



Kirsten Müller, BSc

**Untersuchungen zum Tragverhalten
dünnwandiger, vorgespannter Flächenelemente
aus Textilbeton**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Englhardt

Mitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn., Manfred Zellinger

Institut für Hochbau

EIDESSTATTLICHE 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 entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich während meines Studiums und der Masterarbeit unterstützt haben.

Von universitärer Seite bedanke ich mich bei Prof. Dr.techn. Oliver Englhardt und Dr.techn. Manfred Zellinger für ihre wertvollen Beiträge.

Danken möchte ich auch meiner Familie und meinen Freunden, die mir immer zur Seite standen. Mein besonderer Dank gebührt dabei meinen Eltern, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützten.

Ort, am

Kirsten Müller

Kurzfassung

Textilbeton ist ein Kompositmaterial, welches ein ähnliches Tragverhalten wie Stahlbeton an den Tag legt. Jedoch kann dieses, dank einer korrosionsbeständiger Bewehrung, mit einer wesentlich geringeren Betondeckungen ausgeführt werden. So sind sehr schlanke und leichte Konstruktionen möglich.

Zur weiteren Optimierung des Tragverhaltens kann eine Vorspannung hinzugefügt werden. Dank dieser kann der Moment des Erstrisses hinausgezögert werden, und somit Verformungen gering gehalten, bzw. Traglasten gesteigert werden.

Aus Überlegungen, wie die Vorspannung eingebracht werden kann, ohne sich dabei auf ebene Flächen festzulegen, entwickelte sich die Idee, die textile Bewehrung wie eine Membran zu behandeln. Das bedeutet, aufgrund der Form des Textils besitzt dieses bereits eine Vorspannung sobald es aufgespannt ist. Dies ermöglicht eine neue Vielfalt an Formen, da die Vorspannung auf verschiedene Geometrien angewendet werden kann.

Die vorliegende Arbeit befasst sich zu Beginn mit den Grundlagen von Textilbeton und Membrankonstruktionen. Aufbauend auf dem erarbeiteten Wissen werden Finiten-Element-Modelle erstellt, anhand welcher das Tragverhalten von dünnwandigen, vorgespannten Textilbetonelementen untersucht wird.

Abstract

The load-bearing behavior of textile-reinforced concrete is similar to the one of steel-reinforced concrete. The big advantage of textile-reinforced concrete though is that due to the fact that the fabrics are corrosion-resistant, the concrete cover of the reinforcement can be relatively thin - just a few millimeters of fabrics compared to at least three centimeters at steel reinforcement. Hence, very light structures, conforming to the progress of architectural requirements, are possible.

In addition, to improve the load-bearing behavior, it is possible to pre-stress the textile. This leads to a delay of the initial crack, loads can be increased as well as deflection can be reduced.

It is rather easy to pre-stress the textile for flat structures, but compared to that, it gets more complicated for curved ones.

To solve this problem, the idea came up to use the textile reinforcement like a membrane, which already is under tension, due to its form. This way the membrane puts the concrete under tension before it gets loaded - this is the pre-stress. Thanks to the diversity of possible forms of membranes, new structures with textile reinforced concrete, which are also pre-stressed, where possible.

This study deals with the main properties of textile concrete and membrane constructions and discusses the influence on the load-bearing behavior due to pre-stressing flat and curved, textile-reinforced concrete elements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
1.2	Aufbau und Inhalt der Masterarbeit	2
2	Tragverhalten und Eigenschaften	3
2.1	Textilbeton	3
2.1.1	<i>Filamente, Rovings, Garne und Textile</i>	4
2.1.2	<i>Betone</i>	6
2.1.3	<i>Verbundverhalten</i>	7
2.1.4	<i>Tragverhalten</i>	8
2.1.5	<i>Vorspannung Textilbeton</i>	11
2.2	Membrankonstruktionen	12
2.2.1	<i>Allgemeine Flächentragwerke</i>	12
2.2.2	<i>Membranflächen</i>	14
2.2.3	<i>Vorspannung</i>	14
2.2.4	<i>Form</i>	15
2.2.5	<i>Materialien</i>	16
3	Finiten-Elemente-Modelle	18
3.1	Materialmodelle und Systemberechnung	18
3.1.2	<i>Systemberechnung</i>	20
3.1.3	<i>Berechnungsarten</i>	24
3.2	Ebenes Modell	26
3.2.2	<i>Belastungen</i>	27
3.2.3	<i>Spannungen</i>	28
3.2.4	<i>Erkenntnisse</i>	32
3.3	Gekrümmtes Modell 100 x 100 x 50 cm	33
3.3.1	<i>Randbedingungen</i>	33
3.3.2	<i>System und Formfindung</i>	34
3.3.3	<i>Lasten</i>	35
3.3.4	<i>Lastfälle</i>	36
3.3.5	<i>Spannungen</i>	36
3.3.6	<i>Kombinationen</i>	38
3.4	Gekrümmtes Modell 200 x 200 x 100 cm	42
3.4.1	<i>Randbedingungen</i>	42
3.4.2	<i>System und Formfindung</i>	42
3.4.3	<i>Lasten</i>	42
3.4.4	<i>Lastfälle</i>	43
3.4.5	<i>Spannungen</i>	44
3.4.6	<i>Kombinationen</i>	46
3.5	Gekrümmtes Modell 120 x 300 x 80 (100) cm	49
3.5.1	<i>Randbedingungen</i>	49
3.5.2	<i>System und Formfindung</i>	49
3.5.3	<i>Lasten</i>	51
3.5.4	<i>Lastfälle</i>	51
3.5.5	<i>Kombinationen</i>	52
3.6	Parameterstudie zur Beschreibung des Tragverhaltens	56
3.6.1	<i>Modell 100 x 100 cm</i>	57
3.6.2	<i>Modell 100 x 200 cm</i>	63
3.6.3	<i>Modell 120 x 300 cm</i>	66

4	Mögliche Anwendungen und Einsatzgebiete	69
4.1	Formen	69
4.2	Herstellung	69
4.3	Anwendungsbereiche	70
5	Zusammenfassung und Ausblick	75
5.1	Zusammenfassung	75
5.2	Ausblick	79
6	Literaturverzeichnis	80
7	Abbildungsverzeichnis	82
8	Tabellenverzeichnis	85
9	Abkürzungsverzeichnis	86
10	Anhang	87
10.1	Näherung der Krümmung	87
10.2	Sofistik Modelle	91
10.3	Ebenes Modell 100 x 100 cm	91
10.4	Gekrümmtes Modell 100 x 100 x 50 cm	99
10.5	Gekrümmtes Modell 200 x 200 x 100 cm	105
10.6	Gekrümmtes Modell 120 x 300 cm	112

1 Einleitung

Die Architektur verlangt nach immer schlankeren und leichteren Tragwerken und Bauteilen, welche sich möglichst frei gestalten lassen [1].

Eine textile Bewehrung kann diesem Anspruch gerecht werden: der nichtmetallische Werkstoff ist leicht, korrosionsbeständig und biegsam, weist jedoch gleichzeitig eine hohe Festigkeit auf [2].

Mit Kurzfasern bewehrter Beton wird schon länger in der Praxis verwendet. Dieser hat jedoch den Nachteil, dass die Fasern nicht kraftgerichtet eingebracht werden können. Sie liegen gleichmäßig verteilt im gesamten Betonkörper, auch dort wo sie nicht benötigt werden. Dies hat einen geringen Ausnutzungsgrad zur Folge und ist somit weniger wirtschaftlich [2].

Für die Optimierung der Tragfähigkeit und einer wirtschaftlicheren Nutzung, wird eine textile Bewehrung kraftgerichtet eingebracht, so wie es bereits im Stahlbetonbau üblich ist. Unter "textiler Bewehrungen" versteht man Gelege oder Gewebe, welche aus zusammengesetzten Rovings hergestellt werden, die wiederum aus tausenden Filamenten bestehen.

Durch die Verwendung einer textiler Bewehrung wird der Schwäche des Betons bei Zugbeanspruchung entgegengewirkt und zudem Gewicht eingespart. Darüber hinaus benötigen textile Bewehrungen keinen Schutz gegen Korrosion, was eine sehr geringe Betonüberdeckung ermöglicht. So werden äußerst witterungsbeständige, robuste und zugleich leichte und ästhetisch ansprechende Textilbetonelemente geschaffen [3].

Aus Überlegungen und Gesprächen entstand die Idee, diese Bewehrung vorzuspannen um die Tragfähigkeit der Platten weiter zu beeinflussen - späterer Erstriss, geringere Verformungen. Das daraus resultierende Thema: vorgespannter Textilbeton wurde bereits in der Dissertation von Markus KRÜGER [4] behandelt, und legt den Grundstein für die nachfolgende Arbeit.

KRÜGER [4] befasste sich mit der Vorspannung ebener Platten. Für ebene Flächentragwerke kann die textile Bewehrung z.B. mit einem konventionellen Spannbettverfahren vorgespannt werden. Mit einem geeigneten Spannrahmen wird das Textil aufgespannt und die Vorspannung aufgebracht. Danach wird der Beton eingebracht und verdichtet. Nach dem Ablassen der Vorspannung - bei KRÜGER [4] nach 24 Stunden - möchte sich das Textil zusammenziehen, wird jedoch vom Beton daran gehindert und übt somit Druckkräfte auf den Beton aus. Dies stellt die Vorspannung dar.

In weiterer Folge kam die Frage auf, wie sich das Tragverhalten von gekrümmten, dünnwandigen Textilbetonelementen von einer Vorspannung beeinflussen lässt.

Der Ansatz für die Vorspannung der textilen Bewehrung von gekrümmten Flächentragwerken liegt dem Membranbau zugrunde. Aufgrund der Form und der

Krümmungen findet in der Membran eine mechanische, oder mit Unterstützung, eine pneumatische Vorspannung statt. So befindet sich bereits eine Spannung in der Membran, ohne dem Vorhandensein einer äußeren Last. Die Vorspannung ist bei Membrankonstruktionen nötig, um Verformungen klein zu halten und die Membran gegen Wind, und dadurch verursachte Flatterscheinungen zu stabilisieren [5].

Folglich wird die textile Bewehrung wie eine Membran behandelt. Nach dem Aufspannen des Textils besitzt dieses bereits eine Vorspannung. Als nächstes kann der Beton eingebracht werden, und nach einer angepassten Erhärtungszeit, können die Halterungen des Textils gelöst werden. Das Textil möchte sich wie beim ebenen Zustand zusammenziehen, wird vom Beton jedoch daran gehindert und spannt diesen somit zentrisch vor. Das gekrümmte System befindet sich in einer Gleichgewichtslage.

Der vorgespannte Beton besitzt nun die Eigenschaft größere Lasten abtragen zu können, bevor es zu einem Erstriss kommt und weist ein besseres Verformungsverhalten auf.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Es soll der Einfluss der Vorspannung der textilen Bewehrung auf den Beton und das Tragverhalten untersucht werden. Dies erfolgt an Finiten-Elemente-Modellen, welche sowohl als ebene als auch gekrümmte Flächentragwerke modelliert werden.

Mit den Erkenntnissen über das Tragverhalten von dünnwandigen, gekrümmten Textilbetonelementen, welche zusätzlich noch eine Vorspannung aufweisen, sollen mögliche Anwendungsbereiche aufgezeigt werden.

1.2 Aufbau und Inhalt der Masterarbeit

Die nachfolgende Arbeit befasst sich zunächst mit den Grundlagen von Textilbeton und Membrankonstruktionen. Hierbei wird insbesondere auf das Tragverhalten der beiden Themen eingegangen, als auch der Einfluss der Vorspannung auf das jeweilige System beschrieben.

Aufbauend auf diesen Grundlagen werden Finiten-Elemente-Modelle entwickelt, die das Tragverhalten und den Einfluss der Vorspannung auf den Beton aufzeigen. Es werden verschiedene Größen von Betonelementen als ebene und gekrümmte Flächentragwerke, sowie unterschiedliche Belastungen mit ihren dazugehörigen Lastkombinationen untersucht.

Um die Einflüsse auf das Tragverhalten besser zu verstehen, wird eine Parameterstudie anhand von drei verschiedenen Modellen durchgeführt. Bezugnehmend auf die erarbeiteten Erkenntnisse werden mögliche Einsatzgebiete, Herstellungsverfahren als auch ein Anwendungsbeispiel aufgezeigt.

2 Tragverhalten und Eigenschaften

2.1 Textilbeton

Textilbeton ist ein Verbundwerkstoff der mit technischen Textilien - Gewebe und Gelege - bewehrt wird [5]. Die Wirkungsweise ähnelt dem des Stahlbetons. Um die Tragfähigkeit, sowie die Gebrauchstauglichkeit eines zug- und biegebeanspruchten Bauteils zu erhöhen, wird eine Bewehrung eingebracht.




Die Aufgabe des Textils im Textilbeton ist die Aufnahme der Zugkräfte nach der Rissbildung. Im Gegensatz zu Kurzfaserbeton - bei dem die Fasern keine festgelegte Orientierung aufweisen - gleicht Textilbeton dem konventionellen Stahlbeton, bei dem die Bewehrung dort eingebracht wird, wo sie auch benötigt wird [7]. Die ungerichtete Anordnung der Fasern im Kurzfaserbeton hat zur Folge, dass nur ein kleiner Anteil der Fasern festigkeitssteigernd wirkt [1].

Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit der textilen Bewehrung sind nur wenige Millimeter Betondeckung erforderlich [1]. Die Vereinigung der Vorteile von Stahlbeton und Kurzfaserbeton, wie Korrosionsfreiheit und kraftgerichtete Bewehrung, ermöglichen so hochtragfähige, dünnwandige und dauerhafte Bauteile für neue Einsatzmöglichkeiten im Betonbau [4].

Die Ausnutzung eines Textilbetonquerschnitts ist, dank der kraftgerichteten Bewehrung, wirtschaftlicher als jener des Kurzfaserbetons. Da jedoch die Herstellung von Kurzfaserbeton wesentlich "einfacher" - im Sinne des Herstellungsprozesses - ist, gilt Textilbeton nicht immer automatisch als die günstigere Lösung [7].

In Tabelle 1 werden die wesentlichen Eigenschaften und Unterschiede zwischen Stahlbeton, Kurzfaserbeton und Textilbeton dargestellt.

Tab. 1: Gegenüberstellung Stahlbeton – Kurzfaserbeton – Textilbeton [6]

Stahlbeton	Kurzfaserbeton	Textilbeton
		
<p>■ Beton ■ Betonstahl</p>	<p>↖ Glasfaserbewehrung (Kurzfasern)</p>	<p>— Textile — Bewehrung</p>
<p>Zielgerichtete Lage der Bewehrung zur Aufnahme der auftretenden Zugkräfte: - gutes Tragverhalten - große Effektivität</p>	<p>Keine erforderliche Betondeckung zum Schutz der Bewehrung gegen Korrosion</p>	<p>Keine erforderliche Betondeckung zum Schutz der Bewehrung gegen Korrosion</p>
<p>Relativ große erforderliche Betondeckung zum Schutz der Bewehrung gegen Korrosion</p>	<p>Großer erforderliche Faserbewehrungsgrade durch zufällige Anordnung und nicht vorherbestimmbare Lage der Kurzfasern im Bauteil</p>	<p>Zielgerichtete Lage der Bewehrung zur Aufnahme der auftretenden Zugkräfte: - gutes Tragverhalten - große Effektivität</p>

2.1.1 Filamente, Rovings, Garne und Textilie

Ein Filament ist eine Faser unbestimmter Länge. Werden mehrere hunderte oder auch tausende Filamente zusammengefasst, so entstehen Rovings. Diese können weiter zu Garne verarbeitet werden. Spezielle Garnstrukturen zielen darauf ab, die Zugtragfähigkeit als auch den Verbund zwischen Garn und Betonmatrix zu verbessern. Garne können als flächige oder mehrdimensionale Textilien weiterverarbeitet werden [10].

Materialien

Für die Herstellung von textiler Bewehrung werden hauptsächlich AR-Glas (alkaliresistente Glasfaser), Carbon und Aramid verwendet. Als allgemeine Anforderungen an die Rovings gelten [10]:

- Hohe Zugfestigkeit
- Großer Elastizitätsmodul
- Ausreichende Bruchdehnung

- Geringe Relaxation bei Dauerzug
- Medienbeständigkeit und Dauerhaftigkeit

In der Tabelle 2 sind die wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Materialien aufgeführt.

Tab. 2: Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien [1]

Faserart	Dichte g/cm ³	Durchmesser µm	Zugfestigkeit kN/mm ²	E-Modul kN/mm ²	Bruchdehnung %
Stahl	7,8	10-500	0,3-1,9	200-230	20-200
AR-Glas	2,7	12-20	1,5-2,5	70-80	20-25
Carbon	1,8	4-9	3,0-5,0	230-280	9-11
Aramid	1,4	10-14	2,4-3,4	60-120	1,5-4,6
Polypropylen	0,9	15-65	0,3-0,7	3-8	180-220

Gelege und Gewebe

Garne können zu Textilien weiterverarbeitet werden. Grundsätzlich verläuft in Hauptrichtung (0°) der Kettfaden und quer dazu der Schussfaden (90°). Aufgrund des Webprozesses bei Textilien, entsteht eine Anisotropie der Materialkennwerte. So werden jene Fäden, welche in Bahnrichtung verlaufen, als Kettfäden bezeichnet, und die, die "gewebt" werden, als Schussfäden. Durch das Weben weisen Schussfäden eine größere Welligkeit auf und besitzen daher eine geringere Steifigkeit [8].

Werden zwei Garnscharen übereinander angeordnet und mit einem Wirkfaden verbunden, so spricht man von einem Gelege. Wird der Schussfaden über und unter dem Kettfaden geführt so entsteht ein Gewebe. Der Unterschied liegt in den Kreuzungspunkten. Die Abbildung 1 veranschaulicht die Führung der einzelnen Kett- und Schussfäden. Da beim Gewebe die Höhenlage von Kette und Schuss alternierend wechselt, kommt es durch Streckung des Materials zu Umlenkkräften an den Kreuzungspunkten. Dies führt zu einer Querpressung an den jeweiligen Punkten und in weiterer Folge zu einer Schädigung der Filamente. Dies tritt bei Gelegen nicht auf und diese sind daher den Geweben vorzuziehen [2].

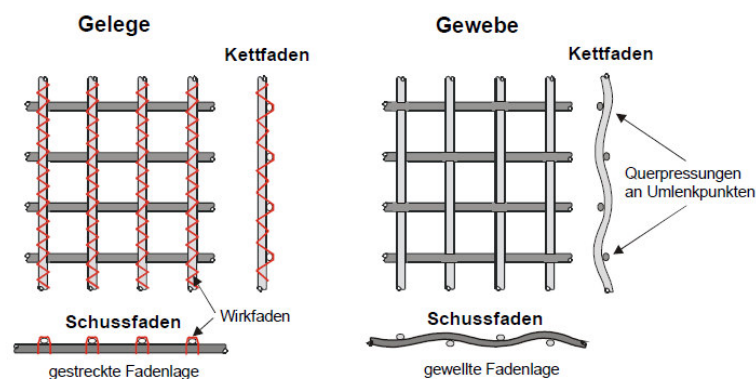


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Geleges (links) und eines Gewebes (rechts) [2]

Hauptsächlich werden Bi- und Multiaxiale Gelege für Herstellung von Textilbeton verwendet, da diese im Bezug auf ihren Bewehrungsgrad sehr flexibel in den jeweiligen Richtungen sind. Hauptanforderungen an die Gelege sind eine große Offenmaschigkeit sowie eine geringe Verschieblichkeit innerhalb der Betonmatrix. Eine große Offenmaschigkeit dient der ausreichenden Durchdringung der Feinbetonmatrix und die geringe Verschieblichkeit ist erforderlich, um die Gewebe handhaben zu können [10].

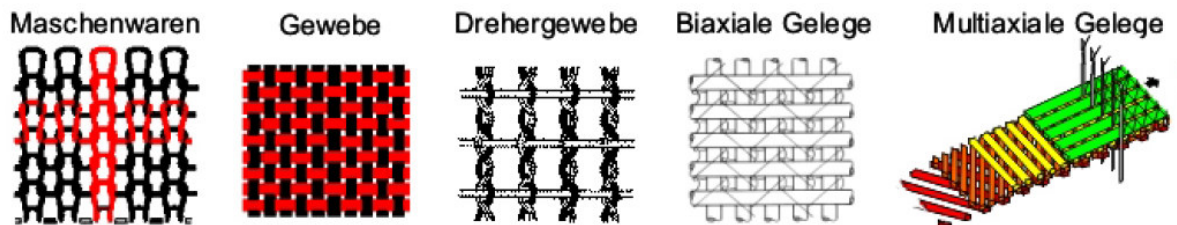


Abb. 2: Zweidimensionale textile Halbzeuge [10]

Für vorgespannten Textilbeton sind die Textilien entsprechend der aufzubringenden Vorspannung und den damit verbundenen erforderlichen Zugfestigkeiten und E-Moduli auszuwählen.

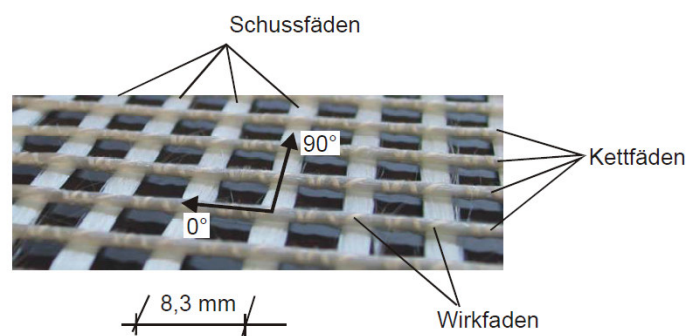


Abb. 3: Biaxiales Gelege [10]

2.1.2 Betone

Folgende allgemeinen Anforderungen hat ein geeigneter Beton für Textilbeton zu erfüllen [10]:

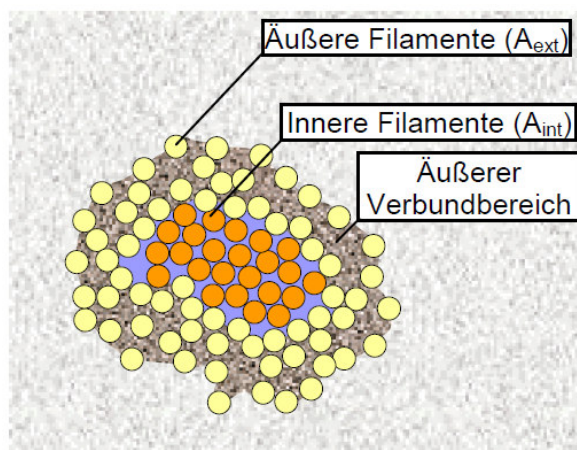
- Gute Durchdringung des Textils
- Hohe Festigkeit
- Auf das Herstellverfahren abgestimmte Konsistenz
- Geringe Alkalität bei Einsatz von Glasfasertextilen

Die Durchdringung des Textils hängt stark vom Größtkorn ab. Aufgrund der vorhandenen Maschenweite des Geleges ist das Größtkorn des Zuschlags beschränkt. Da die Maschenweite meist nur wenige Millimeter beträgt ist das Größtkorn für Textilbeton meist kleiner als 4 mm, weshalb auch von Feinbeton gesprochen wird. Die Zug- und Druckfestigkeiten der Betonmatrix sind von den jeweiligen Anforderungen an das Bauteil abhängig. Die Konsistenz muss auf die Art der Verarbeitbarkeit abgestimmt werden [10].

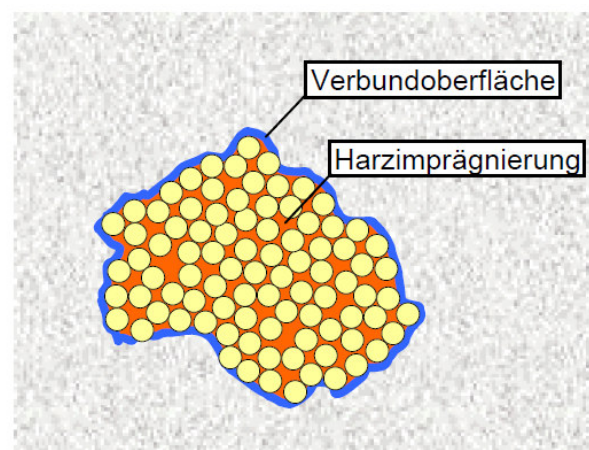
2.1.3 Verbundverhalten

Ein Roving kann in innere und äußere Filamente unterteilt werden. Die äußeren Filamente stehen in direkten Kontakt mit der Betonmatrix und weisen daher einen guten Verbund auf gegenüber den inneren Filamenten, welche nur in Kontakt untereinander stehen [4].

Um den Verbund zwischen inneren und äußeren Rovings zu verbessern, kann z.B. mit Harzprägnierungen gearbeitet werden, dies wird in Abb. 4 aufgezeigt.



Innerer Verbund < Äußerer Verbund
(Bsp.: nicht vollständig mit Zementleim durchdrungener Roving)



Innerer Verbund > Äußerer Verbund
(Bsp.: harzprägnierter Roving)

Abb. 4: Variationen von in Beton eingebetteten textilen Rovings [4]

MOLTER [2] unterscheidet drei Arten des Verbundes:

- Haftverbund:
Zwischen den äußeren Fasern und der Matrix besteht ein elastischer Haftverbund, der wirksam ist, solange es nicht zu Relativverschiebungen zwischen Fasern und Matrix kommt.
- Reibungsverbund:
Nach Überschreiten der Haftfestigkeit kommt es zu Relativverschiebungen zwischen den äußeren Filamenten und der Matrix, so dass der Reibungsverbund wirksam wird.
- Innerer Verbund:
Zwischen den inneren und äußeren Filamenten besteht Reibungsverbund, der aufgrund der glatten Filamentoberfläche deutlich niedriger ist als zwischen äußeren Filamenten und Matrix.

Entsteht der erste Riss, so wird über den Verbund die Kraft in die Bewehrung eingeleitet. Durch die unterschiedlichen Verbundverhalten der inneren und äußeren Filamente stellen sich unterschiedliche Dehnungen und Spannungen ein. Die äußeren Filamente weisen höhere Dehnungen auf, da aufgrund des besseren Verbundes mehr Kraft auf diese übertragen werden kann. Die inneren Filamente werden als eine Einheit betrachtet [2].

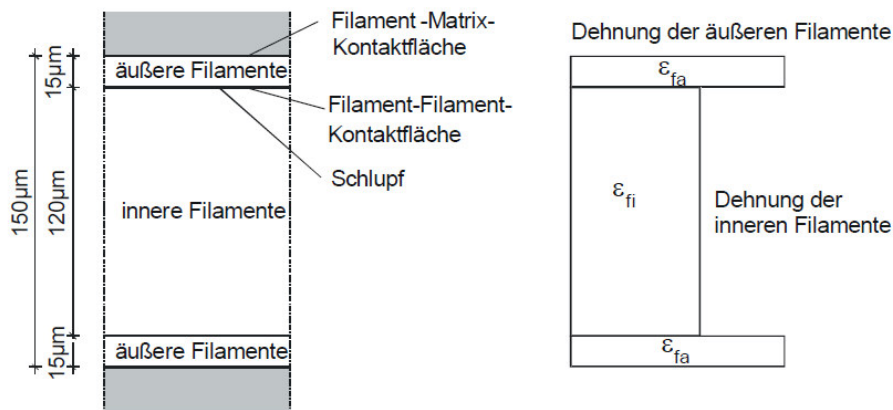


Abb. 5: Aufteilung in innere und äußere Filamente für einen Roving [11]

Das Versagen des Bündels tritt ein, wenn die höher beanspruchten Filamente versagen. Bereits ein Versagen sehr weniger Filamente kann bereits zum Versagen des Bündels führen. Somit lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung des inneren Verbundes zu einer Festigkeitserhöhung führt [2].

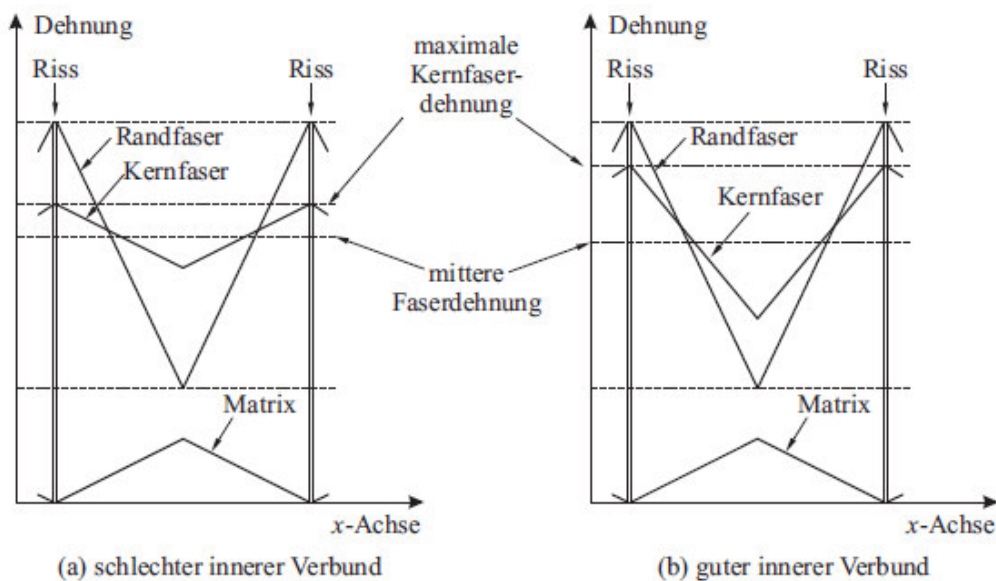


Abb. 6: Dehnungsverlauf in Rand- und Kernfasern bei unterschiedlichen Verbundeigenschaften [12]

2.1.4 Tragverhalten

Das Modell nach AVESTON, COOPER und KELLY [13] - ACK-Modell - geht davon aus, dass sich das Faserbündel wie ein homogener Querschnitt verhält und die Filamente somit auch dieselbe Dehnung aufweisen. So lässt sich eine Spannungs-Dehnungsbeziehung vereinfacht beschreiben. Bis zum ersten Riss steigt die Spannungs-Dehnungslinie linear an und verhält sich ideal-elastisch. Nach Entstehen des ersten Risses geht der Querschnitt über in die Rissbildungsphase wobei die Dehnung, ohne Zunahme der Spannung, ansteigt. Nach

abgeschlossener Rissbildung werden zusätzliche Lasten lediglich von der Bewehrung getragen. Somit bestimmt die Zugfestigkeit des Rovings die maximale Traglast [2].

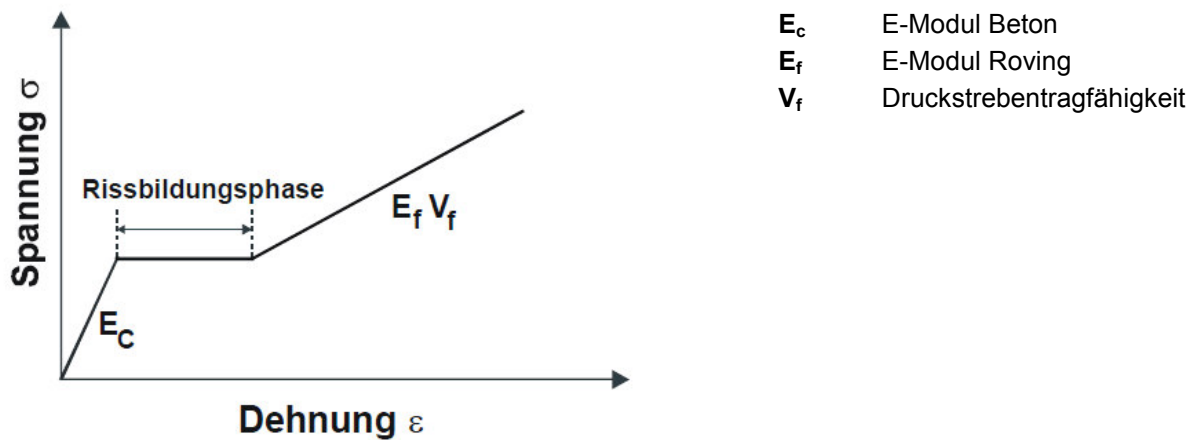


Abb. 7: Idealisierte Spannungs-Dehnungslinie unter Annahme eines homogenen Bewehrungsquerschnitts nach ACK-Modell [13]

Dieses Modell ist stark vereinfacht und nur für Monofilamente ausreichend, da von einem homogenen Querschnitt ausgegangen wird. Werden jedoch Faserbündel wie Rovings verwendet, so besitzen diese keinen homogenen Querschnitt und diese Darstellung ist unzureichend.

OHNO und HANNANT [11] haben das bestehende ACK-Modell um den "inneren Verbund" erweitert. So gehen diese von folgenden Annahmen aus:

- Bis zum Erreichen der Matrixbeanspruchung verhält sich der Verbundbaustoff linear-elastisch, wobei das Spannungs-Dehnungsverhalten von den Volumenanteilen und den Elastizitätsmoduln der einzelnen Komponenten abhängt.
- Im gerissenen Zustand bewegen sich Teile der äußeren Filamente und Matrix nach Überschreitung des elastischen Haftverbundes unabhängig voneinander.
- Zwischen inneren und äußeren Filamenten kann im gerissenen Zustand eine gegenseitige Verschiebung auftreten. Sie bewegen sich ebenfalls unabhängig voneinander.
- Es wird ein starr-plastisches Verbundgesetz angenommen. Das heißt, die übertragbaren Verbundspannungen an der Kontaktfläche von inneren und äußeren Filamenten sowie Matrix und äußeren Filamenten werden durch die Lasteinleitungslängen als konstant angenommen.
- Die übertragbare Verbundspannung zwischen Matrix und äußeren Filamenten ist größer als die zwischen den Filamenten untereinander.

Unter diesen Bedingungen entstand der Spannungs-Dehnungsverlauf nach OHNO und HANNANT, siehe Abb. 8 [11]. Das linear-elastische Verhalten zwischen den Punkten A - B ist jener Bereich wo lediglich die ungerissene Betonmatrix beansprucht wird. Im Punkt B entsteht der Erstriss, welcher die erste Rissbildungsphase bis zu Punkt C einleitet. Zwischen den Punkten C-D entsteht eine zweite Rissbildungsphase. Mit dem Punkt D ist die Rissbildung abgeschlossen. Im letzten Bereich liegen nur die Fasern unter Zugbeanspruchung bis zum Bruch im Punkt E [2].

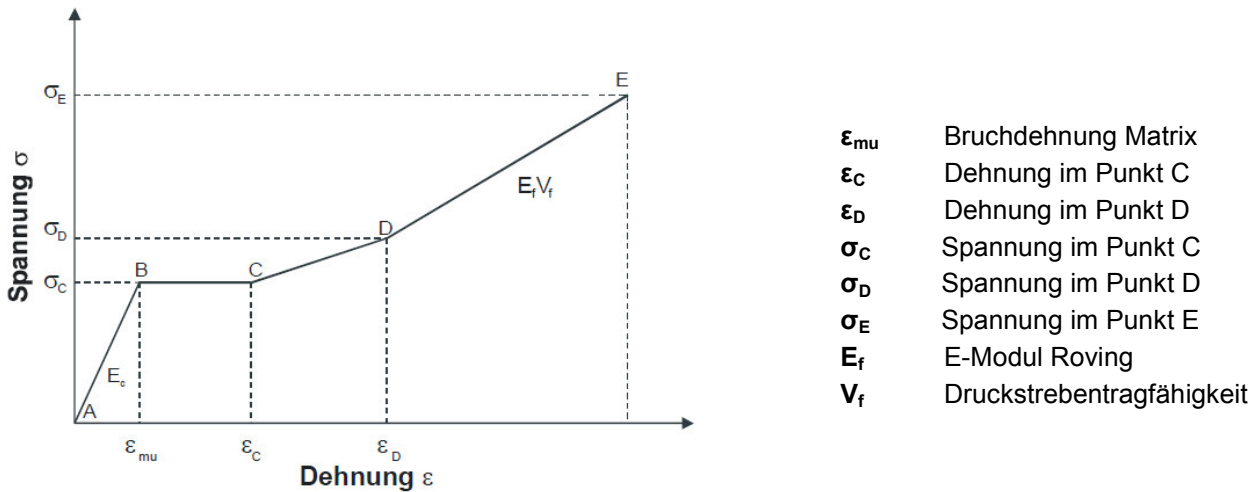


Abb. 8: Spannungs-Dehnungsverlauf nach Ohno und Hannant [11]

Die Abb. 9 zeigt eine idealisierte Darstellung des Textils im ACK-Modell, vgl. Abb. 7 und im OH-Modell, vgl. Abb. 8. Hierbei werden die Unterschiede, in der Betrachtung des Textils des ACK-Modells zum OH-Modell verdeutlicht.

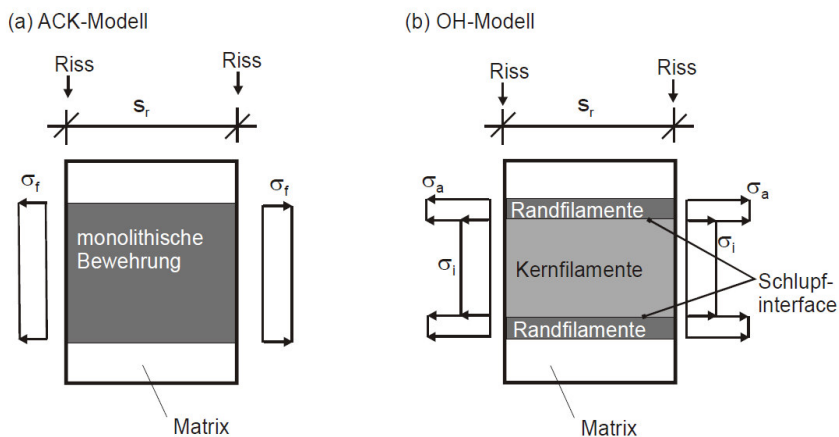


Abb. 9: Idealisierung des Textils im ACK-Modell und OH-Modell [10]

Schlupf zwischen den Filamenten

In Abb. 5 wird der Schlupf, der zwischen den inneren und äußeren Filamenten stattfindet, dargestellt. Die äußeren Filamente stehen in direkten Kontakt mit der Betonmatrix und besitzen somit einen besseren Verbund, als die inneren Filamente, die nur einen geringen

Verbund mit den äußeren Filamenten, und somit auch der Betonmatrix aufweisen. Insbesondere bei hohen Filamentzahlen ist eine vollständige Durchtränkung des Rovings mit Zementleim nahezu nicht möglich, wodurch die inneren Filamente in keinem so gutem Verbund mit den äußeren Filamenten stehen, wie die äußeren Filamente mit der Betonmatrix. Kommt zudem noch eine Vorspannung hinzu, so liegen die Filamente gestreckt vor und das Eindringen des Zementleims wird zusätzlich erschwert. Ein guter innerer Verbund bedeutet einen geringen Schlupf und im Umkehrschluss, dass ein geringerer innerer Verbund einen großen Schlupf mit sich bringt. Dies äußert sich in den unterschiedlichen Dehnungen der inneren- und äußeren Filamenten, vgl. Abb. 9 [4].

Kriechen

Die Verformung eines Bauteils unter Dauerlast nimmt mit der Zeit zu. Dies wird als Kriechen bezeichnet [2]. Da Feinbeton einen hohen Bindemittelgehalt aufweist, ist damit zu rechnen, dass dieser gegenüber Normalbeton eine höhere Kriechneigung besitzt. Ebenfalls sind die Kriecheneigenschaften des verwendeten Textils zu berücksichtigen [4].

2.1.5 Vorspannung Textilbeton

Ein textiles Gelege wird vorgespannt und die Schalung ausbetoniert. Zwischen dem Gelege und der Betonmatrix entsteht ein sofortiger Verbund. Ist der Beton erhärtet, wird die Vorspannung gelöst und die Vorspannkraft liegt im Bauteil. Das Textil versucht sich aufgrund der Vorspannung wieder zusammenzuziehen, wird jedoch von dem Beton daran gehindert, und übt somit Druck auf die Betonmatrix aus. Kommt es zu einer Zugbeanspruchung des Bauteils, so führt der vorhandene Anfangsdruck zu einer verspäteten Rissbildung. Eine Vorspannung des Textils hat den Zweck, den Zeitpunkt der Rissbildung hinauszuzögern. Dadurch kann die Gebrauchstauglichkeit (Verformungen, Rissbreiten) verbessert werden. Wesentlich bei der Weiterleitung der Vorspannung in den Beton, ist das Verbundverhalten zwischen Filament und Betonmatrix. Aufgrund des besseren Verbundverhaltens führen Glasgelege zu kleineren Rissbreiten als Carbongelege, da deren Oberfläche viel glatter und die Verbundeigenschaften dadurch ungünstiger sind. Die Verbundeigenschaften der Materialien können mit Imprägnierungen oder Anordnen von Wirkungsfäden, siehe Abb. 10, verbessert werden [2].

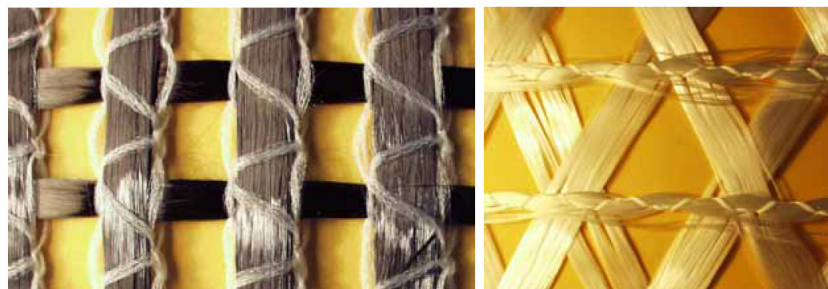


Abb. 10: Biaxiales Carbongelege (links) und multiaxiales AR-Glasgelege mit aufgefächerten Rovings (rechts) [4]

2.2 Membrankonstruktionen

Membrane stellen ein wesentliches Element des Leichtbaus dar. Die Bezeichnung "Leichtbau" wird davon abgeleitet, dass die Konstruktionen ein geringeres Gewicht gegenüber ihrer Traglast aufweisen. Mit Membrane können sehr schlanke, und dennoch tragfähige Konstruktionen entwickelt werden. Ein Hauptmerkmal von Membrankonstruktionen ist die Tatsache, dass die gesamte Konstruktion lediglich Zugkräfte abtragen kann [8]. Die Form des Flächentragwerks beeinflusst die Kraftabtragung und somit die Tragfähigkeit. Daher werden nachfolgend die allgemeinen Eigenschaften von Flächentragwerke erläutert.

2.2.1 Allgemeine Flächentragwerke

Bei Flächentragwerken gibt es zwei Arten wie die Geometrie gerichtet sein kann :

- eben
- gekrümmt .

Ebene Flächentragwerke

Flächen welche keine Krümmungen aufweisen, werden als eben bezeichnet. Ebene Flächentragwerke werden im Bauwesen sehr häufig eingesetzt wobei das klassische Beispiel für ein ebenes Flächentragwerk die Platte ist. Wird die Platte mit einer flächigen Last beansprucht, kommt es zu Biegebeanspruchungen und großen Verformungen. Dafür ist es erforderlich, große Querschnitte mit viel Material einzusetzen, um die Lasten abtragen und die Verformungen klein halten zu können [8].

In Abb. 11 ist eine 4-punktgelagerte Platte, welche mit einer gleichmäßigen Flächenlast belastet wird, und der dazugehörigen Verformungsfigur, dargestellt.

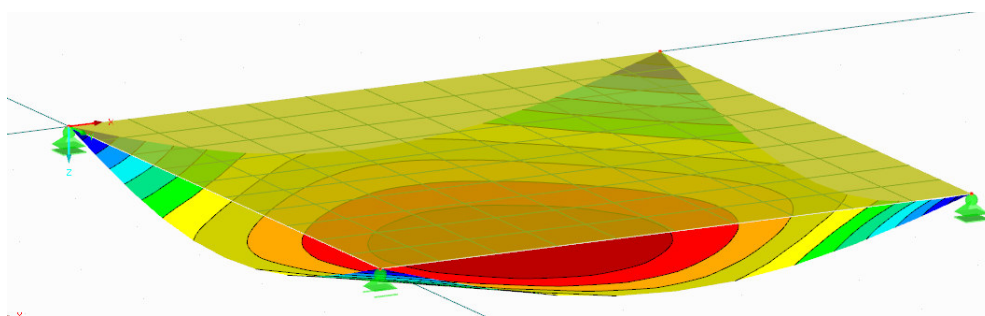


Abb. 11: 4-Punkt gelagerte Platte mit Flächenlast

Die Ausführung einer Membrankonstruktion als ebenes Flächentragwerk ist nicht empfehlenswert. Die schlanken und leichten Konstruktionen bringen große Verformungen mit sich, welche im Allgemeinen nicht erwünscht sind. Darüber hinaus treten bei ebenen Systemen als Leichtbaukonstruktionen Schwingungs- und Flutterprobleme, aufgrund des geringen Eigengewichts, auf.

Diese Effekte sind im Massivbau von untergeordneter Rolle, da die massigen Bauten nicht so leicht in Schwingung zu versetzen sind. Bei Leichtbaukonstruktionen wird mit Krümmungen und Vorspannungen diesen Effekten entgegengewirkt [8].

Gekrümmte Flächentragwerke

Bei gekrümmten Flächentragwerken können zwischen einfach gekrümmten, doppelt gegensinnig gekrümmten und doppelt gleichsinnig gekrümmten Formen unterschieden werden [9].

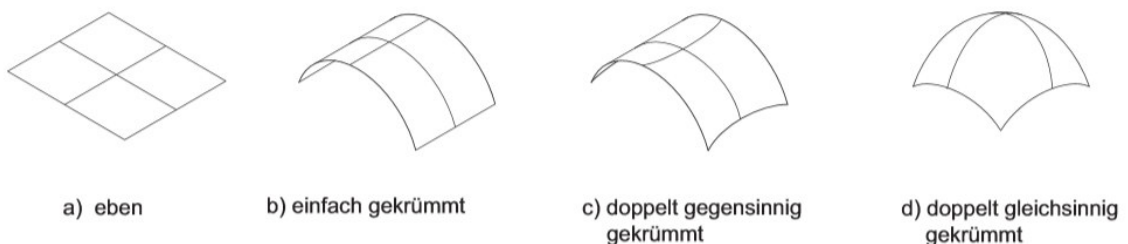


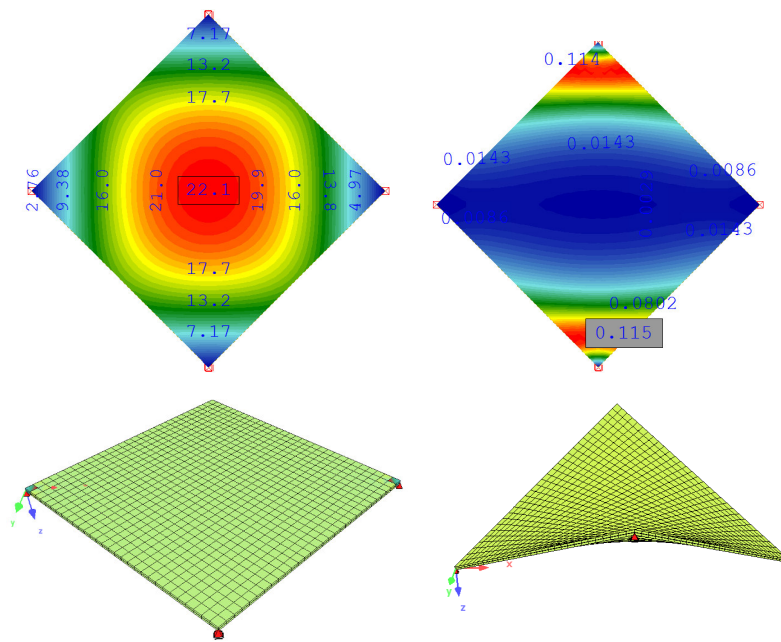
Abb. 12: Formen von Flächentragwerken [9]

Die Lastabtragung bei ebenen Flächentragwerken erfolgt hauptsächlich über Biegebeanspruchungen. Hingegen erfolgt die Lastabtragung bei gekrümmten Flächentragwerken über Normalkraftbeanspruchung, was eine viel geringere Verformung zur Folge hat.

Beispiel für den Einfluss der Geometrie auf die Verformung

Um den Einfluss der Geometrie auf die Verformung aufzuzeigen, wird nachfolgend ein Beispiel dargestellt. Zuerst eine Platte, welche aus 16 mm Beton besteht und mit dem Eigengewicht von $0,4 \text{ kN/m}^2$ belastet wird. Danach eine 4-Punkt gelagerte doppelt gegensinnig gekrümmte Platte mit den gleichen Randpunkten (lediglich zwei Festpunkte werden vertikal verschoben), der gleichen Betondicke und ebenfalls $0,4 \text{ kN/m}^2$ Flächenlast. Durch die Verschiebung von zwei Festpunkten entsteht ein hyperbolisches Paraboloid (Sattelfläche).

Abb. 13 zeigt die 4-punktförmig gelagerte Platte, links als ebenes Flächentragwerk und rechts als gekrümmtes Flächentragwerk, unter Eigengewichtsbelastung. Die Verformung beträgt bei der ebenen Platte in der Mitte $22,1 \text{ mm}$. Bei der gekrümmten Platte sind die Verformungen nicht nennenswert, da sie weniger als 1 mm betragen.



Links - ebene Platte | Rechts - gekrümmte Platte

Abb. 13: Vergleich der Verformungen [mm]

2.2.2 Membranflächen

Gekrümmte, und im speziellen doppelt gekrümmte Flächentragwerke, weisen aufgrund ihrer Form ein wesentlich günstigeres Tragverhalten als ebene Flächentragwerke auf. Durch die Vorspannung und die Form werden die Systeme flattersicher. Darüber hinaus sind die Verformungen und Kräfte kleiner und Stabilitätsprobleme wie Knicken oder Beulen treten bei reinen zugbeanspruchten Tragsystemen, wie Membrankonstruktionen, nicht auf [8].

Die Vorspannung lässt sich auf zwei Arten in Membrankonstruktionen einbringen: mechanisch und pneumatisch. Die Form der Membran hängt von Art der Vorspannung ab. Antiklastische Formen (gegensinnig gekrümmt) werden mechanisch vorgespannt und synklastische Formen (gleichsinnig gekrümmt) werden pneumatisch vorgespannt [9].

2.2.3 Vorspannung

Die Kraftabtragung von Membrankonstruktionen erfolgt ausschließlich über Zugkräfte, die Resultate von Dehnbeanspruchungen der Materialien sind. Für diese Form der Kraftabtragung muss die Konstruktion vorgespannt sein. Das bedeutet: im System befinden sich auch in der Ruhelage bereits Spannungen ohne dem Wirken von äußeren Lasten [8].

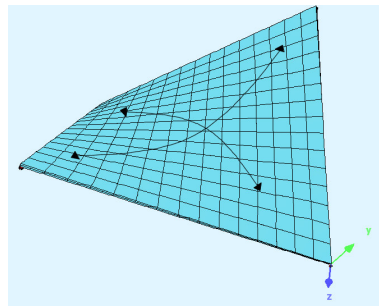


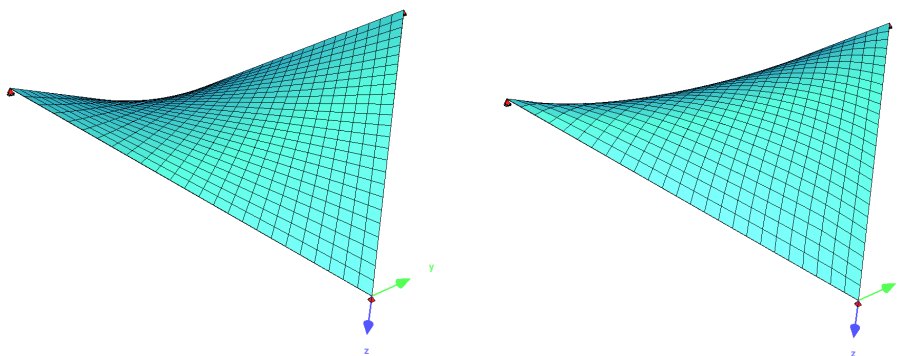
Abb. 14: Krümmungen von Vier-Punktsegel

In Abb. 14 wird der Druck- und der Zugbogen einer Membran - hier 4-Punktsegel - dargestellt. Der Zugbogen stellt sich im Bereich der Hochpunkte - HP - ein, der Druckbogen zwischen den Tiefpunkten -TP. Membrane sind aufgrund des geringen Querschnitts nicht in der Lage Druckkräfte abzutragen. Um jedoch die Druckkräfte, die zwischen den TP entstehen, abzutragen, muss dieser Bereich eine Vorspannung aufweisen. Die Vorspannung wird infolge des Drucks in diesem Bereich abgebaut, wobei immer ein Rest der Vorspannkraft vorhanden sein muss, damit die Membran nicht versagt → keine Druckspannung in Membran.

2.2.4 Form

Zugbeanspruchte Konstruktionen besitzen die Eigenschaft, dass die Form abhängig von der Last- und Lastverteilung ist. Das bedeutet: die Form wird nicht zuvor definiert, sondern stellt sich zufolge der Randbedingungen und dem Gleichgewicht der Vorspannkraft ein [5]. So wird der Prozess, in welchem die Randbedingungen festgelegt und das Gleichgewicht gesucht wird, als *Formfindung* bezeichnet.

Randbedingungen sind, neben den geometrischen Festpunkten, auch die Vorspannungen. Die Krümmung einer Membran ändert sich mit dem Verhältnis der Vorspannungskraft von Kette zu Schuss [8], siehe Abb. 15.

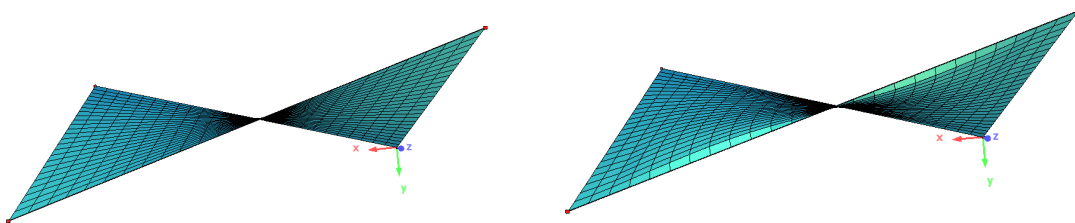


Kette/Schuss = 1/1 | Kette/Schuss = 5/1

Abb. 15: Veränderte Krümmung einer Membran

Es besteht zudem die Möglichkeit für die Formfindung bereits das Eigengewicht des Betons zu berücksichtigen. Dies beeinflusst je nach Größe des Eigengewichts - abhängig von der Elementdicke - die Form und in weiterer Folge auch die Kraftabtragung. Für die Finiten - Element - Modelle in dieser Arbeit, wird die Formfindung ohne Eigengewicht durchgeführt. Die Begründung hierfür liegt im geringen Eigengewicht. Der Unterschied der Berechnung mittels der Form, ohne Berücksichtigung, und mit Berücksichtigung des Eigengewichts ist unwesentlich. Dies kommt erst wieder bei höheren Belastungen bzw. größeren Elementen zu tragen.

In der Abb. 16 wird auf der rechten Seite die Form der Membran ohne Belastung dargestellt, und auf der linken Seite die Form mit Belastung. Aufgrund des geringen Eigenwichts in diesem Beispiel, wird die Form nicht wesentlich beeinflusst, daher wird für diese Darstellung eine Belastung aufgebracht die 10-fach größer ist als das Eigengewicht.



Links - ohne Belastung | Rechts - mit Belastung

Abb. 16: Formfindung

2.2.5 Materialien

Nachfolgend werden die Materialien und die Eigenschaften von den am häufigsten eingesetzten Gewebe beschrieben.

Gewebe

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erklärt wird, handelt es sich bei Geweben um einen Kettfaden (0°) welcher mit dem Schussfaden (90°) verwebt wird.

Für die Filamente bzw. Rovings wird zwischen folgenden Faserarten unterschieden [8]:

- Naturfasern wie Baumwolle, Seide, Hanf oder Leinen
- Synthefasern bzw. thermoplastische Kunststoffe wie Polyester (PES), Polyamid (PA) oder Polytetrafluorethylen (PTFE)
- Mineralfasern wie Glas
- Metallfasern

Aufgrund der geringen Lebensdauer werden Naturfasern nur wenig eingesetzt. Sie eignen sich lediglich für einen zeitlich begrenzten Einsatz. Hauptsächlich werden für Gewebe Fasern aus Glas oder Polyester verwendet.

In der Tabelle 3 werden mechanische Kenndaten für verschiedene Fasern aufgelistet [8].

Tab. 3: Mechanische Kenndaten verschiedener Fasern [15]

Material [Abkürzung]	Dichte [g/cm³]	Zugfestigkeit [N/mm²]	Bruchdehnung [%]	Elastizitätsmodul [N/mm²]
Baumwolle (BW)	1,5-1,54	350-700	6-15	4500-9000
Polyamid (PA)	1,14	-1000	15-20	5000-6000
Polyesterfasern (PES)	1,38-1,41	1000-1300	10-18	10000-15000
Glasfasern (GF)	2,55	-3500	2-3,5	70000-90000
Aramidfasern	1,45	-2700	2-4	130000-150000
Polytetrafluorethylen (PTFE)	2,1-2,3	160-380	13-32	700-400
Kohlenstofffasern (C)	1,7-2,0	2000-3000	<1	200000-500000

3 Finiten-Elemente-Modelle

3.1 Materialmodelle und Systemberechnung

Für die Finiten-Elemente-Modelle werden Materialien definiert, die bei allen Modellen ident sind, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können. Die Materialien werden nachfolgend beschrieben.

Beton

Für den geeigneten Beton wird ein Feinbeton gewählt, den Stefan VOSS [14] in seiner Dissertation beschreibt.

Druckfestigkeit:

$$f_{ck} = 86 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = f_{ck} * \alpha_{cc} / \gamma_c = 86 * 0,85 / 1,5 = 48,7 \text{ N/mm}^2$$

Biegezugfestigkeit:

$$f_{ct} = 5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ctd} = f_{ct} / \gamma_c = 5 * 0,85 / 1,5 = 2,8 \text{ N/mm}^2$$

E-Modul = 32.000 N/mm²

Mit diesen Werten ergeben sich folgende Betonkennwerte und Arbeitslinien, welche für die nachfolgende Modellreihe verwendet werden.

Maximal erreichbare Betonspannungen in der nichtlinearen Berechnung, sowie zugehörige Arbeitslinie für den Gebrauchszustand:

Anfangs- E-Modul: 37 211 N/mm²

max. Druckfestigkeit : 49 N/mm² bei Dehnung -2.34 ‰

max. Zugfestigkeit: 2,5 N/mm²

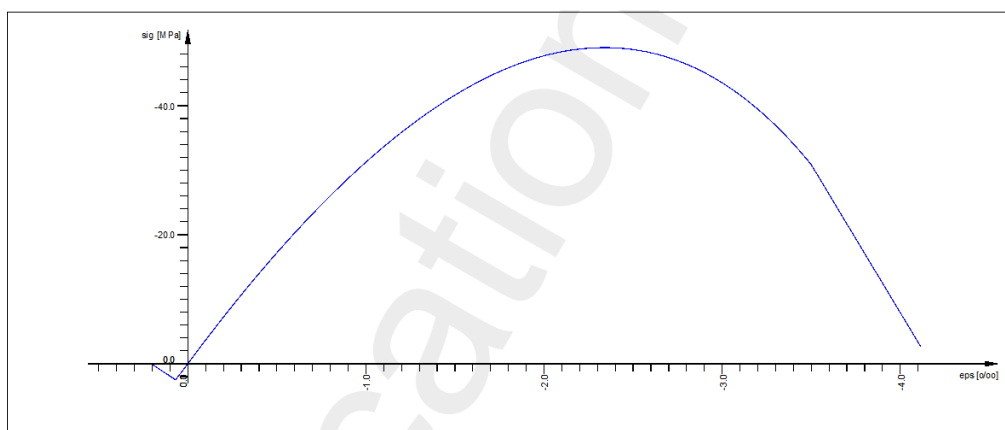


Abb. 17: verwendete Arbeitslinie für nicht lineare Berechnung

Textil

Für die Modellierung des Textils werden Kennwerte, sowie das mechanische Verhalten im Kontakt mit der Betonmatrix vorausgesetzt.

Das geeignete Textil benötigt die Eigenschaft so offen zu sein, dass es zur Gänze von der Betonmatrix umschlossen wird, um einen ausreichenden Verbund zwischen Textil und Betonmatrix zu gewährleisten, und es muss zugleich so tragfähig sein, dass es hohe Vorspannkraft aufnehmen kann, ohne dass sich die Gewebestrukturen verändern.

Ebenes Modell

Für das ebene Modell wird zunächst ein Gelege aus alkaliresistenter Glasfaser gewählt, das in Epoxyharz getränkt wurde. Dies erhöht den Verbund zwischen den inneren und äußeren Filamenten.

Das Gelege besitzt eine Maschenweite von 10 x 10 mm. Für die Abbildung in SOFISTIK¹ wird eine äquivalente Schichtdicke von 0,093 mm bezogen auf die Breite von 1000 mm ermittelt.

$A_t = A_{f,Roving} * l / spacing$	mit:	A_t	Gesamte Bewehrungsfläche im QS
		$A_{f,Roving}$	Einzelfläche eines Rovings
		l	Länge des Querschnitts
		$spacing$	Abstand zwischen Maschen

$A_t = 0,93 * 1000/10 = 93 \text{ mm}^2 \rightarrow$	$d_{\text{äquvi}} = A_t / l = 93/1000 = 0,093\text{mm}$
--	---

Material: AR-EP

$A_s = 0,93 \text{ mm}^2$	$f_{pu} = 1.400 \text{ N/mm}^2$	$f_r = 10 \text{ N/mm}^2$	$E_0 = 72.000 \text{ N/mm}^2$
---------------------------	---------------------------------	---------------------------	-------------------------------

Um jedoch die Modelle besser vergleichen zu können, wird im Weiteren auch das ebene Modell mit den gleichen Materialparametern wie die gekrümmte Modelle berechnet.

Gekrümmte Modelle

Da sich die Anforderungen an das Textil nicht nur auf das Tragverhalten sondern auch auf den Herstellungsprozess beziehen, ist die Eignung eines geeigneten Textils erst durch Versuche zu verifizieren.

Daher werden für die nachfolgenden Modelle Materialkennwerte angenommen.

¹ Sofistik - <http://www.sofistik.de/>

Die Kennwerte für das Textil der gekrümmten Modelle sehen wie folgt aus:

E -Modul = 3000 N/mm² E_{90} -Modul = 2500 N/mm² G = 40 N/mm²

Die Schichtdicke für das Textil wird mit 1 mm angenommen.

Es wird kein Grenzwert für die Zugfestigkeit definiert, da dies stark vom Material abhängt. Lediglich der Ausfall bei Druckbeanspruchung wird berücksichtigt.

3.1.2 Systemberechnung

Das gekrümmte Modell beruht mit seinen Voraussetzungen und Annahmen auf der Modellierung einer ebenen Platte. Hierbei handelt es sich um ein "Schichtenmodell", welches mit einer Knotenebene modelliert ist. So kann gewährleistet werden, dass der Verbund zwischen den Schichten schubstarr ist. Darüber hinaus ist es bei dem ebenen Modell einfacher, die Wirkungsweise und Effekte aller Einwirkungen zu untersuchen.

Aufbau

Aufgrund der geringen Schichtdicke eignen sich Scheibenelemente mehr für die Modellierung des Schichtaufbaus als Volumenelemente. Der Aufbau sieht wie folgt aus:

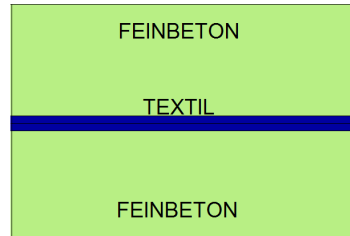


Abb. 18: Visualisierung Querschnitt

Um den starren Verbund zu gewährleisten, wird der gesamte Schichtaufbau mittels einer gemeinsamen Knotenebene erstellt. Dies sieht wie folgt aus:

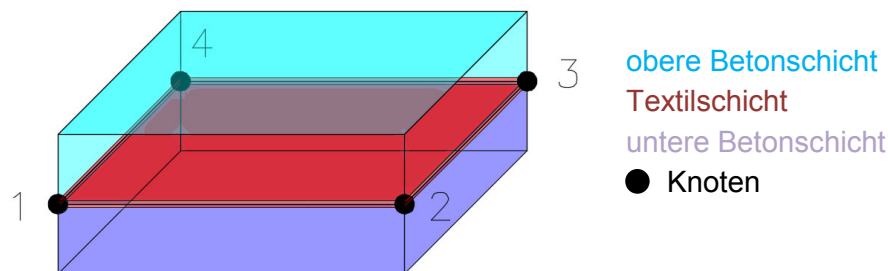


Abb. 19: Schichtaufbau, gemeinsame Knotenebene

Um sicherzugehen, dass die Annahme des starren Verbundes mittels gemeinsamer Knotenebene richtig ist, wird dies mittels einem Vergleichsmodell untersucht. Dieses Vergleichsmodell besteht lediglich aus einer Betonschicht, welche eine Dicke von 10 mm aufweist. Dies, unter Eigengewichtsbelastung, muss die gleichen Spannungen aufweisen, wie jenes Modell, in dem wo die Dicke der Platte über eine obere und eine untere Betonschicht zu je 5 mm definiert wird. Die Lagerung und auch die Belastung sind in beiden Modellen gleich.

In Abb. 20 werden die Spannungen [MPa] in X-Richtung zufolge Eigengewichtsbelastung dargestellt.

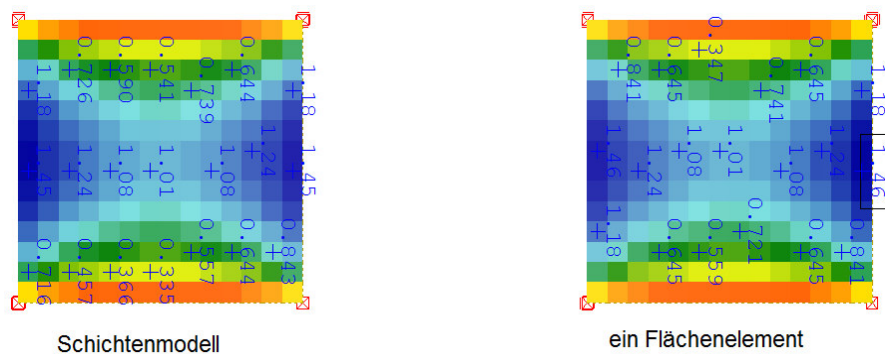


Abb. 20: Vergleich Schichtenmodell - Betonelement [MPa]

Neben dem Vergleich der Spannungen, wird auch das Biegemoment in Feldmitte infolge der Eigengewichtsbelastung verglichen. Dies wird in Abb. 21 aufgezeigt.

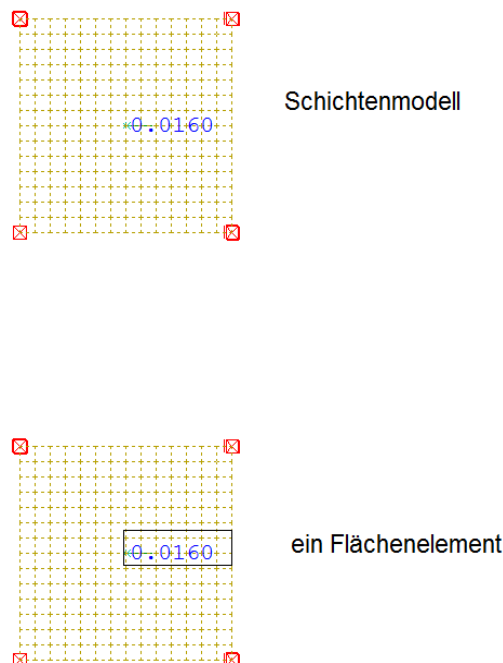


Abb. 21: Biegemoment My - Vergleich [kNm]

Dieser Vergleich zeigt auf, dass die Annahme der gemeinsamen Knotenebene richtig ist, da die Spannungen, Schnittgrößen und Verformungen gleich sind.

Voraussetzungen und Annahmen für die Modellierung

Es gelten sowohl für die gekrümmte, als auch für die ebene Modellierung die gleichen Voraussetzungen und Annahmen. Diese werden nachfolgend beschrieben.

Der Schlupf in den Randbereichen infolge des Ablassens der Vorspannung - Lösen der Halterung des Textils während Herstellung - wird vernachlässigt.

Nach dem Ablassens der Vorspannung, möchte sich die Bewehrung wieder zusammenziehen. Der Verbund von Betonmatrix und Bewehrung ist in den Randbereichen nicht so starr wie im Rest der Platte und so tritt ein Schlupf zwischen Betonmatrix und Bewehrung auf. Für das Modell wird jedoch angenommen, dass über die gesamte Platte ein starrer Verbund besteht.

Da kein Unterschied zwischen Inneren- und äußeren Filamenten gemacht wird, kann der Schlupf, der im Roving (innere/äußere Filamente) stattfindet, nicht mit der Gesamtbetrachtung abgebildet werden.

Darüber hinaus wird das Verhalten zum Zeitpunkt $t = 0$ betrachtet, d.h. Kriechen wird nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend sind die Annahmen und Voraussetzungen für das Modell:

- starrer Verbund über die gesamte Platte
- kein Schlupf infolge des Ablassens der Vorspannung
- kein Schlupf innerhalb des Rovings → homogener Querschnitt
- Kriechen wird nicht berücksichtigt

Betrachtung der Grenzzustände

Es wird zwischen zwei Grenzzuständen unterschieden: Grenzzustand der Tragsicherheit - GZT- und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit - GZG.

Grundsätzlich muss die Bedingung erfüllt sein, dass die Einwirkung kleiner ist als der Widerstand.

Die Ermittlung der Einwirkung erfolgt bei der Betrachtung im GZT mit Teilsicherheitsfaktoren. Die Einwirkung wird mit einem Faktor erhöht und der Widerstand wird mit einem Faktor verringert [16]. In dieser Arbeit sieht die Belastungskombination des GZT wie folgt aus:

$$E_d = 1,35 G_k + 1,5 Q_k$$

Dieser Zustand dient der Sicherstellung der Tragfähigkeit unter sehr großer Belastung. Das Tragwerk darf/muss sich sichtbar verformen, jedoch nicht versagen. Die Verformung stellt hierbei eine Versagensankündigung dar, damit sich etwaige gefährdete Personen in Sicherheit bringen können.

Der GZG dient der Gewährleistung der uneingeschränkten Nutzung der Bauteile. Es gibt hier drei Lastfallkombinationen welche die Lastintensität während der Nutzung beschreiben [16]:

- seltene Situation (Auftreten irreversibler Auswirkungen)
- häufige Situation (Auftreten reversibler Auswirkungen)
- quasi-ständige Situation (Langzeitauswirkungen).

Wird der GZG betrachtet, so wird in dieser Arbeit immer die selten Lastfallkombination betrachtet. Der Betonquerschnitt gilt als nicht gerissen wenn der Grenzwert von $0,7 f_{ctm}$ eingehalten werden kann. Zudem sind Rissbreiten bis 0,2 mm zulässig [16].

$$E_d = G_k + P_k + Q_k$$

mit: G_k - Eigengewicht
 P_k - Vorspannung
 Q_k - Haupteinwirkung

3.1.3 Berechnungsarten

Nachfolgend werden die wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Ansätze für die Berechnung von Bauteilen erläutert.

Geometrische Linearität

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Verformungen klein sind und der Querschnitt eben bleibt. Die Systemsteifigkeit ändert sich nicht und die Ermittlung der Schnittgrößen erfolgt am unverformten System.

Geometrische Nichtlinearität

Wenn die Verformungen/Verschiebungen einen Einfluss auf das Tragverhalten haben, wird von geometrischer Nichtlinearität gesprochen. Im Unterschied zur linearen Berechnung wird die Systemsteifigkeit in jedem Iterationsschritt neu bestimmt. Die Ermittlung der Schnittgrößen erfolgt am verformten System.

Theorie 1. Ordnung

Bei der Berechnung nach der Theorie 1. Ordnung, werden die Kräfte am unverformten System berechnet. Verformungen und Exzentrizitäten werden hier nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch nur bei sehr kleinen Verformungen, die die Ergebnisse unwesentlich beeinflussen, zulässig [17].

Theorie 2. Ordnung

Die Verdrehungen zufolge einer Belastung sind sehr klein. Das Gleichgewicht wird am verformten System gesucht und die Ermittlung der Kräfte erfolgt auch an diesem. Es werden Vorverformungen und Exzentrizitäten berücksichtigt [17].

Theorie 3. Ordnung

Diese beinhaltet die Berücksichtigung großer Verformungen. Das bedeutet, dass die Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen am verformten System stattfinden und Exzentrizitäten berücksichtigt werden. Zudem ist die Vereinfachung nach Theorie 2. Ordnung, Verdrehungen sind sehr klein, nicht mehr gültig.

Materielle Linearität

Das Materialverhalten ist linear und es kann eine schnelle und direkte Berechnung erfolgen. Die Spannung steigt proportional mit der Dehnung an [17]. Dies stellt jedoch kein realistisches Materialverhalten dar. Daher kann es bei großen Belastungen zu falschen Ergebnissen führen - siehe Abb. 22. Die grüne Linie stellt den Bereich dar, in welchem das lineare Materialgesetz noch gültig ist. Hingegen zeigt die rote Linie, dass es bei Verwendung des linearen Materialgesetzes zu einer Überschätzung der zulässigen Spannungen führt.

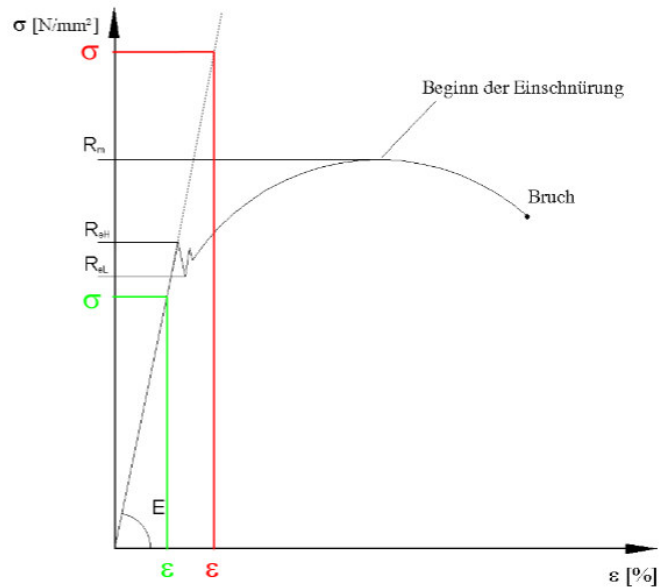


Abb. 22: Spannung-Dehnungsdiagramm Stahl

Materielle Nichtlinearität

Die Berücksichtigung von materiellen Nichtlinearitäten stellt ein realistischeres Verhalten dar. Es werden auftretende Effekte wie z.B. Fließen von Stahl berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt mit idealisierten Arbeitslinien [17].

3.2 Ebenes Modell

Zunächst wird das ebene Modell betrachtet. Anhand dieses Modells werden die Randbedingungen für die Modellierung definiert. Darüber hinaus, kann am ebenen Modell der Einfluss der Vorspannung des Textils auf den Beton und das Tragverhalten des Betonelements untersucht werden.

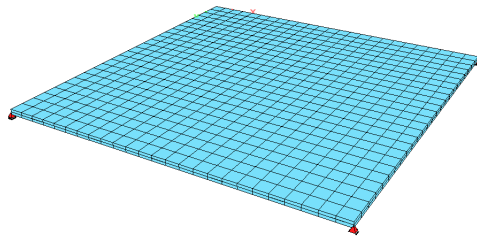


Abb. 23: Visualisierung Platte

Geometrie

Die Abmessungen betragen 100 x 100 x 1,6 cm.

Lagerung

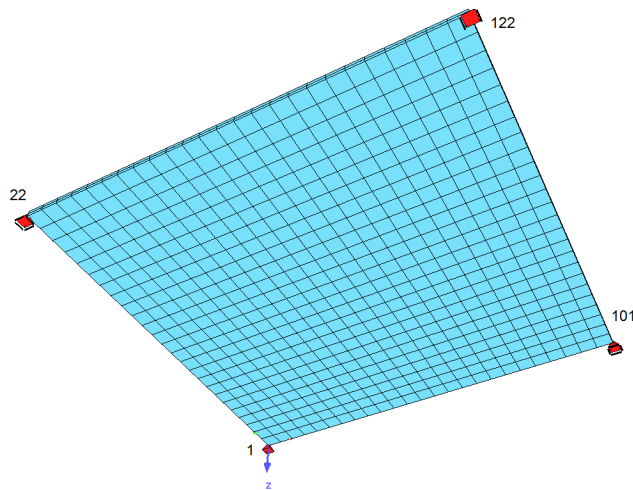


Abb. 24: Lagerung

Auflager Nr.	Festhaltung x	Festhaltung y	Festhaltung z
1	•	•	•
22			•
101			•
122	•		•

3.2.2 Belastungen

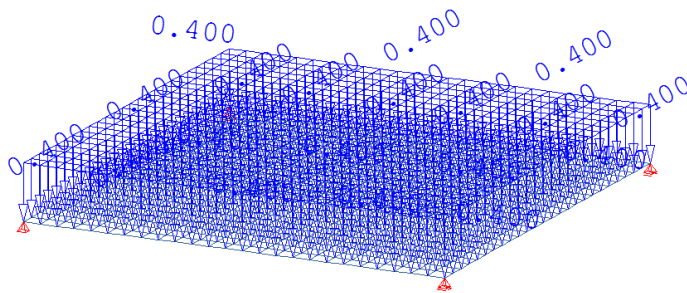
Als Belastung wird sowohl das Eigengewicht angesetzt, sowie eine flächige Nutzlast als auch eine exzentrisch angreifende punktuelle Last.

Eigengewicht : $g_k = 25 \text{ kN/m}^3 = 0,2 \text{ kN/m}^2$ pro Betonschicht (8 mm jeweils)

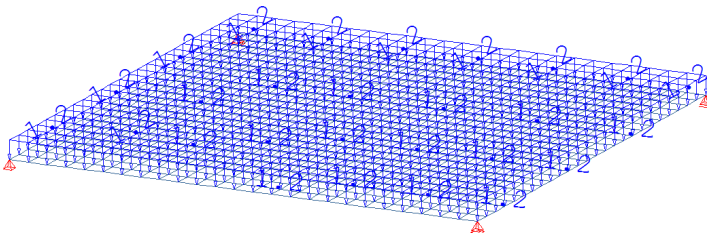
flächige Nutzlast : $q_k = 1,2 \text{ kN/m}^2$

Einzellast : 0,7 kN

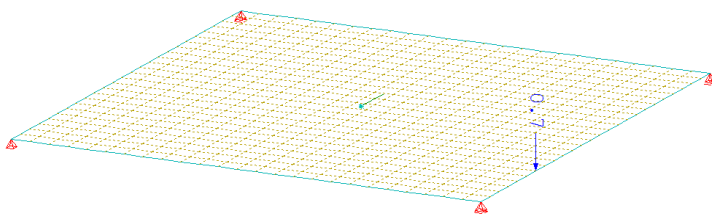
Vorspannung : $V_{sp} = 50 \text{ kN/m}$ in der Membran



Eigengewichtsbelastung [kN/m²]



Nutzlast [kN/m²]



Einzellast [kN]

Abb. 25: Darstellung der Lasten

Anmerkung zur Darstellung von Spannungen und Kräften:

Druck wird in rot und Zug in blau dargestellt.

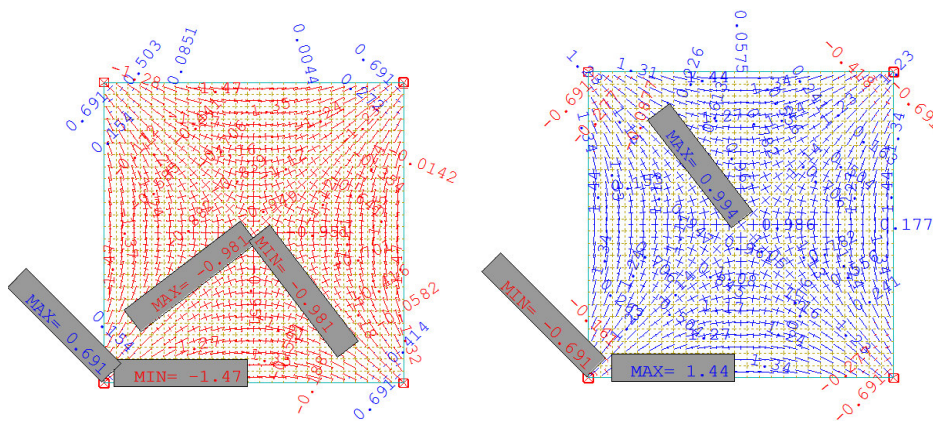
3.2.3 Spannungen

Nachfolgend werden die Hauptspannungen, infolge der verschiedenen Lastfälle dargestellt.

Eigengewicht

Hauptspannungen im Beton [MPa]

Das Eigengewicht, bezogen auf die Dicke der jeweiligen Betonschicht, führt zu einer Flächenlast von $0,4 \text{ kN/m}^2$ auf der Platte.



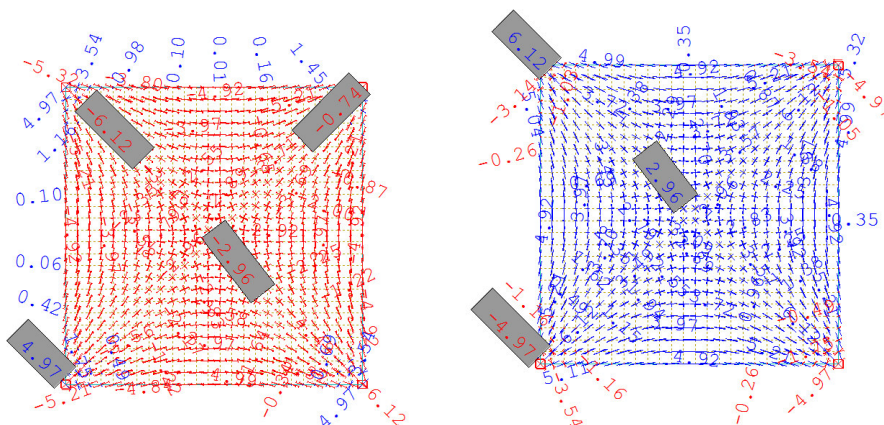
Links - Oberseite | Rechts - Unterseite

Abb. 26: Hauptspannungen im Beton

flächige Nutzlast

Hauptspannungen im Beton [MPa]

In der nachfolgenden Abbildung werden die Hauptspannungen im Beton, infolge der Nutzlast von $1,2 \text{ kN/m}^2$ dargestellt. Die Berechnung erfolgt linear und die Betonzugfestigkeit wird, zum Aufzeigen der Zugspannungen an der Betonunterseite, nicht auf Null gesetzt.



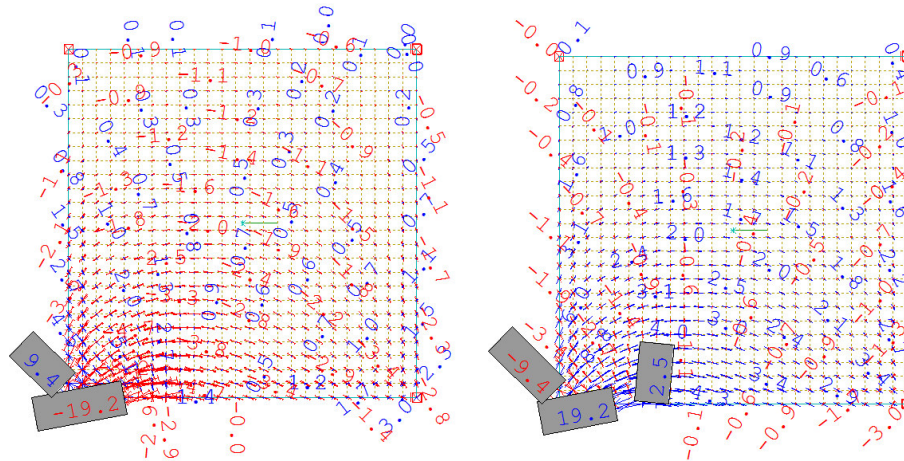
Links - Oberseite | Rechts - Unterseite

Abb. 27: Hauptspannungen im Beton

Einzellast

Hauptspannungen im Beton [MPa]

In der nachfolgenden Abbildung werden die Hauptspannungen im Beton aufgrund exzentrischer Einzellast von 0,9 kN dargestellt.



Links - Betonoberseite | Rechts - Betonunterseite

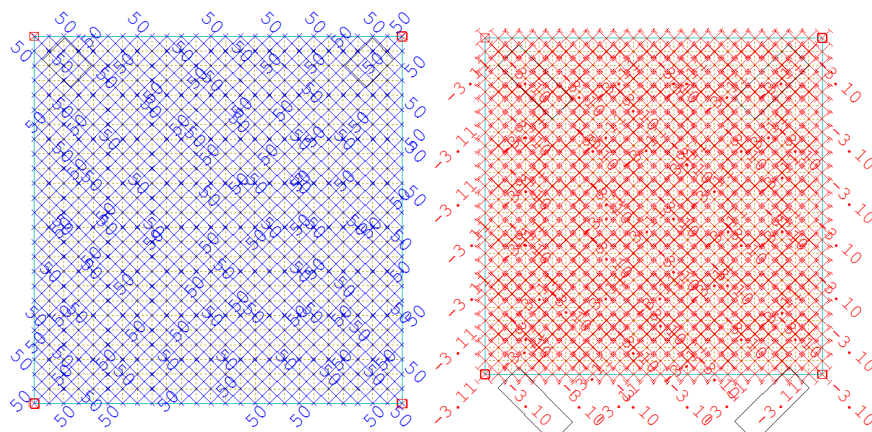
Abb. 28: Hauptspannungen infolge Einzellast [MPa]

Vorspannung

Spannungen in Membran und Beton [MPa]

In Abb. 29, auf der linken Seite, sind die Spannungen in der Membran infolge der Vorspannung abgebildet. Die Membran möchte sich wieder zusammenziehen, wird allerdings vom Beton daran gehindert und erzeugt eine Druckspannung in diesem. Aufgrund des Verhältnisses der Dicken von Membran zu Beton, ist in diesem Beispiel der Faktor der Spannungen 16.

Das bedeutet, dass eine Vorspannung von 50 MPa in der Membran eine ideelle Spannung von 3,10 MPa im Beton erzeugt.



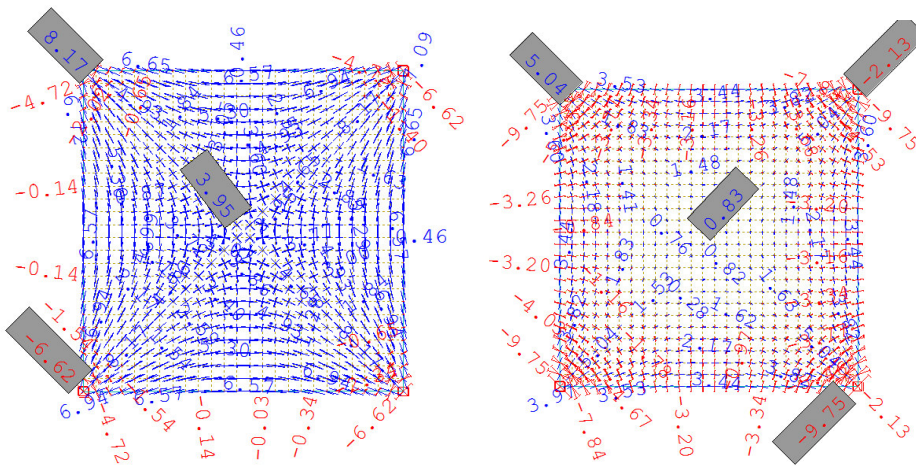
Links - Membran | Rechts - Beton

Abb. 29: Hauptspannungen zufolge Vorspannung [MPa]

Lastfallkombinationen

Hauptspannungen im Beton infolge des Eigengewichts und einer flächigen Nutzlast [MPa]

Die Spannungsermittlung erfolgt nach einer linearen Berechnung. Es werden die Hauptspannungen an der Betonunterseite aufgezeigt. Auf der linken Seite sind die Spannungen, welche infolge des Eigengewichts und einer flächigen Nutzlast auftreten, und auf der rechten Seite die resultierenden Spannungen, infolge dieser Belastung und zusätzlicher Vorspannung dargestellt.

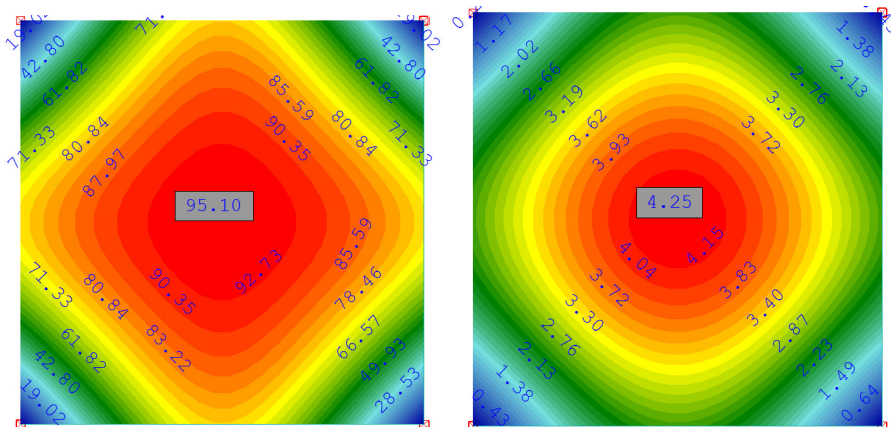


Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 30: Hauptspannungen zufolge EG + NL flächig [MPa]

Mit der gewählten Vorspannung werden die Zugspannungen zum Großteil überdrückt, beziehungsweise sind die auftretenden Zugspannungen sehr gering. Sollen alle Zugkräfte überdrückt werden, so kann die Vorspannung entsprechend erhöht werden.

Besser kann der Einfluss über die Verformung aufgezeigt werden. Die Ermittlung der Verformung erfolgt nach Theorie 3. Ordnung und die Betonzugfestigkeit wird auf Null gesetzt.



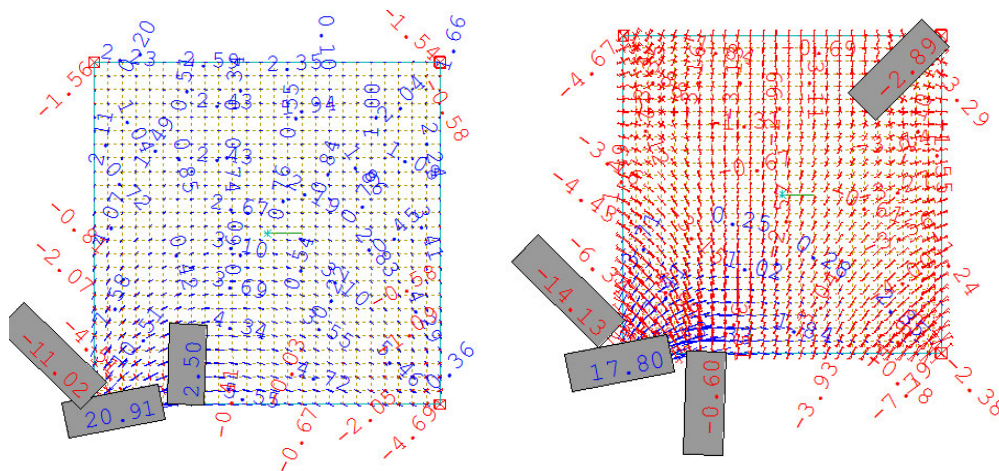
Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 31: Verformungen in Z-Richtung [mm]

Wie in Abb. 31 aufgezeigt wird, ist die Verformung infolge einer flächigen Nutzlast sowie des Eigengewichts, ohne Vorspannung sehr groß. Hier ist bereits ein Versagen des Bauteils eingetreten. Die Verformung mit Vorspannung beträgt lediglich 4 mm, was 1/250 der Länge entspricht.

Hauptspannungen im Beton zufolge EG + Einzellast [MPa]

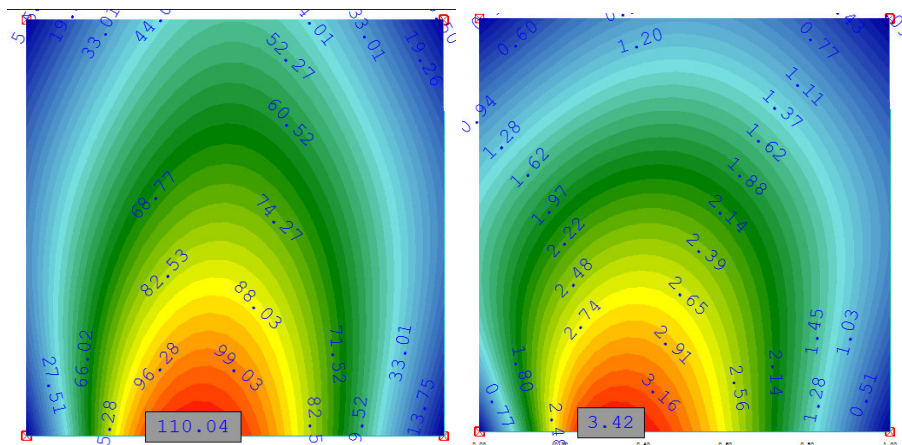
Die Berechnung für die Hauptspannungen erfolgt nach der Theorie 3. Ordnung und berücksichtigt große Verformungen. Nachfolgend werden die Hauptspannungen an der Betonoberseite aufgezeigt. Zum Aufzeigen der Zugspannungen wird die Betonzugspannung nicht auf Null gesetzt.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 32: Hauptspannungen zufolge EG + Einzellast [MPa]

Nachfolgend werden die Verformungen infolge des Eigengewicht und punktueller Belastung mit und ohne Vorspannung dargestellt. Die Berechnung erfolgt nach Theorie 3. Ordnung wobei auch die Betonzugfestigkeit auf Null gesetzt wird.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 33: Verformung in Z-Richtung [mm]

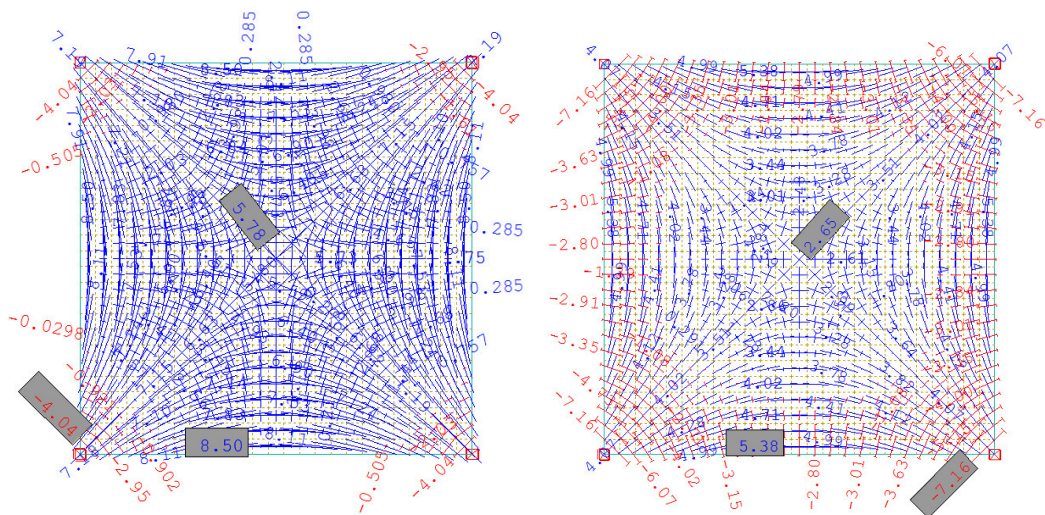
Das ebene Modell ist ohne Vorspannung nicht in der Lage die einwirkende Belastung abzutragen und versagt. Die Verformung mit Vorspannung beträgt 3,4mm.

Grenzzustand der Tragsicherheit

Betrachtet wird nun der Grenzzustand der Tragsicherheit. Hierbei handelt es sich um eine Kombination der Eigengewichtsbelastung und der flächigen Nutzlast mit Teilsicherheitsbeiwerten.

GZT: 1,35 EG + 1,5 NL flächig

Die Berechnung erfolgt linear. Hierbei werden auch die Betonzugspannungen an der Betonunterseite aufgezeigt.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 34: Hauptspannungen im GZT an Betonunterseite [MPa]

3.2.4 Erkenntnisse

Mit dem Modell kann gezeigt werden, dass ein Textil als Vorspannelement für Beton eingesetzt werden kann. Da ebene Platten die Kräfte nur über Biegung abtragen können, entstehen große Zugspannungen. Mit zunehmender Belastung muss auch die Vorspannung entsprechend groß sein, um die Zugspannungen zu überdrücken.

Wie sich die Tragwirkung mit einer Krümmung ändert, wird mit den nachfolgenden Beispielen dargestellt.

3.3 Gekrümmtes Modell 100 x 100 x 50 cm

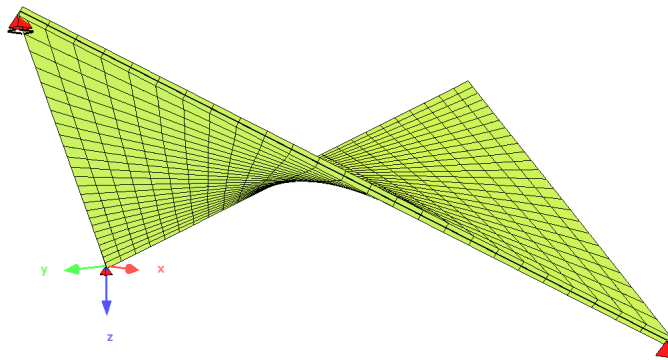


Abb. 35: Visualisierung gekrümmtes Element

3.3.1 Randbedingungen

Geometrie

Die Abmessungen des gekrümmten Flächentragwerks betragen im Grundriss 100 x 100 x 1,6 cm.

Koordinaten der Festpunkte in [m]:

Punkt	x	y	z
1	0	0	0
2	0,707	0,707	-0,5
3	1,414	0	0
4	0,707	-0,707	-0,5

Für das Modell wird kein spezielles Material für die Membran gewählt, da untersucht gehört welches Material sich am besten eignet um auch dem Anspruch als textile Bewehrung gerecht zu werden.

3.3.2 System und Formfindung

Werden die Randbedingungen festgelegt und eine Vorspannung angenommen, so wird über eine Berechnung nach Theorie 3. Ordnung eine Gleichgewichtslage gesucht, welche alle Randbedingungen abdeckt.

Punkt	x	y	z	Festhaltung
1	0	0	0	Px,Py,Pz
2	0,707	0,707	-0,5	Pz
3	1,414	0	0	Px, Py, Pz
4	0,707	-0,707	-0,5	Pz

Vorspannung : 50 kN/m in X- und Y- Richtung.

Um zwischen den Festpunkten gerade Ränder zu erhalten wird eine temporäre Randlagerung definiert, die nach der Betonage der oberen und unteren Schicht entfernt wird.

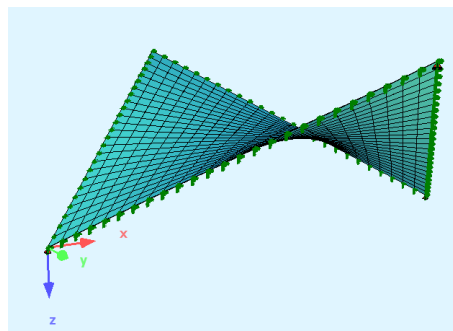


Abb. 36: Visualisierung Membran

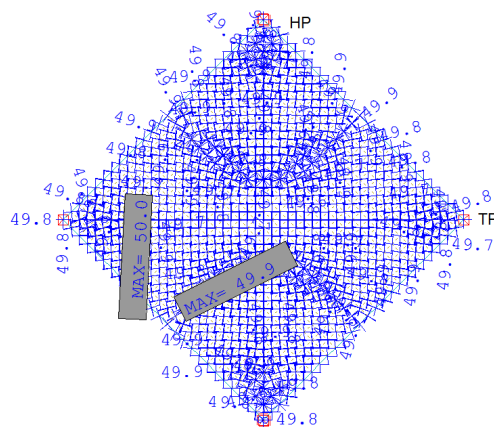


Abb. 37: Vorspannung in Membran [kN/m]

Aufgrund der Gleichgewichtsbedingungen, entspricht die Spannung in der oberen und unteren Betonschicht jeweils die Hälfte der Vorspannkraft in der Membran.
 So folgt: 50 kN/m in der Membran → 25 kN/m pro Betonschicht

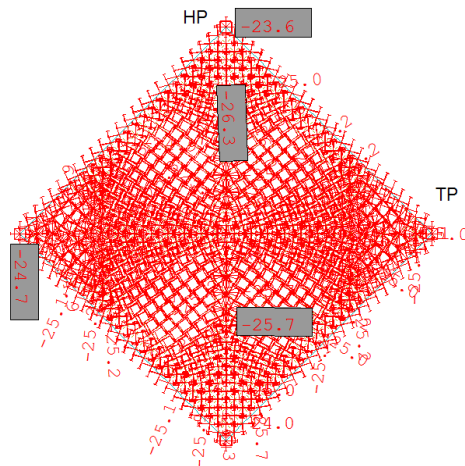


Abb. 38: Vorspannung in Betonschicht [kN/m]

Spannung im Beton infolge Vorspannung, pro Betonschicht [MPa]:

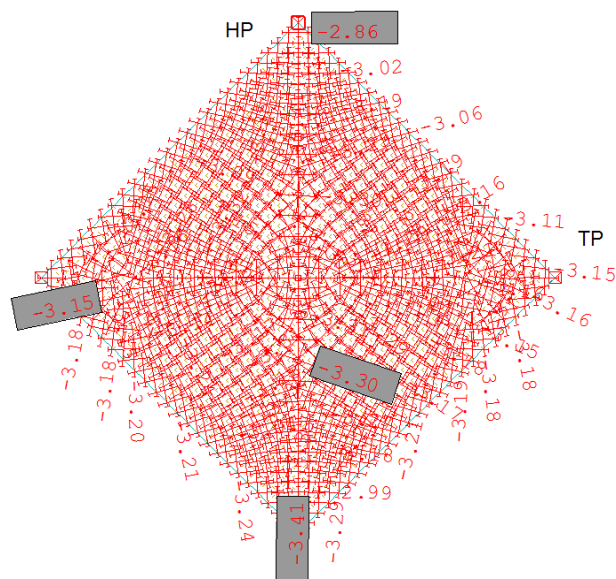


Abb. 39: Hauptspannungen im Beton infolge Vorspannung [MPa]

3.3.3 Lasten

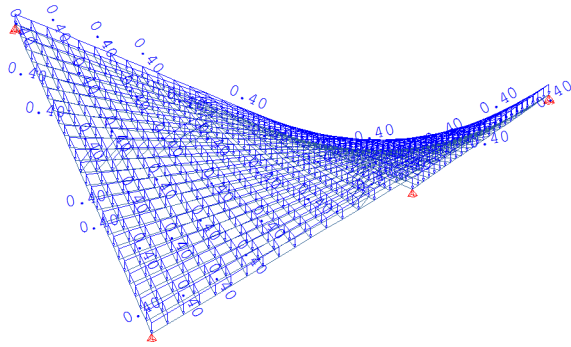
Als Belastung wird das Eigengewicht der Betonschalen angesetzt. Darüber hinaus gibt es sowohl eine flächige, als auch eine exzentrisch angreifende Nutzlast.

Eigengewicht : $g_k = 25 \text{ kN/m}^3 = 0,2 \text{ kN/m}^2$ pro Betonschicht (8 mm jeweils)

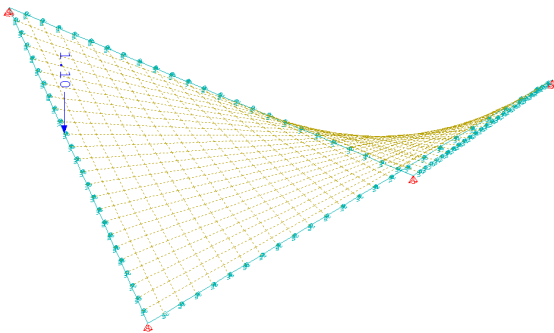
Einzellast : $P = 1,1 \text{ kN}$

Nutzlast flächig : $q_k = 6 \text{ kN/m}^2$

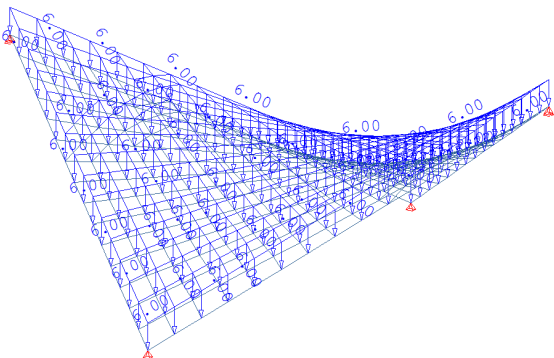
3.3.4 Lastfälle



Eigengewichtsbelastung $g_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$



Einzellast $P = 1,1 \text{ kN}$



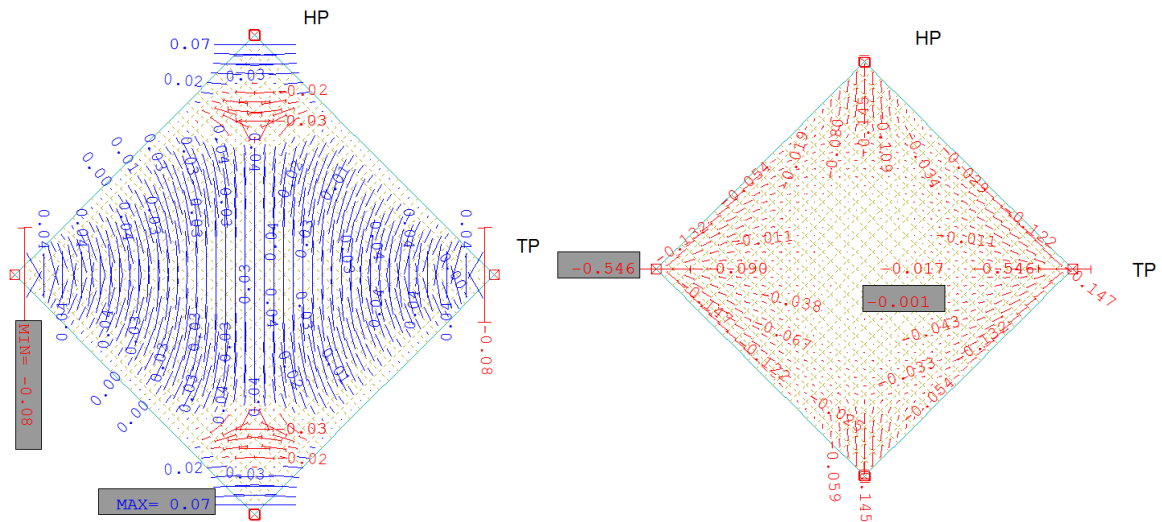
flächige Nutzlast $q_k = 6 \text{ kN/m}^2$

3.3.5 Spannungen

Nachfolgend werden die Spannungen infolge der verschiedenen Belastungen gezeigt. Aufgrund der großen Verformungen werden sämtliche Spannungen und Verformungen nach der Theorie 3. Ordnung und mit Berücksichtigung materieller Nichtlinearitäten berechnet.

Druckspannungen werden in **rot** abgebildet und Zugspannungen in **blau**.

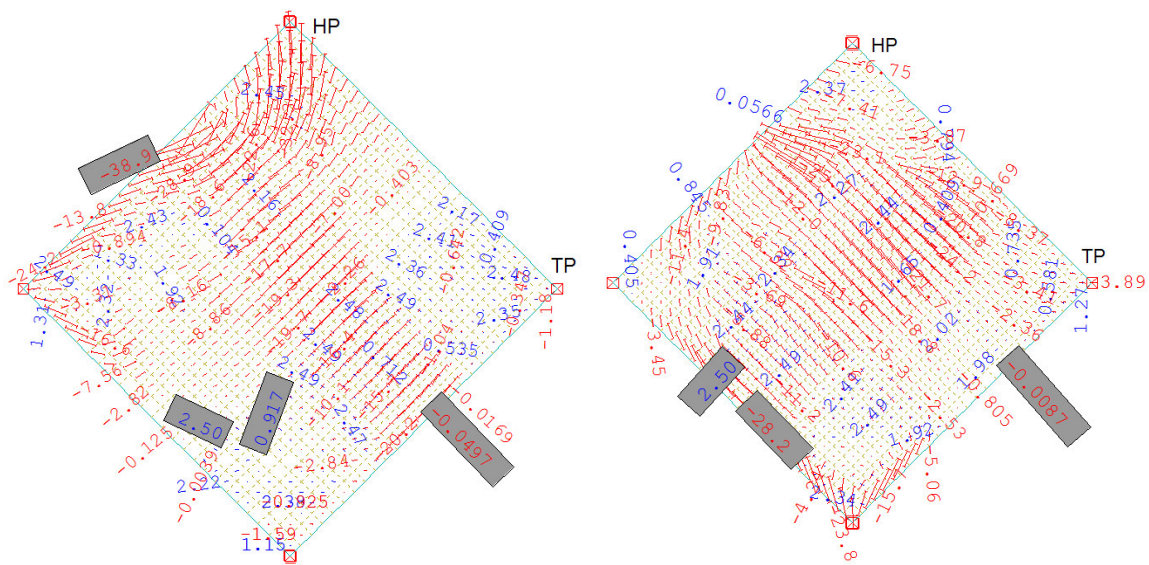
Spannungen an der Betonoberseite infolge Eigengewichtsbelastung in MPa:



Links - Hauptspannungsrichtung 1 | Rechts - Hauptspannungsrichtung 2

Abb. 40: Hauptspannung an Betonoberseite infolge Eigengewicht [MPa]

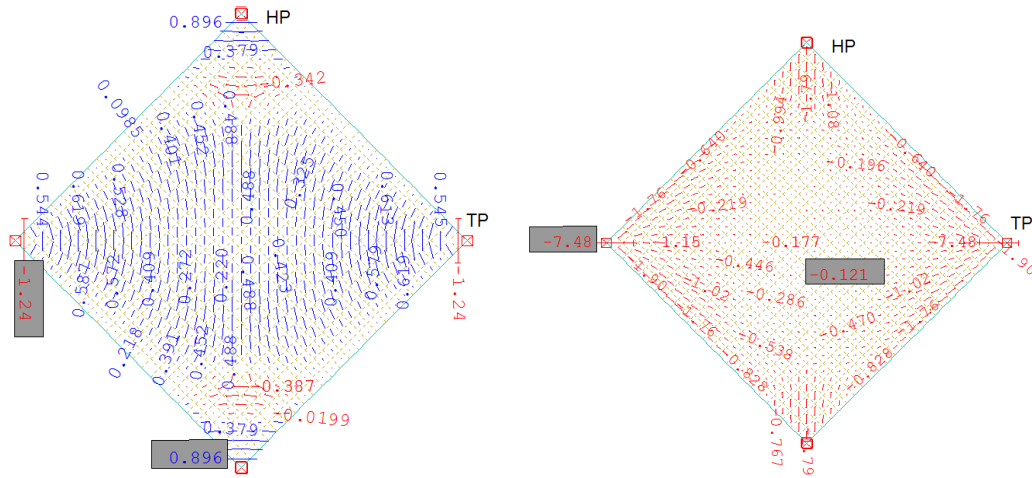
Spannungen im Beton infolge Einzellast in MPa :



Links - Betonoberseite | Rechts - Betonunterseite

Abb. 41: Hauptspannungen im Beton infolge Einzellast [MPa]

Spannungen an der Betonoberseite infolge flächiger Nutzlast in MPa:



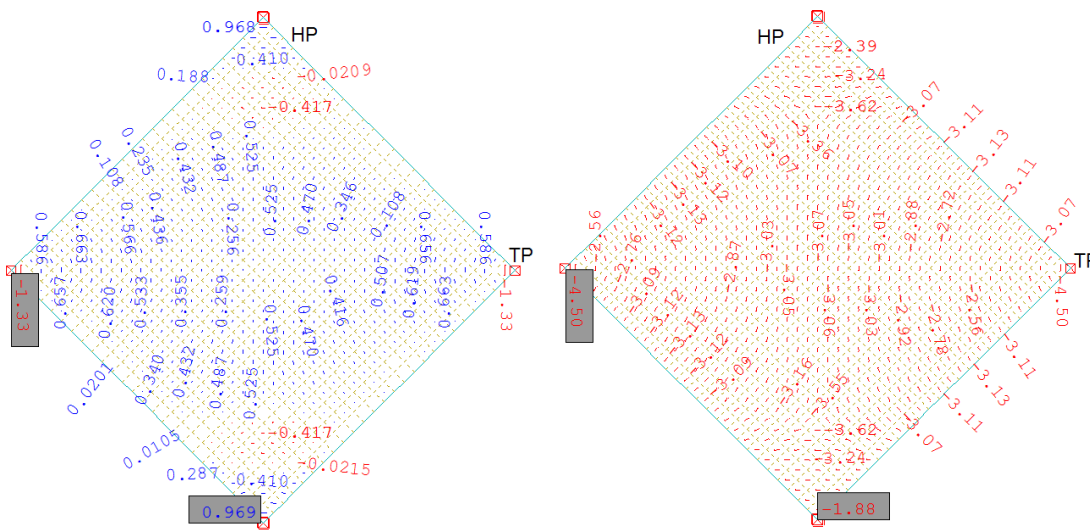
Links - Hauptspannungsrichtung 1 | Rechts - Hauptspannungsrichtung 2
 Abb. 42: Spannungen an Betonoberseite infolge flächiger Nutzlast [MPa]

3.3.6 Kombinationen

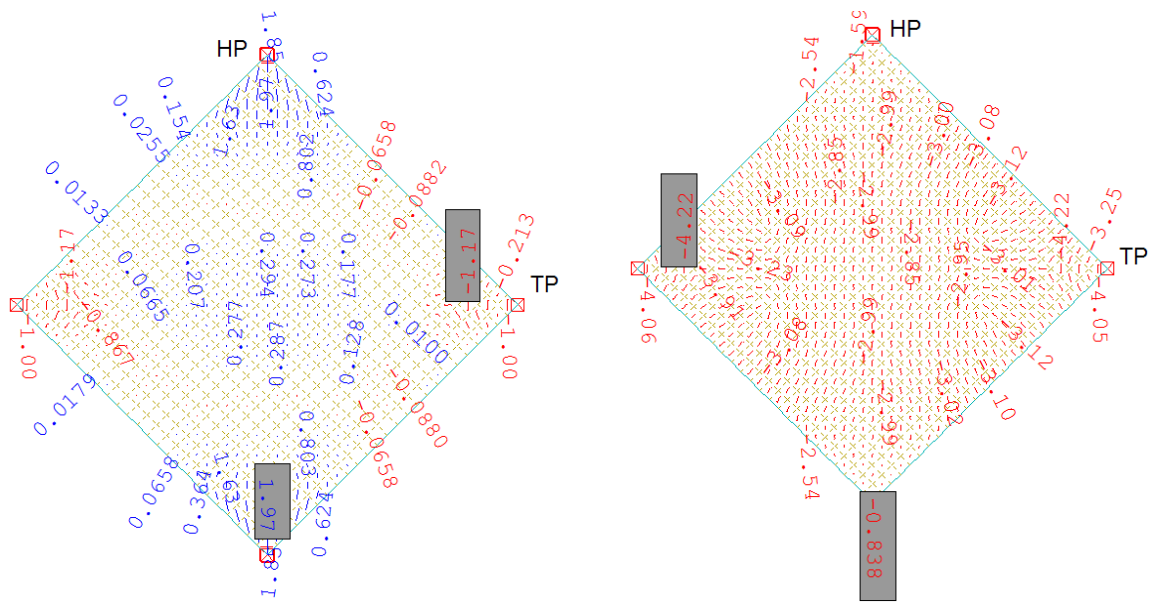
Nachfolgend werden die Kombinationen der einzelnen Belastungen gezeigt.

Spannungen im Beton infolge von EG + flächige NL in MPa:

Auf der linken Seite ist die Hauptspannungsrichtung 1 dargestellt. Das System wird mit dem Eigengewicht und einer flächigen Nutzlast beansprucht. Zugspannungen werden in blau und Druckspannungen in rot dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass sich ein Zugbogen zwischen den HP ausbildet. Diese auftretenden Zugkräfte können mit einer Vorspannung leicht überdrückt werden.



Links - Ohne VSP | Rechts - Mit VSP
 Abb. 43: Hauptspannung 1 an Betonoberseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]

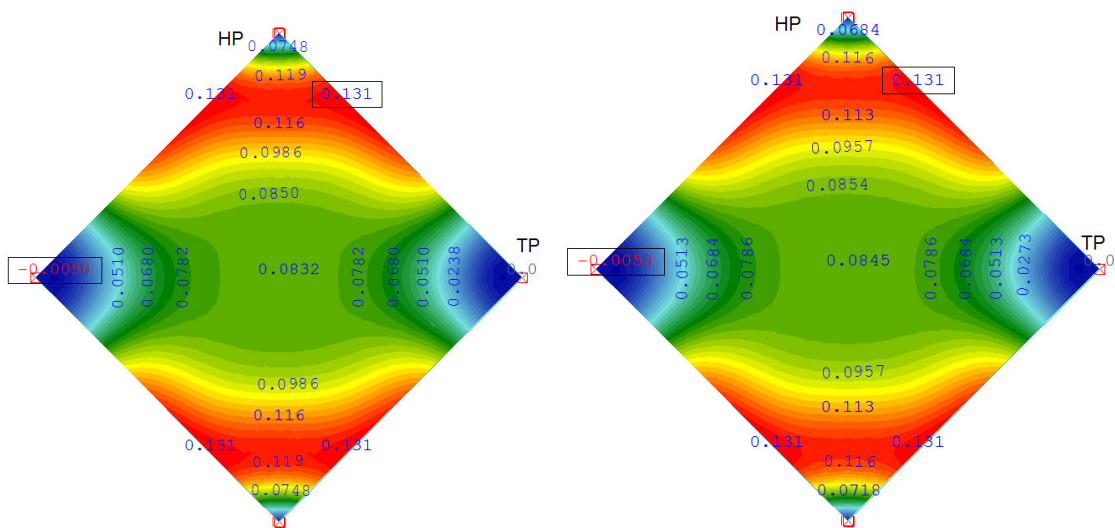


Links - Ohne VSP | Rechts - Mit VSP

Abb. 44: Hauptspannung 1 an Betonunterseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]

Verformung im Beton infolge von EG + flächige NL in MPa:

Die Änderung der Verformung infolge der Vorspannung ist bei flächigen Belastungen sehr klein und daher nicht weiter von Bedeutung. Auf diesen Effekt wird in Kapitel 3.6 näher eingegangen.

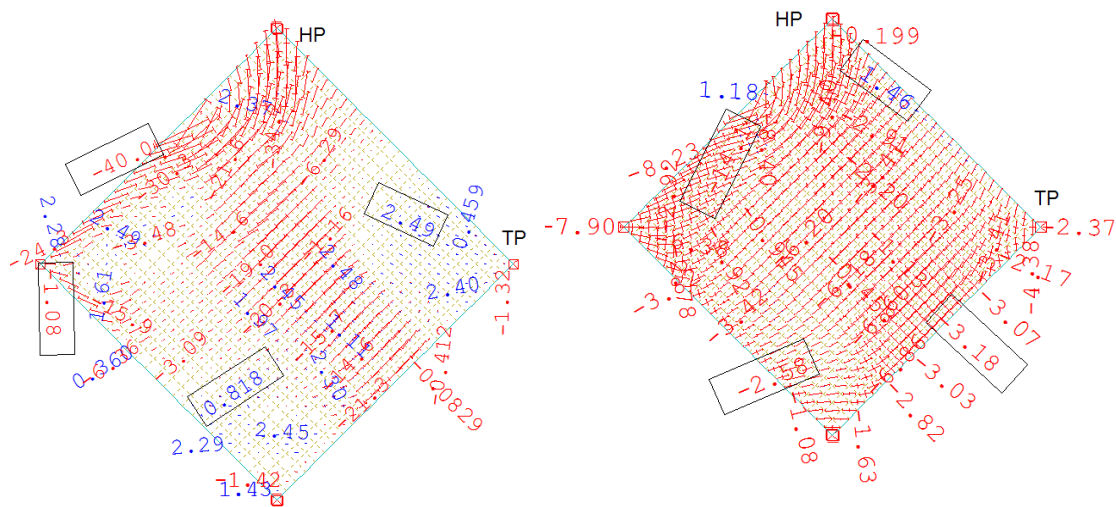


Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 45: Verformung in Z-Richtung [mm]

Spannungen im Beton infolge von EG + Einzellast in MPa:

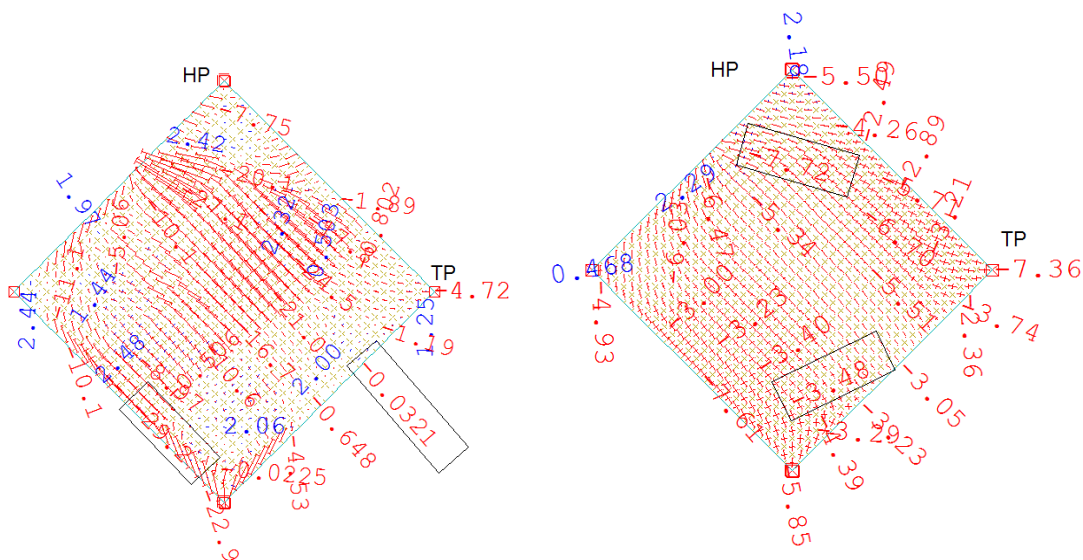
In Abb. 46 werden die Hauptspannungen an der Betonoberseite infolge von Eigengewicht und exzentrischer Belastung mit und ohne Vorspannung aufgezeigt.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 46: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge EG+ Einzellast [MPa]

Dazugehörig sind in Abb. 47 die Hauptspannungen an der Betonunterseite infolge Eigengewicht und Einzellast. Auf der linken Seite ohne Vorspannung und auf der rechten Seite jene mit Vorspannung.

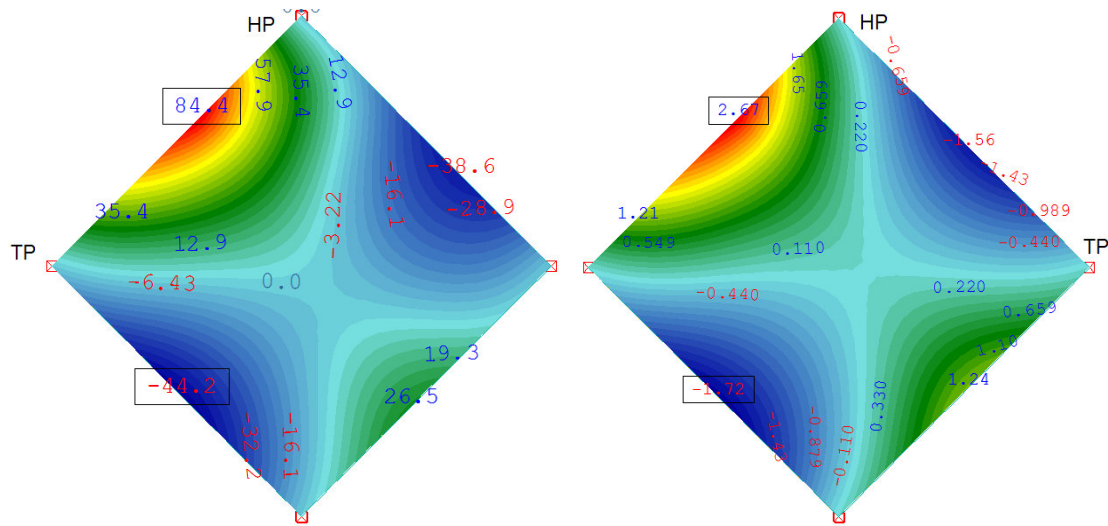


Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 47: Hauptspannungen an Betonunterseite infolge EG+ Einzellast [MPa]

Verformung im Beton infolge von EG + Einzellast in MPa:

Der positive Effekt der Vorspannung kann bei Einzellasten sehr gut gezeigt werden. Die Verformung kann von 84 mm auf 3 mm verringert werden. Dies stellt eine Verbesserung um den Faktor 28 dar.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP
 Abb. 48: Verformung in Z-Richtung [mm]

3.4 Gekrümmtes Modell 200 x 200 x 100 cm

Das nachfolgende Modell beruht sowohl bei seinen Annahmen und Voraussetzungen als auch bei der Berechnung, auf jenen des Beispiels in 3.3.

3.4.1 Randbedingungen

Geometrie

Die Abmessungen des Segels beträgt im Grundriss 200 x 200 x 1,6 cm.

Koordinaten der Festpunkte in [m]:

Punkt	x	y	z
1	0	0	0
2	1.415	1.415	-1
3	2.830	0	0
4	1.415	-1.415	-1

3.4.2 System und Formfindung

Die Randbedingungen werden aus dem Beispiel in 3.3 übernommen. Es werden lediglich die geometrischen Abmessungen und die Belastungen angepasst.

Vorspannung : 50 kN/m in X- und Y- Richtung.

Um zwischen den Festpunkten gerade Ränder zu erhalten wird eine temporäre Randlagerung definiert, welche nach der Betonage der oberen und unteren Schicht entfernt wird.

3.4.3 Lasten

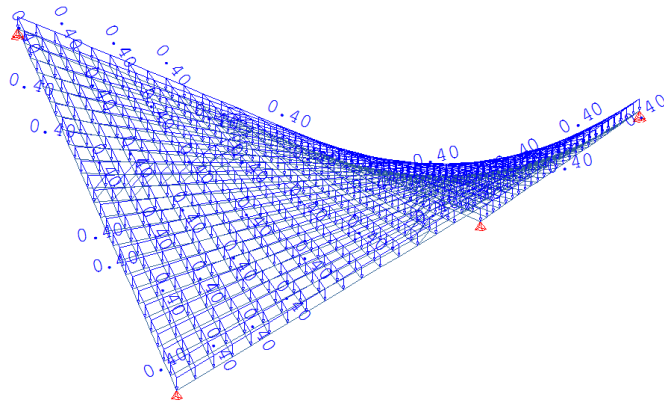
Als Belastung wird das Eigengewicht der Betonschalen angesetzt. Darüber hinaus gibt es sowohl eine flächige, als auch eine exzentrisch angreifende Nutzlast.

Eigengewicht : $g_k = 25 \text{ kN/m}^3 = 0,2 \text{ kN/m}^2$ pro Betonschicht (8 mm jeweils)

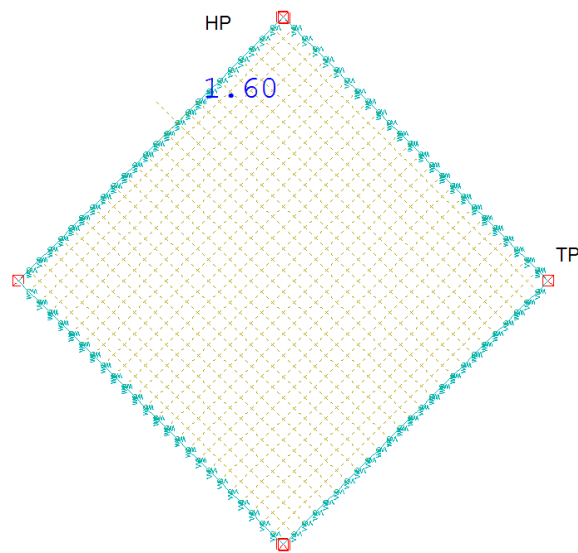
Einzellast : $p = 1,6 \text{ kN}$

Nutzlast flächig : $q_k = 6 \text{ kN/m}^2$

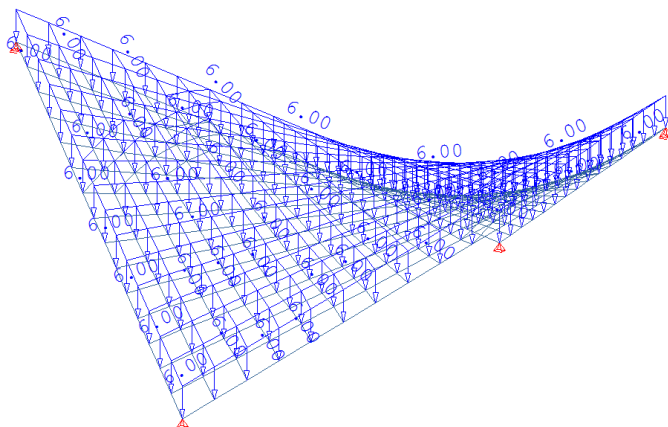
3.4.4 Lastfälle



Eigengewichtsbelastung $g_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$



Einzellast $P = 1,6 \text{ kN}$



flächige Nutzlast $q_k = 6 \text{ kN/m}^2$

3.4.5 Spannungen

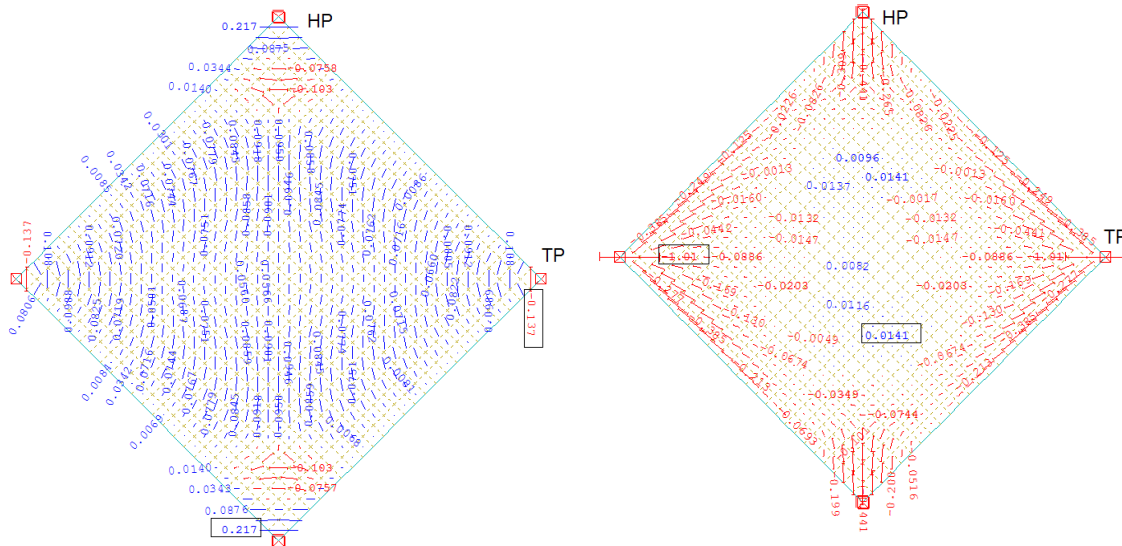
Nachfolgend werden die Spannungen infolge der verschiedenen Belastungen gezeigt.

Druckspannungen werden in rot und Zugspannungen in blau abgebildet.

Eigengewicht

Spannungen an der Betonoberseite infolge der Eigengewichtsbelastung in MPa:

Die Spannungen infolge der Eigengewichtsbelastung sind sehr gering und werden daher nicht besonders hervorgehoben. Jedoch ist ersichtlich, dass sich ein Zugbereich zwischen den Hochpunkten einstellt und ein Druckbereich zwischen den Tiefpunkten.



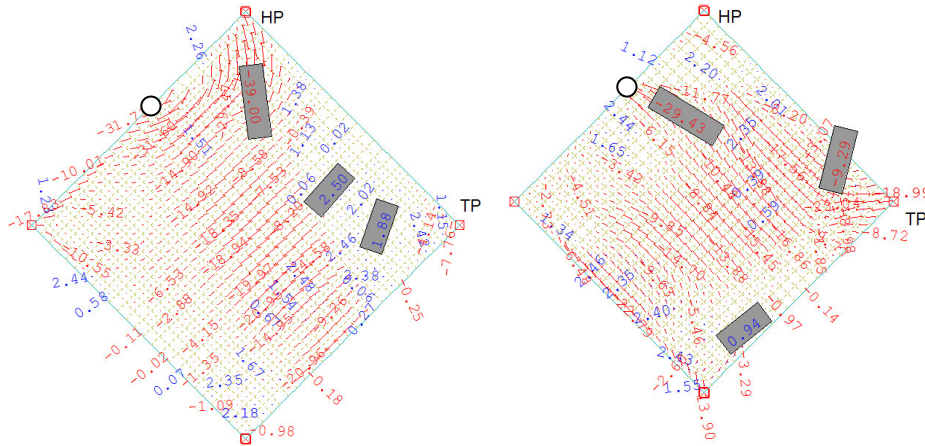
Links - Hauptspannungsrichtung 1 | Rechts - Hauptspannungsrichtung 2

Abb. 49: Hauptspannung an Betonoberseite infolge Eigengewicht [MPa]

Einzellast

Spannungen an der Betonoberseite infolge Einzellast in MPa:

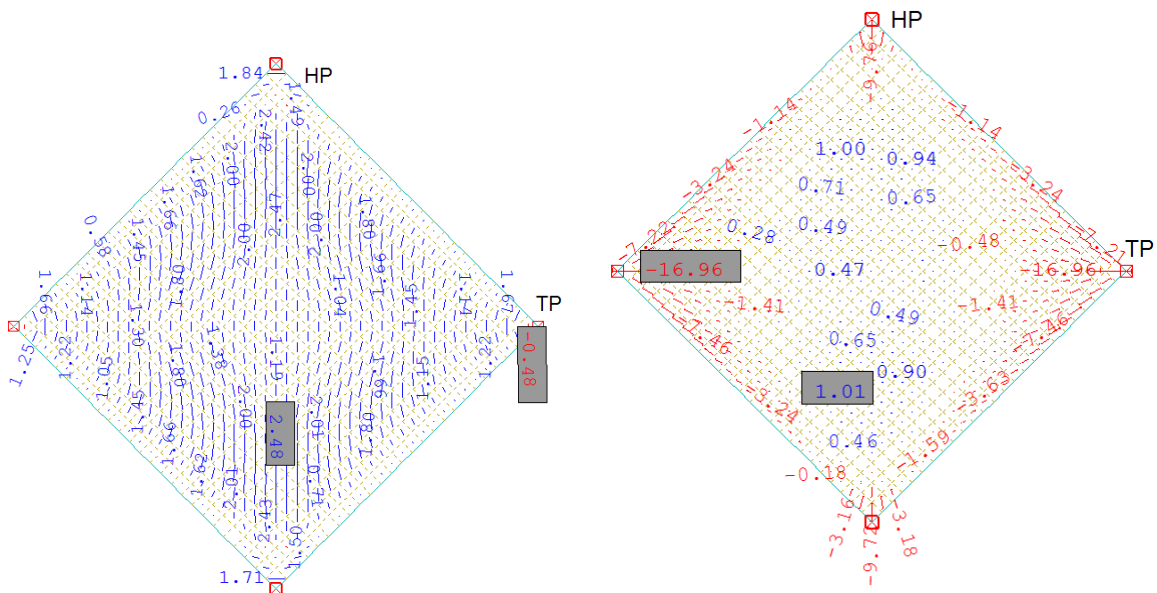
Die Stelle an welcher die exzentrisch wirkende Belastung angreift, ist mit einem Kreis gekennzeichnet.



Links - Betonoberseite | Rechts - Betonunterseite
 Abb. 50: Hauptspannungen infolge Einzellast [MPa]

Flächige Nutzlast

Spannungen an der Betonoberseite infolge flächiger Nutzlast in MPa:



Links - Hauptspannungsrichtung 1 | Rechts - Hauptspannungsrichtung 2
 Abb. 51: Spannungen an Betonoberseite infolge flächiger Nutzlast [MPa]

3.4.6 Kombinationen

Nachfolgend werden die Kombinationen der einzelnen Belastungen gezeigt.

Spannungen im Beton infolge von EG + flächige NL in MPa:

Auf der linken Seite ist die Hauptspannungsrichtung 1 dargestellt. Das System wird mit dem Eigengewicht und einer flächigen Nutzlast beansprucht. Zugspannungen werden in blau dargestellt, und Druckspannungen in rot.

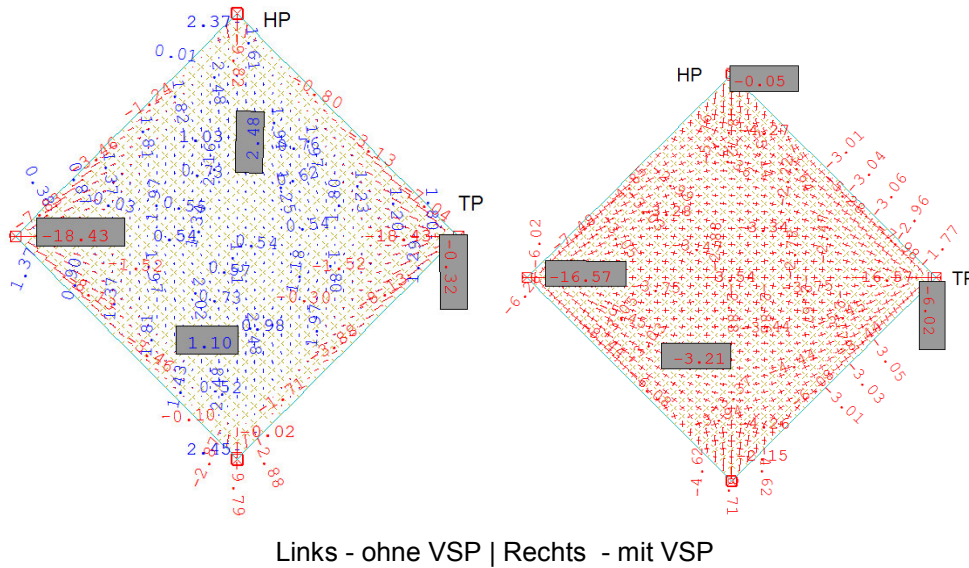


Abb. 52: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]

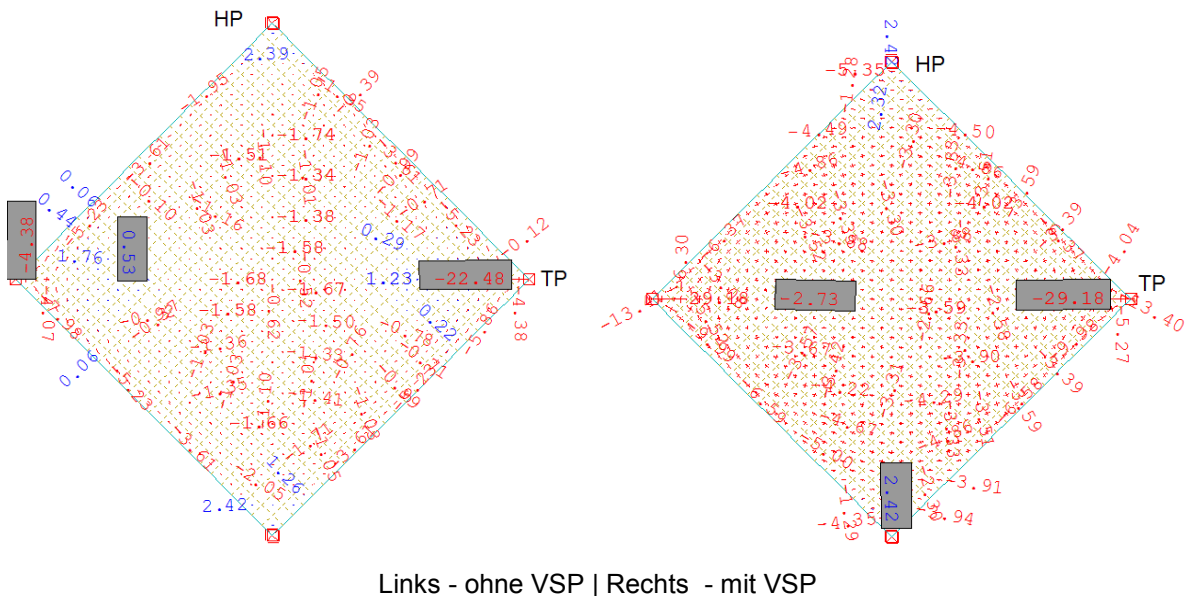
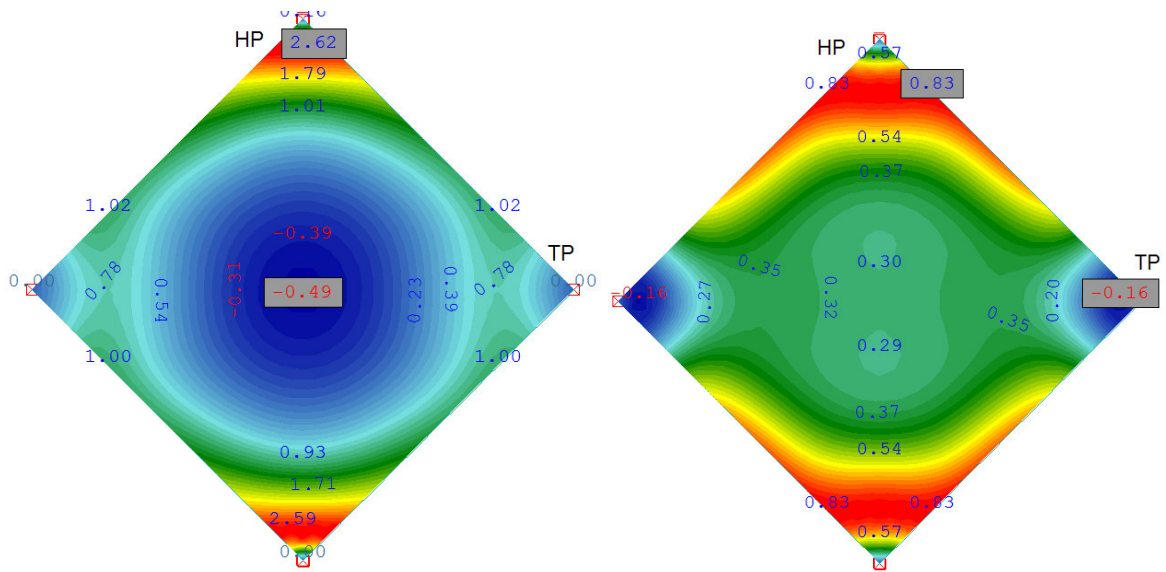


Abb. 53: Spannungen an Betonunterseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]

Verformung im Beton infolge von EG + flächige NL in MPa:

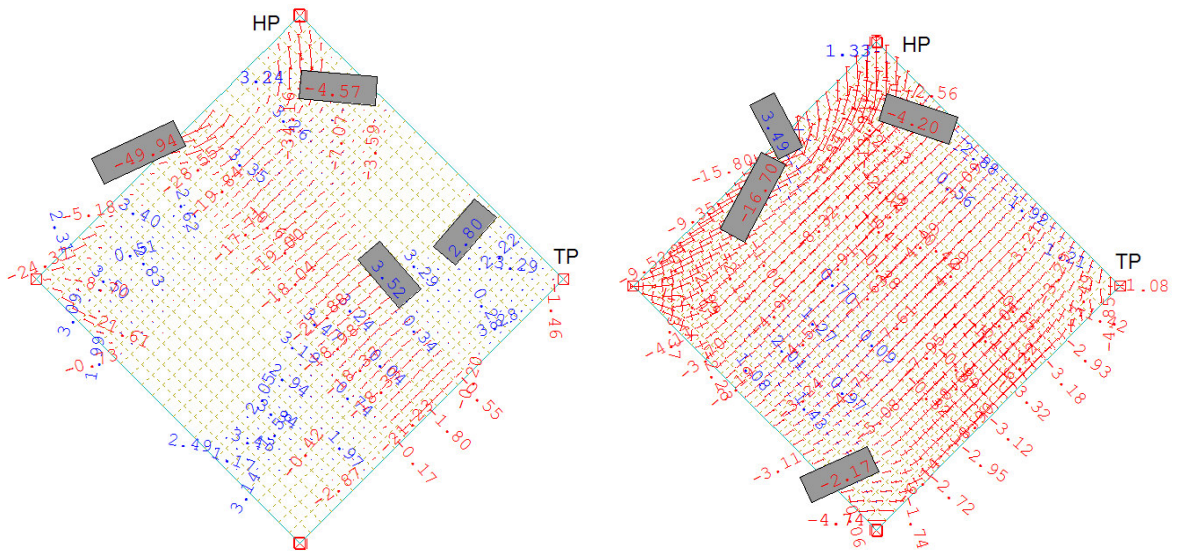


Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 54: Verformung in Z-Richtung [mm]

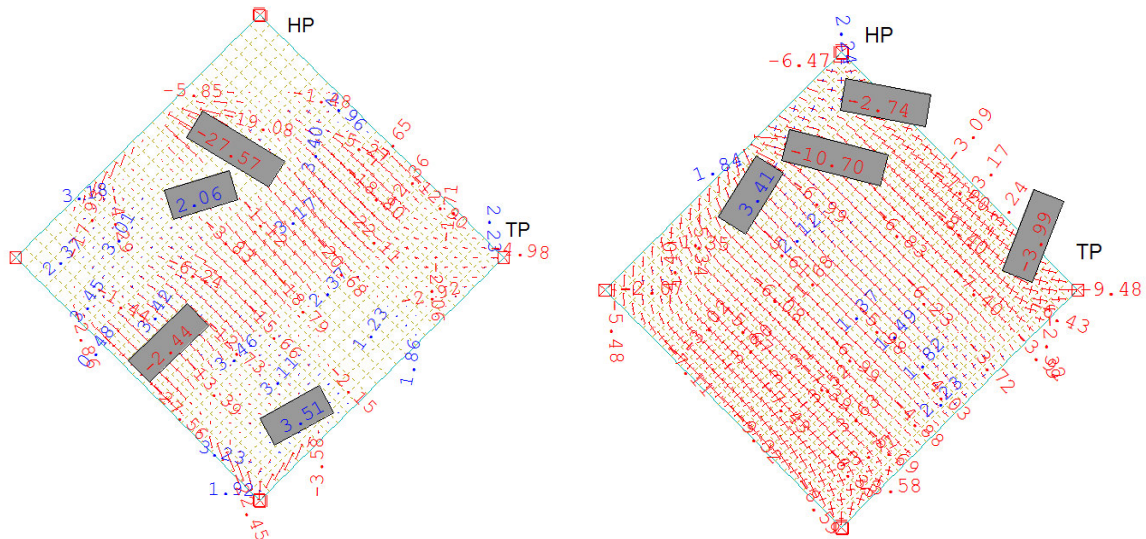
Spannungen im Beton infolge von EG + Einzellast in MPa:

In den Abb. 55 und Abb. 56 werden die Hauptspannungen an der Betonober- und Unterseite gezeigt. Diese entstehen durch die exzentrische Belastung und dem Eigengewicht, wobei auf der rechten Seite jene Spannungen mit Vorspannung gezeigt werden.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 55: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge EG+ Einzellast [MPa]

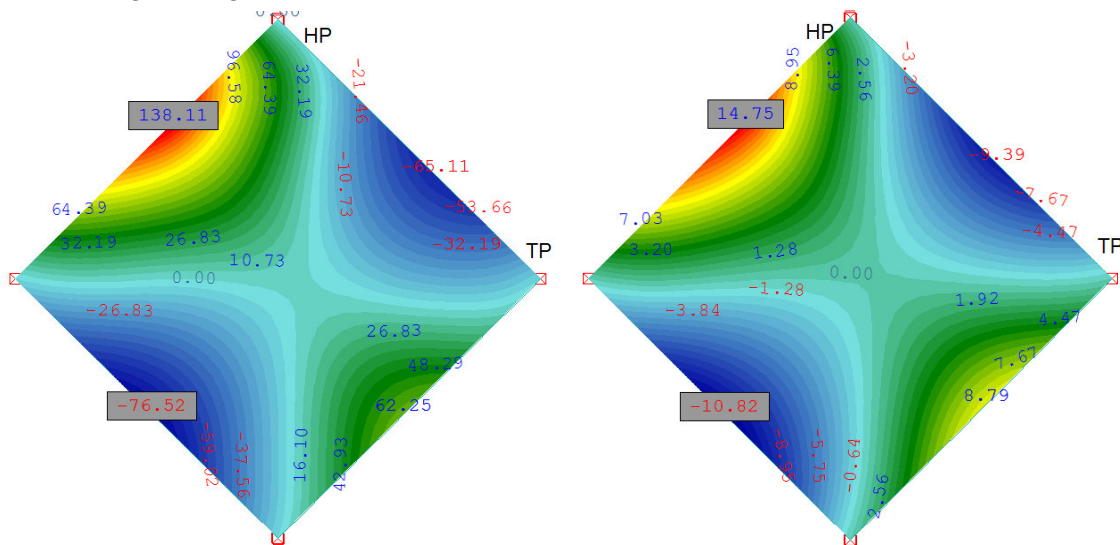


Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 56: Hauptspannungen an Betonunterseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]

Verformung im Beton infolge von EG + Einzellast in MPa:

Die Verformung infolge einer exzentrische Punktlast wird von 138 mm auf 15 mm mit der Vorspannung verringert.



Links - ohne VSP | Rechts - mit VSP

Abb. 57: Verformung in Z-Richtung [mm]

So kann aufgezeigt werden, dass die Vorspannung im Speziellen bei exzentrisch wirkenden Einzellasten stabilisierend wirkt und die Verformungen gering gehalten werden können.

3.5 Gekrümmtes Modell 120 x 300 x 80 (100) cm

Das nachfolgende Modell beruht bei seinen Annahmen und Voraussetzungen als auch bei der Berechnung, auf jenen des Beispiels in 3.3.

3.5.1 Randbedingungen

Geometrie

Die Abmessungen des Segels betragen im Grundriss 150 x 300 x 1,6 cm.

Koordinaten der Festpunkte in [m]:

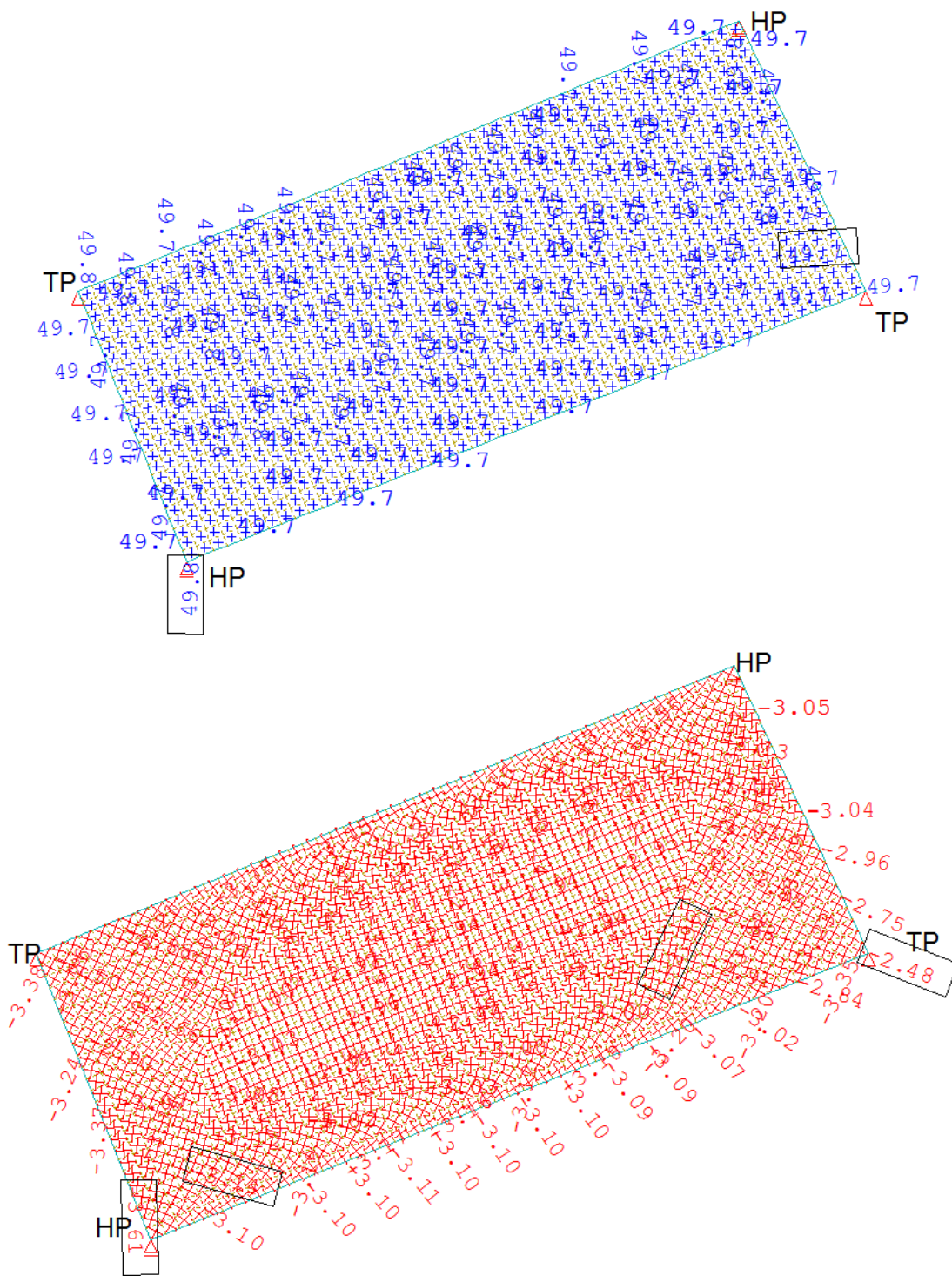
Punkt	x	y	z	
1	0	0	0	TP
2	0,67	1,345	-0,8	HP
3	3,35	0	0	TP
4	2,71	-1.345	-1	HP

3.5.2 System und Formfindung

Die Randbedingungen werden aus dem Beispiel in 3.3 übernommen. Es werden lediglich die geometrischen Abmessungen und die Belastungen angepasst.

Vorspannung : 50 kN/m in X- und Y- Richtung.

Um zwischen den Festpunkten gerade Ränder zu erhalten, wird eine temporäre Randlagerung definiert, welche nach der Betonage der oberen und unteren Schicht entfernt wird.



Oben - Membran | Unten - Beton

Abb. 58: Hauptspannungen infolge Vorspannung [MPa]

3.5.3 Lasten

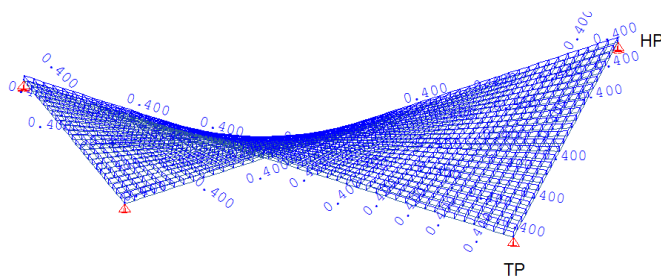
Als Belastung wird das Eigengewicht der Betonschalen angesetzt. Darüber hinaus gibt es sowohl eine flächige, als auch eine exzentrisch angreifende Nutzlast.

Eigengewicht : $g_k = 25 \text{ kN/m}^3 = 0,2 \text{ kN/m}^2$ pro Betonschicht (8 mm jeweils)

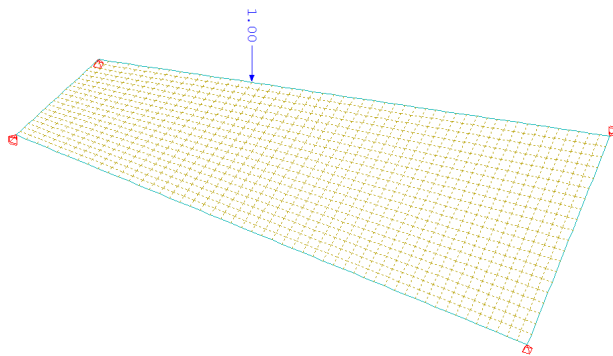
Einzellast : $P = 0,9 \text{ kN}$

Nutzlast flächig : $q_k = 1,4 \text{ kN/m}^2$

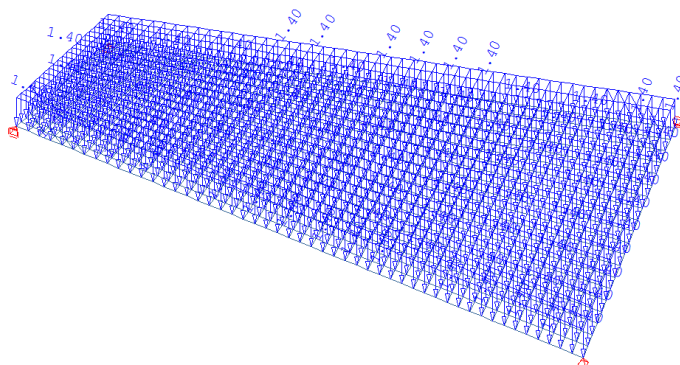
3.5.4 Lastfälle



Eigengewichtsbelastung $g_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$



Einzellast $P = 1 \text{ kN}$



flächige Nutzlast $q_k = 1,4 \text{ kN/m}^2$

3.5.5 Kombinationen

Nachfolgend werden die Kombinationen der einzelnen Belastungen gezeigt.

Spannungen im Beton infolge von EG + flächige NL in MPa:

Das System wird mit dem Eigengewicht und einer flächigen Nutzlast beansprucht. Zugspannungen werden in blau dargestellt, und Druckspannungen in rot. Die Berechnung erfolgt nach Theorie 3. Ordnung, wobei jedoch zum Aufzeigen der Zugspannungen, die Betonzugfestigkeit nicht auf Null gesetzt wird. So kann der Einfluss der Vorspannung besser dargestellt werden.

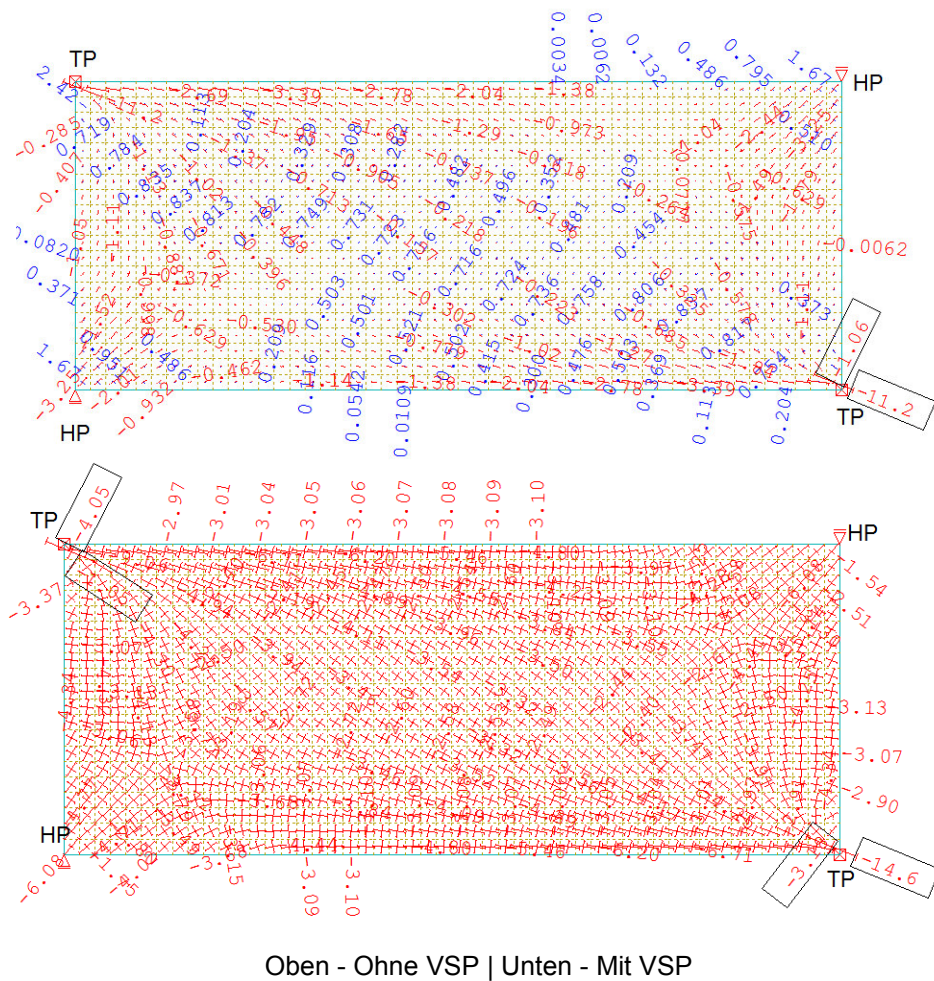


Abb. 59: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge von EG+ flächiger NL [MPa]

Die Spannungen an der Betonunterseite werden ebenfalls überdrückt. Daher werden diese nicht aufgezeigt.

Verformung im Beton infolge von EG + flächige NL in MPa:

Nachfolgend ist die Verformung einmal ohne, und einmal mit Vorspannung gezeigt. Die Ermittlung der Vorspannung erfolgt nach Theorie 3. Ordnung und die Betonzugfestigkeit wird auf Null gesetzt, um die maximale Verformung aufzuzeigen.

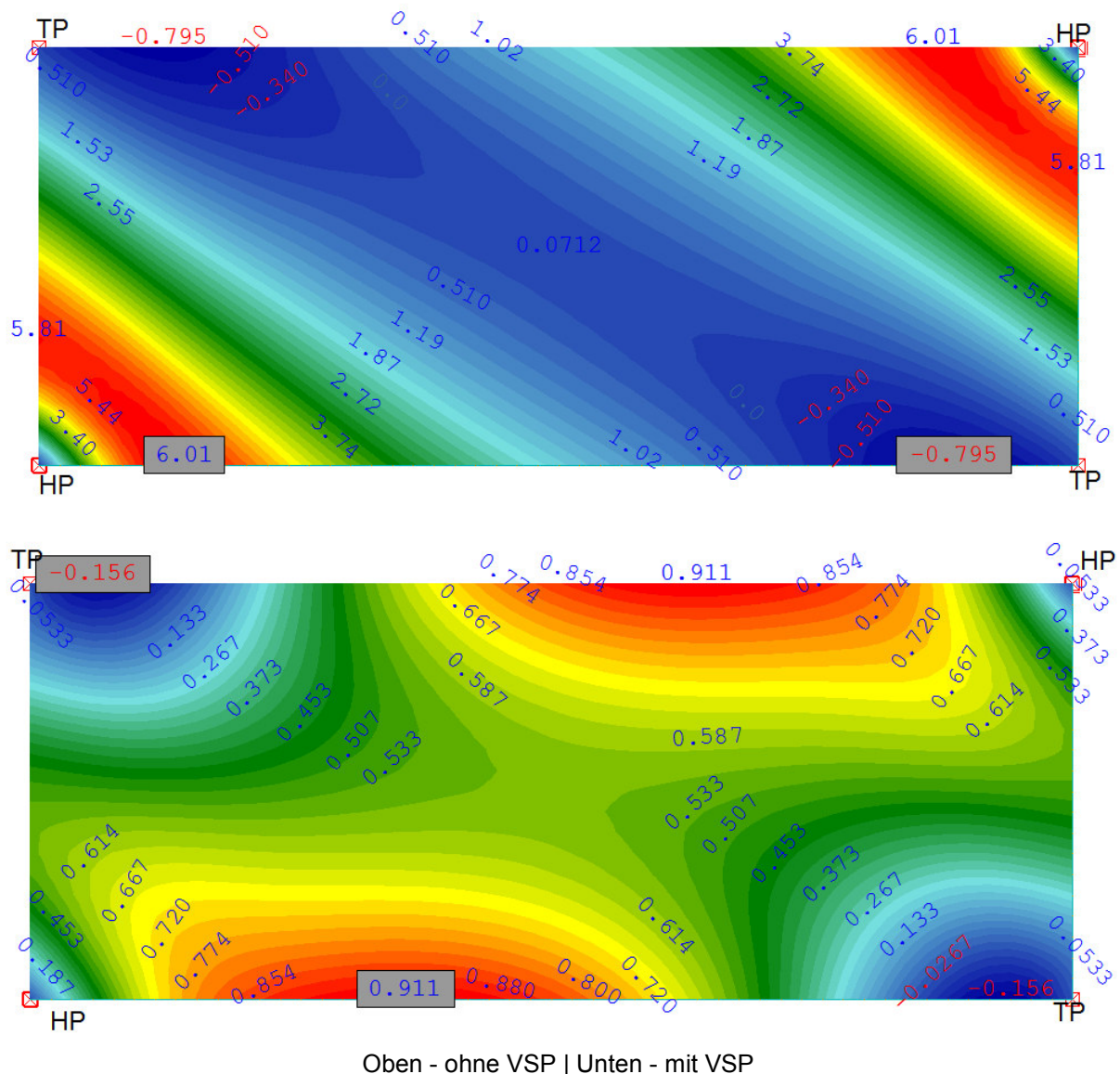
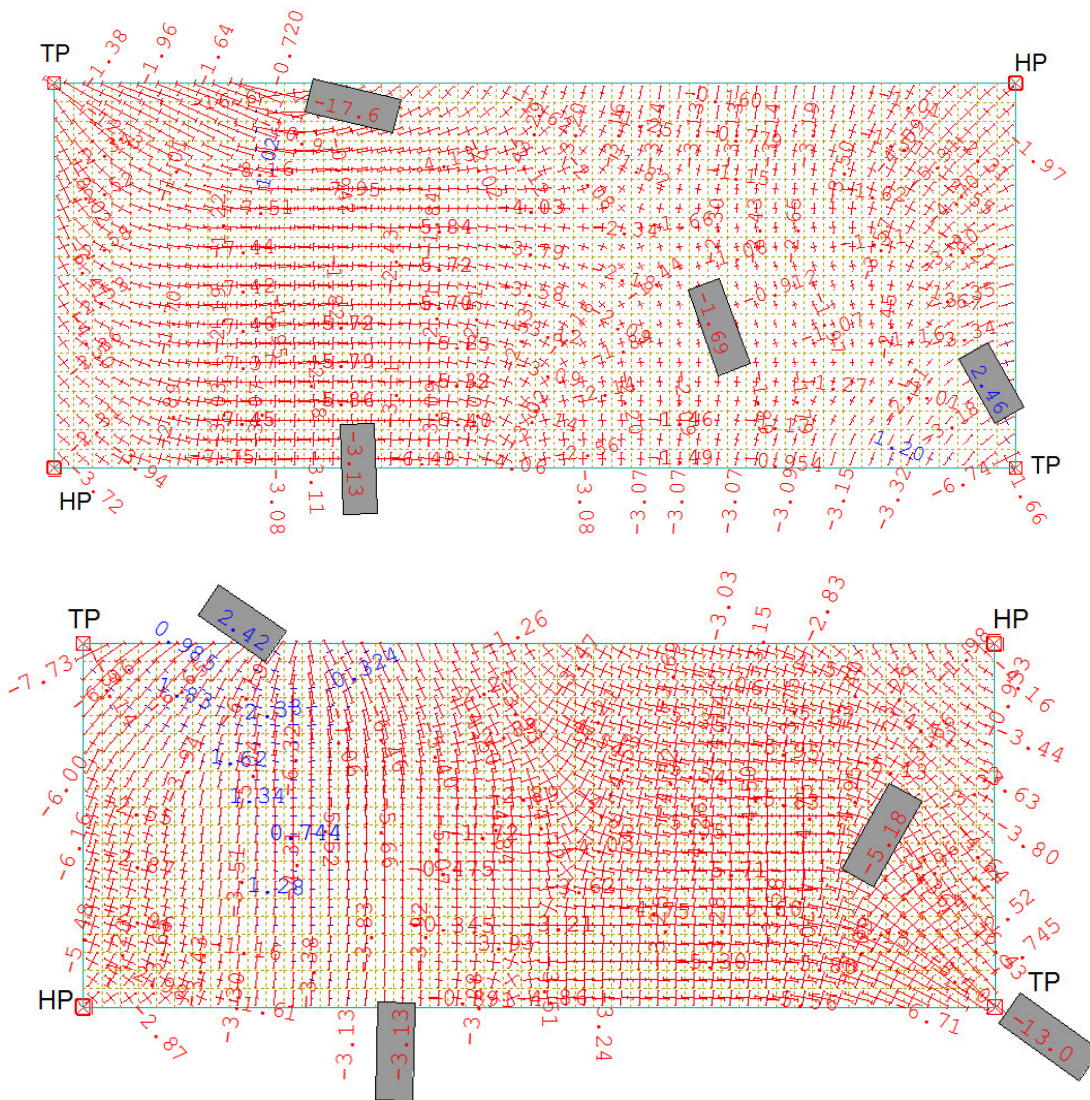


Abb. 60: Verformung in Z-Richtung [mm]

Die Verformung wird mittels der Vorspannung um den Faktor 6 verbessert. Eine Verformung von 1 mm entspricht einer Durchbiegung von $L/3000$.

Spannungen im Beton infolge von EG + Einzellast+ VSP in MPa:

In Abb. 61 werden die Hauptspannungen an der Betonober- und -unterseite gezeigt. Diese entstehen durch das Eigengewicht, einer exzentrischen Belastung und der Vorspannung. Die Ermittlung der Spannungen erfolgt nach Theorie 3. Ordnung. Die blauen Zahlen stellen die Zugspannungen dar. Diese können auch mittels Vorspannung nicht überdrückt werden. Mit der Annahme, dass die Betonzugfestigkeit im SLS-Lastfall 3,5 N/mm² beträgt, kommt es zu keinen Rissen. Da der Lastfall der Lastfall EG + exzent. NL ohne VSP die zulässigen Betonspannungen überschreitet, und zudem keine Gleichgewichtslage gefunden werden kann, wird darauf verzichtet die Spannungen diesen Lastfalls darzustellen.



Oben - Betonoberseite | Unten - Betonunterseite

Abb. 61: Hauptspannungen im Beton infolge von EG + Einzellast + VSP [MPa]

Verformung im Beton infolge von EG + Einzellast + VSP in MPa:

Im Lastfall mit exzentrischer Nutzlast übersteigt das System ohne Vorspannung die max. zulässigen Betonspannungen. Zudem kann kein Gleichgewicht gefunden werden. Daher werden keine Verformungen des Systems ohne Vorspannung dargestellt.

In Abb. 62 wird die Verformung infolge einer Einzellast und einer Vorspannung dargestellt. Mit 6 mm bezogen auf eine Seitenlänge von 3000 mm beträgt die Verformung $L/500$, was einen akzeptablen Wert darstellt.

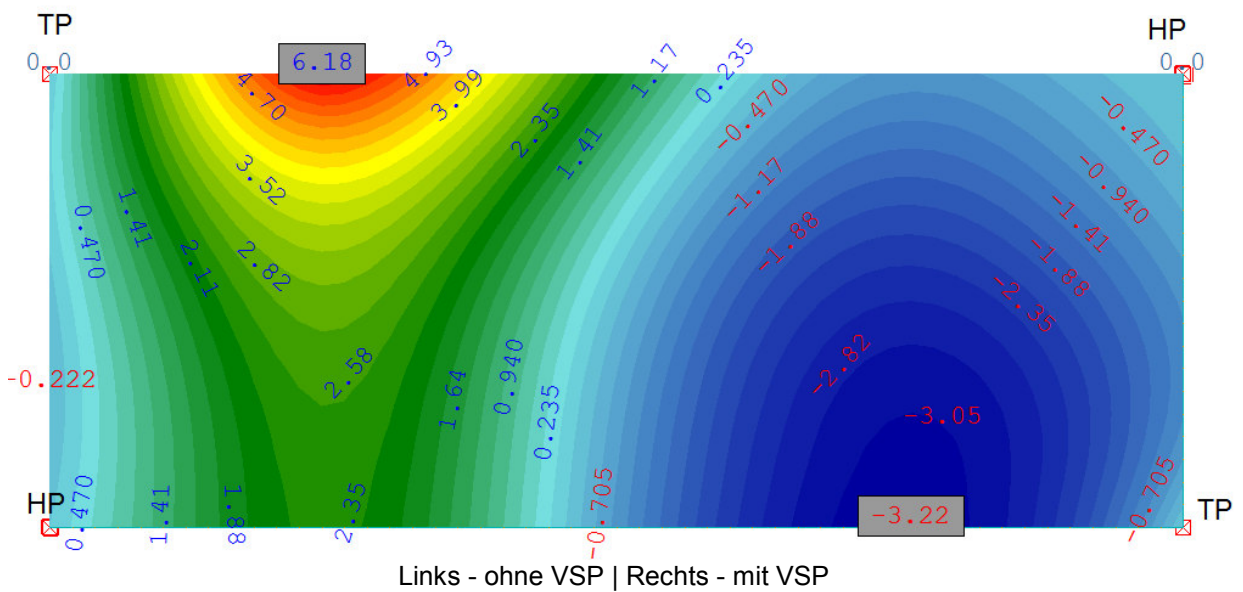


Abb. 62: Verformung in Z-Richtung [mm]

3.6 Parameterstudie zur Beschreibung des Tragverhaltens

Die zuvor gezeigten Modelle stellen rein fiktive Beispiele dar. Die Geometrien, die Lasten sowie die Vorspannung wird so gewählt, um den Einfluss der Vorspannung möglichst groß aufzuzeigen. Im nächsten Schritt werden die Modelle für mögliche Anwendungen kreiert. Mit diesen Modellen werden Parameterstudien durchgeführt, um das Tragverhalten besser darzustellen.

Betrachtet wird der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Als Grenze der Betonzugfestigkeit wird der 0,05 - Fraktilwert herangezogen. Dieser beträgt hier: $0,7 f_{ctk} = 0,7 \times 5 = 3,5 \text{ N/mm}^2$. Die Belastung entspricht der seltenen Lastfallkombination welche wie folgt aufgebaut ist:

$$E_{d,rare} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Bei den folgenden Beispielen bedeutet dies:

$$E_d = G_k + P_k + Q_k$$

mit: G_k - Eigengewicht
 P_k - Vorspannung
 Q_k - Haupteinwirkung

Die Berechnung erfolgt nach Theorie 3. Ordnung und materielle Nichtlinearitäten werden berücksichtigt. Als Grenzwert wird die max. zulässige Betonzugspannung von $3,5 \text{ N/mm}^2$ herangezogen.

Der Aufbau der Elemente erfolgt gleich wie die zuvor gezeigten Modelle, nur werden diese im Folgenden um 90° aufgestellt - wie Fassadenelemente.

Die Lagerung erfolgt auf vier Punkten, wobei jedoch der Abstand der Halterungen variiert werden kann. So kann die Traglast noch gesteigert oder die Verformung verringert werden.

3.6.1 Modell 100 x 100 cm

Betrachtet wird eine Platte mit den Abmessungen 100 x 100 cm. Die Berechnung der Verformung erfolgt nach der Theorie 3. Ordnung unter Berücksichtigung materieller Nichtlinearitäten.

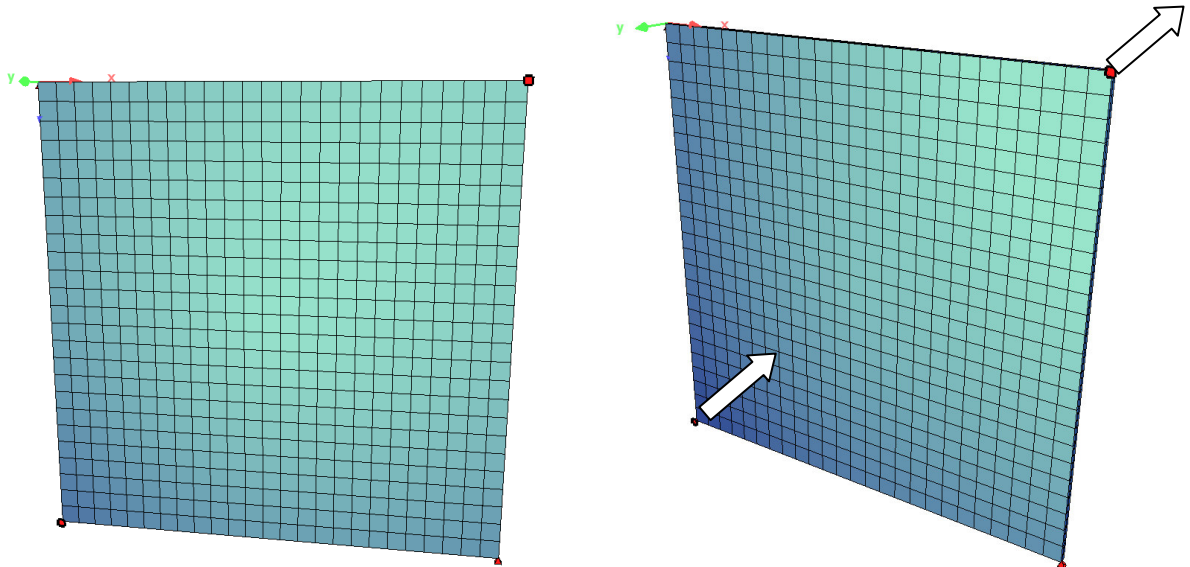


Abb. 63: Isometrische Ansicht Platte 100 x 100

Die weißen Pfeile stellen jene Eckpunkte dar, die verschoben werden um ein gekrümmtes Flächenelemente zu erzeugen.

In Abb. 64 wird das ebene Element mit den Abmessungen 100 x 100 cm mit einer Flächenlast, wirkt in der globalen Y-Richtung, belastet. Hierbei wird die Vorspannung variiert, wobei $V_1 - V_{35}$ der Vorspannung des Textils in kN/m entspricht.

Umrechnung Vorspannung Textil in Vorspannung Beton:

1 kN/m Vorspannung des Textils \rightarrow erzeugt 1 N/mm² Spannung im Textil

1 kN/m / 2 (zwei Betonschichten) = 0,5 kN/m Vorspannung die Betonschicht aufnehmen muss

0,5 N/mm / 8 mm (Betonschicht) = 0,0625 N/mm² gegengerichtete Spannung im Beton

Umrechnungsfaktor: 1/16

Eine Vorspannung von 1 - 35 kN/m im Textil erzeugt eine Druckspannung von 0,0625 - 2,188 N/mm² im Beton.

Zunächst wird das Diagramm gezeigt, welches die Verformung infolge einer ansteigenden Flächenlast zeigt, siehe Abb. 64.

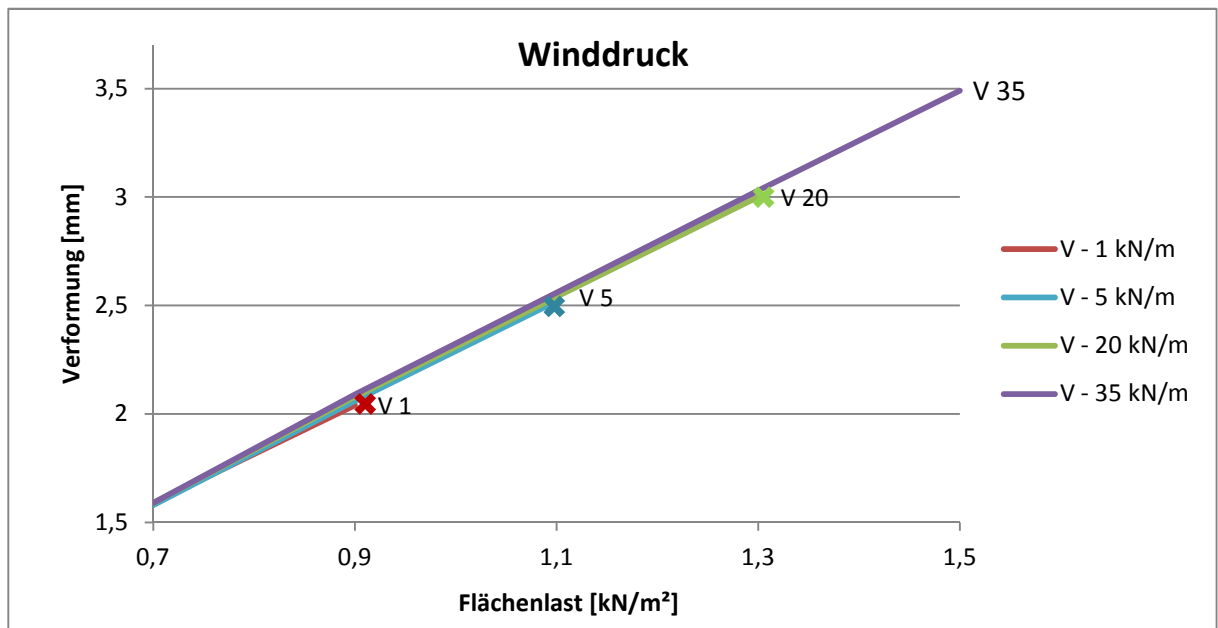


Abb. 64: Diagramm Verformung infolge ansteigenden Flächenlast 100 x 100 cm

Die Werte für die Vorspannung werden so gewählt, dass die nächst höhere Flächenlast abgetragen werden kann. In diesem Beispiel bedeutet das, dass mit einer Vorspannung von 1 kN/m im Textil, maximal 0,9 kN/m² als flächige Belastung abgetragen werden können, um den Grenzwert der zulässigen Betonzugspannung einzuhalten.

Wird eine Flächenlast von 1,1 kN/m² gefordert, so ist mindestens eine Vorspannung von 5 kN/m erforderlich. Für eine Flächenlast von 1,3 kN/m² werden mindestens 20 kN/m benötigt und bei einer Flächenlast von 1,5 kN/m² sind es mindestens 35 kN/m Vorspannung im Textil. Mit einer Zunahme von 0,2 kN/m² Flächenlast, steigt die Verformung um rund 0,5 mm an.

Es ist gut erkennbar, dass der Beton nicht reißt, da auch mit steigender Vorspannung die Verformung nicht verringert wird. Vielmehr ist die Vorspannung erforderlich, um größere Belastungen abtragen zu können. Der Grund hierfür liegt in der fehlenden Biegesteifigkeit der schlanken Platten: wie in 2.2.1 erläutert wurde, tragen ebene Flächentragwerk die Kräfte über Biegung ab. Da die Elemente sehr schlank sind, fehlt es ihnen an Biegesteifigkeit, die mittels Vorspannung "scheinbar" erhöht wird. Tatsächlich wird nicht die Biegesteifigkeit erhöht, sondern das Moment des Erstrisses hinausgezögert, da zunächst die Druckkraft im Beton - welche sich durch die Vorspannung aufgebaut hat - überwunden werden muss, bevor es zu einer Zugbeanspruchung im Beton kommt.

Die Abb. 66 zeigt die Verformungen infolge einer ansteigenden Einzellast, mit verschiedenen Vorspannungen, auf ein ebenes Element mit den Abmessungen 100 x 100 cm.

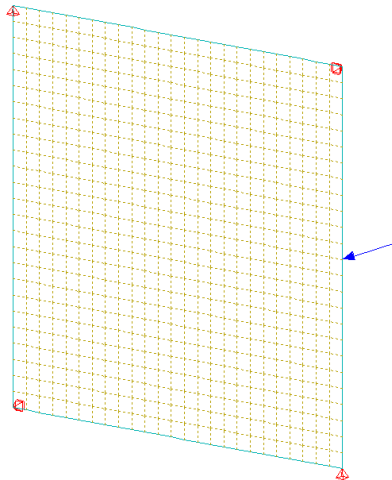


Abb. 65: Darstellung Angriffspunkt Einzellast

Die Einzellast wird auf einer Seitenkante angesetzt, was in Abb. 65 dargestellt wird. Die Werte der Vorspannung sind so gewählt, um die Einzellast mit 0,1 kN - Schritten ansteigen zu lassen.

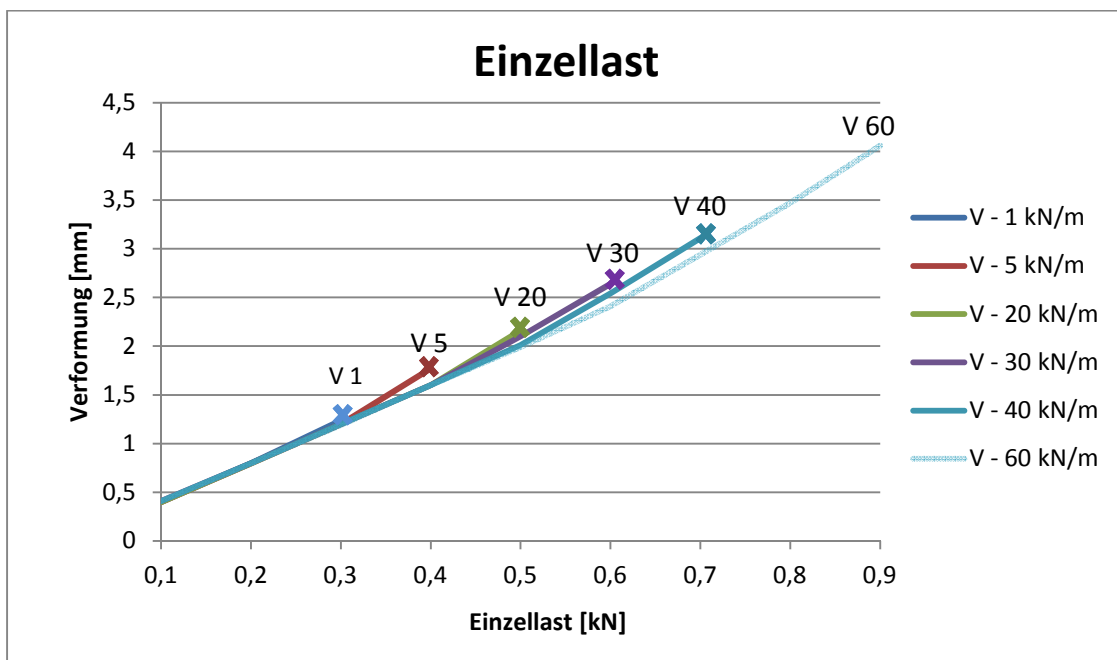


Abb. 66: Diagramm Verformung infolge ansteigender Einzellast 100 x 100 cm

Das Element kann mit einer Vorspannung von lediglich 1 kN/m eine Einzellast mit einer Größe von 0,3 kN abtragen. Sollte das Element jedoch größere Lasten abtragen können, so ist eine entsprechende Vorspannung nötig. Grund hierfür ist die auftretende Zugkraft im Beton infolge der Einzellast. Diese muss mittels der Vorspannung überdrückt werden. Die maximale Verformung bei einer Einzellast von 0,9 kN beträgt knapp 4 mm, was einer Durchbiegung von $L/250$ entspricht.

Wie zuvor erwähnt, tragen ebene Elemente die Kräfte über Biegung ab. Führt man das ebene Element nun in ein gekrümmtes über, so wird die Belastung auch über Normalkräfte abgetragen - siehe Kapitel 2.2.1. Hier werden zwei Eckpunkte in der globalen Y-Achse verschoben - siehe. Abb. 63. Dies erfolgt in 0,1 m - Schritten. Die Krümmung, welche sich einstellt, wird manuell angenähert. Diese Ermittlung kann dem Anhang entnommen werden.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Element mit zunehmender Krümmung, welches mit einer Flächenlast von 1,4 kN/m² belastet wird.

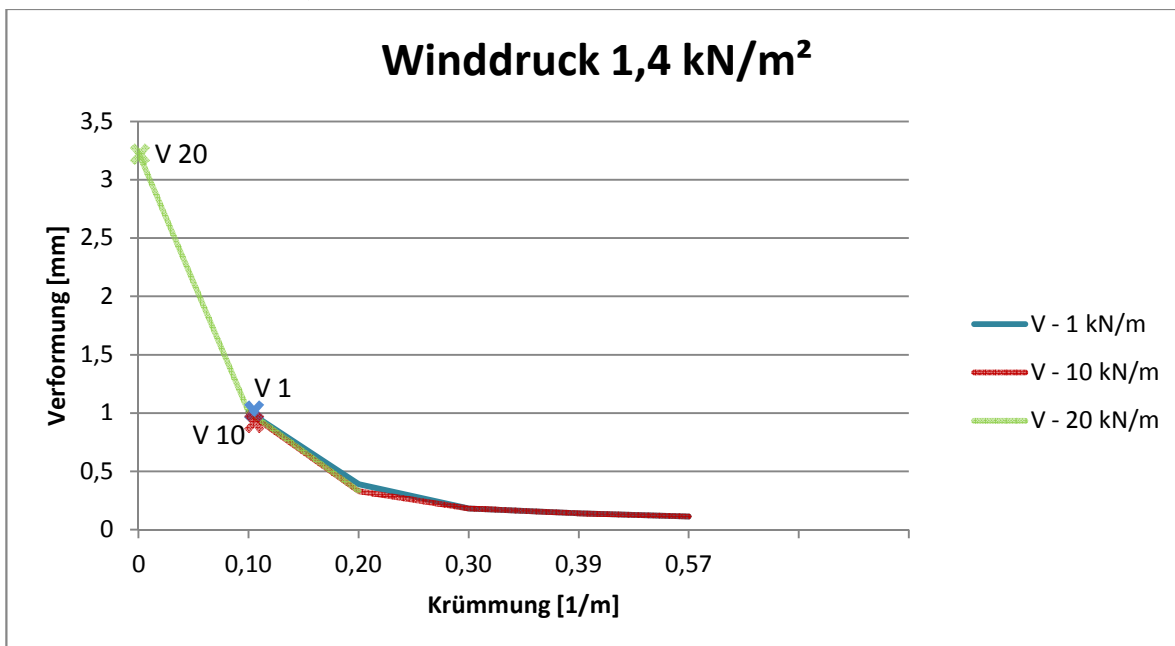


Abb. 67: Diagramm Verformung infolge Winddruck 100 x 100 cm

Bei der Belastung von 1,4 kN/m² werden mindestens 20 kN/m Vorspannung benötigt, um die Kräfte im ebenen Modell - Krümmung ist Null - abtragen zu können. Geringere Vorspannungen führen unter der gegebenen Belastung zu einer Überschreitung der zulässigen Spannungen. Verschiebt man zwei Eckpunkte um einen Wert von 0,1 m in der Y-Ebene, so stellt sich - genähert - eine Krümmung von ca. 0,2 [1/m] ein. Es erfolgt eine Verbesserung der Verformung um den Faktor 10 in diesem Beispiel. Zudem ist gut ersichtlich, dass ab diesem Punkt die Vorspannung für die Verformung, infolge einer flächige Belastung, unwesentlich ist.

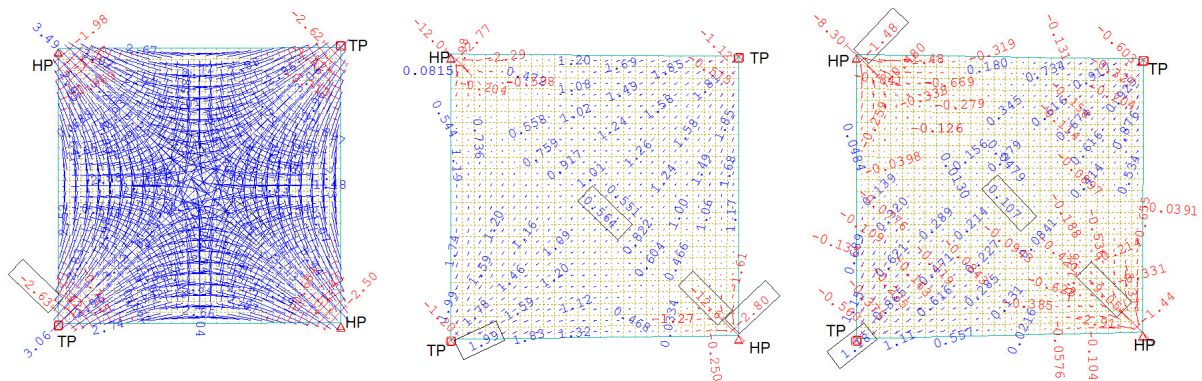
Im Rahmen dieser Studien zeigte sich, dass sich dieser Punkt bei einer Krümmung $k > 0,1$ [1/m] einstellt. Ab diesem Punkt bilden sich in den Diagonalen Druck- und Zugbögen aus. Wo ein ebenes Flächentragwerk die Kräfte rein über Biegung abträgt, tragen gekrümmte Flächentragwerke die Kräfte über Normalkräfte ab.

Da Membranen gekrümmte ausgeführt werden, tragen sie Lasten auch ausschließlich über Normalkräfte ab. Zwischen den HP stellen sich Zugbögen, und zwischen den TP Druckbögen ein. Wobei Membranen keinen Druck aufnehmen können, und sie insbesondere im Bereich des Druckbogens eine Vorspannung benötigen, um die Kraftabtragung zu gewähren.

Da es sich hier jedoch nicht um Membranen handelt, sondern die modellierten Elemente auch eine Biegesteifigkeit besitzen, entstehen keine reinen druck- bzw. zugbeanspruchten Bereiche. Das bedeutet, in Bereichen wo an der Unterseite Zugspannungen auftreten - blaue Zahlen - entstehen an der Oberseite Druckspannungen.

Um die Ausbildung von Druck- und Zugbögen zu veranschaulichen, ist das Modell 100 x 100 cm in Abb. 68 einmal mit Krümmung $k = 0$ [1/m], $k = 0,1$ [1/m] und $k = 0,2$ [1/m] dargestellt.

Das Bild auf der linken Seite stellt die Betonzugseite infolge einer flächigen Belastung dar. Da das ebene Flächentragwerk nur über Biegung abträgt, befinden sich hier auch nur Zugspannungen (blaue Zahlen). Mit zunehmender Krümmung ist gut ersichtlich, wie sich zwischen den TP Zugspannungen einstellen, und zwischen den HP Druckspannungen.



Links - $k = 0$ | Mitte - $k = 0,1$ | Rechts - $k = 0,2$

Abb. 68: Zugspannungen im Modell 100 x 100 cm an Betonzugseite [1/m]

Mit einer Krümmung sind die Zugspannungen bereits so verringert, dass eine Vorspannung nicht mehr erforderlich ist. Die Vorspannung ist erst wieder wichtig, wenn größere Traglasten abgetragen werden sollen, oder Einzellasten angreifen. Dies zeigt das nachfolgende Diagramm.

Nun wird die Verformung infolge einer Einzellast mit 0,9 kN bei zunehmender Krümmung, in Abb. 69 betrachtet.

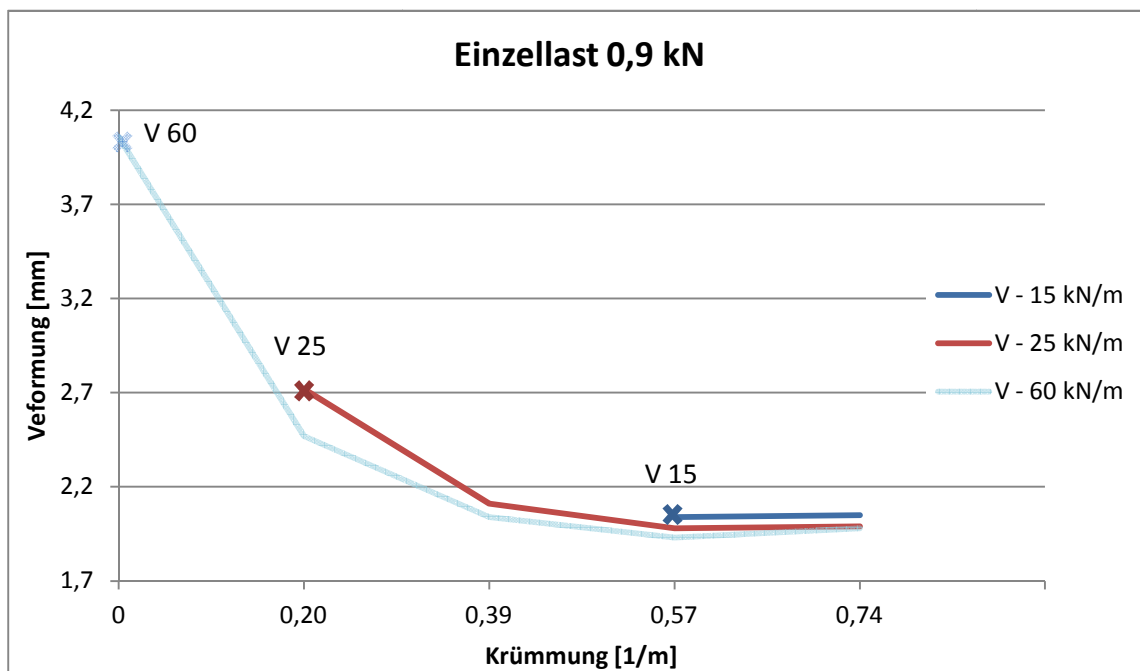


Abb. 69: Diagramm Verformung infolge Einzellast 100 x 100 cm

Je geringer die Krümmung ist, desto größer muss die Vorspannkraft sein, um die Zugspannungen, die im Beton auftreten, zu überdrücken. Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch: je größer die Krümmung ist, desto kleiner muss die Vorspannung sein.

Da der Beton nicht reißt, bzw. die Rissbreiten so klein sind, hat eine Vergrößerung der Vorspannung keinen Einfluss auf die Verformung, wird jedoch benötigt um den GZG und den GZT einzuhalten. .

So ist eine Vorspannung von mindestens 25 kN/m erforderlich, wenn die Krümmung einen Wert von 0,2 [1/m] besitzt. Beziehungsweise muss bei einer Krümmung von 0,57 [1/m] die Vorspannung nur mehr 15 kN/m sein.

Die Verformung nimmt mit einer Krümmung von 0,2 [1/m] um einen Faktor von 1,6 ab. Dies führt zu einer Durchbiegung von L/400.

3.6.2 Modell 100 x 200 cm

Das nachfolgende Modell besitzt die Abmessungen 100 x 200 cm. Die Lagerung erfolgt, wie zuvor, auf vier Punkten. Hier stellen sich bereits große Spannweiten ein. Es besteht natürlich die Möglichkeit, zusätzliche Halterungen zu verwenden. Auf dies wird in dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen.

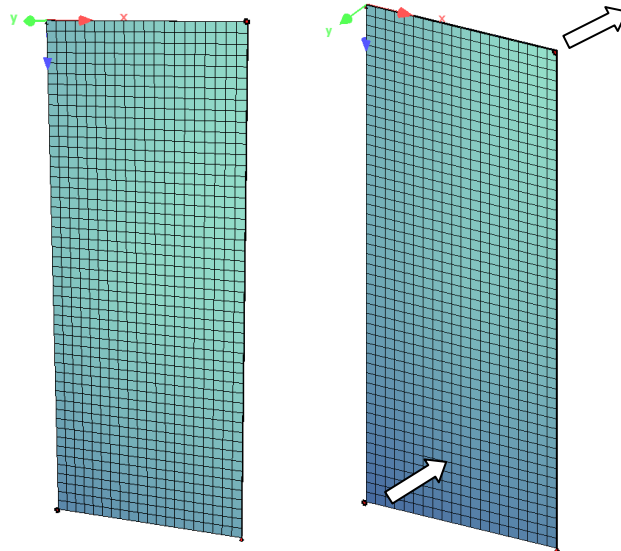


Abb. 70: Isometrie Element 100 x 200 cm

Das erste Diagramm zeigt die Verformung infolge einer flächigen Belastung und zunehmender Krümmung, siehe Abb. 71.

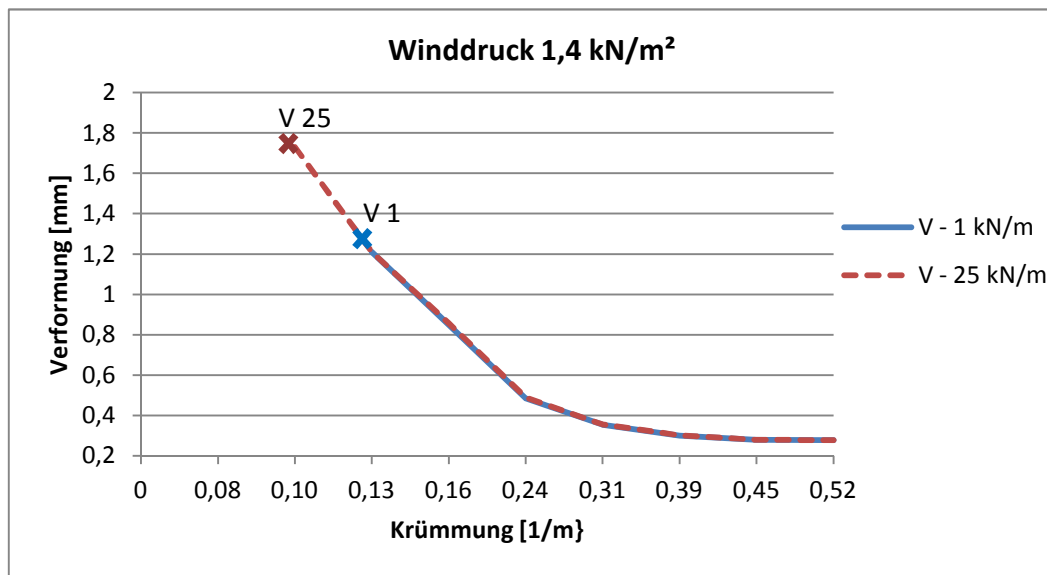


Abb. 71: Diagramm Verformung infolge Winddruck 100 x 200 cm

Betrachtet wird zunächst der Bereich, wo die Krümmung einen Wert zwischen $k = 0 - 0,16$ [1/m] beträgt. Besitzt das Element eine Krümmung von Null, so handelt es sich um ein ebenes Element. In diesem Bereich ist das System nicht fähig die Lasten abzutragen und es kommt zu einem Versagen. Dies liegt an der großen Biegung, welche sich infolge der

Belastung einstellt. Dieses System ist sehr unwirtschaftlich und würde so nie in der Realität vorkommen. Ganz anders sieht es aus, wenn zusätzliche Halterungen angebracht werden. Hierbei werden die Spannweiten stark verringert und das System ist wieder tragfähig. Die Abmessungen zwischen den Halterungen können auch mittels der Vorspannung beeinflusst werden. So sind größere Vorspannungen nötig, wenn die Spannweiten größer sind, oder kleinere Vorspannungen bei kleineren Spannweiten. Auf eine Abbildung wird verzichtet, jedoch wird auf das ebene Modell in 3.2 verwiesen: hier ist mit einer Vorspannung von 35 kN/m eine Spannweite von 100 cm in der Ebene möglich.

Das Diagramm zeigt auf, dass ab einer Krümmung $k > 0,1$ [1/m] die Vorspannung keinen Einfluss auf die Verformung besitzt, da der Querschnitt nicht reißt. Das ist auch der Grund, weshalb in der Legende drei verschiedene Vorspannungen dargestellt werden, im Diagramm jedoch nur eine Linie zu erkennen ist.

Die Krümmung von 0,16 [1/m] entspricht einer gedanklichen Verschiebung von 0,2 m in der Y - Ebene, siehe Abb. 72.

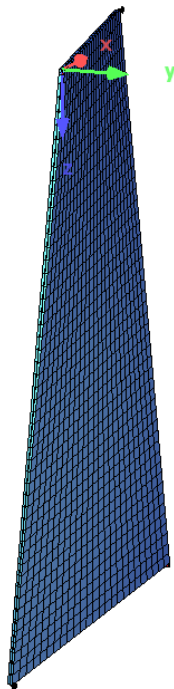


Abb. 72: Isometrie gekrümmtes Element 100 x 200 cm

Das Diagramm in Abb. 74 zeigt die Verformungen, infolge einer Einzellast mit 0,9 kN und ansteigender Krümmung. Der Angriffspunkt der Einzellast wird in Abb. 73 dargestellt.

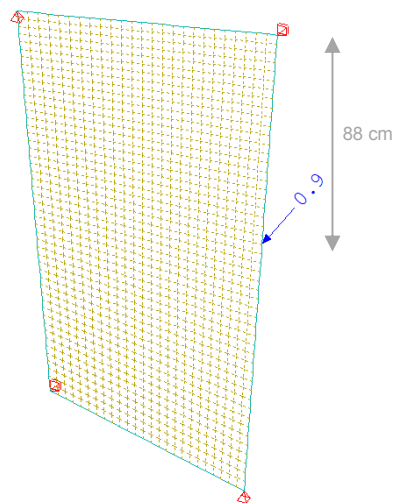


Abb. 73: Angriffspunkt der Einzellast 100 x 200 cm

Wie bei dem zuvor gezeigten Modell, wird auch hier ersichtlich, dass mit der Krümmung die erforderliche Vorspannung abnimmt um der gegebenen Einzellast stand zu halten.

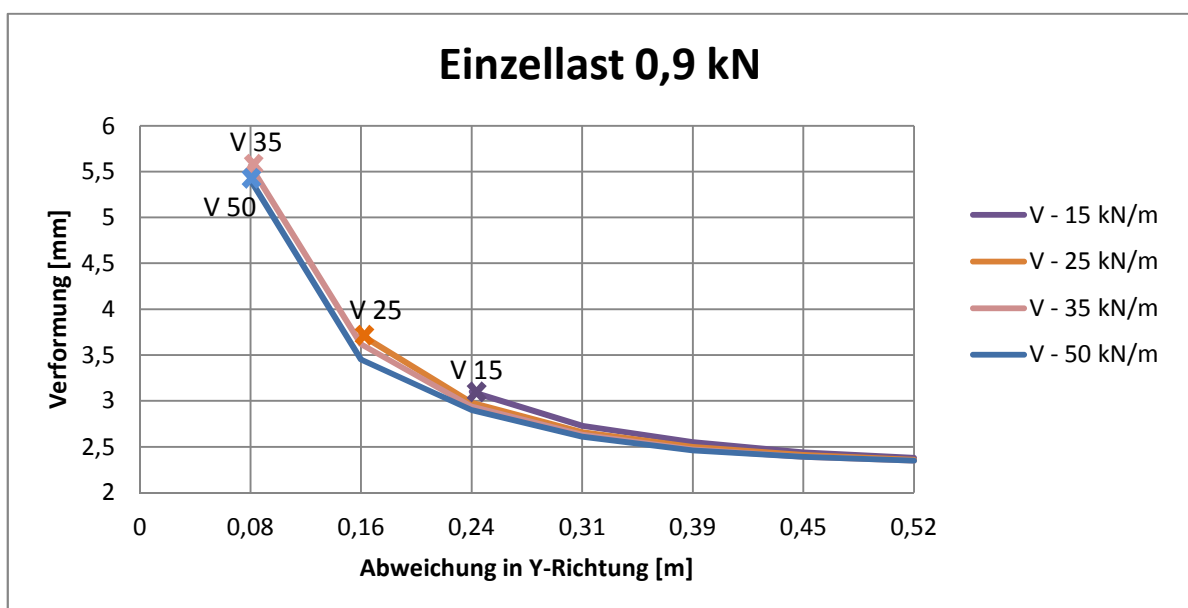


Abb. 74: Diagramm Verformung infolge Einzellast 100 x 200 cm

Ein ebenes Element ist nicht in der Lage diese Einzellast abzutragen. Wie auch bei einer flächigen Belastung, sind die Spannweiten zu groß und es müssen zusätzliche Halterungen eingeführt werden.

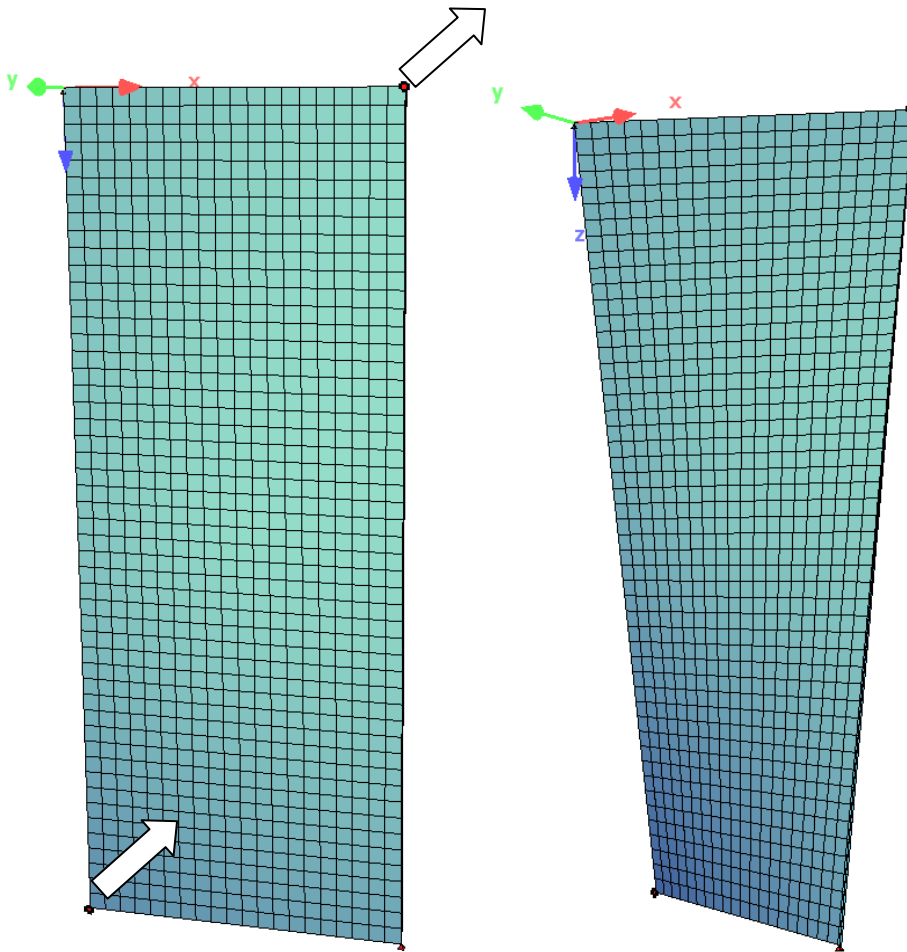
Wird das Element jedoch gekrümmt ausgeführt, so weist es ein besseres Tragverhalten auf. Dies kann an der Abnahme der Verformung abgelesen werden.

Bei einer Krümmung von 0,16 [1/m] ist mindestens eine Vorspannung von 25 kN/m erforderlich um den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit einzuhalten. Die sich einstellende Verformung beträgt ca. 3,7 mm und entspricht einer Durchbiegung von $L/540$.

3.6.3 Modell 120 x 300 cm

Das letzte Modell besitzt die Abmessungen 120 x 300 cm. Dies entspricht einem konventionellen Maß für Fassadenelemente. Die Lagerung erfolgt auch hier nur auf vier Punkten.

Die weißen Pfeile stellen jene Eckpunkte dar, welche verschoben werden um das ebene Modell in ein gekrümmtes überzuführen.



Mit diesem Modell wird auch ein mögliches Anwendungsbeispiel in Kapitel 4 dargestellt.

Das nachfolgende Diagramm, Abb. 75, zeigt die Verformungen infolge einer flächigen Belastung mit $1,4 \text{ kN/m}^2$ und zunehmender Krümmung.

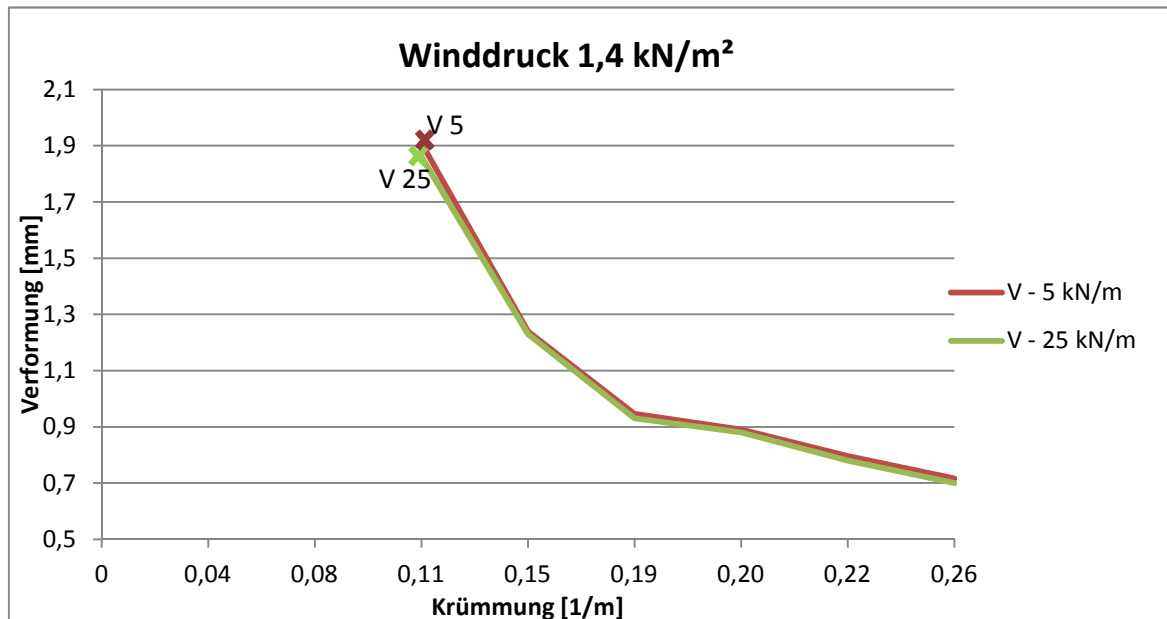


Abb. 75: Diagramm Verformung infolge Winddruck 120 x 300 cm

Im Bereich der Krümmung von $0 - 0,11 \text{ [1/m]}$ ist das Element zu instabil und daher nicht tragfähig. Mit zusätzlichen Halterungen werden die Spannweiten verringert und höhere Lasten können abgetragen werden.

Überschreitet die Krümmung den Wert $0,11 \text{ [1/m]}$ so ist das System bereits mit einer Vorspannung von 5 kN/m , im Textil, tragfähig. Auch mit zunehmender Vorspannung wird die Verformung nicht mehr nennenswert verbessert. Hingegen ist die Krümmungszunahme verantwortlich für eine Halbierung der Verformung im Bereich von $k = 0,11 - 0,19 \text{ [1/m]}$. Aufgrund der Tatsache, dass auch weitere Reihen immer übereinander liegen würden, sind für eine Übersichtlichkeit lediglich zwei Reihen aufgeführt.

Betrachtet man den Bereich wo die Krümmung einen Wert von $0,11 \text{ [1/m]}$ besitzt, so stellt sich dort eine Verformung von ca. $1,9 \text{ mm}$ ein. Bezogen auf die Seitenlänge entspricht dies einer Durchbiegung von $L/1578$.

Nun wird in Abb. 76 die Verformungen infolge einer Einzellast mit zunehmender Krümmung gezeigt.

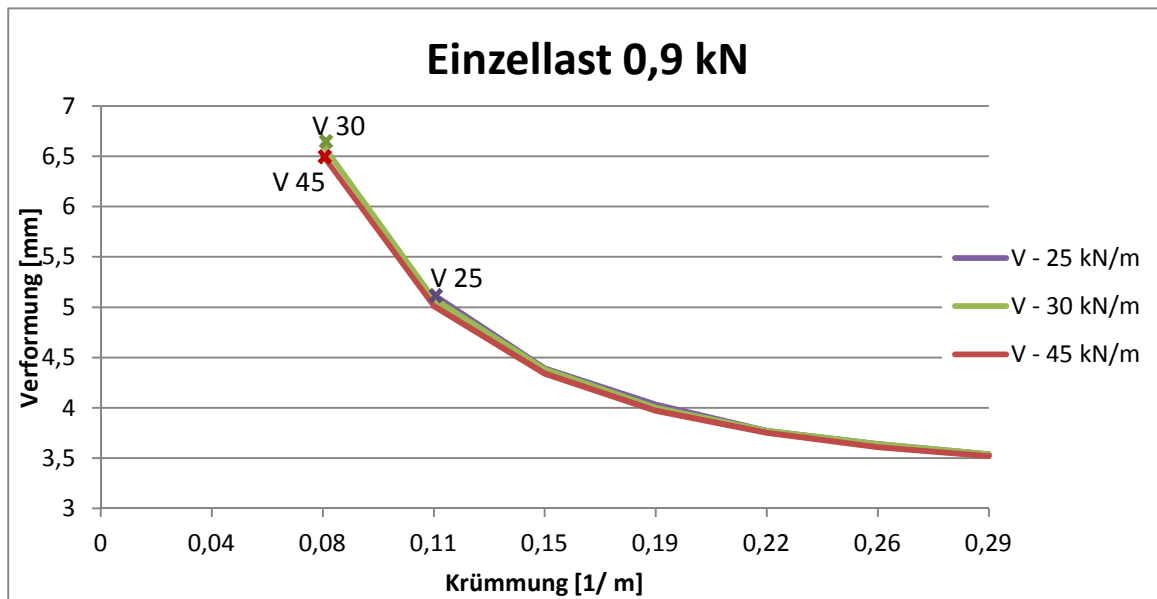


Abb. 76: Diagramm Verformung infolge Einzellast 120 x 300

Aufgrund der großen Spannweiten zwischen den Halterungen, ist das Element ohne Vorspannung und ohne Krümmung nicht ausreichend tragfähig. Auch hier können, wie bei der flächigen Belastung, zusätzliche Halterungen eingebracht werden.

Ist es jedoch möglich, die Elemente von einer ebenen Struktur in eine gekrümmte über zu führen, so können mittels Vorspannung sehr stabile Elemente geschaffen werden.

Mit einer Vorspannung von 25 kN/m ist das Element bei einer Krümmung von 0,11 [1/m] bereits stabil genug, um die Kräfte der einwirkenden Einzellast abzutragen.

Es ist ersichtlich, dass auch eine Vergrößerung der Vorspannung zu keiner Verringerung der Verformung führt. Was zeigt, dass der Beton unter der gegebenen Belastung nicht reißt. Jedoch ist eine gewisse Vorspannung nötig, um den GZT einzuhalten. So ist bei einer Krümmung von 0,08 [1/m], die kleinste erforderliche Vorspannung mindestens 30 kN/m.

Im Bereich von 0,08 bis 0,11 [1/m] nimmt die Verformung um 1,5 mm ab, was einer Verbesserung um den Faktor 1,3 entspricht. Mit zunehmender Krümmung nimmt auch der Faktor, welcher die Verkleinerung der Verformung beschreibt, ab. Zum Beispiel beträgt dieser Faktor im Krümmungsbereich von 0,11 bis 0,15 nur mehr 1,16 - entspricht 0,72 mm.

4 Mögliche Anwendungen und Einsatzgebiete

Das folgende Kapitel stellt mögliche Anwendungen, die Herstellung und ein konkretes Anwendungsbeispiel vor.

4.1 Formen

Alle Modelle, welche in dieser Arbeit aufgezeigt werden, sind antiklastisch gekrümmt oder eben. Der Grund hierfür liegt in der Modellierung und der Vorstellung, dass es im Rahmen von Versuchen leichter ist, ein Textil mechanisch vorzuspannen als pneumatisch.

Jedoch können auch synklastisch - gekrümmte Elemente so vorgespannt werden. Unter diesem Ansatz, die textile Bewehrung als Membran und zugleich Vorspannelement zu nutzen, sind alle Formen möglich.

4.2 Herstellung

Bei der mechanischen Vorspannung erfolgt das Aufspannen des Textils an den definierten Randpunkten. Das Textil muss um den Wert der Dehnung infolge der Vorspannung verkleinert werden - Zuschnitt -, um beim Aufspannen die gewünschte Vorspannung zu besitzen. Zwischen den Randpunkten können die Ränder gekrümmt oder gerade ausgeführt werden, siehe Abb. 77.

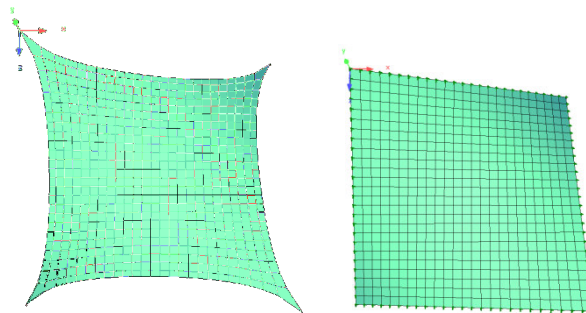


Abb. 77: Ränderausbildung bei Membrane

Bei zusätzlicher Halterung der Ränder könnte ein ähnlicher Rahmen verwendet werden, wie er beim ebenen Spannbettverfahren verwendet wird. Dieser muss sich jedoch an den Eckpunkten vertikal verschieben lassen um sich der Form anzupassen.

Für die Herstellung von synklastisch gekrümmten Elementen, muss die Vorspannung mittels pneumatischer Unterstützung eingebracht werden. Sobek [18] erwähnt Wallace Neff als erste Person, die versuchte Betonschalen mittels pneumatisch gestützter Schalungen herzustellen. Neff meldete im Jahre 1942 ein Patent für seine Herstellung an: als Schalung wird eine neoprenbeschichtete Membran verwendet, die mittels eines Stützmediums stabilisiert wird. In der deutschen Patentschrift [19] wird aufgeführt, dass des weiteren die Möglichkeit besteht, die Bewehrung -Stabstahl oder Betonstahlmatten- mit Hilfe der Schalungsmembran vorzuspannen. So kann die Schale weiter stabilisiert werden.

4.3 Anwendungsbereiche

Die textile Bewehrung als Vorspannelement von gekrümmten Elementen zu verwenden, ermöglicht eine nahezu grenzenlose Freiheit in der Formgebung.

In der Vorstellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ist der primäre Anwendungsbereich die als Fassadenbekleidung. Wünsche in der Gestaltung und Formgebung können so realisiert werden.

Neben dem Gereicht werden optischer Ansprüche, sind diese Element äußerst tragfähig, robust und können, je nach Erfordernis, angepasst werden. Je nach Traglast kann mit der Krümmung die Vorspannung variiert werden, beziehungsweise die Dicke der Betonschichten erhöht oder auch verkleinert werden.

Es sind auch andere Anwendungen denkbar, wie z.B.: Unterstellplätze, Überdachungen für Fahrradabstellflächen, Messestände etc..

Das nachfolgende Anwendungsbeispiel basiert auf dem dritten Modell der Parameterstudie

Anwendungsbeispiel Fassadenelement

Das nachfolgende Beispiel eines Fassadenelements ist gleich aufgebaut wie die zuvor gezeigten Beispiele: zwei Betonschichten zu je 8 mm, mit einer textilen Einlage von 1 mm, welche mit 15 kN/m vorgespannt ist.

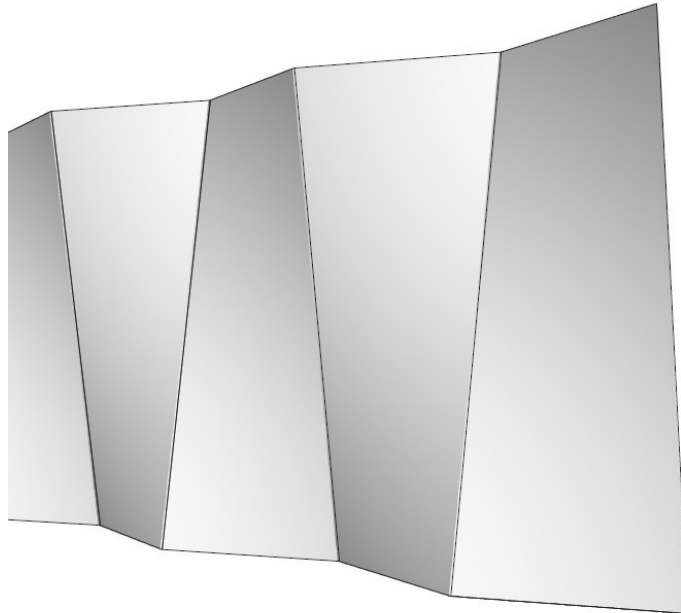


Abb. 78: Visualisierung Fassadenelemente

Die Abmessungen des Elements betragen $1,2 \times 3 \times 0,5$ m und entsprechen damit herkömmliche Fassadenelemente. Die Verschiebung zweier Eckpunkte in der globalen Y-Achse um einen Wert von 0,5 m führt zu einer Krümmung von $0,19$ [1/m].

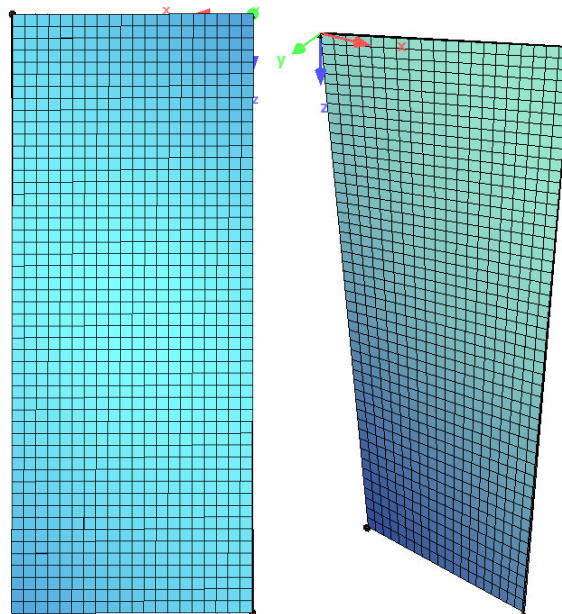


Abb. 79: Isometrische Ansicht Fassadenelement

Belastungen

Eigengewicht : $g_k = 25 \text{ kN/m}^3 = 0,2 \text{ kN/m}^2$ pro Betonschicht (8 mm jeweils)

Nutzlast exzentrisch : $P = 0,7 \text{ kN}$

Nutzlast flächig : $q_{y,k} = 1,4 \text{ kN/m}^2$

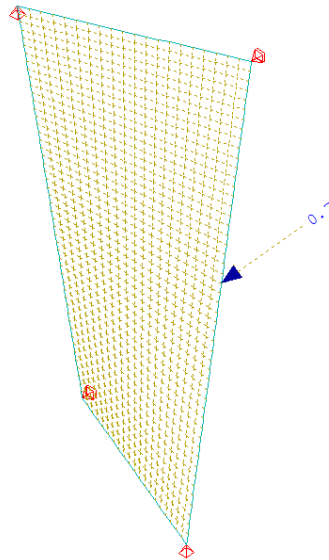


Abb. 80: Darstellung Angriffspunkt exzentrisch angreifende Last

Spannungen

Es werden der Grenzzustand der Tragfähigkeit - GZT - und der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit - GZG - betrachtet.

In Abb. 81 werden die Hauptspannungen im Beton infolge der Lastfallkombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit aufgezeigt. Die Berechnung erfolgt nach Theorie 3. Ordnung und unter Berücksichtigung materieller Nichtlinearitäten.

Wie in Kapitel 3.6.3 erläutert wurde, wird für eine Flächenlast von $1,4 \text{ kN/m}^2$ bei einer Krümmung von $0,19$ mindestens eine Vorspannung von 1 kN/m im Textil benötigt, um den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit einzuhalten. Da jedoch eine Einzellast aufgebracht wird, wird die Vorspannung mit 15 kN/m angesetzt.

Mögliche Anwendungen und Einsatzgebiete

Für die Ermittlung der Verformung wird der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit betrachtet. Die Berechnung erfolgt nach der Theorie 3. Ordnung und es werden materielle Nichtlinearitäten berücksichtigt. Bei der Betrachtung im GZG darf für die Betonzugfestigkeit ein Wert angesetzt werden, der 70% der Betonzugfestigkeit - $0,7 \times f_{ctk}$ - entspricht. In diesem Fall beträgt dieser Wert $3,5 \text{ N/mm}^2$.

Die Verformung infolge einer Einzellast beträgt nach dieser Berechnung 3 mm. Bezogen auf die Seitenlänge des Elements beträgt die Durchbiegung $L/1000$.

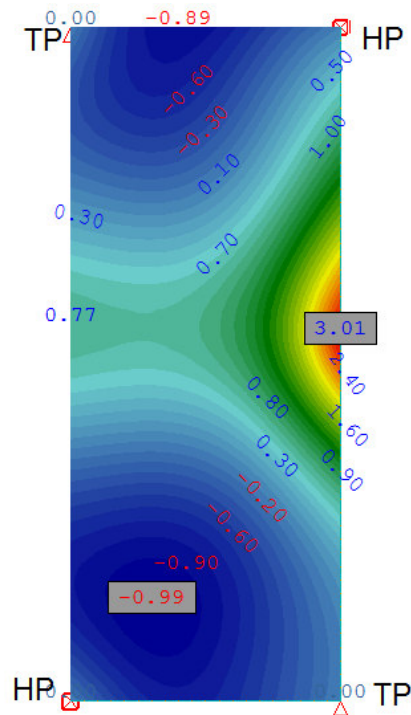


Abb. 83: Verformung infolge Einzellast - GZG [mm]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das folgende Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung, eine Bewertung sowie die Schlussfolgerungen die aus der Arbeit gezogen werden können als auch ein Ausblick.

5.1 Zusammenfassung

In Kapitel 2 werden sowohl das Tragverhalten und die Eigenschaften von textilbewehrtem Beton, als auch von Membrankonstruktionen beschrieben. Die Vorstellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ist die Kombination beider Themen.

Als textile Bewehrung werden Gewebe oder Gelege verwendet, welche von der Zementmatrix durchtränkt werden, wobei ein starrer Verbund zwischen Beton und Textil entsteht. Diese textile Bewehrung lässt sich in der Ebene leicht - verglichen zu einer Krümmung - vorspannen. Um auch gekrümmte Betonelemente vorzuspannen entstand die Idee, die textile Bewehrung auch als Vorspannelement zu verwenden. Die textile Bewehrung wird wie eine Membran behandelt. Membrane besitzen die Eigenschaften, aufgrund ihrer Form bereits über eine Vorspannung zu verfügen. Nach dem Aufbringen des Betons und einer Aushärtezeit, können die Halterungen der Membran gelöst werden. Diese will sich wieder zusammenziehen, wird jedoch vom Beton daran gehindert, und übt so einen Druck auf diesen aus. So wird der Beton vorgespannt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen, werden mittels dem Programm SOFISTIK, Finiten-Elemente-Modelle erstellt. Diese werden in Kapitel 3 dargestellt. Für die Modellierung werden Annahmen und Voraussetzungen getroffen. Diese werden nachfolgend nochmals aufgeführt:

- starrer Verbund über die gesamte Platte
- kein Schlupf infolge des Ablassens der Vorspannung
- kein Schlupf innerhalb des Rovings → homogener Querschnitt
- Kriechen wird nicht berücksichtigt.

Die Arten der Ermittlung von Schnittgrößen und Verformungen von Bauteilen werden ebenfalls in Kapitel 3 erklärt. Zudem werden die zwei Grenzzustände erläutert, die bei den Modellen betrachtet werden.

Die Berechnung für die verschiedenen Lastfälle erfolgen linear oder nach der Theorie 3. Ordnung. Eine lineare Berechnung bedeutet, es werden keine Verformungen für die Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen berücksichtigt und lineare Materialgesetze werden verwendet.

Eine Berechnung nach Theorie 3. Ordnung bedeutet, dass die Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen am verformten System stattfinden und Exzentrizitäten berücksichtigt werden. Zudem werden hier materielle Nichtlinearitäten berücksichtigt.

Für die Bemessung von Betonbauteilen wird die Betonzugfestigkeit auf Null gesetzt, da die Bemessung darauf abzielt, dass die Bewehrung die gesamte Zugkraft aufnimmt und der Beton die gesamte Druckkraft. Um jedoch die Zugspannungen im System aufzuzeigen, wird in einigen Beispielen die Betonzugfestigkeit nicht auf Null gesetzt. Dies ist ersichtlich, wenn Zugspannungen zu sehen sind (blaue Zahlen).

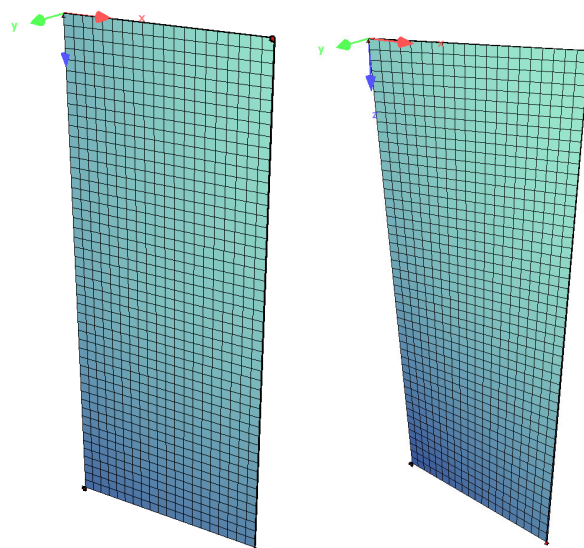
Im Kapitel 5 wird eine Parameterstudie mit drei verschiedenen Modellen durchgeführt. Anhand der Diagramme kann die Tragwirkung und der Einfluss der verschiedenen Parameter besser aufgezeigt werden.

Aufbauend auf dem letzten Modell in Kapitel 3, wird ein Anwendungsbeispiel in Kapitel 4 aufgezeigt. Dieses Kapitel enthält zudem mögliche Einsatzgebiete und Ideen zum Herstellungsprozess.

Mit den erarbeiteten Erkenntnissen können Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick aufgezeigt werden.

Bewertung

Die Verwendung der textilen Bewehrung auch als Vorspannelement zu nutzen, ist grundsätzlich nicht neu. Die textile Bewehrung jedoch als Vorspannelement für gekrümmte Elemente zu nutzen, schon. Anhand der Finite-Element-Modelle kann aufgezeigt werden, dass die Vorspannung durchaus sinnvoll ist und so neue Wege mit dünnwandigen Betonelementen ermöglicht werden.



Links - $k = 0$ [1/m] | Rechts - $k = 0,1$ [1/m]

Abb. 84: Darstellung Krümmung Modell 120 x 300 cm

Ist die Krümmung des Elements $k = 0 - 0,1$ [1/m], so sind große Vorspannkräfte erforderlich, da die Kraftabtragung größtenteils über Biegung erfolgt und dies zu großen Biegespannungen und Verformungen führt - graphische Darstellung siehe Abb. 84. Dazu kommt, dass bei einer geforderten Vorspannung im Beton, die d -fache Vorspannkraft im Textil vorhanden sein muss.

Der Faktor d ergibt sich aus der Betondicke. Das bedeutet, bezogen auf ein Verhältnis Textil/Betondicke = $1/d$: die Vorspannung des Textils muss das d -fache der geforderten Vorspannung im Beton betragen. Bei den hier gezeigten Modellen (Textil/Betondicke = $1/16$) würde eine geforderte Vorspannung von 1 N/mm^2 im Beton, eine Vorspannung von 16 N/mm^2 im Textil bedeuten, wobei es sich um ideale Vorspannungen handelt, da Schlupfeffekte nicht berücksichtigt werden.

Übersteigt die Krümmung jedoch den Wert von $0,1$ [1/m], so zeigt sich in den Diagrammen in Kapitel 3, dass die Größe der Vorspannung keinen Einfluss mehr auf die Verformung besitzt.

Das Modell mit den Abmessungen $100 \times 100 \text{ cm}$ zeigt auf, dass die Verformung um den Faktor 10 verringert werden kann, wenn die Krümmung von 0 [1/m] auf $0,1$ [1/m] geändert wird. Allerdings wirkt in diesem System auch eine Vorspannung, da das eben System nicht ausreichend tragfähig ist.

Mit einer Krümmung verringert sich die erforderliche Vorspannkraft: als ebenes Modell - $100 \times 100 \text{ cm}$ - ist eine Mindestvorspannkraft von 20 kN/m im Textil erforderlich, hingegen nur mehr 1 kN/m wenn eine Krümmung von $0,2$ [1/m] vorhanden ist.

Zudem können die Abmessungen zwischen den Halterungen mit zunehmender Krümmung vergrößert werden: unter einer Flächenlast von $1,4 \text{ kN/m}^2$ benötigt ein Element mit den Abmessungen $100 \times 200 \text{ cm}$ zusätzliche Halterungen entlang der langen Seite. Diese können entfallen, wenn das System mit einer Krümmung ausgeführt wird.

Kommt es zu Beanspruchungen infolge einer exzentrisch wirkenden Einzellast, so wird eine Vorspannung sehr wichtig. Hier kommt es zu punktuellen Zugspannungsspitzen welche mittels der Vorspannung ausgeglichen werden müssen, um die Grenzzustände einzuhalten. Betrachtet man das ebene Modell mit $100 \times 200 \text{ cm}$, so kann mit Zunahme der Krümmung um einen Wert von $0,08$ [1/m] - im Anfangsbereich - die erforderliche Vorspannung um mindestens 10 kN/m reduziert werden.

Maßgebend für die Größe der Vorspannung ist, neben der Geometrie, auch die Krümmung des Elements und das Belastungsniveau unter welchem die Grenzzustände eingehalten werden müssen.

Schlussfolgerung

In Kapitel 4.2 wird beschrieben, dass es mit der textilen Bewehrung möglich ist, alle gängigen Schalenformen vorzuspannen. So kann die Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit von dünnwandige, gekrümmte Betonelemente verbessert werden.

Aufgrund der vielen Faktoren die Einfluss auf die Tragfähigkeit und Verformung haben, lässt sich keine allgemein gültige Aussage über die Größe des Einflusses der Vorspannung tätigen.

Hingegen kann gesagt werden, dass eine Krümmung mit $k > 0,1$ [1/m] ausreicht um die erforderliche Vorspannkraft stark zu verringern. Als Beispiel: Vergleich der Verformungen eines ebenen Modells 100 x 100 cm unter flächiger Belastung und dem gleichem Modell mit einer Krümmung von 0,1 [1/m]. Der Faktor der Verformungsverkleinerung beträgt 3,25 ohne Vorspannung unter einer Flächenlast, bzw. 1,34 bei Einzellasten. Unter einer größeren Belastung, mit zusätzlicher Vorspannung, ist ein Faktor von 10 auch möglich.

Es hat sich gezeigt, dass Elemente die größer sind als 100 x 100 cm, eine Vorspannung benötigen, falls keine zusätzlichen Halterungen angebracht werden. Die Querschnitte verfügen nur über eine geringe Biegesteifigkeit und hinzukommen große Verformungen infolge von Einzellasten.

Mit einer entsprechenden Anpassung von Krümmung und/oder Vorspannung bezogen auf die tatsächlich wirkenden Lasten, lassen sich Elemente erzeugen, die keine großen Verformungen aufweisen und zudem "relativ frei" in ihrer Formgebung sind.

Jedoch kommen mit dieser Idee auch Fragen auf, um nur einige zu nennen.

Wie ist das tatsächliche Verhalten des vorgespannten, textilbewehrten Elements im GZT?

In Kapitel 2.1.4 wird das Spannungs-Dehnungsverhalten von Textilbeton beschrieben. Dieses Spannungs-Dehnungsverhalten konnte in der Modellierung nicht abgebildet werden, und es wird mit Beton und Textil als Schichtmodell gearbeitet. Zudem wird ein starrer Verbund zwischen allen Schichten angenommen, wodurch Schlupfeffekte vernachlässigt werden.

Welches ist das geeignetste Material für die textile Bewehrung um den Beton vorzuspannen?

Die Wahl des zu verwendeten Textils ist eine der wichtigsten Fragen. Wie KRÜGER [4] bereits bei der Vorspannung von ebenen Systemen festgestellt hat, gibt es eine Vielzahl an Anforderungen an die textilen Bewehrung. Der innere Verbund ist von besonderer Bedeutung und beeinflusst die Tragfähigkeit, die Rissbreiten, sowie eine gleichmäßige Ausnutzung des Rovingquerschnitts. Zudem spielt die Durchtränkung des Textils von der Betonmatrix eine große Rolle. Durch die Vorspannung werden die Filamente jedoch zusätzlich gebündelt und das Eindringen von Zementleim wird erschwert. Um die

Vorspannung vom Textil in den Beton übertragen zu können, wird auch ein großer, äußerer Verbund gefordert. Eine raue Oberfläche verbessert den äußeren Verbund. Dies wird mit Harzprägungen oder speziellen Oberflächenbehandlungen erreicht [4].

Wie groß wird das Textil vorgespannt?

Für eine textile Bewehrung aus z.B: AR-Glasfaser wird empfohlen bis max. 30% ihrer Zugfestigkeit vorzuspannen [4]. Hingegen liegt die Vorspannung bei Membrankonstruktionen im Bereich von 1,5% - 6 % der Kurzzeitfestigkeit [8].

Der Grund für diesen großen Unterschied der Vorspanngröße liegt in der Form des Tragwerks: die hier aufgeführten 30 % der Zugfestigkeit bei textiler Bewehrung bezieht sich auf ebene Flächentragwerke, wobei die Kraftabtragung primär über Biegung und große Verformungen erfolgt. Hingegen werden Membrankonstruktionen immer gekrümmt ausgeführt, siehe Kapitel 2.2. Je größer die Krümmung des Elements ist, desto kleiner ist die erforderliche Vorspannung.

Die Tragwirkung von gekrümmten und vorgespannten Textilbeton ist sehr gut. So können dünnwandige Elemente entwickelt werden, die Dank Vorspannung geringere Verformungen aufweisen und größere Abstände zwischen den Halterungen überwinden können. Dies ist insbesondere wichtig, wenn die Form aus der ebenen Situation abweicht. Hier ist es unter Umständen nicht möglich zusätzliche Halterungen innerhalb des Elements umzusetzen. Mit zunehmender Krümmung können Vorspannungen verringert werden, wobei es irrelevant ist ob die Krümmung synklastisch oder antiklastisch geformt ist. Hingegen gilt: je geringer die Krümmung wird, desto wichtiger wird wieder die Vorspannung da die Lastabtragung immer mehr einem ebene Modell gleicht.

5.2 Ausblick

Die Anwendung von textilvorgespannten, dünnwandigen Betonelementen ist vielfältig. Die Tragfähigkeit lässt sich durch die Form, die Betongüte, die Elementdicke, das Textil und die Vorspannung beeinflussen. So sind die Elemente sehr anpassungsfähig und zudem, aufgrund ihrer Zusammensetzung, sehr witterungsbeständig und robust.

Es sind jedoch noch viele Fragen offen, welche untersucht und beantwortet gehören. Neben jenen, zuvor erwähnten, sind auch die folgenden naheliegend:

- Wie groß sind die tatsächlichen Traglasten?
- Wie verhält sich das Element bei mehreren Bewehrungslagen?
- Wie groß ist der Schlupf in den Randbereichen nach dem Vorspannen?
- Wie groß ist die Relaxation des Textils unter Dauerbelastung?

Diese sind nur einige wenige, welche nur durch umfangreiche Versuchsreihen beantwortet werden können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] HEGGER J., HORSTMANN M., VOSS S., WILL N.: Textilbewehrter Beton - Tragverhalten, Bemessung und Anwendung. In: Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 6, S. 362 -370.
- [2] MOLTER M.: Zum Tragverhalten von textilbewehrten Beton. Dissertation, Aachen, 2005.
- [3] <http://www.rieder.cc/at>. Datum des Zugriffs: 5.September.2015
- [4] KRÜGER M.: Vorgespannter textilbewehrter Beton. Dissertation, Stuttgart 2004.
- [5] GENGNAGEL C.: Membranbau. <http://texlon.ch/de/fachartikel/index.php>. Datum des Zugriffs: 5.Oktober.2015
- [6] <http://www.textilbeton-aachen.de/information/textilbeton-was-ist-das/>. Datum des Zugriffs: 16.September.2015
- [7] CURBACH M., JESSE F.: Eigenschaften und Anwendungen von Textilbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau, 104/2009, S. 9-16.
- [8] ZELLINGER, M.: Zur Formfindung, Berechnung und Konstruktion von Membrantragwerken. Dissertation, Verlag TU Graz 2006.
- [9] GENGNAGEL C.: Mobile Membrankonstruktionen. Dissertation, München 2005.
- [10] BRUCKERMANN O.: Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton. Dissertation, Aachen 2007.
- [11] OHNO S., HANNANT D.J.: Modeling the Stress-Strain Response of Continuous Fibre Reinforced Cement Composites. In: ACI Materials Journal, Vol. 91, Nr.3/1994.
- [12] JESSE F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Dissertation, Dresden 2004.
- [13] AVESTON J., COOPER A., KELLY A.: Singel and Multiple Fracture. In: The Properties of Fiber Composites IPC Science and Technology Press, 1971.
- [14] VOSS STEFAN: Ingenieurmodell zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Dissertation, Aachen 2008.
- [15] SOBEK W., S. M.: Textile Werkstoffe. In: Bauingenieur, 70/1995. S. 243-250
- [16] EUROCODE 0 : Grundlagen der Tragwerksplanung (ÖNORM EN 1990-2003). Österreichisches Normungsinstitut.
- [17] ZILCH K., DIEDERICHS C.J., KATZENBACH R., BECKEMANN K.J.: Handbuch für Bauingenieure - Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. 2. Auflage, 2012.
- [18] SOBEK W.: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Aus den Arbeiten des Insitutes für Massivbau, 1. Auflage, Stuttgart 1987

- [19] NEFF W.: Verfahren zur Herstellung von schalenförmigen Baukonstruktionen auf einer innern, aufblasbaren Form. Auslegeschrift /052 103, Deutsches Patentamt März1959.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung eines Geleges (links) und eines Gewebes (rechts) [2]	5
Abb. 2: Zweidimensionale textile Halbzeuge [11]	6
Abb. 3: Biaxiales Gelege [11]	6
Abb. 4: Variationen von in Beton eingebetteten textilen Rovings [4]	7
Abb. 5: Aufteilung in innere und äußere Filamente für einen Roving [12]	8
Abb. 6: Dehnungsverlauf in Rand- und Kernfasern bei unterschiedlichen Verbundeigenschaften [13]	8
Abb. 7: Idealisierte Spannungs-Dehnungslinie unter Annahme eines homogenen Bewehrungsquerschnitts nach ACK-Modell [14]	9
Abb. 8: Spannungs-Dehnungsverlauf nach Ohno und Hannant [12]	10
Abb. 9: Idealisierung des Textils im ACK-Modell und OH-Modell [11]	10
Abb. 10: Biaxiales Carbongelege (links) und multiaxiales AR-Glasgelege mit aufgefächerten Rovings (rechts) [4]	11
Abb. 11: 4-Punkt gelagerte Platte mit Flächenlast	12
Abb. 12: Formen von Flächentragwerken [9]	13
Abb. 13: Vergleich der Verformungen [mm]	14
Abb. 14: Krümmungen von Vier-Punktsegel	15
Abb. 15: Veränderte Krümmung einer Membran	15
Abb. 16: Formfindung	16
Abb. 17: verwendete Arbeitslinie für nicht lineare Berechnung	18
Abb. 18: Visualisierung Querschnitt	20
Abb. 19: Schichtaufbau, gemeinsame Knotenebene	20
Abb. 20: Vergleich Schichtenmodell - Betonelement [MPa]	21
Abb. 21: Biegemoment M_y - Vergleich [kNm]	21
Abb. 22: Spannung-Dehnungsdiagramm Stahl	25
Abb. 23: Visualisierung Platte	26
Abb. 24: Lagerung	26
Abb. 25: Darstellung der Lasten	27
Abb. 26: Hauptspannungen im Beton	28
Abb. 27: Hauptspannungen im Beton	28
Abb. 28: Hauptspannungen infolge Einzellast [MPa]	29
Abb. 29: Hauptspannungen zufolge Vorspannung [MPa]	29
Abb. 30: Hauptspannungen zufolge EG + NL flächig [MPa]	30
Abb. 31: Verformungen in Z-Richtung [mm]	30
Abb. 32: Hauptspannungen zufolge EG + Einzellast [MPa]	31
Abb. 33: Verformung in Z-Richtung [mm]	31
Abb. 34: Hauptspannungen im GZT an Betonunterseite [MPa]	32

Abb. 35: Visualisierung gekrümmtes Element.....	33
Abb. 36: Visualisierung Membran	34
Abb. 37: Vorspannung in Membran [kN/m]	34
Abb. 38: Vorspannung in Betonschicht [kN/m]	35
Abb. 39: Hauptspannungen im Beton infolge Vorspannung [MPa].....	35
Abb. 40: Hauptspannung an Betonoberseite infolge Eigengewicht [MPa]	37
Abb. 41: Hauptspannungen im Beton infolge Einzellast [MPa].....	37
Abb. 42: Spannungen an Betonoberseite infolge flächiger Nutzlast [MPa]	38
Abb. 43: Hauptspannung 1 an Betonoberseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]	38
Abb. 44: Hauptspannung 1 an Betonunterseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]	39
Abb. 45: Verformung in Z-Richtung [mm]	39
Abb. 46: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge EG+ Einzellast [MPa]	40
Abb. 47: Hauptspannungen an Betonunterseite infolge EG+ Einzellast [MPa]	40
Abb. 48: Verformung in Z-Richtung [mm]	41
Abb. 49: Hauptspannung an Betonoberseite infolge Eigengewicht [MPa]	44
Abb. 50: Hauptspannungen infolge Einzellast [MPa].....	45
Abb. 51: Spannungen an Betonoberseite infolge flächiger Nutzlast [MPa]	45
Abb. 52: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]	46
Abb. 53: Spannungen an Betonunterseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]	46
Abb. 54: Verformung in Z-Richtung [mm]	47
Abb. 55: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge EG+ Einzellast [MPa]	47
Abb. 56: Hauptspannungen an Betonunterseite infolge EG+ flächiger NL [MPa]	48
Abb. 57: Verformung in Z-Richtung [mm]	48
Abb. 58: Hauptspannungen infolge Vorspannung [MPa].....	50
Abb. 59: Hauptspannungen an Betonoberseite infolge von EG+ flächiger NL [MPa].....	52
Abb. 60: Verformung in Z-Richtung [mm]	53
Abb. 61: Hauptspannungen im Beton infolge von EG + Einzellast + VSP [MPa]	54
Abb. 62: Verformung in Z-Richtung [mm]	55
Abb. 63: Isometrische Ansicht Platte 100 x 100	57
Abb. 64: Diagramm Verformung infolge ansteigenden Flächenlast 100 x 100 cm.....	58
Abb. 65: Darstellung Angriffspunkt Einzellast.....	59
Abb. 66: Diagramm Verformung infolge ansteigender Einzellast 100 x 100 cm.....	59
Abb. 67: Diagramm Verformung infolge Winddruck 100 x 100 cm	60
Abb. 68: Zugspannungen im Modell 100 x 100 cm an Betonzugseite [1/m]	61
Abb. 69: Diagramm Verformung infolge Einzellast 100 x 100 cm.....	62
Abb. 70: Isometrie Element 100 x 200 cm.....	63
Abb. 71: Diagramm Verformung infolge Winddruck 100 x 200 cm	63
Abb. 72: Isometrie gekrümmtes Element 100 x 200 cm	64
Abb. 73: Angriffspunkt der Einzellast 100 x 200 cm	65

Abb. 74: Diagramm Verformung infolge Einzellast 100 x 200 cm	65
Abb. 75: Diagramm Verformung infolge Winddruck 120 x 300 cm	67
Abb. 76: Diagramm Verformung infolge Einzellast 120 x 300.....	68
Abb. 77: Ränderausbildung bei Membrane	69
Abb. 78: Visualisierung Fassadenelemente	71
Abb. 79: Isometrische Ansicht Fassadenelement.....	71
Abb. 80: Darstellung Angriffspunkt exzentrisch angreifende Last.....	72
Abb. 81: Hauptspannungen an Betonrückseite infolge flächiger Belastung und VSP - GZT [MPa].....	73
Abb. 82: Hauptspannungen infolge Einzellast - GZT [MPa].....	73
Abb. 83: Verformung infolge Einzellast - GZG [mm].....	74
Abb. 84: Darstellung Krümmung Modell 120 x 300 cm.....	76

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Gegenüberstellung Stahlbeton – Kurzfaserbeton – Textilbeton [6].....	4
Tab. 2:	Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien [1]	5
Tab. 3:	Mechanische Kenndaten verschiedener Fasern [16]	17

9 Abkürzungsverzeichnis

AR	Alkali Resistent
EP	Epoxyharz
BW	Baumwolle
C	Kohlenstoff
PES	Polyester
PA	Polyamid
PTFE	Polytetrafluorethylen
E-Modul	Elastizitätsmodul
bzw.	Beziehungsweise
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
HP	Hochpunkt
TP	Tiefpunkt
EG	Eigengewicht
NL	Nutzlast
VSP	Vorspannung
n.r.	nicht relevant
d.h.	das heißt
E_c	E-Modul Beton
E_f	E-Modul Roving
V_f	Druckstrebentragfähigkeit
G	Schubmodul
l	Länge des Querschnitts
spacing	Abstand zwischen Maschen
My	Biegemoment um Y
f_{ck}	Druckfestigkeit
f_{ct}	Biegezugfestigkeit
$d_{\text{äquvi}}$	äquivalente Schichtdicke
f_r	Restzugfestigkeit
f'_{pu}	Zugfestigkeit eines Roving
A_t	Gesamte Bewehrungsfläche im QS
$A_{f,\text{Roving}}$	Einzelfläche eines Rovings
k	Krümmung

Griechische Buchstaben

ε	Dehnung
σ	Spannung

Einheiten

mm	Milimeter
m	Meter
N	Newton
kN	Kilonewton
MPa	Megapascal

10 Anhang

10.1 Näherung der Krümmung

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die Näherung für die Ermittlung der Krümmung dar.

ABSCHÄTZUNG KRÜMMUNG

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad \rightarrow \text{Geometrische Zusammenhänge}$$

bei verschobenen Kreisen gilt:

$$r^2 = (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 = r^2 \quad \text{mit: } x_m, y_m \dots \text{Koordinaten des Kreismittelpunkts}$$

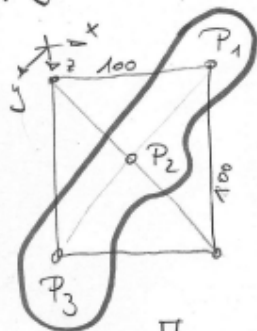
Variablen: $A = x_m^2 + y_m^2 - r^2$

$$B = 2x_m$$

$$C = 2y_m$$

$$\hookrightarrow A + B(-x_i) + C(-y_i) = -(x_i^2 + y_i^2)$$

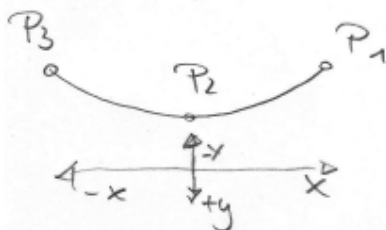
geg.: 3 Punkte $P(x|z|y)$



$$P_1(1|0|0,1)$$

$$P_2(0,5|0,05|0,5)$$

$$P_3(0|1|0,5)$$



$$x \text{ für } P_1, P_3 \hat{=} \frac{\sqrt{1^2 + 1^2}}{2} = \frac{1,414}{2} m = \underline{0,707}$$

$$P_1(0,707|0,1)$$

$$P_2(0|-0,05)$$

$$P_3(-0,707|-0,1)$$

Gleichungen

$$\textcircled{1} \quad A + B(-(+0,707)) + C(-(-0,1)) = -(0,707^2 + 0,1^2)$$

$$\textcircled{2} \quad A + B(- (0)) + C(-(-0,05)) = -(0^2 + 0,05^2)$$

$$\textcircled{3} \quad A + B(-(-0,707)) + C(-(-0,1)) = -(0,707^2 + 0,1^2)$$

$$\begin{array}{l} \textcircled{1} \quad A - 0,707B + 0,1C = -0,5098 \\ \textcircled{2} \quad A + 0B + 0,05C = -0,0025 \\ \textcircled{3} \quad A + 0,707B + 0,1C = -0,5098 \end{array} \quad \left| \cdot (-1) \right.$$

$$\textcircled{1} \quad A - 0,707B + 0,1C = -0,5098$$

$$\textcircled{2} \quad 0 + 0,707B - 0,05C = 0,5073$$

$$\textcircled{3} \quad 0 + 1,414B + 0 = 0 \Rightarrow B = 0 \checkmark$$

$$\textcircled{2} \quad 0 + 0 - 0,05C = 0,5073 \Rightarrow C = -10,146$$

$$\textcircled{1} \quad A - 0 + 0,1 \cdot (-10,146) = -0,5098$$

$$\textcircled{1} \quad A = 0,5048$$

$$y_m = \frac{C}{2} = -5,073 \quad x_m = \frac{B}{2} = 0 \checkmark$$

$$r^2 = x_m^2 + y_m^2 - A = 0 + (-5,073)^2 - 0,5048$$

$$r^2 = 25,228 \quad \Rightarrow r = 5,0227 \text{ m}$$

$$\text{Krümmung: } \frac{1}{r} = \frac{1}{5,0227} = \underline{\underline{0,199 \frac{1}{\text{m}}}}$$

$$(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 = r^2$$

aus Umformungen $\Rightarrow A + B(-x) + C(-y) = -(x^2 + y^2)$

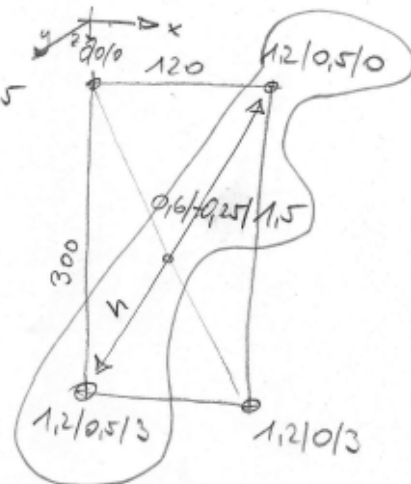
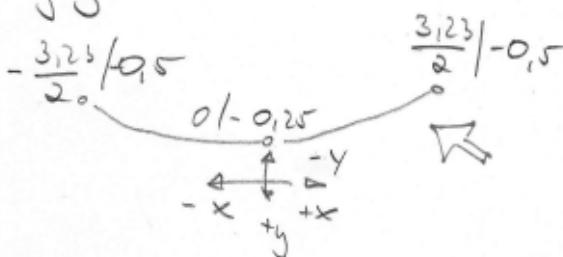
mit: $A = x_m^2 + y_m^2 - r^2$

$$B = 2x_m$$

$$C = 2y_m$$

$x_m, y_m \rightarrow$ Koordinaten
für Kreismittelpunkt

geg.: 3 Punkte



$$h = \sqrt{1,2^2 + 3^2} = \underline{3,23m}$$

Gleichungen

$$\begin{aligned} \textcircled{1} &\Rightarrow A + B(-(-1,615)) + C(-(-0,5)) = -(1,615^2 + 0,5^2) \\ \textcircled{2} &\Rightarrow A + B(-0) + C(-(-0,25)) = -(0^2 + 0,25^2) \\ \textcircled{3} &\Rightarrow A + B(-1,615) + C(-(-0,5)) = -(1,615^2 + 0,5^2) \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \\ \cdot (-\textcircled{1}) \\ \end{array} \right.$$

$$\hookrightarrow \textcircled{1} \quad A + 1,615B + 0,5C = -2,858$$

$$\textcircled{2} \quad 0 - 1,615B - 0,25C = 2,796$$

$$\textcircled{3} \quad 0 - 3,23B + 0 = 0 \Rightarrow B = 0 \checkmark$$

$$\hookrightarrow C = -\frac{2,796}{0,25} = \underline{-11,184} \quad A = \underline{2,732}$$

$$\rightarrow x_m = \frac{B}{2} = 0 \checkmark$$

$$y_m = \frac{C}{2} = \underline{-5,59}$$

$$r^2 = x_m^2 + y_m^2 - A$$

$$\hookrightarrow r^2 = 0^2 + (-5,59)^2 - 2,732$$

$$r^2 = 31,248 - 2,732 = 28,516$$

$$r = \sqrt{28,516} = \underline{5,34 \text{ m}}$$

$$\text{Krümmung} = \frac{1}{r} = \frac{1}{5,34} = \underline{\underline{0,187 \frac{1}{\text{m}}}}$$

10.2 Sofistik Modelle

Nachfolgend werden die Eingaben in SOFISTIK dargestellt. Diese Eingaben werden im Editor TEDDY getätigt. Hierbei handelt es sich um eine textbasierte Systemeingabe mit welcher alle SOFISTIK Module gesteuert werden können.

Es werden im Rahmen dieser Arbeit viele Modelle erstellt. Der Aufbau ist jedoch immer sehr ähnlich, daher werden nur einige Exemplarisch dargestellt.

10.3 Ebenes Modell 100 x 100 cm

Zunächst wird das ebene Modell mit den Abmessungen 100 x 100 gezeigt.

Materialeingabe

Texteingabe

```
+PROG AQUA
KOPF
NORM 'DIN' 'en1992-2004' CAT 'B'
BETO 1 FC 41 FCN 41 FCT 5 EC 32000 MUE 0
      BEZ 'Feinbeton'
```

\$Betondruckfestigkeit fck = 86 MPa --> 41 wird angegeben um Designwert von 46 MPa in Berechnung zu haben

```
MATE 201 E 3000 E90 2500 G 40 MUE 0.2
      GAM 14 BEZ 'Membran PTFE 0.1 mm'
```

```
NMAT 201 MEMB P2 0 $ definiert das Material als Membran
ENDE
```

Erläuterung

Programmaufruf AQUA
 Programmkopf
 Definieren einer Norm
 Definition des Feinbetons

Definieren des Textils

Definieren des Textils als Membran

Netzgenerierung

Texteingabe

```
+PROG SOFIMSHA
KOPF
UNIT 5 $ Geometrie+Lasten in m
SYST ART GDIV GDIR
      RAUM 1000 posz
```

```
KNOT NR X Y Z FIX
      1 0 0 0 PP
      22 0 1 0 PZ
      122 1 1 0 PXPZ
      101 1 0 0 PZ
```

Erläuterung

Programmaufruf SOFIMSHA
 Programmkopf
 Einheiten
 Definieren eines Raumes

Festlegen der Knoten und der Knotenfesthalterungen

<p>GRUP 1 BEZ 'Membran' QUAD K1 1 22 122 101 T 1 [mm] LAGE - M 25 N 25 MNR 201 DRX 1 DRY 1 NRA 2</p> <p>GRUP 2 BEZ 'Beton oben' QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm] LAGE OBEN M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1</p> <p>GRUP 3 BEZ 'Beton unten' QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm] LAGE UNTE M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1</p> <p>GRUP 9 BEZ 'Randlagerung' RAND 1 BEZ 'temporäre Lagerung' RAND 1 22 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7 RAND 22 122 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7 RAND 122 101 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7 RAND 101 1 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7 ENDE</p>	<p>Definieren der Membranschicht</p> <p>Definieren der oberen Betonschicht</p> <p>Definieren der unteren Betonschicht</p> <p>Definieren der Randlagerung für gerade Ränder während des Formfindungsvorgangs</p>
---	---

Belastungen definieren

Texteingabe

+PROG SOFILOAD
 KOPF
 LF 901 TYP NONE BEZ 'Eigengewicht'
 QUAD GRP 2 TYP PZZ P 2*25*0.008

LF 902 TYP NONE BEZ 'Nutzlast flächig'
 QUAD GRP 2 TYP PZP P 1.2

LF 903 TYP NONE BEZ 'Nutzlast exzentrisch'
 KNOT 1054 Typ PZZ P1 0.7
 ENDE

Erläuterung

Programmaufruf SOFILOAD
 Programmkopf
 Definieren des Lastfalls EG
 Belastung auf Gruppe 2 in global Z

Definieren des Lastfalls NL flächig
 Belastung auf Gruppe 2 in global Z

Definieren des Lastfalls NL exzent.
 Belastung auf Knoten 1054 in Z

Formfindung und Systemupdate

Texteingabe

+PROG ASE
 KOPF Formfindung
 SYST PROB TH3 NMAT JA
 GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 1 voll FAKS 1e-3
 VORX 50 VORY 50 \$kN/m
 GRUP 2,3 nein
 GRUP 9 voll
 LF 1 BEZ 'Formfindung'
 ENDE

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Änderung der Membransteifigkeit
 Definieren der Vorspannung
 Ausschalten des Betons
 Volles Wirken der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls

Texteingabe

+PROG ASE
 KOPF Formfindung
 SYST PROB TH3 PLF 1 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 1 voll
 GRUP 2,3 nein
 GRUP 9 voll
 LF 2 BEZ 'Formfindung FASK = 1 SLS'
 ENDE

+PROG ASE
 KOPF
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 2

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 1,2,3 voll
 GRUP 9 nein
 LF 3 BEZ 'Neues Sytem'
 ENDE

+PROG ASE
 KOPF Koordinaten Update
 SYST PLF 3 SPEI ja
 ENDE

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 1

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Membransteifigkeit wirkt voll
 Ausschalten des Betons
 Volles Wirken der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 2

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Membran und Beton wirkt voll
 Ausschalten der Randhalterung
 Definieren des Lastfalls

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Systemupdate mit Geometrie aus
 Primärlastfall 3

Lastfallkombinationen und Berechnung**Texteingabe**

+PROG ASE
 KOPF
 SYST PROB Line NMAT Ja

GRUP 1,2,3 voll
 GRUP 9 nein
 LF 4 BEZ 'Eigengewicht'
 LC 901
 ENDE

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 1. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten
 Membran und Beton wirkt voll
 Ausschalten der Randhalterung
 Definieren des Lastfalls EG
 Kopieren des Lastfalls

Texteingabe

+PROG ASE
 KOPF
 SYST PROB Line NMAT JA

GRUP -
 GRUP 9 nein
 LF 5 BEZ 'Nutzlast exzentrisch'
 LC 903
 ENDE

+PROG ASE
 KOPF
 SYST PROB Line NMAT Ja

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein
 LF 6 BEZ 'NL flächig'
 LC 902
 ENDE

+PROG ASE
 KOPF
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein
 LF 7 BEZ 'EG+VSP'
 LC 901
 ENDE

+PROG ASE
 KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0
 STEU ITER 3 W2 1
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein
 LF 8 BEZ 'EG +VSP + NL flächig '
 LC 902

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 1. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls NL exzentrisch
 Kopieren des Lastfalls

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 1. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls NL flächig
 Kopieren des Lastfalls

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 3
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls EG + VSP
 Kopieren des Lastfalls

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Betonzugfestigkeit wird auf null gesetzt
 Iterationsverfahren
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 3
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls
 EG + VSP + NL flächig
 Kopieren des Lastfalls

LC 901
ENDE

Kopieren des Lastfalls

Da der Aufbau aller Lastfälle ähnlich ist, wird darauf verzichtet alle Erläuterungen aufzuführen.

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 9 BEZ 'EG + NL flächig

LC 901

LC 902

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 10 BEZ 'EG + NL exzentr.'

LC 901

LC 903

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 14 BEZ 'EG + VSP + NL exzentr.'

LC 901

LC 903

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB LINE NMAT JA

GRUP -

Anhang

GRUP 9 nein
LF 15 BEZ 'EG + flächige NL - linear'
LC 901
LC 902
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
STEU ITER 3 W2 1
SYST PROB LINE NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung
GRUP -
GRUP 9 nein
LF 16 BEZ 'EG + NL flächig +vsp - linear'
LC 902
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB LINE NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung
GRUP -
GRUP 9 nein
LF 17 BEZ 'EG + NL exzentr. + VSP - linear'
LC 903
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB LINE NMAT JA
GRUP -
GRUP 9 nein
LF 18 BEZ 'EG + NL exzentr. - linear'
LC 903
LC 901
ENDE

Kombinationen für die Tragsicherheit

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
STEU ITER 3 W2 1
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung
GRUP -
GRUP 9 nein
LF 19 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL exzentr. +VSP'

LC 903 Fakt 1.5
LC 901 Fakt 1.35
ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 20 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL exzentr.'

LC 903 Fakt 1.5

LC 901 Fakt 1.35

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 21 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig'

LC 902 Fakt 1.5

LC 901 Fakt 1.35

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 22 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig +VSP'

LC 902 Fakt 1.5

LC 901 Fakt 1.35

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 23 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig'

LC 902 Fakt 1.5

LC 901 Fakt 1.35

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU ITER 3 W2 1

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

GRUP -

GRUP 9 nein

LF 25 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig +VSP'

LC 902 Fakt 1.5

LC 901 Fakt 1.35

ENDE

Schnitt im Raum

Aufgrund der Tatsache das es sich bei dem Modell um einen Schichtaufbau handelt, muss ein Querschnitt definiert werden, um die Schnittgrößen bezogen auf den Querschnitt zu erhalten.

Texteingabe

+PROG SIR

Kopf externer Stabschnitt

STEU Aqua 14

ECHO schn

LF 10

LF 11

LF 15

LF 16

GRUP 1 OPT nein

SCHN 1 XM 0.5 YM 0.5 XMIN -0.001

XMAX 0.001 ZMIN -0.008 ZMAX 0.008

YMIN -1 YMAX 1 NX 1 QNR 1

ENDE

+PROG AQUA

KOPF

QNR 1 MNR 1

QPOL U \$Eingaben in mm

QP 1 -500 -8

QP 2 500 -8

Erläuterung

Programmaufruf SIR

Programmkopf

Eingabedatei für Programm AQUA erzeugen

Ausgabe der Schnittgrößen

Lastfälle die mit externen Stabschnitt berechnet werden

Membranschicht wird deaktiviert

Definieren des Raums für den Schnitt

Programmaufruf AQUA

Programmkopf

Definieren des Querschnitts und Materials

Polpunkt

Polpunkt

QP 3	500	8	Polpunkt
QP 4	-500	8	Polpunkt
ENDE			

10.4 Gekrümmtes Modell 100 x 100 x 50 cm

Zunächst wird das ebene Modell mit den Abmessungen 100 x 100 x 50 gezeigt.

Materialeingabe

Texteingabe

```
+PROG AQUA
KOPF
NORM 'DIN' 'en1992-2004' CAT 'B'
BETO 1 FC 41 FCN 41 FCT 5 EC 32000 MUE 0
      BEZ 'Feinbeton'
```

\$Betondruckfestigkeit fck = 86 MPa --> 41 wird angegeben um Designwert von 46 MPa in Berechnung zu haben

```
MATE 201 E 3000 E90 2500 G 40 MUE 0.2
```

```
      GAM 14 BEZ 'Membran PTFE 0.1 mm'
```

```
NMAT 201 MEMB P2 0 $ definiert das Material als Membran
```

```
ENDE
```

Erläuterung

Programmaufruf AQUA

Programmkopf

Definieren einer Norm

Definition des Feinbetons

Definieren des Textils

Definieren des Textils als Membran

Netzgenerierung

Texteingabe

```
+PROG SOFIMSHA
KOPF
UNIT 5 $ Geometrie+Lasten in m
```

```
SYST ART  GDIV  GDIR
```

```
      RAUM 1000  posz
```

```
KNOT NR   X     Y     Z     FIX
```

```
      1     0     0     0     PP
```

```
      22  0.707  0.707 -0.5  PZ
```

```
     122  1.414  0     0     PP
```

```
     101  0.707 -0.707 -0.5  PZ
```

```
GRUP 1 BEZ 'Membran'
```

```
      QUAD K1 1  22  122  101  T 0.1[mm] LAGE -
```

```
          M 25 N 25 MNR 201 DRX 1 DRY 1 NRA 2
```

```
GRUP 2 BEZ 'Beton oben'
```

Erläuterung

Programmaufruf SOFIMSHA

Programmkopf

Einheiten

Definieren eines Raumes

Festlegen der Knoten und der

Knotenfesthaltungen

Definieren der Membranschicht

Definieren der oberen Betonschicht

```

QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm]
    LAGE OBEN M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1
GRUP 3 BEZ 'Beton unten'
QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm]
    LAGE UNTE M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1

GRUP 9 BEZ 'Randlagerung'
RAND 1 BEZ 'temporäre Lagerung'
    RAND 1 22 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
    RAND 22 122 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
    RAND 122 101 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
    RAND 101 1 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
ENDE

```

Definieren der unteren Betonschicht

Definieren der Randlagerung
für gerade Ränder während des
Formfindungsvorgangs

Belastungen definieren

Texteingabe

```

+PROG SOFILOAD
KOPF
LF 901 TYP NONE BEZ 'Eigengewicht'
    QUAD GRP 2 TYP PZZ P 2*25*0.008

LF 902 TYP NONE BEZ 'Nutzlast flächig'
    QUAD GRP 2 TYP PZP P 6

LF 903 TYP NONE BEZ 'Nutzlast exzentrisch'
    KNOT 1015 Typ PZZ P1 1.1
ENDE

```

Erläuterung

Programmaufruf SOFILOAD
Programmkopf
Definieren des Lastfalls EG
Belastung auf Gruppe 2 in global Z

Definieren des Lastfalls NL flächig
Belastung auf Gruppe 2 in global Z

Definieren des Lastfalls NL exzent.
Belastung auf Knoten 1015 in Z

Formfindung und Systemupdate

Texteingabe

```

+PROG ASE
KOPF Formfindung
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - $ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll FAKS 1e-3
    VORX 50 VORY 50 $kN/m
GRUP 2,3 nein
GRUP 9 voll
LF 1 BEZ 'Formfindung'
ENDE

```

Erläuterung

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
Änderung der Membransteifigkeit
Definieren der Vorspannung
Ausschalten des Betons
Volles Wirken der Randlagerung
Definieren des Lastfalls

```

+PROG ASE
KOPF Formfindung

```

Programmaufruf ASE
Programmkopf

SYST PROB TH3 PLF 1 NMAT JA

Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
Berücksichtigen von materiellen
Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
Primärlastfall 1

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll
GRUP 2,3 nein
GRUP 9 voll
LF 2 BEZ 'Formfindung FASK = 1 SLS'
ENDE

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
Membransteifigkeit wirkt voll
Ausschalten des Betons
Volles Wirken der Randlagerung
Definieren des Lastfalls

Texteingabe

Erläuterung

+PROG ASE
KOPF
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 2

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
Berücksichtigen von materiellen
Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
Primärlastfall 2

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1,2,3 voll
GRUP 9 nein
LF 3 BEZ 'Neues Sytem'
ENDE

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
Membran und Beton wirkt voll
Ausschalten der Randhalterung
Definieren des Lastfalls

+PROG ASE
KOPF Koordinaten Update
SYST PLF 3 SPEI ja

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Systemupdate mit Geometrie aus
Primärlastfall 3

ENDE

Lastfallkombinationen und Berechnung

Texteingabe

Erläuterung

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT Ja

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
Berücksichtigen von materiellen
Nichtlinearitäten
Membran und Beton wirkt voll
Ausschalten der Randhalterung
Definieren des Lastfalls EG
Kopieren des Lastfalls

GRUP 1,2,3 voll
GRUP 9 nein
LF 4 BEZ 'Eigengewicht'
LC 901
ENDE

<p>+PROG ASE KOPF \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert SYST PROB TH3 NMAT JA</p> <p>GRUP - GRUP 9 nein LF 5 BEZ 'Nutzlast exzentrisch' LC 903 ENDE</p>	<p>Programmaufruf ASE Programmkopf</p> <p>Berechnung nach Theorie 3. Ordnung, Berücksichtigen von materiellen Nichtlinearitäten Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert Ausschalten der Randlagerung Definieren des Lastfalls NL exzentrisch Kopieren des Lastfalls</p>
--	---

Texteingabe

Erläuterung

<p>+PROG ASE KOPF \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung</p> <p>GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein GRUP 9 nein LF 6 BEZ 'NL exzentr. + VSP' LC 903 ENDE</p>	<p>Programmaufruf ASE Programmkopf</p> <p>Berechnung nach Theorie 3. Ordnung Berücksichtigen von materiellen Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf Primärlastfall 3 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert Ausschalten der Randlagerung Definieren des Lastfalls Kopieren des Lastfalls</p>
--	---

<p>+PROG ASE KOPF \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung</p> <p>GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein GRUP 9 nein LF 7 BEZ 'EG+VSP' LC 901 ENDE</p>	<p>Programmaufruf ASE Programmkopf</p> <p>Berechnung nach Theorie 3. Ordnung Berücksichtigen von materiellen Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf Primärlastfall 3 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert Ausschalten der Randlagerung Definieren des Lastfalls Kopieren des Lastfalls</p>
---	---

Da der Aufbau aller Lastfälle ähnlich ist, wird darauf verzichtet alle Erläuterungen aufzuführen.

+PROG ASE
KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
 SYST PROB TH3 NMAT JA
 GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein

LF 8 BEZ 'NL flächig'
LC 902
ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 9 BEZ 'NL flächig + VSP'

LC 902

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 10 BEZ 'EG + NL exzentr. + VSP'

LC 903

LC 901

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 11 BEZ 'EG + NL exzentr.'

LC 903

LC 901

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 12 BEZ 'EG + NL flächig + VSP'

LC 902

LC 901

ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 201 BEZ 'EG + NL flächig'
LC 902
LC 901
ENDE

Kombinationen für die Tragsicherheit

-PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 14 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL exzentr. +VSP'
LC 903 FAKT 1.5
LC 901 FAKT 1.35
ENDE

-PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 15 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig + VSP'
LC 902 FAKT 1.5
LC 901 FAKT 1.35
ENDE

-PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT Ja ITER 300 TOL 0.2 \$Mehr Iterationen, größere Toleranzschranke
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 16 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig'
LC 902 FAKT 1.5
LC 901 FAKT 1.35
ENDE

10.5 Gekrümmtes Modell 200 x 200 x 100 cm

Zunächst wird das ebene Modell mit den Abmessungen 200 x 200 x 100 gezeigt.

Materialeingabe

Texteingabe

```
+PROG AQUA
KOPF
NORM 'DIN' 'en1992-2004' CAT 'B'
BETO 1 FC 41 FCN 41 FCT 5 EC 32000 MUE 0
      BEZ 'Feinbeton'
```

\$Betondruckfestigkeit fck = 86 MPa --> 41 wird angegeben um Designwert von 46 MPa in Berechnung zu haben

```
MATE 201 E 3000 E90 2500 G 40 MUE 0.2
```

```
      GAM 14 BEZ 'Membran PTFE 0.1 mm'
```

```
NMAT 201 MEMB P2 0 $ definiert das Material als Membran
ENDE
```

Erläuterung

Programmaufruf AQUA
 Programmkopf
 Definieren einer Norm
 Definition des Feinbetons

Definieren des Textils

Definieren des Textils als Membran

Netzgenerierung

Texteingabe

```
+PROG SOFIMSHA
KOPF
UNIT 5 $ Geometrie+Lasten in m
SYST ART  GDIV  GDIR
      RAUM 1000  posz
KNOT  NR   X     Y     Z     FIX
      1   0     0     0     PP
      22  1.415  1.415  -1    PZ
      122 2.83   0     0     PP
      101 1.415  -1.415 -1    PZ
```

```
GRUP 1 BEZ 'Membran'
```

```
  QUAD K1 1 22 122 101 T 0.1[mm] LAGE -
      M 25 N 25 MNR 201 DRX 1 DRY 1 NRA 2
```

```
GRUP 2 BEZ 'Beton oben'
```

```
  QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm]
      LAGE OBEN M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1
```

```
GRUP 3 BEZ 'Beton unten'
```

```
  QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm]
      LAGE UNTE M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1
```

```
GRUP 9 BEZ 'Randlagerung'
```

```
  RAND 1 BEZ 'temporäre Lagerung'
      RAND 1 22 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
```

Erläuterung

Programmaufruf SOFIMSHA
 Programmkopf
 Einheiten
 Definieren eines Raumes

Definieren der Knoten und der
 Knotenfesthalterungen

Definieren der Membranschicht

Definieren der oberen Betonschicht

Definieren der unteren Betonschicht

Definieren der Randlagerung
 für gerade Ränder während des
 Formfindungsvorgangs

RAND 22 122 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
RAND 122 101 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
RAND 101 1 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
ENDE

Belastungen definieren

Texteingabe

+PROG SOFILOAD
KOPF
LF 901 TYP NONE BEZ 'Eigengewicht'
QUAD GRP 2 TYP PZZ P 2*25*0.008

LF 902 TYP NONE BEZ 'Nutzlast flächig'
QUAD GRP 2 TYP PZP P 6

LF 903 TYP NONE BEZ 'Nutzlast exzentrisch'
KNOT 1015 Typ PZZ P1 1.6
ENDE

Erläuterung

Programmaufruf SOFILOAD
Programmkopf
Definieren des Lastfalls EG
Belastung auf Gruppe 2 in global Z

Definieren des Lastfalls NL flächig
Belastung auf Gruppe 2 in global Z

Definieren des Lastfalls NL exzentr.
Belastung auf Knoten 1015 in Z

Formfindung und Systemupdate

Texteingabe

+PROG ASE
KOPF Formfindung
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll FAKS 1e-3
VORX 50 VORY 50 \$kN/m
GRUP 2,3 nein
GRUP 9 voll
LF 1 BEZ 'Formfindung'
ENDE

Erläuterung

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
Änderung der Membransteifigkeit
Definieren der Vorspannung
Ausschalten des Betons
Volles Wirken der Randlagerung
Definieren des Lastfalls

+PROG ASE
KOPF Formfindung
SYST PROB TH3 PLF 1 NMAT JA

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
Berücksichtigen von materiellen
Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
Primärlastfall 1

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll
GRUP 2,3 nein
GRUP 9 voll
LF 2 BEZ 'Formfindung FASK = 1 SLS'

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
Membransteifigkeit wirkt voll
Ausschalten des Betons
Volles Wirken der Randlagerung
Definieren des Lastfalls

 ENDE
Texteingabe

+PROG ASE
 KOPF
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 2

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzen auf
 Primärlastfall 2

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 1,2,3 voll
 GRUP 9 nein
 LF 3 BEZ 'Neues Sytem'
 ENDE

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Membran und Beton wirkt voll
 Ausschalten der Randhalterung
 Definieren des Lastfalls

+PROG ASE
 KOPF Koordinaten Update
 SYST PLF 3 SPEI ja

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Systemupdate mit Geometrie aus
 Primärlastfall 3

ENDE

Lastfallkombinationen und Berechnung**Texteingabe**

+PROG ASE
 KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
 SYST PROB TH3 NMAT Ja

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten
 Membran und Beton wirkt voll
 Ausschalten der Randhalterung
 Definieren des Lastfalls EG
 Kopieren des Lastfalls

GRUP 1,2,3 voll
 GRUP 9 nein
 LF 4 BEZ 'Eigengewicht'
 LC 901
 ENDE

+PROG ASE
 KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
 SYST PROB TH3 NMAT JA

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls NL exzentrisch
 Kopieren des Lastfalls

GRUP -
 GRUP 9 nein
 LF 5 BEZ 'Nutzlast exzentrisch'
 LC 903

ENDE

Texteingabe

Erläuterung

+PROG ASE
 KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

 GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein
 LF 6 BEZ 'NL exzentr. + VSP'
 LC 903
 ENDE

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 3
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls
 Kopieren des Lastfalls

+PROG ASE
 KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

 GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein
 LF 7 BEZ 'EG+VSP'
 LC 901
 ENDE

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 3
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls
 Kopieren des Lastfalls

+PROG ASE
 KOPF
 \$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
 SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
 \$Primärlastfall 3 beinhaltet die Vorspannung

 GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 9 nein
 LF 8 BEZ 'NL flächig'
 LC 902
 ENDE

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 3
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Ausschalten der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls
 Kopieren des Lastfalls

Da der Aufbau aller Lastfälle ähnlich ist, wird darauf verzichtet alle Erläuterungen aufzuführen.

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 9 BEZ 'NL flächig + VSP'
LC 902
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 10 BEZ 'EG + NL exzentr. + VSP'
LC 903
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 11 BEZ 'EG + NL exzentr.'
LC 903
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 12 BEZ 'EG + NL flächig + VSP'
LC 902
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein

LF 13 BEZ 'EG + NL flächig'
LC 902
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB LINE NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 300 BEZ 'EG + NL flächig + VSP - line'
LC 902
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB LINE NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 301 BEZ 'EG + NL flächig - line'
LC 902
LC 901
ENDE

Kombinationen für die Tragsicherheit

-PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 13 BEZ '1.5 NL flächig '
LC 902 FAKT 1.5
ENDE

-PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 14 BEZ '1.5 NL exz.'
LC 903 FAKT 1.5
ENDE

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB LINE NMAT JA PLF 3

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 14 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL exzentr. + VSP'

LC 903 FAKT 1.5

LC 901 FAKT 1.35

ENDE

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 15 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig + VSP'

LC 902 FAKT 1.5

LC 901 FAKT 1.35

ENDE

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0 \$\$ Je nach Betrachtung aktiviert/deaktiviert

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT Ja ITER 300 \$tol 0.2

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 16 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig

LC 902 FAKT 1.5

LC 901 FAKT 1.35

ENDE

10.6 Gekrümmtes Modell 120 x 300 cm

Zunächst wird das ebene Modell mit den Abmessungen 120 x 300 gezeigt.

Materialeingabe

Texteingabe

```
+PROG AQUA
KOPF
NORM 'DIN' 'en1992-2004' CAT 'B'
BETO 1 FC 41 FCN 41 FCT 5 EC 32000 MUE 0
      BEZ 'Feinbeton'
```

\$Betondruckfestigkeit fck = 86 MPa --> 41 wird angegeben um Designwert von 46 MPa in Berechnung zu haben

```
MATE 201 E 3000 E90 2500 G 40 MUE 0.2
      GAM 14 BEZ 'Membran PTFE 0.1 mm'
```

```
NMAT 201 MEMB P2 0 $ definiert das Material als Membran
ENDE
```

Erläuterung

Programmaufruf AQUA
 Programmkopf
 Definieren einer Norm
 Definition des Feinbetons

Definieren des Textils

Definieren des Textils als Membran

Netzgenerierung

Texteingabe

```
+PROG SOFIMSHA
KOPF
UNIT 5 $ Geometrie+Lasten in m
SYST ART  GDIV  GDIR
      RAUM 1000  posz
KNOT  NR    X    Y    Z    FIX
      1     0    0    0    PP
      22    .67  1.345 -0.8  PZ
      122   3.35  0    0    PP
      101   2.71 -1.345 -1    PZ
```

```
GRUP 1 BEZ 'Membran'
  QUAD K1 1 22 122 101 T 0.1[mm] LAGE -
      M 25 N 25 MNR 201 DRX 1 DRY 1 NRA 2
```

```
GRUP 2 BEZ 'Beton oben'
  QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm]
      LAGE OBEN M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1
```

```
GRUP 3 BEZ 'Beton unten'
  QUAD K1 1 22 122 101 T 8.00[mm]
      LAGE UNTE M 25 N 25 MNR 1 DRX 1 DRY 1
```

```
GRUP 9 BEZ 'Randlagerung'
  RAND 1 BEZ 'temporäre Lagerung'
  RAND 1 22 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
```

Erläuterung

Programmaufruf SOFIMSHA
 Programmkopf
 Einheiten
 Definieren eines Raumes

Definieren der Knoten und der

Definieren der Membranschicht

Definieren der oberen Betonschicht

Definieren der unteren Betonschicht

Definieren der Randlagerung
 für gerade Ränder während des
 Formfindungsvorgangs

RAND 22 122 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
 RAND 122 101 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
 RAND 101 1 fit TYP cx,cy,cz ca 1E7
 ENDE

Belastungen definieren

Texteingabe

+PROG SOFILOAD
 KOPF
 LF 901 TYP NONE BEZ 'Eigengewicht'
 QUAD GRP 2 TYP PZZ P 2*25*0.008

 LF 902 TYP NONE BEZ 'Nutzlast flächig'
 QUAD GRP 2 TYP PZP P 2.5

 LF 903 TYP NONE BEZ 'Nutzlast exzentrisch'
 KNOT 1015 Typ PZZ P1 2
 ENDE

Erläuterung

Programmaufruf SOFILOAD
 Programmkopf
 Definieren des Lastfalls EG
 Belastung auf Gruppe 2 in global Z

 Definieren des Lastfalls NL flächig
 Belastung auf Gruppe 2 in global Z

 Definieren des Lastfalls NL exzentr.
 Belastung auf Knoten 1015 in Z

Formfindung und Systemupdate

Texteingabe

+PROG ASE
 KOPF Formfindung
 SYST PROB TH3 NMAT JA
 GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 1 voll FAKS 1e-3
 VORX 50 VORY 50 \$kN/m
 GRUP 2,3 nein
 GRUP 9 voll
 LF 1 BEZ 'Formfindung'
 ENDE

Erläuterung

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
 Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Änderung der Membransteifigkeit
 Definieren der Vorspannung
 Ausschalten des Betons
 Volles Wirken der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls

+PROG ASE
 KOPF Formfindung
 SYST PROB TH3 PLF 1 NMAT JA

Programmaufruf ASE
 Programmkopf
 Berechnung nach Theorie 3. Ordnung,
 Berücksichtigen von materiellen
 Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
 Primärlastfall 1

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
 GRUP 1 voll
 GRUP 2,3 nein
 GRUP 9 voll
 LF 2 BEZ 'Formfindung FASK = 1 SLS'

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
 Membransteifigkeit wirkt voll
 Ausschalten des Betons
 Volles Wirken der Randlagerung
 Definieren des Lastfalls

ENDE

Texteingabe

+PROG ASE
KOPF
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 2

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1,2,3 voll
GRUP 9 nein
LF 3 BEZ 'Neues Sytem'
ENDE

+PROG ASE
KOPF Koordinaten Update
SYST PLF 3 SPEI ja

ENDE

Erläuterung

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Berechnung nach Theorie 3. Ordnung
Berücksichtigen von materiellen
Nichtlinearitäten, Aufsetzten auf
Primärlastfall 2

Alle Bauteilsteifigkeiten werden aktiviert
Membran und Beton wirkt voll
Ausschalten der Randhalterung
Definieren des Lastfalls

Programmaufruf ASE
Programmkopf
Systemupdate mit Geometrie aus
Primärlastfall 3

Lastfallkombinationen und Berechnung

Texteingabe

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0
SYST PROB LINE NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 4 BEZ 'EG'
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0
SYST PROB LINE NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 5 BEZ 'NL flächig'
LC 902
ENDE

+PROG ASE
KOPF

\$STEU BETO W4 0.0
STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen
STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen
SYST PROB LINE NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 9 nein
LF 6 BEZ 'NL exzentrisch'
LC 903
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll
GRUP 9 nein
LF 7 BEZ 'EG + NL exzentr. + VSP'
LC 903
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0
STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen
STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen
SYST PROB TH3 NMAT JA
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll
GRUP 9 nein
LF 8 BEZ 'EG + NL exzentr.'
LC 903
LC 901
ENDE

+PROG ASE
KOPF
\$STEU BETO W4 0.0
SYST PROB TH3 NMAT JA PLF 3
GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein
GRUP 1 voll
GRUP 9 nein
LF 9 BEZ 'EG + NL flächig + VSP'
LC 902
LC 901
ENDE

+PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 10 BEZ 'EG + NL flächig '

LC 902

LC 901

ENDE

Kombinationen für die Gebrauchstauglichkeit

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 13 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL ex'

LC 903 FAKT 1.5

LC 901 FAKT 1.35

ENDE

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 14 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL ex + VSP'

LC 903 FAKT 1.5

LC 901 FAKT 1.35

ENDE

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 15 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig +VSP'

LC 902 FAKT 1.5
LC 901 FAKT 1.35
ENDE

-PROG ASE

KOPF

\$STEU BETO W4 0.0

STEU WARN 353 \$Überschreitung der max. Druckstauchung zulassen

STEU WARN 350 \$Überschreitung der max. Druckspannung zulassen

SYST PROB TH3 NMAT JA

GRUP - \$ schaltet erst mal alle Gruppen ein

GRUP 9 nein

LF 16 BEZ '1.35 EG + 1.5 NL flächig'

LC 902 FAKT 1.5

LC 901 FAKT 1.35

ENDE