: Rohr / S1 / Längsspannung/außen σ_x - [N/mm ²]	81

Abb. 97	Variante 2: Rohr / S1 / Längsspannung/innen σ_{x+} [N/mm ²].....	81
Abb. 98	Variante 2: Rohr / S1 / Umfangsspannung/außen σ_{y-} [N/mm ²].....	82
Abb. 99	Variante 2: Rohr / S1 / Umfangsspannung/innen σ_{y+} [N/mm ²].....	82
Abb. 100	Variante 2: Rohr/S1/Vergleichsspannung/außen σ_{v-} [N/mm ²].....	83
Abb. 101	Variante 2: Rohr/S1/Vergleichsspannung/innen σ_{v+} [N/mm ²].....	83
Abb. 102	Variante 2: Rohr / S2 / Längsspannung/außen σ_{x-} [N/mm ²].....	84
Abb. 103	Variante 2: Rohr / S2 / Längsspannung/innen σ_{x+} [N/mm ²].....	84
Abb. 104	Variante 2: Rohr / S2 / Umfangsspannung/außen σ_{y-} [N/mm ²].....	85
Abb. 105	Variante 2: Rohr / S2 / Umfangsspannung/innen σ_{y+} [N/mm ²].....	85
Abb. 106	Variante 2: Rohr/S2/Vergleichsspannung/außen σ_{v-} [N/mm ²].....	86
Abb. 107	Variante 2: Rohr/S2/Vergleichsspannung/innen σ_{v+} [N/mm ²].....	86
Abb. 108	Verformungsfigur unter Eigengewicht.....	87
Abb. 109	Verformungsfigur während des ersten Betonierschrittes.....	88
Abb. 110	Verformungsfigur während des zweiten Betonierschrittes.....	88
Abb. 111	Momentenverlauf einzeln/Schicht-0 bis Schicht 9 [kNm].....	92
Abb. 112	Momentenverlauf einzeln/Schicht-10 bis Schicht-18 [kNm].....	93
Abb. 113	Mitwirkende Schalenbreite für ringversteiften Querschnitt [mm].....	94
Abb. 114	Ersatzmodell / Beulring/ Schicht-17.....	96
Abb. 115	Variante 5a: Beulring 2 / Momente M_y [kNm] / Schicht 17.....	97
Abb. 116	Variante 5a: Beulring 2 / Normalkraft N [kN] / Schicht 17.....	97
Abb. 117	Ersatzmodell / Beulring / Schicht 18.....	100
Abb. 118	Variante 5a: Beulring 2 / Momente M_y [kNm] / Schicht 18.....	101
Abb. 119	Variante 5a: Beulring 2 / Normalkraft N [kN] / Schicht 18.....	101
Abb. 120	Ovalität laut [4].....	103
Abb. 121	Richtung der Achsen 1,2,3 zur Ermittlung der Ovalität.....	104
Abb. 122	Die Unrundheit laut [4].....	109
Abb. 123	Bestimmung der Unrundheit des Stahlrohres.....	110
Abb. 124	Die maximale Stelle der Unrundheit inkl.Eigengewicht.....	111
Abb. 125	Die maximale Stelle der Unrundheit exkl. Eigengewicht.....	112
Abb. 126	Vergleich der Radialverformungen u_z [mm] des Eigengewichtes / Schnitt S1 (1m und 3m Auflagerabstand).....	115
Abb. 127	Gesamtvergleich der Radialverformung u_z [mm] / schnitt S1 (1m und 3m Auflagerabstand).....	116
Abb. 128	Spannungsvergleich / Beulring / $\sigma_{,au\ddot{a}u\ddot{e}n}$ [N/mm ²] / Schicht 0 (1m und 3m Auflagerabstand).....	118
Abb. 129	Gesamtspannungsvergleich / Beulring / $\sigma_{,au\ddot{a}u\ddot{e}n}$ [N/mm ²] / Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand).....	119

Abb. 130	Gesamtspannungsvergleich / Beulring / σ_{innen} [N/mm ²] / Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)	119
Abb. 131	Vergleich der Vergleichsspannungen/außen $\sigma_{\text{v-}}$ [N/mm ²] /Rohr/S1 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)	120
Abb. 132	Vergleich der Vergleichsspannungen/innen $\sigma_{\text{v+}}$ [N/mm ²] /Rohr/S1 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)	120
Abb. 133	Vergleich der Vergleichsspannungen/außen $\sigma_{\text{v-}}$ [N/mm ²] /Rohr/S2 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)	121
Abb. 134	Vergleich der Vergleichsspannungen/innen $\sigma_{\text{v+}}$ [N/mm ²] /Rohr/S2 Schicht 18 (1m und 3m Auflagerabstand)	121
Abb. 135	Ringspannungen für einzelne Montageschritte oben σ_{x} [N/mm ²].....	124
Abb. 136	Ringspannungen gesamt oben σ_{x} [N/mm ²] (Schicht 17 und Schicht 18)	125
Abb. 137	Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 1-4.....	129
Abb. 138	Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 5-8.....	129
Abb. 139	Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 9-12.....	130
Abb. 140	Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 13-16.....	130
Abb. 141	Variante 5b : Beulring 2 / Verformungen einzeln uz [mm] /Schicht 17-18.....	131
Abb. 142	Systemskizze der Betonierstufe 1 (0-5h)	132
Abb. 143	Systemskizze der Betonierstufe 2 (5-10h)	133
Abb. 144	Systemskizze der Betonierstufe 3 (10-15h)	134
Abb. 145	Systemskizze der Betonierstufe 4 (15-20h)	135
Abb. 146	Systemskizze der Betonierstufe 5 (20-25h)	136
Abb. 147	Systemskizze der Betonierstufe 6 (25-30h)	137
Abb. 148	Systemskizze der Betonierstufe 7 (30-35h)	138
Abb. 149	Systemskizze der Betonierstufe 8 (35-40h)	139
Abb. 150	Systemskizze der Betonierstufe 9 (40-45h)	140
Abb. 151	Systemskizze der Betonierstufe 10 (45-50h)	141
Abb. 152	Systemskizze der Betonierstufe 11 (50-55h)	142
Abb. 153	Systemskizze der Betonierstufe 12 (55-60h)	143
Abb. 154	Systemskizze der Betonierstufe 13 (60-65h)	144
Abb. 155	Systemskizze der Betonierstufe 14 (65-70h)	145
Abb. 156	Systemskizze der Betonierstufe 15 (70-75h)	146
Abb. 157	Systemskizze der Betonierstufe 16 (75-80h)	147
Abb. 158	Systemskizze der Betonierstufe 17 (80-85h)	148
Abb. 159	Systemskizze der Betonierstufe 18 (85-90h)	149

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Variante 5a: Entwicklung der Betondruckfestigkeit und der Temperatur C20/25	29
Tab. 2	Variante 5b: Entwicklung der Betondruckfestigkeit und der Temperatur C40/50	30
Tab. 3	Spannungsdifferenz infolge des Poisson-Effekts /Schicht_0 / 180°	89
Tab. 4	Reduzierende Werte der Momente/Schicht 17	95
Tab. 5	Reduzierung der Spannungen im Beulring 2/Schicht -17	98
Tab. 6	Reduzierte Werte der Momente/Schicht 18	99
Tab. 7	Reduzierung der Spannungen im Beulring 2/Schicht -18	99
Tab. 8	Tabelle der Hauptergebnisse	102
Tab. 9	Radialverformungen im Schnitt S2 inkl. Eigengewicht	105
Tab. 10	Die Ovalität inkl. Eigengewicht	106
Tab. 11	Radialverformungen im Schnitt S2 exkl. Eigengewicht	107
Tab. 12	Ovalität exkl. Eigengewicht.....	108
Tab. 13	Unrundheit inkl. Verformungen aus dem Eigengewicht an verschiedenen Stellen 111	
Tab. 14	Unrundheit exkl. Verformungen aus dem Eigengewicht an verschiedenen Stellen 112	
Tab. 15	Variante 5: Entwicklung der Auflagerkräfte ULS von Schicht 0-18.....	113
Tab. 16	Variante 5: Entwicklung der Auflagerkräfte SLS von Schicht 0-18	114
Tab. 17	Spannungsunterschied / Beulring σ ,oben [N/mm ²] / (1m-3m Auflagerabstand)	117
Tab. 18	Spannungsunterschied / Beulring σ ,unten [N/mm ²] / (1m-3m Auflagerabstand)	118
Tab. 19	Unterschied der Vergleichsspannungen σ_v ,innen / 1m und 3m Auflagerabstand 122	
Tab. 20	Unterschied der Vergleichsspannungen σ_v ,außen / 1m und 3m Auflagerabstand 123	

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:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

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
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl