

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

PLANUNG UND HERSTELLUNG EINER FREIGEFORMTEN BETONSCHALE

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Ing. Johann Kollegger, M.Eng.

und

Universitätsassistent Dipl. Ing. Benjamin Kromoser

[E212]

Institut für Tragkonstruktionen – Betonbau

Karlsplatz 13/212

A-1040 Wien

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Markus Waglechner, BSc

0925474

A-3910 Zwettl

Reichers 24

Wien, im Juni 2014

.....

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei meinem Studium und der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern. Ohne ihre Unterstützung, nicht nur in finanzieller Hinsicht, wäre es mir nicht möglich gewesen mein Studium zu absolvieren.

Für die Bereitstellung des interessanten Diplomarbeitsthemas und der Möglichkeit an diesem Projekt teilzunehmen, möchte ich mich sehr herzlich bei o.Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Johann Kollegger bedanken. Viele interessante Diskussionen, nicht nur zum Thema Beton, waren eine Bereicherung meiner Studienzeit.

Weiters möchte ich auch Dipl.-Ing. Benjamin Kromoser für die außerordentlich gute Betreuung während der Diplomarbeit danken. Nicht nur die unzähligen Stunden auf der Baustelle bleiben in Erinnerung, sondern auch viele anregenden Gespräche. Ich bedanke mich auch bei allen anderen Mitarbeitern des Betonbauinstituts, die mich bei meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Natürlich gebührt mein Dank auch all meinen Studienkollegen, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben. Besonders hervorheben möchte ich Christoph Kienast und Stefan Hehenberger, die meinen Weg schon seit der HTL teilen.

Kurzfassung

An der Technischen Universität Wien wurde die „Pneumatic Wedge Method“ entwickelt. Mit dieser Methode ist ein wirtschaftlicher Bau zweifach gekrümmter Schalen möglich. Eine ebene Betonplatte wird mit Hilfe von Luftkissen und Spanngliedern zu einer räumlichen Tragstruktur verkrümmt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Planung und Herstellung einer freigeformten Schale aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“. Nach der Erläuterung bekannter Herstellungsverfahren und der „Pneumatic Wedge Method“ folgt die Planung und Berechnung des Großversuchs. Neben der Bemessung der Versuchsschale wurden mit einem Finite Elemente Programm verschiedene Schalenstrukturen berechnet. Anschließend wird der Bau der Versuchsschale von Beginn bis Fertigstellung genau erläutert. Abschließend beschäftigt sich diese Arbeit mit möglichen Verbesserungen der Methode und der Anwendbarkeit bei größeren Projekten.

Abstract

At the Technical University of Vienna, the "Pneumatic Wedge Method" was developed. An economic construction of double curved shells is possible with this method. A flat concrete slab is bent to a double curved shell structure with the help of air cushions and tendons.

This thesis deals with the design and construction of a free-form shell of concrete using the "Pneumatic Wedge Method". Following a description of possible construction methods, design and structural analysis of a large-scale experiment are discussed. Further shells that can be built with the "Pneumatic Wedge Method" were calculated by using a finite element program. Then, the large scale experiment is discussed in detail. In conclusion, this thesis provides possible improvements of the construction method and a possible application to larger projects.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG..... | 1 |
| 1.1 | Freiformflächen aus Beton..... | 1 |
| 1.2 | Aktuelle Trends | 2 |
| 1.2.1 | Sakralbauten | 3 |
| 1.2.2 | Sonderbauten | 3 |
| 1.3 | Herstellungsverfahren..... | 5 |
| 1.3.1 | Konventionelle Schalung..... | 5 |
| 1.3.2 | Erdhügel | 6 |
| 1.3.3 | Freivorbau | 7 |
| 1.3.4 | Fertigteile | 8 |
| 1.3.5 | Membrane | 9 |
| 1.4 | Herstellungsmethode „Pneumatic Wedge Method“ am Beispiel eines Kugelabschnittes | 12 |
| 2 | PLANUNG UND BERECHNUNG | 20 |
| 2.1 | Vorversuche | 20 |
| 2.1.1 | Biegeversuch an rechteckigen Betonplatten | 20 |
| 2.1.2 | Vorversuche am Pneu | 23 |
| 2.2 | Planung und Bemessung der Versuchsschale | 25 |
| 2.2.1 | Formfindung..... | 25 |
| 2.2.2 | Bewehrungswahl..... | 29 |
| 2.2.3 | Momenten-Krümmungs-Diagramm..... | 29 |
| 2.2.4 | Luftdruck | 35 |
| 2.3 | RFEM-Berechnung..... | 37 |
| 2.3.1 | E-Modul..... | 37 |
| 2.3.2 | Belastung..... | 38 |
| 2.3.3 | Modellierung..... | 38 |
| 2.3.4 | Ergebnisse | 39 |
| 2.4 | Berechnung möglicher Schalenstrukturen..... | 44 |
| 2.4.1 | Halbkugel | 44 |
| 2.4.2 | Kugelabschnitt..... | 48 |
| 2.4.3 | Kugelabschnitt-Variante..... | 52 |
| 2.4.4 | Zylinder | 56 |
| 2.4.5 | Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten | 57 |
| 2.4.6 | Halbellipsoid..... | 61 |
| 2.4.7 | Ellipsoidabschnitt | 66 |
| 2.4.8 | Ellipsoidabschnitt-Variante | 70 |
| 2.4.9 | Paraboloid | 75 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3 | BAU EINER FREIGEFORMTEN SCHALENSTRUKTUR | 79 |
| 3.1 | Arbeitsvorbereitung | 79 |
| 3.1.1 | Schalungsbau | 79 |
| 3.1.2 | Stahlbauteile | 81 |
| 3.1.3 | Pneu | 83 |
| 3.1.4 | Bewehrung | 84 |
| 3.1.5 | Druckluft | 84 |
| 3.2 | Versuchsaufbau | 86 |
| 3.2.1 | Untergrund | 86 |
| 3.2.2 | Pneu | 87 |
| 3.2.3 | Schalung | 88 |
| 3.2.4 | Bewehrung | 88 |
| 3.2.5 | Betonage | 89 |
| 3.2.6 | Querverschubsicherung, Abstandhalter | 91 |
| 3.2.7 | Spannglied | 92 |
| 3.2.8 | Luftschlauch | 93 |
| 3.3 | Versuchsdurchführung | 94 |
| 3.3.1 | Messtechnik | 94 |
| 3.3.2 | Umformungsprozess | 97 |
| 3.3.3 | Abschluss | 100 |
| 3.4 | Auswertung | 101 |
| 3.4.1 | Probewürfel | 101 |
| 3.4.2 | Höhenentwicklung | 102 |
| 3.4.3 | Fugenschluss | 103 |
| 3.4.4 | Optik | 106 |
| 3.5 | Weiterverarbeitung der Schale | 108 |
| 3.5.1 | Schalenerschließung | 108 |
| 3.5.2 | Verfüllung der Fugen | 109 |
| 3.5.3 | Schalenabschnitt | 109 |
| 4 | ABSCHLUSS..... | 111 |
| 4.1 | Verbesserungsvorschläge..... | 111 |
| 4.2 | Empfehlungen für die Anwendung der Methode bei größeren Projekten..... | 111 |
| 4.2.1 | Wildbrücke AM 2 bei Koralmbahn | 112 |
| 4.3 | Zusammenfassung und Ausblick | 115 |
| | LITERATURVERZEICHNIS | 116 |
| | ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... | 117 |
| | TABELLENVERZEICHNIS..... | 121 |
| | ANHANG | 122 |

1 Einleitung

1.1 Freiformflächen aus Beton

Räumlich gekrümmte Flächentragwerke weisen durch ihre Form ein besonders günstiges Tragverhalten auf. Sie verdanken ihre Tragfähigkeit nicht primär der Festigkeit ihres Werkstoffes, sondern dessen räumlicher, dreidimensionaler Anordnung. Bei dünnen Schalen, deren Dicke klein gegenüber der Spannweite ist, kann die Biegung vernachlässigt werden und die Lasten werden primär durch Normalkräfte abgeleitet. In Abbildung 1.1 ist das genannte Tragverhalten am Beispiel einer Kugelschale dargestellt. Diesen Zustand bezeichnet man als Membranspannungszustand. Dieser effektive Lastabtragungsmechanismus hat einen äußerst geringen Materialverbrauch zur Folge. In der Natur finden sich zahlreiche Beispiele für doppelt gekrümmte Schalenträgerwerke wie z.B. Eierschalen, Nussschalen und Schneckenhäuser. Die Schalen haben in den genannten Beispielen sowohl eine tragende als auch eine raumabschließende Funktion.

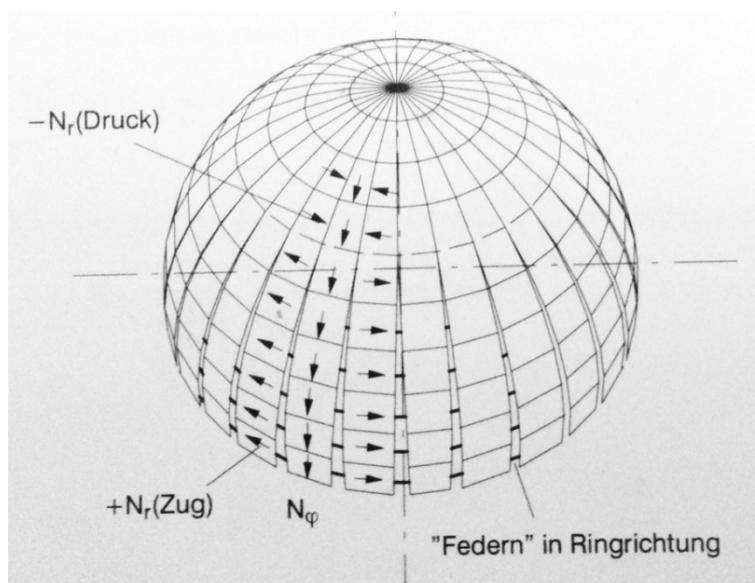


Abbildung 1.1: Tragverhalten einer Kugelschale [2]

Für den Bau von Freiformflächen ist Beton aufgrund seiner Gießfähigkeit ein idealer Baustoff. Nach der Erstarrung des Betons bleibt die Form der Struktur erhalten. Dabei ist man keineswegs auf regelmäßige Formen der Schale (z.B. Kugelkalotte) angewiesen, sondern kann sie je nach Funktion, Stützung oder gestalterischen Absichten frei formen.

1.2 Aktuelle Trends

Freigeformte Betonflächen sind ein wichtiger Bestandteil der modernen Architektur. Sie werden aufgrund ihrer Ästhetik und hohen Tragfähigkeit eingesetzt.

Die Herstellung der Schalungs- und Rüstungskonstruktion für Beton ist aufwendig und arbeitsintensiv. Daher wird in Ländern mit hohen Lohnkosten wie etwa in Mitteleuropa der Bau zunehmend unwirtschaftlich. Aus diesem Grund werden solche Bauwerke nur mehr selten realisiert. Es kommen stattdessen Gitterschalen aus Holz oder Stahl zum Einsatz. In der modernen Architektur werden diese Gitterschalen auch gerne mit dem Werkstoff Glas kombiniert. In Abbildung 1.2 ist ein Beispiel für eine Holzkonstruktion angeführt.



Abbildung 1.2: Messehalle Freistadt

Um diesem Trend entgegenzuwirken gibt es diverse innovative Forschungsvorhaben im Bereich des Betonschalensbaus. Besonderer Fokus liegt auf der Entwicklung neuer wirtschaftlicher Herstellungsmethoden. Bei den Schalenformen wird der Schwerpunkt auf jene gesetzt, die mit geraden Brettern geschalt werden können.

Stahlbetonschalen können dank der großen Anzahl an Gestaltungsmöglichkeiten vielseitig eingesetzt werden. Zum Beispiel für Sakralbauten, Verkehrsbauten, öffentliche Bauten wie Versammlungs- und Sportstätten, Lagerstätten und Sonderbauten jeglicher Art.

1.2.1 Sakralbauten

In Sakralbauten kommen schon seit Beginn des Schalenbaus, unabhängig welche Religion, zweifach gekrümmte Schalen zur Anwendung. Exemplarisch dafür steht folgende Moschee, die 2009 in Deutschland errichtet wurde:

Moschee Köln-Ehrenfeld: Diese Moschee wurde vom Jahr 2009 bis 2011 in Köln gebaut. Die Kuppeln wurden in einem Freivorbauverfahren in Sichtbetonqualität hergestellt. Der Durchmesser der Innenkuppel beträgt 26 m. Die Wand und die darauf aufsetzenden einzelnen Kuppelschalen verjüngen sich von max. 1,0 m auf 0,4 m Dicke an der Spitze. Damit wird in Bereichen großer Lasten die Steifigkeit erhöht und in großer Gebäudehöhe das Eigengewicht reduziert. Um speziell im oberen Bereich der Schale, der durch die Fassadenelemente stark eingeschnitten ist, ausreichende Kuppeltragwirkung zu erzielen, ist dort der Einsatz einer Stahlkonstruktion notwendig. In Abbildung 1.3 ist die Moschee in Köln-Ehrenfeld im Bauzustand (links) und im fertiggestellten Endzustand (rechts) zu sehen.



Abbildung 1.3: Moschee Köln-Ehrenfeld [3]

1.2.2 Sonderbauten

Speziell für Bauten mit besonderen Erfordernissen werden Schalenkonstruktionen verwendet. Hierbei kann es sich etwa um hohe Stabilitäts- und Sicherheitsansprüche für Reaktorabdeckungen oder kleine Querschnitte zur optimalen Raumausnutzung handeln. Auch zur Erfüllung rein ästhetisch-künstlerischer Ansprüche werden immer wieder mehrfach gekrümmte Betonschalen verwendet. Nachfolgend findet sich eine kleine Auswahl solcher Sonderbauten:

Einkaufszentrum Il diamante [4]:

Bei diesem Einkaufszentrum (Abbildung 1.4) handelt es sich um eine Schale in der Form eines Ellipsoids. Die Hauptabmessungen des Bauwerks betragen

93 m Länge, 52 m Breite und 22 m Höhe. Die Schalendicke wurde mit 100-120 mm gewählt. Diese Stärke resultiert aus dem Herstellungsverfahren mit Spritzbeton und wird zum Erlangen einer ausreichenden Beulsicherheit benötigt. Mit dieser geringen Dicken der Schale ist eine Maximierung des nutzbaren Gebäudevolumens möglich.

Zusätzlich zur radial und tangential verlegten Bewehrung kamen auch 35 in Ringrichtung angeordnete Spannkabel zum Einsatz. Im Fußbereich sind zur Aufnahme der auftretenden Querkkräfte Kopfbolzendübel angeordnet.

Die Betonage erfolgte im oberen Bereich mittels konventionellem Betongießverfahren. Die vertikalen Bereiche wurden mit Spritzbeton hergestellt. Zur Erhöhung der Duktilität und Verbesserung des Rissverhaltens wurden dem Beton 30 kg/m³ Stahlfasern beigemischt.



Abbildung 1.4: Einkaufszentrum II diamante

Zementlager:

Besonders in Nordamerika werden für den Bau von Lagern jeglicher Art gerne Kuppeln verwendet. Diese Zementlager haben Durchmesser in der Größenordnung von etwa 30 m und können 40.000 t Zement einlagern. Durch die hohe Stabilität werden diese Lager in Tornado- und Erdbebengebieten eingesetzt.

Der Bau dieser Kuppeln kann auf verschiedene Arten erfolgen. Oft wird dafür eine Membran verwendet. Nach dem Aufblasen wird eine Schicht Polyurethan aufgebracht. Auf diese kommt dann abschließend eine Schicht Spritzbeton.



Abbildung 1.5: Zementwerk in Ontario, Kanada

1.3 Herstellungsverfahren

Der Bau von Schalen kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Jedes dieser Herstellungsverfahren besitzt Vor- und Nachteile. Daher ist es notwendig bestehende Systeme zu verbessern und neue innovative Verfahren zu entwickeln. Aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten besteht bei der folgenden Aufzählung gängiger Herstellungsverfahren kein Anspruch auf Vollständigkeit.

1.3.1 Konventionelle Schalung

Die Herstellung einer konventionellen Schalungs- und Rüstungskonstruktion ist aufwendig und kostenintensiv. Nicht nur die Herstellung der Unterkonstruktion ist kompliziert, auch die Berechnung und Planung dieser Hilfskonstruktion erfordert erhebliche Überlegungen und genaue Betrachtung. Das hier Beschriebene ist gut anhand Abbildung 1.6 ersichtlich. Dieser Schalungsunterbau wird nach Erhärten des Betons wieder entfernt und kann meist nicht wiederverwendet werden. Daraus ergibt sich ein hoher Ressourcenverbrauch.



Abbildung 1.6: Schalung Einkaufszentrum Il diamante

Daher ist eine Wiederverwendung der Schalung anzustreben. Ein Beispiel dafür sind Tennishallen, die von Heinz Isler Ende der siebziger Jahre entwickelt wurden. Jedes Tennisfeld wurde von einer Schale überdeckt. Durch Mehrfachnutzung und Versetzen der komplizierten Schalung konnte ein wirtschaftlicher Bau erfolgen [2].

Bei Anwendung dieses Herstellungsverfahrens ist zuerst der Bau einer Unterkonstruktion mittels Rohrgerüst notwendig. Darauf kommt eine Holzkonstruktion, die die gewünschte Form der Freiformfläche exakt abbildet. Diese Unterkonstruktion wird beplankt und bildet die Schalhaut. Danach erfolgt die Verlegung der erforderlichen Bewehrung. Abschließend kann die Betonage der Schale mit einem geeigneten Betonierverfahren erfolgen. Nach Erhärtung des Betons erfolgt die Demontage der Schalungskonstruktion und der reine Betonkörper bleibt zurück.

1.3.2 Erdhügel

Bei diesem Verfahren ersetzt eine Anschüttung Rüstung und Schalung. Der Erdhügel wird entsprechend geformt bis er der Gestalt der gewünschten Schale entspricht. Nach dem Betonieren wird die Erde ausgebaggert und die Schale somit freigelegt [2].

Bei dieser Herstellung kommt es bei großen Volumina zu immensen Kosten im Bereich des Erdbaus und hohem Ressourcenverbrauch. Daher kommt dieses Bauverfahren nur in Frage, wenn sich am Standort schon ein geeigneter Erdhügel befindet. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Methode ist die Stadthalle von Albuquerque (Abbildung 1.7).



Abbildung 1.7: Bau der Stadthalle Albuquerque [2]

1.3.3 Freivorbau

Der Freivorbau als Baumethode ist allgemein aus dem Brückenbau bekannt. Dabei wird am frei auskragenden Ende der jeweils folgende Bauabschnitt angefügt. Dieses System wird auch für den Kuppelbau verwendet.

Wie Heene in [5] berichtet, ist bereits das Pantheon in Rom in den Jahren 115 bis 126 n. Chr. auf diese Art erbaut worden. Das Hauptgebäude des Pantheons ist ein überwölbter Rundbau mit ca. 43,3 m Innendurchmesser. Um das Gewicht zu verringern wurde der Beton der Kuppel mit leichtem, vulkanischem Tuff- und Bimsstein vermischt. Bis 1913 war das Pantheon die größte Massivkuppel der Welt. In Abbildung 1.8 ist in der rechten Grafik die „vierbeinige Spinne“ zu erkennen, die einen Teil des Freivorbaues bildete.

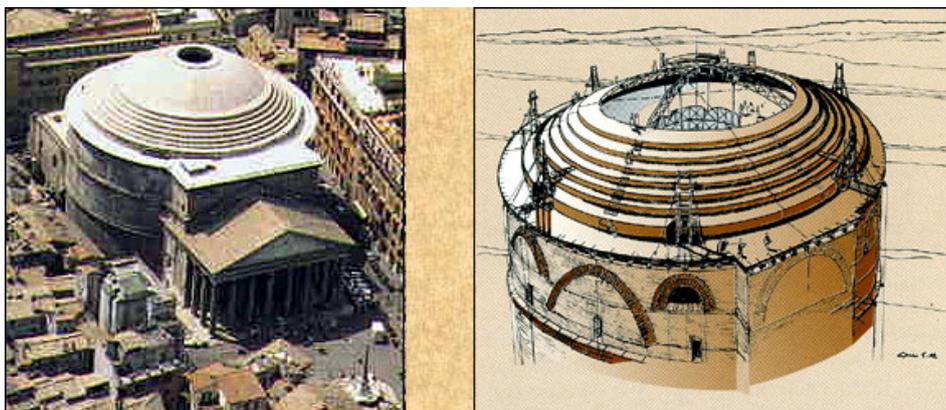


Abbildung 1.8: Pantheon in Rom [5]

Ein Beispiel für eine aktuell ausgeführte Konstruktion ist die bereits erwähnte Moschee Köln-Ehrenfeld, die in Abbildung 1.3 zu sehen ist. Hier wurde zur Realisierung des Baus mit dreidimensional gewölbten Sonderschalungen der Fa. DOKA gearbeitet.

1.3.4 Fertigteile

Eine weitere Möglichkeit Stahlbetonschalen herzustellen ist der Einsatz von Fertigteilen. Diese werden im Werk vorgefertigt, anschließend auf die Baustelle gebracht, entsprechend versetzt und die Fugen vergossen. Um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu gewährleisten ist es essentiell, dass Schalungen mehrmals verwendet werden können. Im Speziellen ist auf die Faktoren Transport und Versetzbarkeit auf der Baustelle zu achten. Durch die Größe und das hohe Gewicht der einzelnen Fertigteile ergeben sich damit Grenzen für deren Einsatz.

Ein Beispiel für die Verwendung von Fertigteilen bei der Herstellung von Stahlbetonschalen ist die Merkez-Moschee in Duisburg. Diese wurde 2007 errichtet. Hier kamen insgesamt 70 Fertigteile in Form von Tortenstücken mit einem Radius von 13,2 m zum Einsatz. Sämtliche Einzelteile wurden auf der Baustelle mittels Autokran versetzt. In Abbildung 1.9 ist links die Montage der Fertigteile zu sehen und rechts der Endzustand nach Einbau sämtlicher Einzelteile.



Abbildung 1.9: Merkez-Moschee, Duisburg [6]

1.3.5 Membrane

Seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts werden Schalen auf pneumatisch gestützten Schalungen gebaut. Dünne, zugfeste Membrane werden so zugeschnitten, dass sie, wenn sie wie Luftballone aufgeblasen werden, die gewünschte Form annehmen [2]. Dieser Ballon wird durch den innen herrschenden Überdruck stabilisiert. Die Aufbringung des Materials erfolgt üblicherweise von außen (Abbildung 1.10).

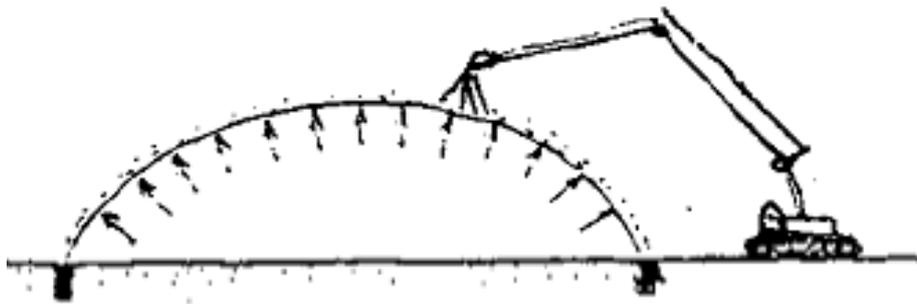


Abbildung 1.10: pneumatischem Schalungssystem, Betonaufbringung von außen [7]

Man kann eine solche Schalungsmembran auch als Haut zur Wasserdichtigkeit permanent auf der Schale lassen. Dann wird der Beton von innen gegen die aufgeblasene Schalhaut gespritzt. Zuvor wird die Haut mit einem versteifenden Kunststoffschaum bespritzt, an dem dann auch die Bewehrung leicht befestigt werden kann [2]. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 1.11 zu sehen.

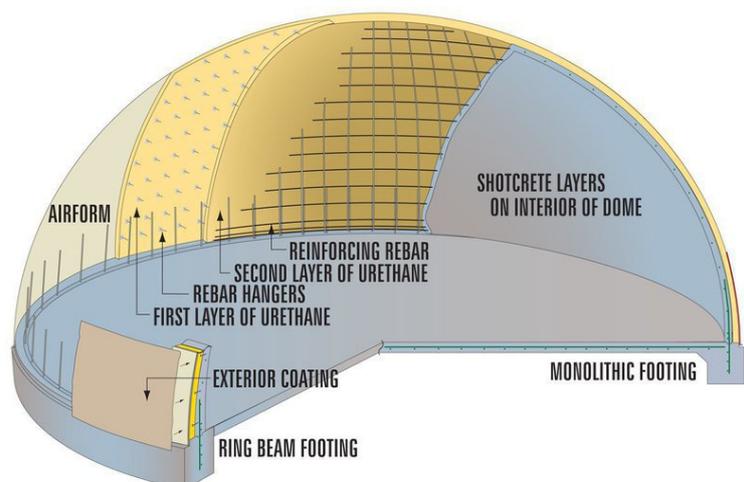


Abbildung 1.11: pneumatisches Schalungssystem, Betonaufbringung von innen [8]

Ein besonders raffiniertes Verfahren wurde 1965 vom Italiener Dante Bini entwickelt: Die zugeschnittene Membran wird am Rand eingeklemmt, eben auf den Boden ausgelegt und darauf die Bewehrung, versehen mit ausziehbaren Stößen, verlegt und der Beton geschüttet – alles ganz einfach in der Horizontalen. Darauf wird eine zweite Membran verlegt und auch am Rand befestigt. Jetzt wird die untere Membran aufgeblasen und das Ganze angehoben. Die Außenmembran verhindert das Abrutschen des Betons während des Aufblasens, ermöglicht eine Verdichtung des Betons mit Außenrüttlern und bleibt dann als Witterungsschutz darauf liegen. Der Vorteil des Verfahrens ist der Entfall des Betonierens auf geneigten Flächen. Türen werden nachträglich einfach herausgeschnitten. Über 500 Schalen wurden weltweit mit diesem Verfahren hergestellt [2] Der Aufstellvorgang ist in 4 Schritten aus Abbildung 1.12 ersichtlich.

Die Herstellung von Schalen mittels Membran bringt aber auch einige Probleme mit sich. Zum einen ist die Nachgiebigkeit des Pneus bei der Betonage ein Problem. Um die gewünschte Form bis zur Erhärtung des Betons zu erhalten, müssen Kompensationsmaßnahmen ergriffen werden, beispielsweise die massive Erhöhung des Innendrucks. Zum anderen will der Pneu von sich aus eine möglichst runde Gestalt annehmen. Um dies zu verhindern, muss die Einhaltung der gewünschten Form mittels Verankerungen am Boden erzwungen werden. Aufgrund der Probleme in Bezug auf Formgebung und Formtreue hat sich der Bau von Schalen mit Hilfe von pneumatischen Schalungen nicht durchgesetzt.

a)



b)



c)



d)



Abbildung 1.12: Entstehung einer Binishell [2]: a) Verlegung der Bewehrung b) Betoniervorgang c) Aufstellvorgang d) Endzustand

1.4 Herstellungsmethode „Pneumatic Wedge Method“ am Beispiel eines Kugelabschnittes

Die „Pneumatic Wedge Method“ wurde in den letzten Jahren am Institut für Tragkonstruktionen Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau der TU Wien entwickelt. Das Verfahren funktioniert nach dem Grundprinzip flache, in der Ebene betonierete Platten mittels Hebe- und Spannvorrichtungen in doppelt gekrümmte Schalen zu transformieren [9].



Abbildung 1.13: Umformungsprozess von einer ebenen Betonplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale [1]

Die neu entwickelte Baumethode ermöglicht die Herstellung einer freigeformten, mehrfach gekrümmten Schale aus einer ebenen Ausgangslage. Die ebene Platte in der Ausgangsform muss so beschaffen sein, dass die Stauchungen, die beim Übergang einer ebenen in eine doppelt gekrümmte Form auftreten, aufgenommen werden können [10]. Dazu wird die Zielform, eine Fläche mit positiver Gaußschen Krümmung, in abwickelbare und leicht biegbare Segmente zerteilt. Zwischen den Segmenten sind in der Ausgangslage keilförmige Stauchungsfugen vorhanden. Wie in Abbildung 1.13 zu sehen, schließen sich beim Aufstellvorgang die Fugen und es entsteht die gewollte Zielform. Durch dieses Verfahren sind arbeits- und materialintensive Hilfskonstruktionen (Lehrgerüste) nicht mehr notwendig.

Zum Umformen der Betonplatte benötigt man ein Luftkissen unter der Betonplatte und Spannritzen ohne Verbund, die entlang des Umfangs angeordnet sind. Das Funktionsprinzip ist in der Systemskizze der Abbildung 1.14 ersichtlich. Durch Aufblasen des Hebepeus wird das Eigengewicht der Betonplatte ausgeglichen und die Betonplatte beginnt sich in der Mitte zu heben. Zugleich verkürzt sich der Umfang der Platte und die Spannglieder werden dementsprechend nachgestrafft. Durch die Vorverformung und den Luftdruck des Luftkissens wird verhindert, dass die Betonplatte während des Spannens der Spannritzen lokal ausbeult. Gleichzeitig mit dieser Umfangsverkleinerung wölbt sich die Platte auf und formt sich schließlich von einer ebenen Platte zu einer zweifach gekrümmten Schale.

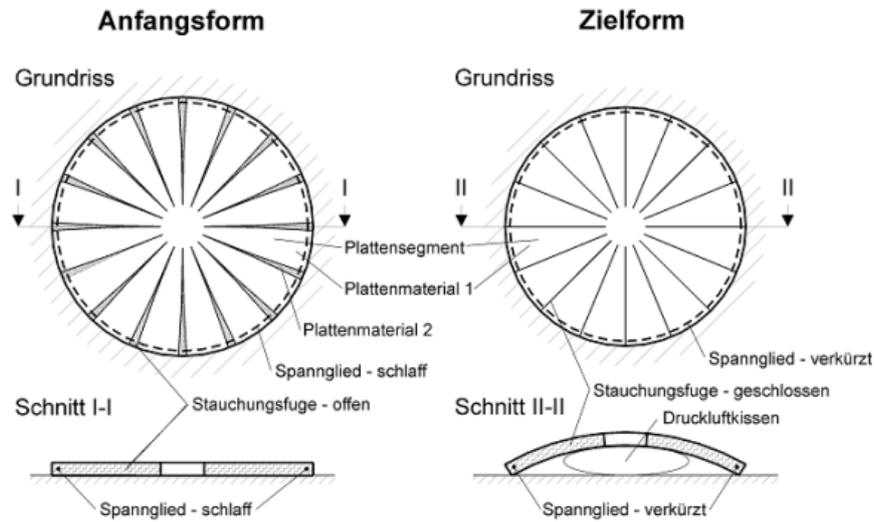


Abbildung 1.14: Systemskizze [10]

In den keilförmigen Aussparungen zwischen den Segmenten werden pneumatische Keile angeordnet, die eine Kraftübertragung ermöglichen. Diese Pneu bilden eine Verbindung zwischen den Betonsegmenten und sind mit Hilfe von Kederschiene im Beton verankert. Wenn beim Aufstellen die Spannung in Ringrichtung zunimmt und gleichzeitig der unter der Schale befindliche Pneu aufgeblasen wird, werden die keilförmigen Pneu zusammengedrückt. Da in den pneumatischen Keilen ständiger Überdruck herrscht, besteht während des Umformungsprozesses kein Stabilitätsproblem. In Abbildung 1.15 kann man erkennen wie der keilförmige Pneu mittels Kederschiene eingebaut ist und sich während der einzelnen Herstellungsstufen verhält.

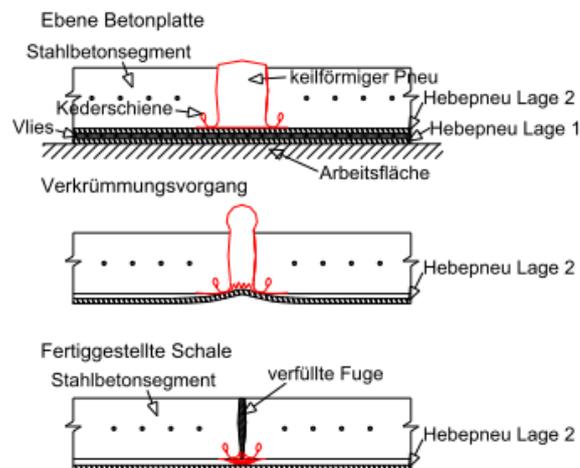


Abbildung 1.15: Schnitt durch Pneu und Stahlbetonsegmente [1]

Nach vollständiger Umformung werden die Spannlitzen verkeilt und die Schale ist damit in ihrer Lage gesichert. Die geplanten Fugen zwischen den Segmenten werden im Anschluss mit aushärtendem Vergussmaterial verfüllt.

Nachfolgend wird diese Herstellungsmethode der „Pneumatic Wedge Method“ bei einem Kugelabschnitt anhand der einzelnen Arbeitsschritte nochmals erläutert [1][11]:

1) Erstellung eines ebenen Unterbauplanums

Für die Herstellung einer Schale mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist ein ebenes Unterbauplanum erforderlich. Die Oberfläche hat glatt zu sein, um einen möglichst reibungsfreien Umformungsprozess zu gewährleisten.



Abbildung 1.16: Unterbauplanum

2) Herstellen der keilförmigen Schalungselemente sowie der Randabschalung

Die keilförmigen Aussparungen der Betonplatte werden mit Hilfe speziell gefertigter Abschaltungen hergestellt. Die Randabschalung dient zusätzlich als Widerlager zum Vorspannen der Stahlseile.



Abbildung 1.17: keilförmige Abschalelemente

3) Auflegen des „Hebepneus“

Auflegen des Hebepneus auf den Untergrund und Glattziehen der Falten.

4) Auflegen der keilförmigen Pneus

Radiales Auflegen der keilförmigen Pneus auf dem Hebepneus auf einem Flächenanteil der Grundfläche, der etwa der Differenz zwischen der Grundfläche und der Oberfläche der Schale entspricht. Um die pneumatischen Keile im Beton zu verankern wird ein System angewandt, das auch zum Spannen von Membranen verwendet wird. Der Keder wird mit der Kederfahne am pneumatischen Keil angenäht und die Kederschiene in der Schalung positioniert und anschließend einbetoniert.



Abbildung 1.18: Auflage keilförmiger Pneus und Abschalelemente

5) Positionieren der Schalungselemente auf Hebepneus und keilförmigen Pneus

Zur Abschalung der Betonsegmente werden die Schalungselemente auf den Pneus positioniert und miteinander verschraubt.

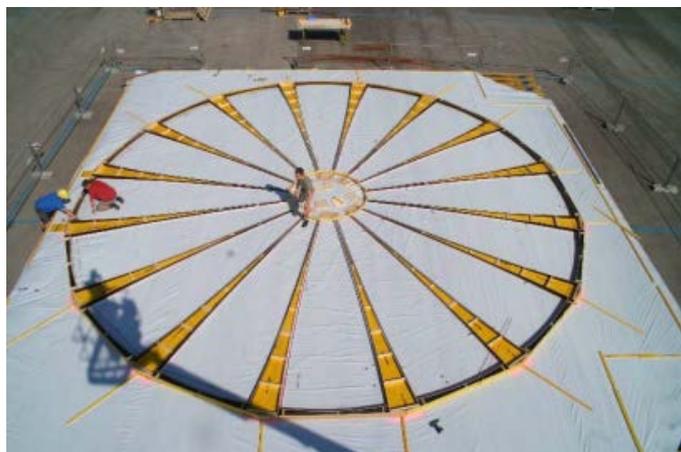


Abbildung 1.19: Schalung für die ebene Betonplatte

6) Verlegen und Vorspannen der Bewehrungsstahlseile

Die Stahlseile werden zwischen Gegenspannring in der Mitte und der ringförmigen Abschalung am Außenrand eingebaut und vorgespannt.



Abbildung 1.20: Gegenspannring und Bewehrung in Plattenmitte

7) Verlegen der Querbewehrung

Als konstruktive Bewehrung werden in Radialrichtung, normal zu den Stahlseilen, konventionelle Bewehrungsstäbe eingebaut.

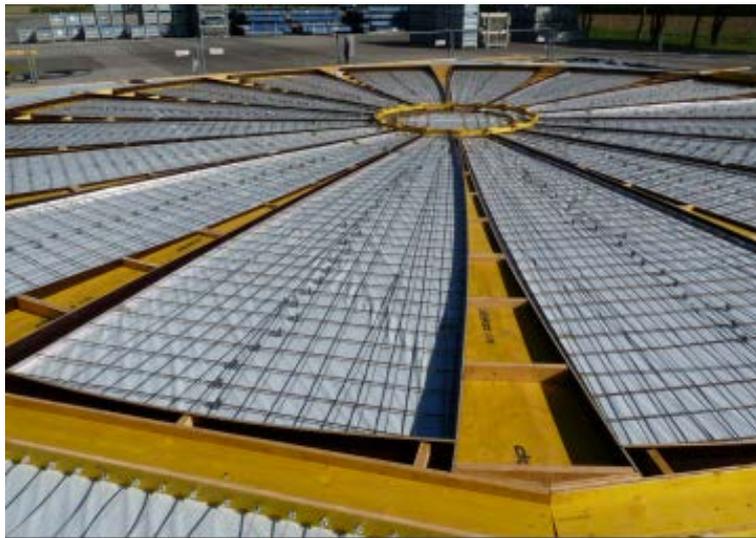


Abbildung 1.21: Bewehrung nach abgeschlossener Verlegung

8) Betonage der ebenen Betonplatte

Nach Fertigstellung der Schalungs- und Bewehrungsarbeiten wird die Platte betoniert und gerüttelt.



Abbildung 1.22: Betonplatte nach Betonage

9) Entfernung der Abschalung

Nach Aushärten des Betons werden die Abschalelemente entfernt. Dabei ist besondere Vorsicht geboten um die Pneus nicht kaputt zu machen und Leckagen zu vermeiden.



Abbildung 1.23: Betonsegment mit Abstandhalter

10) Anordnung Spannglied

Anordnen zumindest eines flexiblen Zugglieds, das verschieblich gegenüber den Schalensegmenten ausgebildet ist, in Umfangsrichtung am äußeren Rand der Grundfläche.

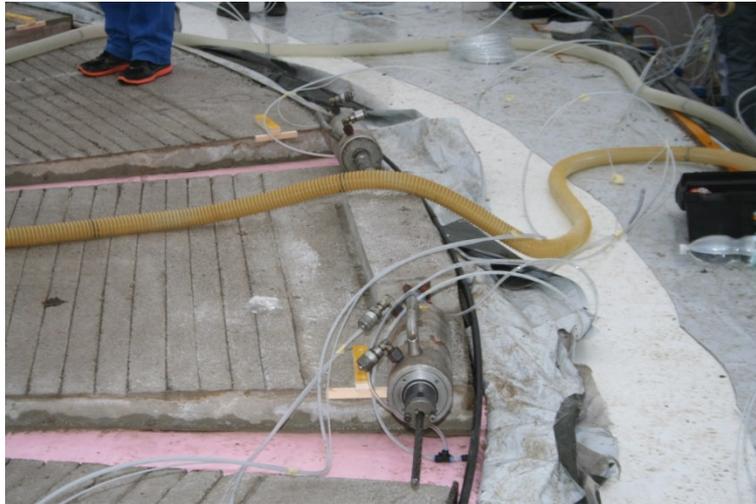


Abbildung 1.24: Anordnung von Spannglied und Spannvorrichtung

11) Anbringung Luftschräuche

Verlegung Luftschräuche von den keilförmigen Pneus zur Ventilinsel und vom Hebepleneu zu den Seitenkanalverdichtern.



Abbildung 1.25: Anbringen der Luftschräuche

12) Aufblasen des Hebenpneus und keilförmigen Pneus

Durch Einblasen von Luft in den Hebenpneu beginnt ein Anheben und Verkrümmung der Schalensegmente. Der Luftdruck in den keilförmigen Pneus wird so eingestellt, dass ein gleichmäßiges Schließen der Fugen während des Formgebungsprozesses erreicht wird.



Abbildung 1.26: Betonschale im Umformungsprozess

13) Spannen der Vorspannlitzen

Während der Umformung werden die Spannglieder gespannt und bringen radial Kraft auf die Betonplatte auf. An die Umfangsverkleinerung der Schale werden die Spannglieder durch entsprechendes Nachstraffen angepasst. Nach Abschluss des Umformungsprozesses werden die Spannilitzen verkeilt.



Abbildung 1.27: Hydraulischer Vorspannzylinder

14) Verfüllen der Fugen

Verfüllen der Fugen zwischen den Schalensegmenten mit einem aushärtenden Vergussmaterial.

2 Planung und Berechnung

2.1 Vorversuche

2.1.1 Biegeversuch an rechteckigen Betonplatten

Da die einzelnen Betonelemente während des Herstellungsvorganges sehr stark verkrümmt werden, muss eine Beton- Bewehrungskombination eingesetzt werden, die diese Krümmungen aufnehmen kann. Im Zuge der Voruntersuchungen wurden am Institut für Tragkonstruktionen im Rahmen des FFG-Projektes „Freiformflächen aus Beton“ 4-Punkt-Biegeversuche an unterschiedlich bewehrten rechteckigen Betonplatten durchgeführt. Hier wird nur die maßgebende Beton- Bewehrungskombination angegeben, die auch im Großversuch verwendet wurde.

Die Abmessung der Betonplatten beträgt 2500x500x50 mm. Es wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C40/50 mit einem E-Modul von 35000 N/mm² verwendet. Bewehrt sind diese Platten mit einer Stahlseilbewehrung. Pro Element sind 5 Stahlseile mit einem inneren Hebelarm von 40 mm angeordnet. In Tabelle 2.1 sind die Eckdaten der Betonplatten nochmals zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Materialdaten Betonplatte

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Länge: | 2500 mm |
| Breite: | 500 mm |
| Dicke: | 50 mm |
| Druckfestigkeitsklasse: | C40/50 |
| E-Modul: | 35000 N/mm ² |
| Anzahl Stahlseile: | 5 |
| Bewehrungsfläche Stahlseile: | 52,25 mm ² |
| Innerer Hebelarm d: | 40 mm |

Es wurden Edelstahl Drahtseile 7x19 mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Seilfestigkeit von 1570 N/mm² verwendet. Diese garantieren eine gleichmäßige Dehnungsaufnahme und ermöglichen große Krümmungen der Betonplatte, ohne die Entstehung von örtlich großen Rissen. Der innere Hebelarm der Stahlseilbewehrung beträgt 40 mm.



Abbildung 2.1: Edelstahl Drahtseile 7x19

Die technischen Daten der Stahlseile sind in Tabelle 2.2 angeführt:

Tabelle 2.2: Materialdaten Stahlseile

| | |
|--|-------------------------|
| Seiltyp: | 7x19 |
| Seilfestigkeitsklasse R_r : | 1570 N/mm ² |
| Füllfaktor f : | 0,532 |
| Seilnennendurchmesser d : | 5,0 mm |
| metallischer Querschnitt A : | 10,45 mm ² |
| Faktor für die Mindestbruchkraft K : | 0,362 |
| Mindestbruchkraft F_{\min} : | 14,21 kN |
| Rechnerische Bruchkraft $F_{e,\min}$: | 16,41 kN |
| Bewehrungsfläche je Stahlseil: | 10,45 mm ² |
| E-Modul: | 85120 N/mm ² |

Das Kraft-Durchbiegung-Diagramm in Abbildung 2.2 zeigt die Durchbiegung in Feldmitte. Man kann daran schön die einzelnen Bereiche erkennen. Zuerst der linear elastische Bereich, gefolgt vom Bereich mit Rissbildung. Danach weitere Laststeigerung, die zum Dehnen der Bewehrung führt. Abschließend wird mit der Entlastung der Versuch abgeschlossen.

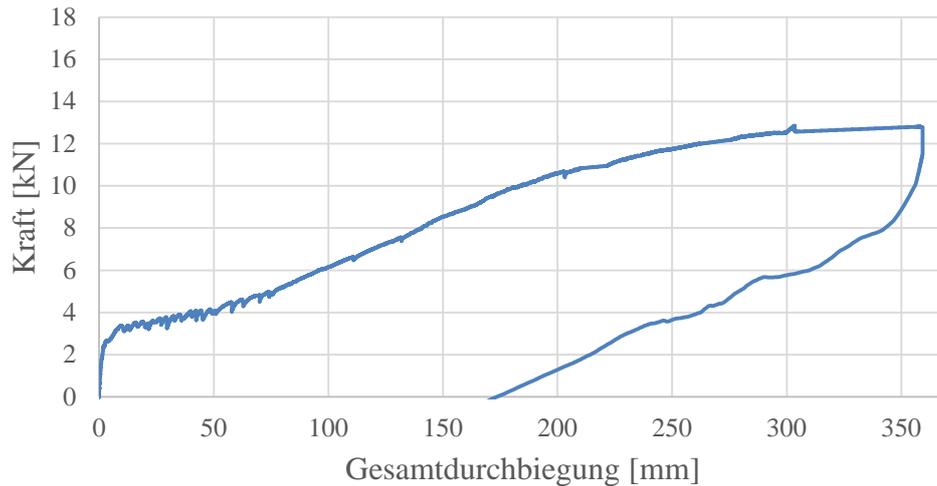


Abbildung 2.2: Kraft-Durchbiegung-Diagramm [16]

Das Ziel der in [1] beschriebenen Vorversuche war festzustellen, wie groß die Krümmung eines Elementes werden kann, bevor ein Versagen der Betondruckzone, ein Versagen der Bewehrung oder ein Verbundversagen auftritt. Aufgrund der gleichmäßigeren Dehnungsaufnahme wiesen die mit Stahlseilen bewehrten Elemente wesentlich höhere Durchbiegungen und somit auch größere Krümmungen auf. Das aussagekräftige Momenten-Krümmungsdiagramm ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

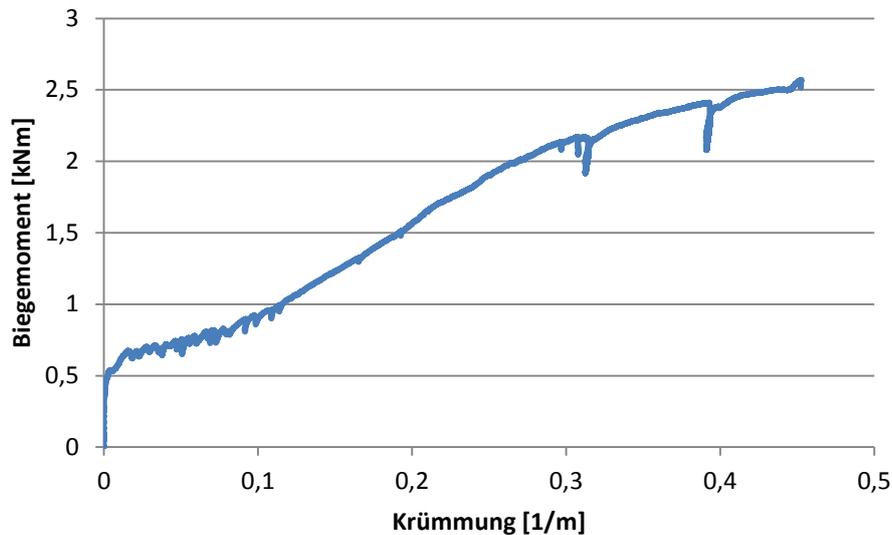


Abbildung 2.3: M-κ-Diagramm [16]

Die Bestimmung der Krümmung ist über den Krümmungsradius möglich. Den Krümmungsradius selbst erhält man aus den Versuchsdaten mit der Formel für ein Kreissegment [14]:

$$\kappa = \frac{1}{r} \quad (2-1)$$

$$r = \frac{4h^2 + s^2}{8h} \quad (2-2)$$

κ Krümmung

r Radius

h Segmenthöhe

s Kreissehne

2.1.2 Vorversuche am Pneu

Im Vorfeld der Planung fanden Belastungsversuche mit verschiedenen Pneumaterialien (Tabelle 2.3) statt. Es wurden quadratische Luftkissen mit einer Seitenlänge von 400 mm getestet (Abbildung 2.4). Die Folienlagen wurden miteinander vernäht und verschweißt. Über ein Ventil wurde Druckluft eingeblasen. Der Druck wurde so lange erhöht bis es zum Versagen des Luftkissens kam.



Abbildung 2.4: Luftkissen bei Belastungstest

Es wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Tabelle 2.3: Ergebnisse Vorversuch Pneu

| Material | Druck | Versagensart |
|------------------|----------|-------------------------------------|
| Sattlerplane | 80 mbar | Versagen der Klebung |
| Complan Plane | 170 mbar | Versagen der Klebung |
| Riverseal 200 | 640 mbar | Materialversagen beim Schweißansatz |

Beim Großversuch wurde das Material Riverseal 200 von Rivertext verwendet.

Zur Berechnung der erreichten Zugkraft im Pneu kann die Kesselformel in Gleichung (2-3) verwendet werden.

$$\sigma_t = \frac{p \cdot d}{2 \cdot s} \quad (2-3)$$

σ_t Tangentialspannung

p Innendruck

d Innendurchmesser

s Wandstärke

Bei einem erreichten Innendruck von 640 mbar und einem Durchmesser von 300 mm erhält man mit der Kesselformel folgende vorhandene Zugkraft:

$$F_t = \frac{p \cdot d}{2} = \frac{64 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,3\text{m}}{2} = 9,6 \text{ kN/m} \quad (2-4)$$

F_t Zugkraft in Tangentialrichtung

2.2 Planung und Bemessung der Versuchsschale

2.2.1 Formfindung

In der Vergangenheit wurde bereits die Anwendbarkeit der „Pneumatic Wedge Method“ zur Herstellung von Freiformflächen aus Beton vom Betonbauinstitut der TU Wien erfolgreich erprobt. Die Form dieser Schalen beschränkte sich bis jetzt jedoch auf Kugelabschnitte. Als nächster Schritt der Forschung erfolgt die Anwendung der Baumethode bei anderen Formen von zweifach gekrümmten Flächen.

Die Form des neuen Großversuchs ähnelt der eines Ellipsoidabschnitts. Die verwendete Basiskurve ist jedoch keine Ellipse, sondern eine in ein Rechteck eingeschriebene Bézierkurve dritten Grades mit den Kontrollpunkten an den End- und Mittelpunkten der vier Seiten. Die Schnittkurven längs und quer sind ebenfalls Bézierkurven, die in einem gleichschenkligen Trapez, dessen seitliche Schenkel jeweils im 65° Winkel zur Grundseite stehen (Abbildung 2.5). Die Basiskurve ist somit im Vergleich zur Ellipse zu den Enden hin runder und weist bei annähernd gleicher Proportion eine geringere Krümmungsspitze an den Enden auf. Der 65° Grad-Winkel wurde deswegen gewählt, da er steil genug ist, um zu gewährleisten, dass der entstehende Raum auch bis in die Randzonen nutzbar ist. Die Formfindung ist in [9] genau erläutert.

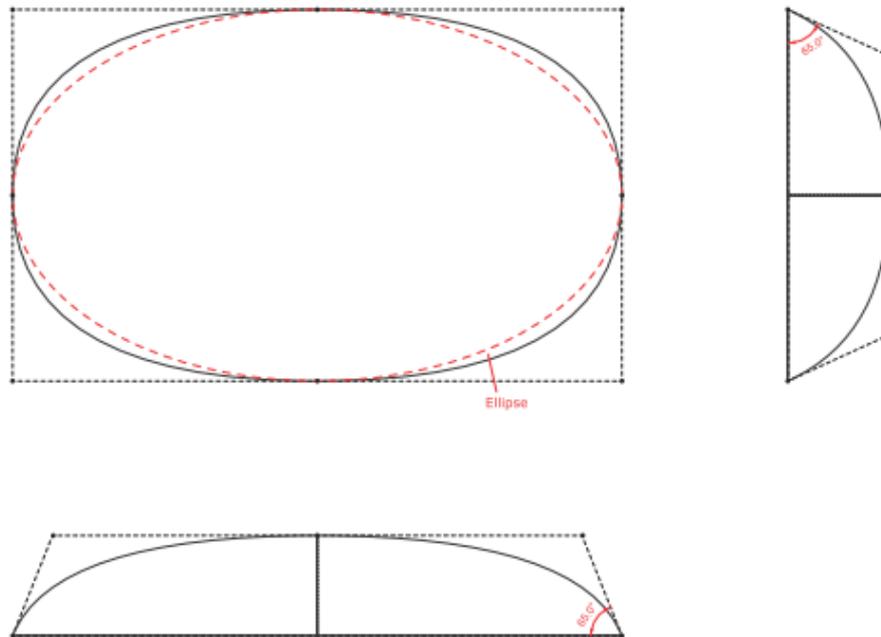


Abbildung 2.5: Grundform Großversuch [9]

Für die Herstellung dieser Schale mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist eine Segmentierung erforderlich. Dafür wurde die Zerteilung der Schale in eine verbindende längliche Platte im Zentrum und 24 Segmente, die rundum laufen, gewählt. Damit kann gewährleistet werden, dass die keilförmigen Aussparungen im Randbereich nicht zu groß werden und die damit verbundenen Verzerrungen im Rahmen bleiben. Die Segmentbreite außen beträgt rund 1,9 m. Der Abstand der Keile außen bewegt sich zwischen 250 und 350 mm. In Abbildung 2.6 ist die geplante Segmentierung der Schale zu erkennen.

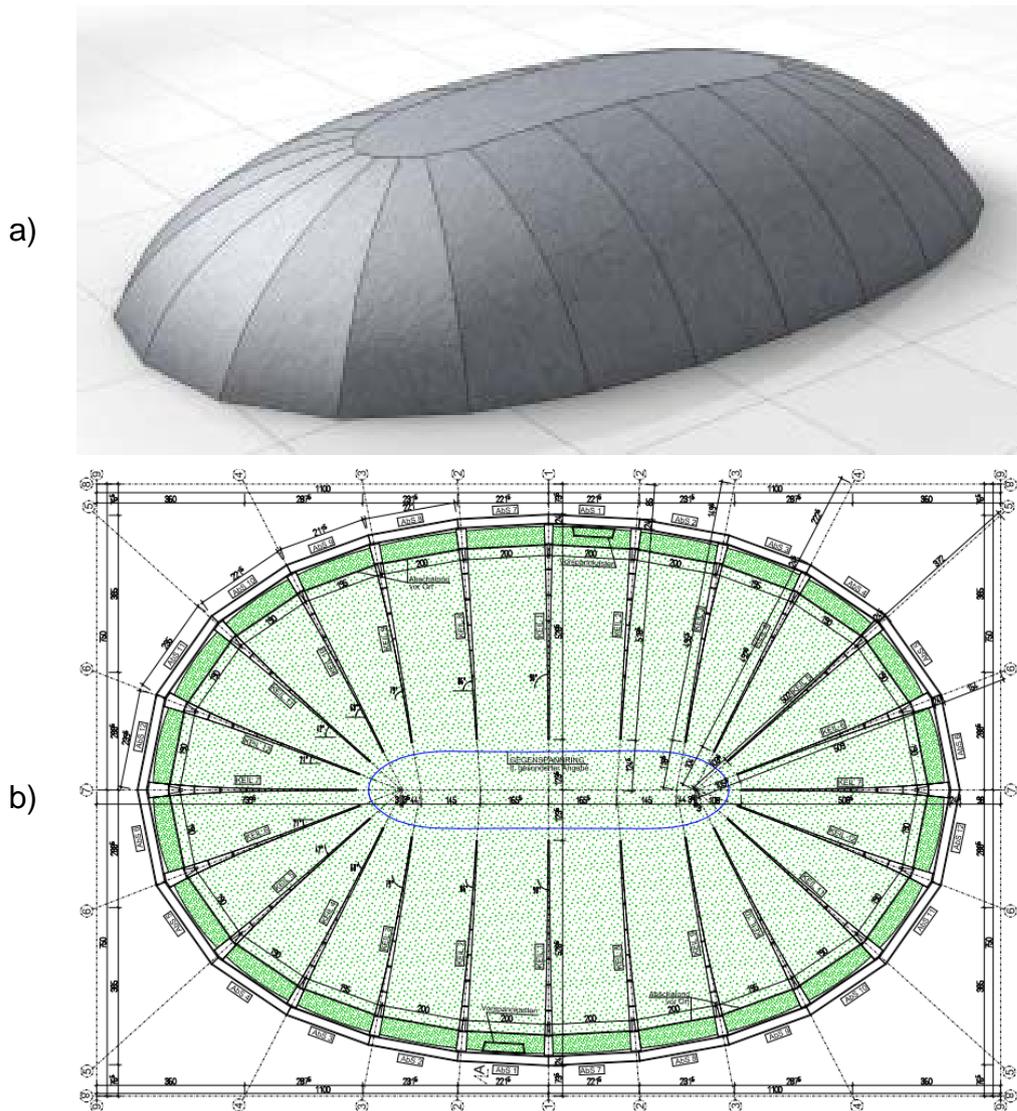


Abbildung 2.6: a) Segmentierte Schale [9] b) abgewickelter Grundriss

Die Abmessung der ebenen Platte beträgt ca. 13x19,5 m. Im Endzustand erreicht die Schale eine Länge von 17,6 m, eine Breite von 10,8 m und eine Höhe von 2,9 m. Mit diesen Abmessungen erreicht man ein Volumen von 285 m³ unter der Kuppel. Die Stärke der Schale beträgt 50 mm. In den äußeren 500 mm wird die Schalendicke auf 200 mm vergrößert, um das Gewicht im Randbereich zu erhöhen. Ein Abheben der Platte beim Aufstellvorgang wird damit verhindert. In Abbildung 2.7 ist die eben beschriebene geplante Endform des Großversuchs zu sehen.

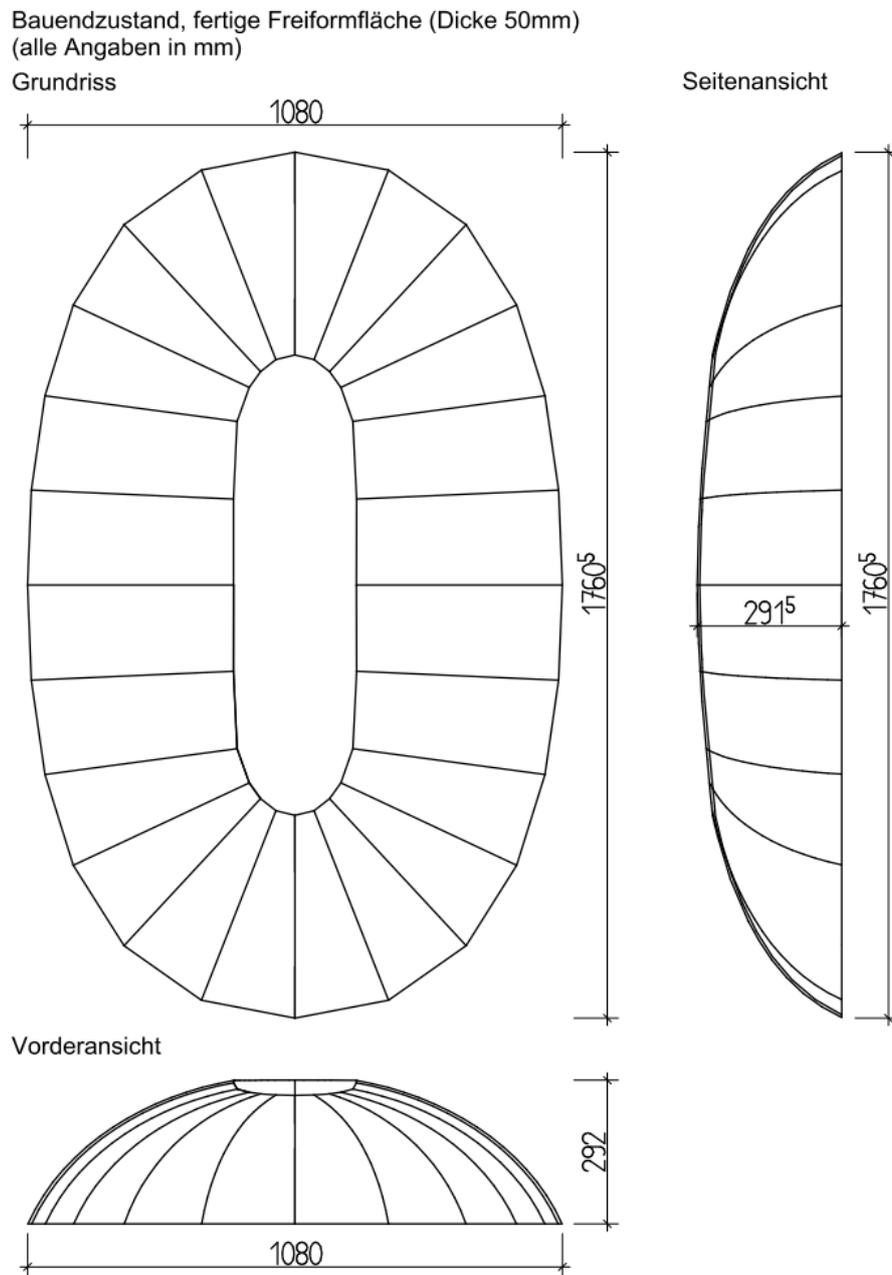


Abbildung 2.7: Endzustand Versuchsschale [9]

Auf die Herstellbarkeit der Schale hat der Krümmungsradius der einzelnen Segmente entscheidenden Einfluss. Die Betonplatte muss in der Lage sein die Krümmung beim Umformungsprozess aufzunehmen. In Abbildung 2.8 ist der Krümmungsverlauf der einzelnen Elemente erkennbar. Man sieht, dass der Krümmungsradius der Segmente zwischen 3,1 bis 7,25 m liegt.

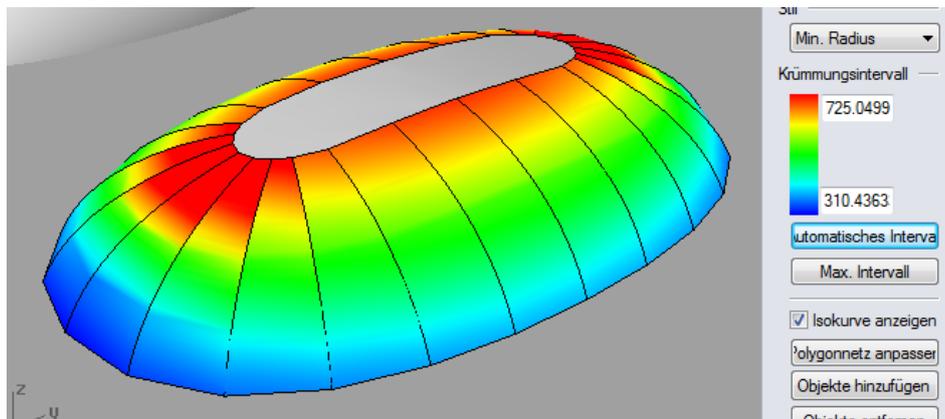


Abbildung 2.8: Krümmungsradius der Segmente

2.2.2 Bewehrungswahl

Für die Wahl der Bewehrung wurde auf die Ergebnisse der Vorversuche zurückgegriffen: es wurden Stahlseile mit dem Durchmesser von 5 mm in radialer Richtung verwendet. Diese Stahlseile sind in einer Höhe von 40 mm (Schwerpunkt) angeordnet und im Mittel in einem Abstand von 100 mm verlegt. Stahlseile sind notwendig, um ein Fließen der Bewehrung zu verhindern und ein gleichmäßiges Verkrümmen der Schalensegmente zu erreichen. Als konstruktive Querbewehrung in Tangentialrichtung wird konventioneller Bewehrungsstahl BSt 550 mit Durchmesser 6 mm in 2.Lage alle 150 mm verlegt.

Damit lässt sich für einen Abschnitt von 1 m der Bewehrungsgrad ausrechnen:

$$\rho = \frac{A_s}{A} = \frac{10 \cdot 10,45}{1000 \cdot 50} = 0,0021 = 0,21\% \quad (2-5)$$

ρ Bewehrungsgrad

2.2.3 Momenten-Krümmungs-Diagramm

Um die Umformung von Beton bei der „Pneumatic Wedge Method“ zu erreichen ist ein Überschreiten des Rissmoments notwendig, der Betonquerschnitt befindet sich im Zustand II. Generell durchläuft ein Stahlbetonquerschnitt bis zu seinem Versagen 4 Teilabschnitte [12][13]:

1) Ungerissener Zustand (Zustand I)

Im ungerissenen Zustand herrscht an allen Stellen des Bauteils idealer Verbund und es werden auftretende Zugkräfte vom Beton aufgenommen. Der Betonquerschnitt besitzt die Biegesteifigkeit $(EI)_i$.

2) Erstrissbildung bis abgeschlossene Rissbildung

Dieser Abschnitt beginnt mit dem Erreichen des kritischen Rissmoments M_{cr} , bei dem die Zugfestigkeit des Betons überschritten wird. Das abgeschlossene Rissbild ist erreicht, wenn an keiner Stelle mehr ungestörter Verbund vorliegt.

3) Dehnen der Bewehrung

Bei weiterer Laststeigerung kommt es nur mehr zur Aufweitung von Rissen. Der Stahlbetonquerschnitt befindet sich im Zustand II und besitzt die Biegesteifigkeit $(EI)_{II}$. Die Biegesteifigkeit im Zustand II ist wesentlich geringer als die im Zustand I.

4) Fließen der Bewehrung

Beim Erreichen des Fließmoments M_y beginnt die Zugbewehrung zu fließen. Aufgrund der Gleichgewichtsbedingungen wird danach auch die Betondruckzone kleiner. Bei M_u kommt es zum Versagen des Betons in der Druckzone.

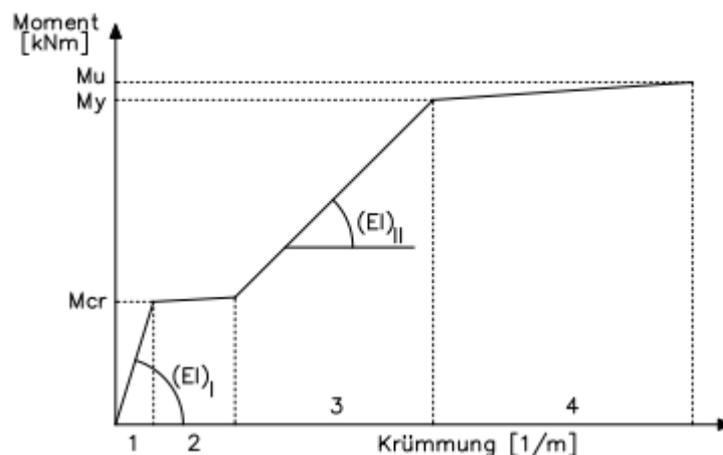


Abbildung 2.9: Momenten-Krümmungs-Beziehung [12]

Radius, Krümmung und Moment stehen in folgender Beziehung zueinander:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad (2-6)$$

κ Krümmung

R Radius

M Biegemoment

EI Biegesteifigkeit

Bei der Berechnung wird von folgenden Werten ausgegangen:

| | | |
|-----------------------------------|-------|-----------------------|
| ◆ $b=1000$ mm | | Breite |
| ◆ $h=50$ mm | | Höhe |
| ◆ $d_1=10$ mm | | Randabstand Bewehrung |
| ◆ $E_C=33000$ N/mm ² | | E-Modul Beton |
| ◆ $f_{ck}=30$ N/mm ² | | Druckfestigkeit Beton |
| ◆ $f_{ctm}=2,9$ N/mm ² | | Zugfestigkeit Beton |
| ◆ $A_S=104,5$ mm ² | | Fläche der Stahlseile |
| ◆ $E_S=85120$ N/mm ² | | E-Modul Stahlseil |
| ◆ $R_r=1570$ N/mm ² | | Seilfestigkeit |

Zustand I:

Das Trägheitsmoment kann unter Vernachlässigung der Stahlbewehrung folgendermaßen berechnet werden:

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1000 \cdot 50^3}{12} = 1,042 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2-7)$$

I_I Trägheitsmoment im Zustand I

Damit lässt sich die Biegesteifigkeit im Zustand I berechnen, die den Erstanstieg des Momenten-Krümmungs-Diagramm charakterisiert.

$$B_I = (EI)_I = 33000 \cdot 1,042 \cdot 10^7 = 3,438 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \quad (2-8)$$

B_I Biegesteifigkeit im Zustand I

Der Zustand I endet beim Erreichen des Rissmoments:

$$M_{cr} = \frac{\sigma \cdot I}{z} = \frac{2,9 \cdot 1,042 \cdot 10^7}{25} = 1,21 \text{ kNm} \quad (2-9)$$

M_{cr} Rissmoment

z Randabstand

Beim Erreichen des Rissmoments ist folgende Krümmung vorhanden:

$$\kappa = \frac{M}{(EI)_I} = \frac{1,21}{343,8} = 0,0035 \frac{1}{m} \quad (2-10)$$

Zustand II:

Sobald die Zugfestigkeit des Betons überschritten wird, entstehen Risse, wodurch der Übergang von Zustand I in Zustand II erfolgt. Aus der Abbildung 2.10 ist die Gleichung für die Druckzonenhöhe, sowie die Spannungen zufolge einer Biegebeanspruchung für den Rechteckquerschnitt im Zustand II ableitbar.

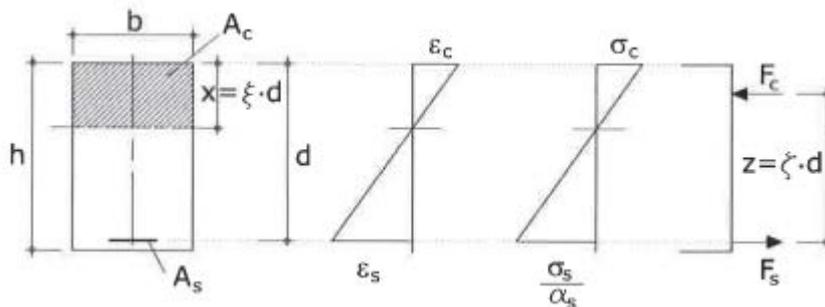


Abbildung 2.10: Berechnung der Spannungen für den Rechteckquerschnitt im Zustand II [13]

$$d = h - d_1 = 50 - 10 = 40 \text{ mm} \quad (2-11)$$

d statische Nutzhöhe

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{85120}{33000} = 2,58 \quad (2-12)$$

α_s Verhältnis der Steifigkeiten

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{104,5}{1000 \cdot 40} = 0,0026 \quad (2-13)$$

ρ Bewehrungsgrad

$$x = \alpha_s \cdot \rho \cdot d \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_s \cdot \rho}} - 1 \right) = \quad (2-14)$$

$$x = 2,58 \cdot 0,0026 \cdot 40 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2}{2,58 \cdot 0,0026}} - 1 \right) = 4,4 \text{ mm}$$

x Druckzonenhöhe

Für den einfach bewehrten, biegebeanspruchten Rechteckquerschnitt errechnet sich das Trägheitsmoment I_{II} unter Vernachlässigung des Eigenträgheitsmoments der Bewehrung zu:

$$I_{II} = \frac{b \cdot x^3}{3} + A_s \cdot \alpha_s \cdot (d - x)^2 \quad (2-15)$$

$$I_{II} = \frac{1000 \cdot 4,4^3}{3} + 104,5 \cdot 2,58 \cdot (40 - 4,4)^2 \\ = 370006 \text{ mm}^4$$

I_{II} Trägheitsmoment im Zustand II

Die Kurzzeitbiegesteifigkeit für den reinen Zustand II kann folgendermaßen angegeben werden:

$$B_{II} = E_c \cdot I_{II} = 33000 \cdot 370006 = 12210191800 \text{ Nmm}^2 \quad (2-16)$$

B_{II} Biegesteifigkeit im Zustand II

Die Spannungen der Bewehrung sowie die Spannungen des Betons kann man mit folgenden Formeln berechnen:

$$\sigma_s = \frac{M}{I_{II}} \cdot (d - x) \cdot \alpha_s \quad (2-17)$$

$$\sigma_c = \frac{M}{I_{II}} \cdot x \quad (2-18)$$

σ_s Spannungen der Bewehrung

σ_c Spannungen des Betons

Daraus lässt sich das maximale Moment errechnen, bei dem der jeweilige Baustoff versagt:

$$\max M_s = \frac{1570 \cdot 370006}{(40 - 4,4) \cdot 2,58} = 6,32 \text{ kNm} \quad (2-19)$$

$$\max M_c = \frac{30 \cdot 370006}{4,4} = 2,53 \text{ kNm} \quad (2-20)$$

Die zugehörigen Krümmungen sind:

$$\kappa_s = \frac{M}{(EI)_{II}} = \frac{6,32}{12,21} = 0,52 \frac{1}{m} \quad (2-21)$$

$$\kappa_c = \frac{M}{(EI)_{II}} = \frac{2,53}{12,21} = 0,21 \frac{1}{m}$$

Diese Krümmungen wurden mit einer rein geometrischen Berechnung ermittelt, wie sie in Gebrauchstauglichkeitsbetrachtungen verwendet wird. Das zugrundeliegende linear elastische Werkstoffmodell bildet nicht die reale Kräfteverteilung der Druckzone ab. Somit kann das Rechenergebnis der maximal erreichbaren Krümmung nicht an die Werte des Vorversuchs heranreichen.

Aus den berechneten Werten und den Ergebnissen der Biegeversuche von Kapitel 2.1.1 kommt man auf folgende Momenten-Krümmungs-Beziehung:

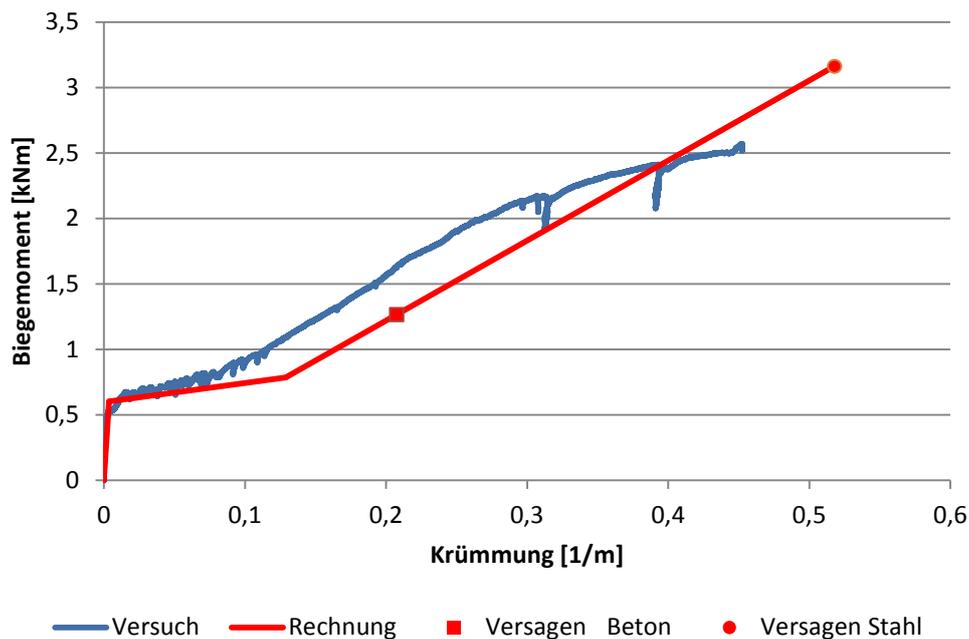


Abbildung 2.11: Momenten-Krümmungs-Diagramm

Die Momente im Diagramm entsprechen der Hälfte der Berechnung, da der Versuch mit einer Betonplatte mit der Breite von 500 mm durchgeführt wurde. Man kann erkennen, dass der Bereich im Zustand I bis zum Rissmoment gut zusammenstimmt. Danach beginnen die Abweichungen größer zu werden. Bei

der Rechnung tritt bedingt durch das gewählte Werkstoffmodell ein viel zu frühes Versagen vom Beton im Vergleich zum realen Versuch auf.

Wie man in Abbildung 2.8 sieht, tritt bei der Versuchsschale im Fußbereich ein minimaler Krümmungsradius von 3,1 m auf. Das entspricht einer Krümmung von 0,32 1/m. Die Betonplatte im Vorversuch kann diese Krümmung aufnehmen. Bei der Rechnung geht sich rechnerisch die Betondruckzone nicht aus. Real tritt diese Maximalkrümmung im 200 mm starken Randbereich auf. Auch sind in diesem Außenbereich die Stahlseile nicht 100, sondern 150 mm voneinander entfernt. Dies führt zu einer größeren möglichen Krümmung bis zum Versagen des Betons.

2.2.4 Luftdruck

Beim Aufstellen einer Schale mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist die Verwendung eines Hebepneus notwendig. Dieser wird mit Druckluft aufgeblasen. Wie viel Druck man dafür benötigt ist von einigen Faktoren abhängig:

- ◆ **Eigengewicht Betonplatte**: Um die Betonplatte anzuheben ist die Überwindung des Eigengewichts der Betonplatte notwendig. An den Rändern muss die Platte durch ein Zusatzgewicht am Boden gehalten werden.
- ◆ **Erstriss Beton**: Um einen Umformungsprozess in Gang zu setzen, muss die Rissbildung im Beton einsetzen. Damit wird die Bewehrung aktiviert und die Betonplatte kann sich verkrümmen.
- ◆ **Verkrümmung**: Durch das Aufblasen des Pneus entsteht eine Vorverkrümmung der Betonplatte. Diese erleichtert die weitere Formgebung beim Einsatz der Spannglieder und verhindert sprunghaftes Ausknicken.

Allgemein besteht zur Umrechnung der Drücke folgender Zusammenhang:

$$10 \text{ mbar} = 1 \text{ kN/m}^2 \quad (2-22)$$

Eigengewicht Betonplatte

Das spezifische Eigengewicht von Stahlbeton ist $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$. Die Betonplatte ist beim Versuch 50 mm dick. Damit ergibt sich der benötigte Luftdruck zur Kompensation des Eigengewichts zu:

$$p_{EG} = \gamma \cdot h = 25 \cdot 0,05 = 1,25 \text{ kN/m}^2 \quad (2-23)$$

$$p_{EG} = 12,5 \text{ mbar} \quad (2-24)$$

Erstriss Beton

Für die Berechnung des Erstrisses wird Beton der Festigkeitsklasse C30/37 angesetzt. Dieser weist eine Zugfestigkeit von $f_{ctm}=2,9 \text{ N/mm}^2$ auf. Die Berechnung erfolgt anhand eines 1 m breiten Plattenstreifens. Dieser Plattenstreifen befindet sich in der Symmetrieachse der Versuchsschale, in der annähernd eine Bogentragwirkung herrscht. Die Länge dieses Plattenstreifens beträgt 12,8 m.

Die Spannung im Beton wird mittels Formel (2-25) ermittelt. Der Querschnitt ist noch ungerissen, deswegen wird I_I verwendet.

$$\sigma = \frac{M}{I_I} \cdot z \quad (2-25)$$

Daraus erhält man nach Umformung und Einsetzen der Zugfestigkeit des Betons das maximal aufnehmbare Moment bis zum Erstriss.

$$M = \frac{\sigma \cdot I_I}{z} = \frac{2,9 \cdot 1,042 \cdot 10^7}{25} = 1,21 \text{ kNm} \quad (2-26)$$

Das Maximalmoment des Plattenstreifens wird entsprechend (2-27) berechnet.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} \quad (2-27)$$

Damit ergibt sich der zusätzlich benötigte Luftdruck zur Erreichung des Erstrisses nach bereits erfolgter Kompensation des Eigengewichtes zu:

$$p_R = \frac{M \cdot 8}{l^2} = \frac{1,21 \cdot 8}{12,8^2} = 0,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (2-28)$$

$$p_R = 0,6 \text{ mbar}$$

Vorkrümmung

Die Durchbiegung eines einfeldrigen Plattenstreifens ermittelt sich laut [14] folgendermaßen:

$$w = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI} \quad (2-29)$$

Damit hat der Bogen laut Gleichung (2-30) beim Erstriss eine Höhe von 60 mm.

$$w = \frac{5 \cdot 0,06 \cdot 12,8^4}{384 \cdot 343,8} = 0,06 \text{ m} = 60 \text{ mm} \quad (2-30)$$

Beim Großversuch wird mit einem Luftdruck im Bereich von 14-16 mbar gearbeitet. Damit ist es möglich die Betonplatte wesentlich höher anzuheben. Nach dem Erstriss verliert die Betonplatte auch an Steifigkeit und der Umformungsprozess funktioniert einfacher. Die mit Luftdruck zu erreichende Höhe ist lt. Gleichung (2-29) eine Funktion der Steifigkeit des Betons und der Spannweite, die sich kontinuierlich verkürzt. Sobald der Hebeplan zur Umformung nicht mehr alleine ausreicht, wird der Vorgang mit den Spanngliedern unterstützt.

2.3 RFEM-Berechnung

Die Berechnung der Versuchsschale erfolgte mit dem FEM-Programm RFEM 5.02.007 der Firma Dlubal. Es wurde die Schale berechnet, die in Kapitel 2.2.1 beschrieben ist.

2.3.1 E-Modul

Das Programm RFEM rechnet mit einem linear elastischen Materialmodell. Die Nichtlinearität des Betons wird nicht berücksichtigt. Daher wird bei folgenden Berechnungen ein angepasster E-Modul verwendet.

Zur Ermittlung dieses reduzierten E-Moduls werden wieder die Daten des Biegeversuchs an rechteckigen Betonplatten herangezogen. Laut [14] ergibt sich für einen 4-Punkt Biegeversuch zur Bestimmung der Durchbiegung folgende Formel:

$$w = \frac{F \cdot l^3}{24 \cdot B} \cdot \frac{a}{l} \cdot \left[3 - 4 \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right] \quad (2-31)$$

w Durchbiegung

F Einwirkende Kraft

l Auflagerabstand

a Abstand vom Auflager zur Krafteinwirkung

B Biegesteifigkeit

Bis auf die Biegesteifigkeit sind alle Daten zu jedem Zeitpunkt bekannt. Daher kann man sich in einem ersten Schritt aus Formel (2-31) die Biegesteifigkeit errechnen. Um den reduzierten E-Modul zu erhalten, ist die vorhandene

Biegesteifigkeit durch das konstante Trägheitsmoment im Zustand I, mit dem auch RFEM rechnet, zu dividieren.

$$E_{red} = \frac{B}{I_I} \quad (2-32)$$

E_{red} reduzierter E-Modul

2.3.2 Belastung

Die Freiformfläche wird mit 2 Lastfällen belastet:

LF 1: Eigengewicht

Es wird ein Stahlbetonwichte von $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ angesetzt. Die Schale hat eine Stärke von 50 mm. Somit ergibt sich das Eigengewicht zu $1,25 \text{ kN/m}^2$

LF 2: Schnee

Für Schnee wird ein Belastung von $s_k=1,5 \text{ kN/m}^2$ angenommen. Da sich die Schale freistehend in Wien befindet, wird nur eine symmetrische Belastung angesetzt und auf etwaige Spezialfälle verzichtet.

Die Ergebnisse in Kapitel 2.3.4 entsprechen der Lastfallkombination LF1+LF2.

2.3.3 Modellierung

Die Modellierung erfolgt an der bereits fertiggestellten Schale (Abbildung 2.12). Das bedeutet, die Fugen zwischen den Segmenten sind verfüllt und eine Kraftweiterleitung ist somit uneingeschränkt möglich.

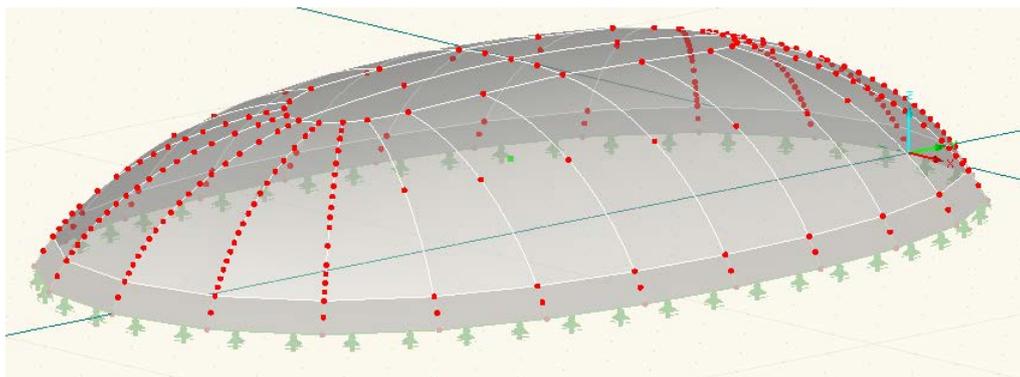


Abbildung 2.12: RFEM-Modell

Die 3D-Flächen wurden in AutoCAD gezeichnet und anschließend exportiert. In RFEM werden diese gekrümmten Flächen mit Quadrangel-Flächen realisiert. Das Modell wurde aus 24 Segmenten und 4 Flächen im Zentrum zusammengefügt. Die Kanten zwischen den Elementen sind noch erkennbar.

Auf den 200 mm starken Sockel wurde im Modell verzichtet. Das ganze Modell besitzt durchgängig 50 mm Wandstärke, um im Fußbereich unnötige Spannungsspitzen zu vermeiden.

Die Lagerung erfolgt über Linienlager entlang des gesamten Umfangs. Gehalten wird das Bauwerk in vertikaler und radialer Richtung. Die radiale Festhaltung entspricht den Spanngliedern in der Realität.

Das FE-Netz wird vom Programm RFEM automatisch generiert. Das Netz kann aus Drei- und Vierecken bestehen, jedoch sind, wo möglich, gleiche Quadrate generiert. Als Maschenweite wurde 100 mm gewählt.

Als Material wird Beton der Klasse C30/37 verwendet. Als mittlerer Krümmungsradius wird $r=5$ m gewählt, somit ergibt sich aus der Umrechnung aus Kapitel 2.3.1 ein modifizierter E-Modul von 3025 N/mm^2 .

2.3.4 Ergebnisse

Der veränderte E-Modul ist für die Durchbiegung während der Verformung, also beim Aufstellen gültig. Für eine spätere Belastung sind die Betonsegmente als vorgespannte Elemente anzusehen. Man müsste die Vorspannung als Zusatzlastfall mitberücksichtigen. Dadurch würden sich die Verformungen geringfügig ändern.

Verformung

In Abbildung 2.13 ist die Verformung der Versuchsschale im Endzustand unter Eigengewicht und Schnee abgebildet. Die Durchbiegung in der Mitte der Schale beträgt maximal 10,5 mm. Im Verhältnis zur Größe der Schale ($L=17,6$ m, $B=10,8$ m, $H=2,9$ m) ergibt sich somit nur eine geringe Verformung. An der Längsseite im Fußbereich neigt die Schale zu einer leichten Ausbauchung nach außen.

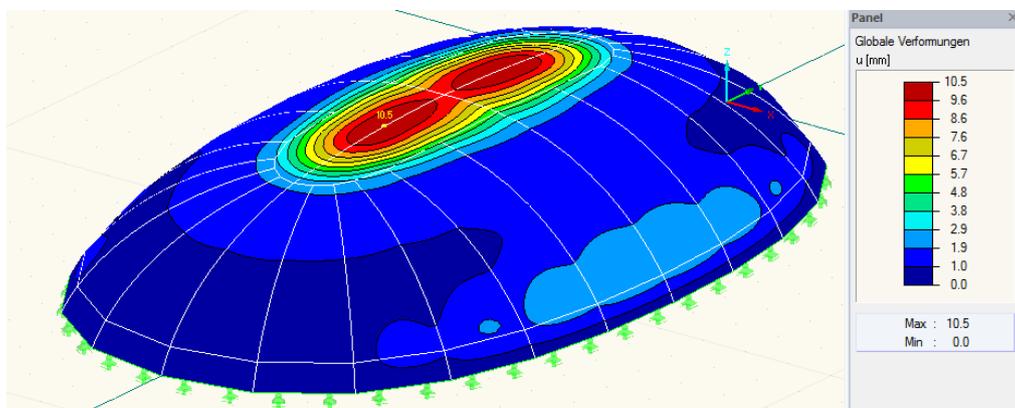


Abbildung 2.13: Verformung Großversuch

Auflagerkräfte:

Die Auflagerreaktionen sind jeweils als konstante Verteilung zu sehen. Bei der Darstellung der tatsächlich auftretenden Verteilung würde man im Bereich der Kanten zwischen den Segmenten eine erhöhte Belastung vorfinden. In Abbildung 2.14 ist zu erkennen, dass die größte Belastung im Bereich der Segmente auftritt, die zwischen Längs- und Breitseite angeordnet sind. Die maximale vertikale Belastung beträgt 12 kN/m und wird vom Untergrund aufgenommen. Die radial wirkende Auflagerreaktion wird im Endzustand von den Spanngliedern aufgenommen bzw. gehalten. Hier ist der maximale Wert 7,5 kN und stellt für die verwendeten Spannglieder kein Problem dar.

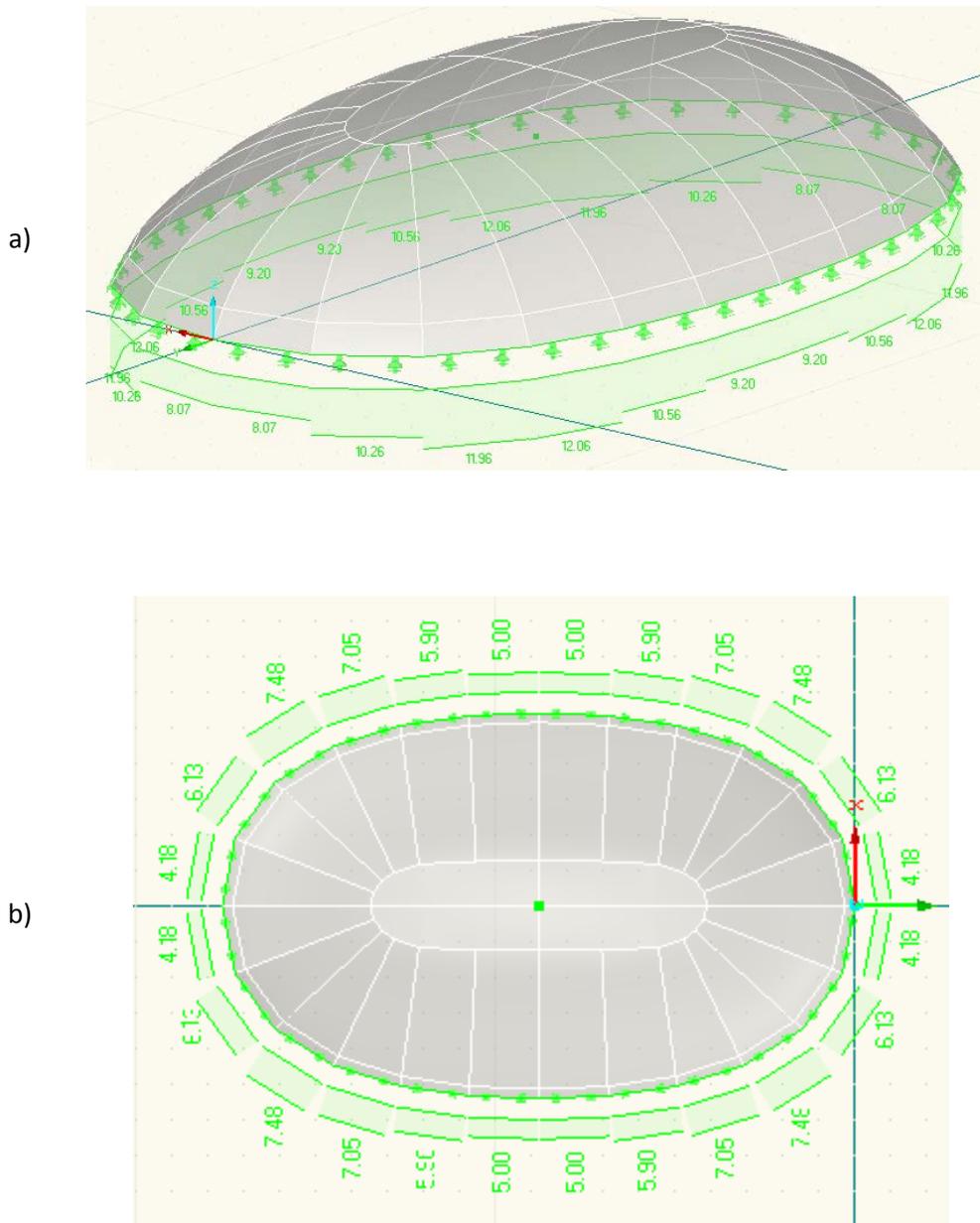


Abbildung 2.14: Auflagerreaktionen Großversuch a) AR in Vertikalrichtung b) AR in Radialrichtung

Normalkräfte

Die Abtragung der Lasten erfolgt bei der Schale primär über Normalkräfte, es stellt sich der sogenannte Membranspannungszustand ein. Durch die gleichmäßige Ausnutzung aller Fasern des Querschnittes entsteht ein effektiverer Tragmechanismus als etwa bei reiner Biegung.

In Abbildung 2.15 sind Normalkräfte in Radial- und Tangentialrichtung dargestellt. Man kann gut erkennen, dass im oberen Bereich der Schale Druck herrscht. Weiter unten hat sich ein Zugring rund um die Schale ausgebildet, wobei die Kräfte an der Längsseite am größten sind. Die maximal auftretende Zugkraft von 19 kN/m, entspricht $0,38 \text{ N/mm}^2$, kann von Beton der Güte C30/37 ($f_{ctm}=2,9 \text{ N/mm}^2$) ohne Probleme aufgenommen werden.

Bei der „Pneumatic Wedge Method“ bilden sich bei den Übergängen der einzelnen Segmente Kanten aus. Dadurch entsteht ein Tragmechanismus, wie er bei Falterwerken bekannt ist und die Lastabtragung erfolgt vermehrt über diese Stellen. Bei der Lastabtragung in Radialrichtung kann man diesen Effekt schön erkennen. Jeweils in Segmentmitte nimmt die Druckbelastung etwas ab. Die maximale Druckkraft ergibt ca. 40 kN/m ($0,8 \text{ N/mm}^2$), im Vergleich zur Druckfestigkeit des Betons ein sehr geringer Wert.

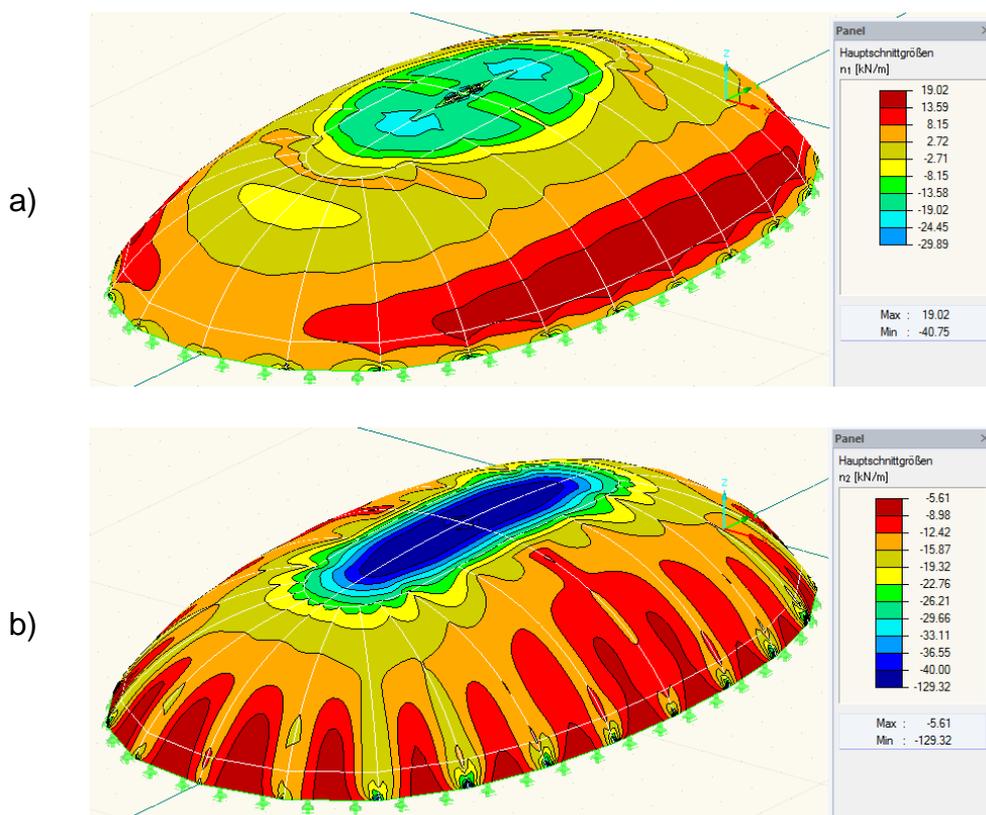


Abbildung 2.15: Berechnungsergebnisse Großversuch: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung

Biegemomente

Aufgrund des Membranspannungszustandes der Freiformschale treten nur sehr geringe Biegemomente auf. In Abbildung 2.16 sind die Biegemomente in den beiden Hauptrichtungen angegeben. Der Maximalwert beläuft sich auf 0,4 kNm/m und tritt im Kappenbereich auf, wo sich die größten Durchbiegungen ausbilden. Abhängig von der Belastungsrichtung ergibt sich für die Schale ein Bruchmoment zwischen 0,8 (d=40 mm) und 6 kNm/m (d=10 mm). Dabei handelt es sich um charakteristische Werte.

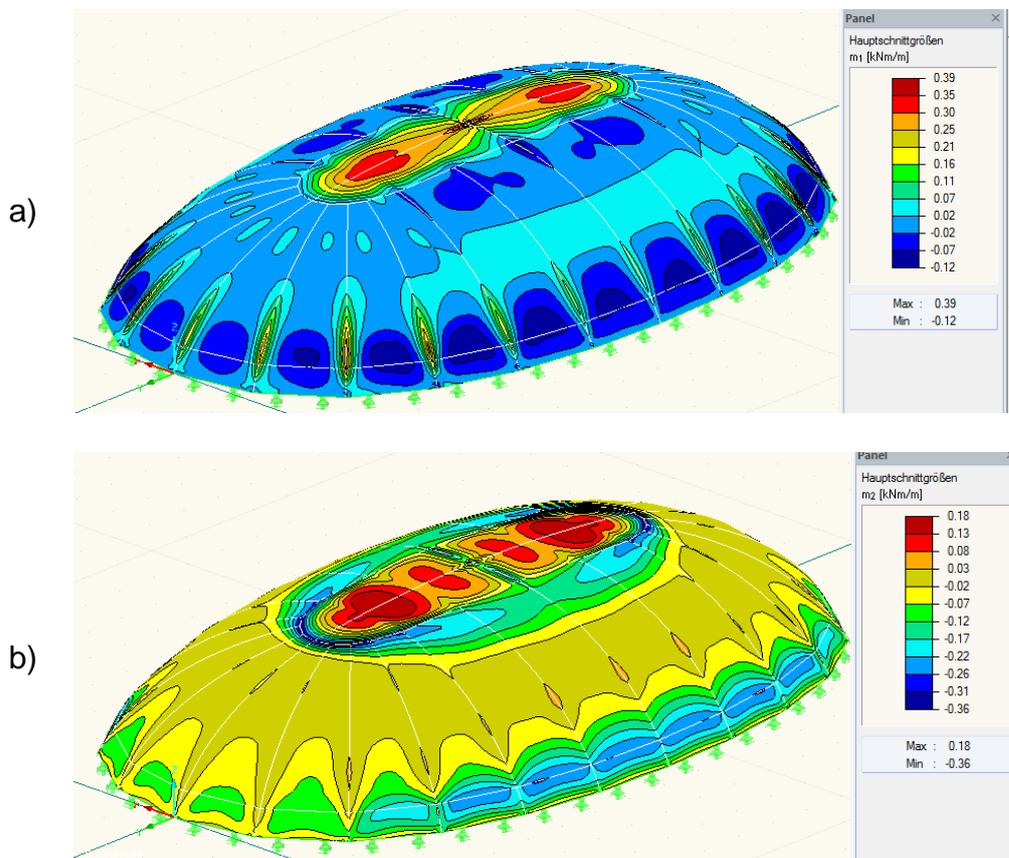


Abbildung 2.16: Berechnungsergebnisse Großversuch: a) Biegemomente m_1
b) Biegemomente m_2

2.4 Berechnung möglicher Schalenstrukturen

Mit der „Pneumatic Wedge Method“ sind eine Vielzahl von Flächen herstellbar. Bis hierhin wurde die Schale des Großversuchs behandelt. Nachfolgend werden weitere, mit dieser Baumethode herstellbare Formen dargestellt und berechnet.

Bei den Berechnungen werden folgende Materialwerte angesetzt:

- ◆ Beton: C30/37
- ◆ Schalendicke: 50 mm
- ◆ E-Modul: angepasst nach Krümmung an die Vorversuche
- ◆ Bewehrung: Niro-Seile
- ◆ Belastung: Eigengewicht + 1,5 kN/m² Schnee

2.4.1 Halbkugel

Eine Kugel lässt sich durch Gleichung (2-33) allgemein beschreiben.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (2-33)$$

x_0, y_0, z_0 Kreismittelpunkt

r Radius



Abbildung 2.17: Umformungsprozess Halbkugel [9]

Die Krümmung der Halbkugel ist konstant. Aufgrund ihres Krümmungsverhaltens ist die Halbkugel geeignet für die Anwendung der „Pneumatic Wedge Method“. Der Umformungsprozess ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Die Segmentierung erfolgt in 16 Teilen. Die Halbkugel ist einfach zu berechnen und aufgrund ihrer Symmetrie ist der Schalungsbau simpel. Zur Umformung eignet sich der Hebeplan. Die außen anliegenden Spannsysteme können aufgrund der gleichmäßigen Rundung zur Unterstützung des Anhebeprozesses verwendet werden, da die Umlenkräfte konstant sind. Von den keilförmigen Pneus ist nur ein Typ erforderlich [9].

Für die Berechnung wurde ein Radius von 5,5 m gewählt. Für dieses Größenverhältnis wurde bereits an der TU Wien ein Großversuch an einem Kugelabschnitt durchgeführt. Bei einer Krümmung von $0,18 \frac{1}{m}$ ergibt sich aus den Vorversuchen ein E-Modul von 3085 N/mm².

Verformung

Die Maximalverformung der Halbkugel ist mit 1,2 mm, bezogen auf den 11 m Grundflächendurchmesser, sehr gering. Es kommt im Kappenbereich wieder zu einer zu erwartenden Durchbiegung. Weiter unten im Zugbereich der Kuppel kommt es zu einer Ausbauchung. Diese Verformung ist im Bereich der Kanten zwischen den Segmenten aufgrund der dort herrschenden erhöhten Steifigkeit weniger stark ausgebildet. Das eben Beschriebene ist in Abbildung 2.18 zu sehen.

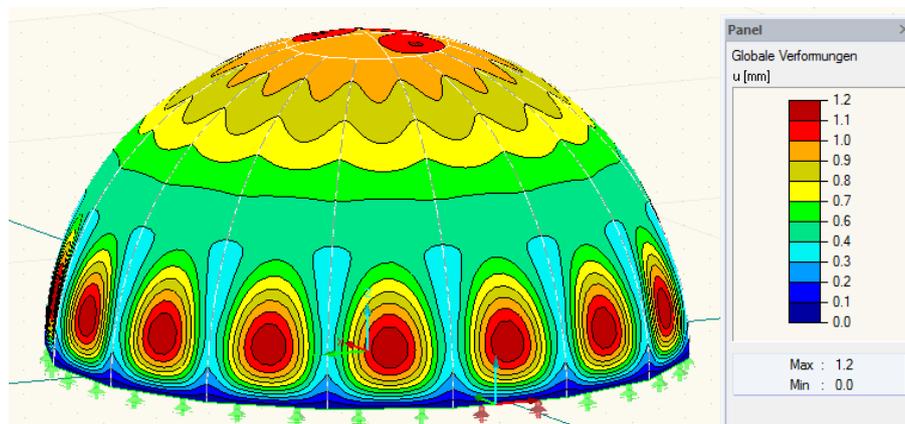


Abbildung 2.18: Verformungen Halbkugel

Auflagerreaktionen

In Abbildung 2.19 sind die erhaltenen Auflagerreaktionen dargestellt. Formbedingt ergibt sich eine symmetrische Verteilung der Auflagerreaktionen rundum. Die Lagerreaktionen sind wieder verschmiert über ein Segment dargestellt. Durch die komplett ausgebildete Halbkugel startet die Schale mit einem großen Öffnungswinkel vom Untergrund. Damit verbunden bilden sich kleine Auflagerreaktionen in Radialrichtung im Vergleich zu den vertikalen Auflagerreaktionen aus. Bei den eingegebenen Lasten ergibt sich ein Faktor von 15,5 zwischen horizontalen und vertikalen Auflagerreaktionen.

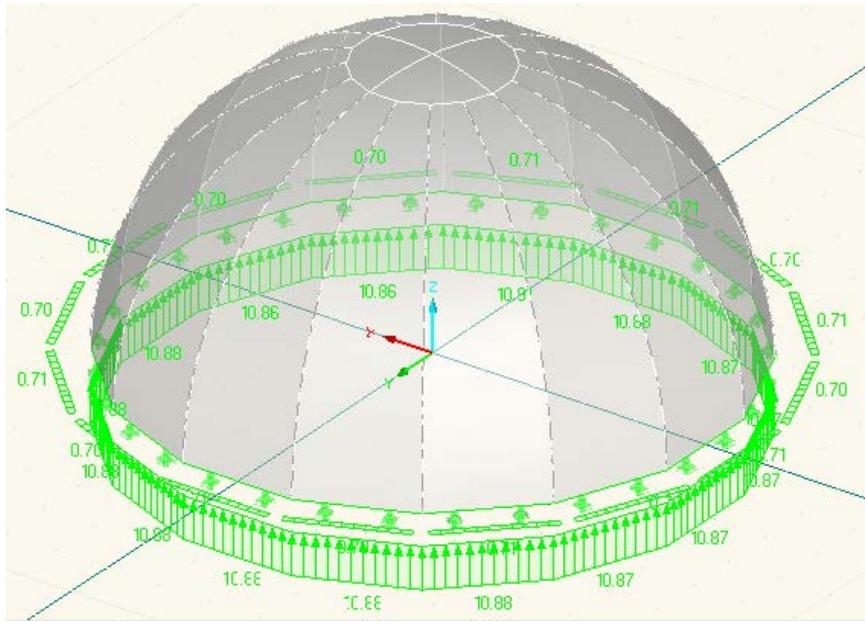
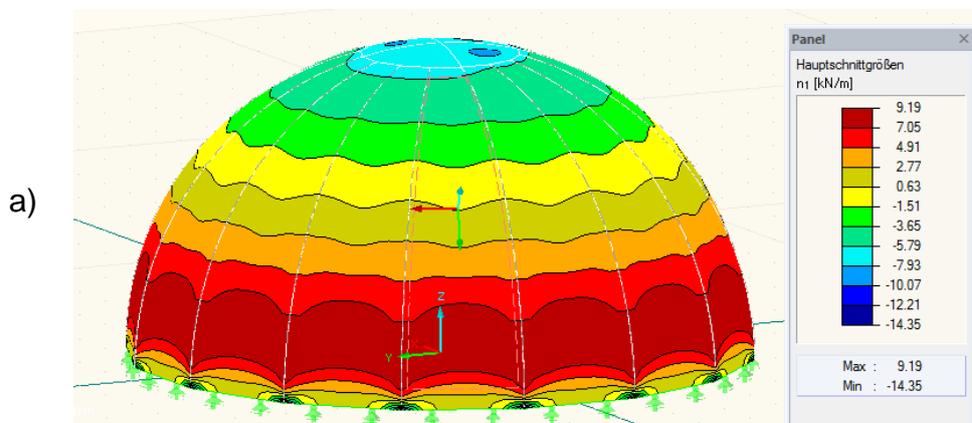


Abbildung 2.19: Auflagerreaktionen Halbkugel

Normalkraft:

Der Hauptteil der Lastabtragung wird von den Normalkräften übernommen. In Abbildung 2.20 sieht man, dass bei den Normalkräften in Ringrichtung der obere Teil der Kuppel unter Druck, der untere Teil unter Zug steht. Die Normalkräfte in Meridianrichtung sind im oberen Teil konstant, im unteren Bereich werden die Lasten aber vermehrt über den Außenbereich der einzelnen Segmente abgetragen. Im Fußpunkt kommt es beim Wechsel der einzelnen Segmente zu örtlichen Spannungsspitzen, die für die Bemessung der Schale nicht maßgebend sind. Aus der Grafik kann man auch entnehmen, dass die zu erwartenden Spannungen (Zug 0,2 N/mm², Druck 0,86 N/mm²) problemlos vom Beton aufgenommen werden können.



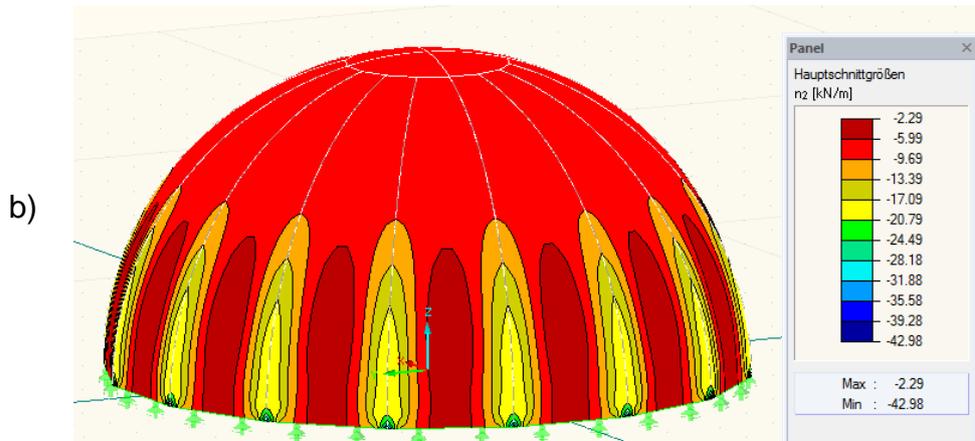


Abbildung 2.20: Berechnungsergebnisse Halbkugel: a) Normalkräfte n₁ in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n₂ in Radialrichtung

Biegemoment

Die größten Biegemomente treten wie bei der Normalkraft bei den Kanten im unteren Bereich der Halbkugel auf. Allerdings sind die Biegemomente mit einem Maximalwert von 0,34 kNm/m gering und vom Bauwerk aufnehmbar. In Abbildung 2.21 sind die maßgebenden Biegemomente m₁ zu sehen.

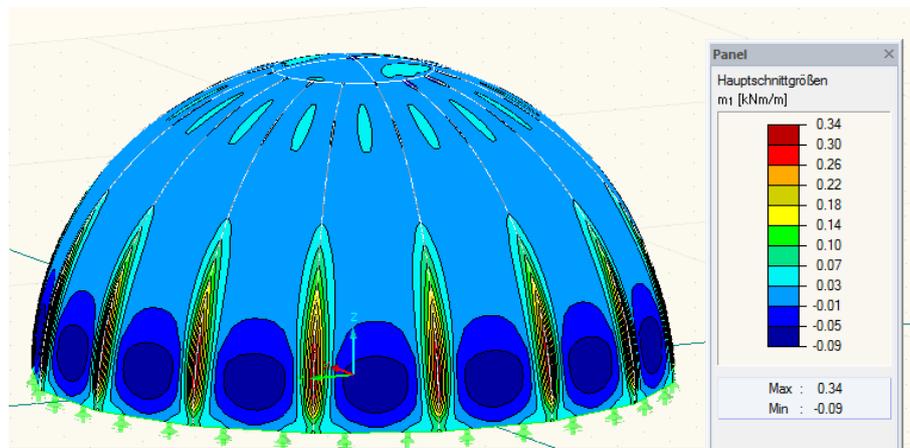


Abbildung 2.21: Berechnungsergebnisse Halbkugel: Biegemomente m₁

2.4.2 Kugelabschnitt

Vom Kugelabschnitt spricht man, wenn der Kugelschnitt nicht exakt in der Hälfte wie bei der Halbkugel erfolgt. Natürlich bleibt auch die Krümmung wie bei der Kugel konstant. Für die „Pneumatic Wedge Method“ ist die Form des Kugelabschnitts äußerst gut geeignet. In Abbildung 2.22 ist der Umformungsprozess eines Kugelabschnittes dargestellt.

Die Segmentierung erfolgt hier in 16 Teilen. Der Schalungsaufwand ist aufgrund der gleichen Schalungskeile gering. Vor allem bei flachen Kugelabschnitten und damit verbundenen geringen Abständen zwischen den Segmenten im Ausgangszustand bietet sich das Herstellungsverfahren an. Für solche flachen Kugelabschnitte reicht im Regelfall der Hebeplan zum Anheben aus und die Spannritzen sind nur mehr zum Halten der finalen Lage notwendig. Generell ist anzumerken, dass die aufzunehmenden horizontalen Kräfte für das Auflager ansteigen, je flacher der Kugelabschnitt ausgebildet wird.



Abbildung 2.22: Umformungsprozess Kugelabschnitt [4]

Die Machbarkeit eines Kugelabschnittes mit der „Pneumatic Wedge Method“ wurde bereits bei früheren Großversuchen des Betonbauinstituts der TU Wien bewiesen. In Abbildung 2.23 ist der Plan einer in Amstetten gebauten Kuppel abgebildet. Die Schale besitzt im fertiggestellten Zustand einen Grundflächendurchmesser von knapp 10,2 m und eine Höhe am Scheitelpunkt von annähernd 3,6 m.

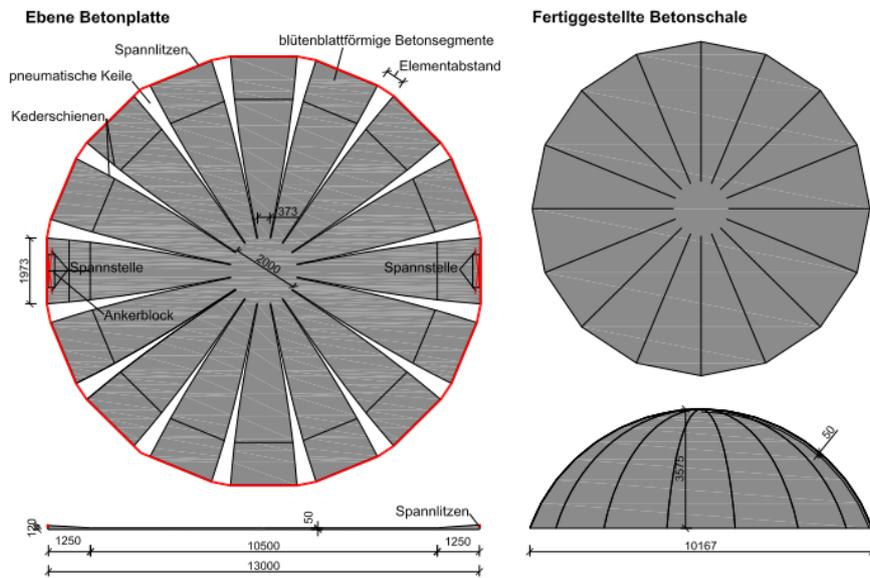


Abbildung 2.23: Abmessungen Kugelabschnitt

Der eingeschriebene Kreis dieses Kugelabschnitts besitzt einen Radius von 5,5 m und die Krümmung der einzelnen Segmente beträgt somit 0,18 1/m. Aus den Ergebnissen der Biegeversuche ist damit ein E-Modul des gerissenen Betons von 3085 N/mm² ableitbar.

Verformung

Aufgrund der flacheren Ausbildung des Kugelabschnittes im Vergleich zur Halbkugel neigt diese im Zentrum zu größeren Verformungen. Allerdings ist diese Durchbiegung von 0,7 mm im Vergleich zur Größe des Kugelabschnittes äußerst gering. Das ist auf die ausgezeichnete Tragwirkung der Schale zurückzuführen.

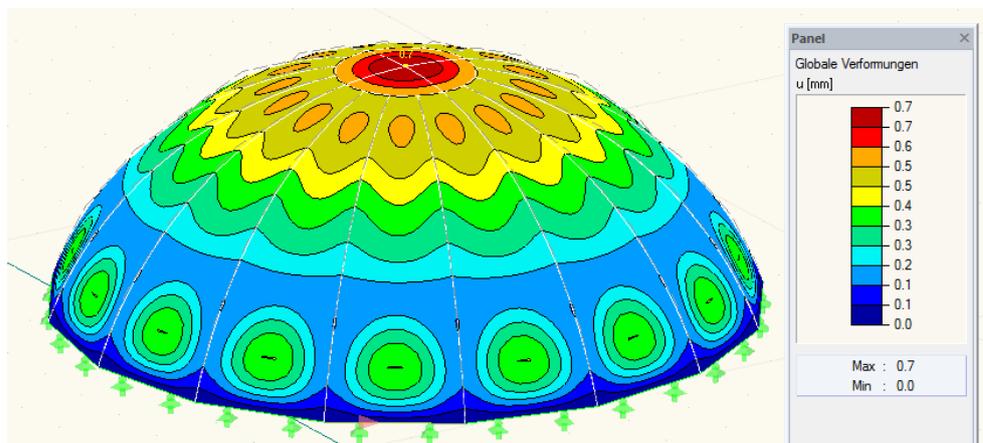


Abbildung 2.24: Verformungen Kugelabschnitt

Auflagerreaktionen

Die Auflagerreaktionen sehen weitgehend so aus wie bei einer Halbkugel. Allerdings werden die Schubkräfte nach außen umso größer, je flacher der Kugelabschnitt wird. In der gewählten Konfiguration ergibt sich eine horizontale Auflagerkraft von 3,42 kN/m und eine vertikale Auflagerkraft von 8,51 kN/m. Damit beträgt das Verhältnis zueinander nur mehr 2,5 und nicht mehr wie bei der Halbkugel 15,5.

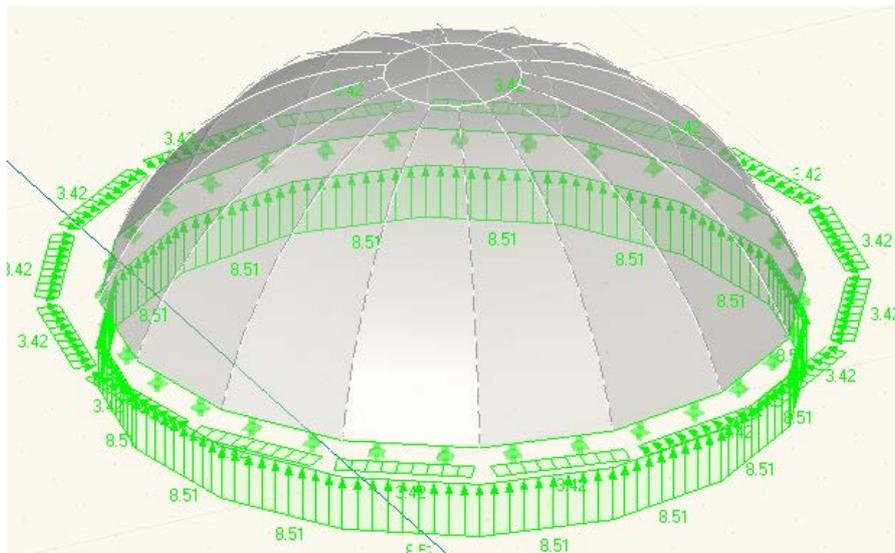
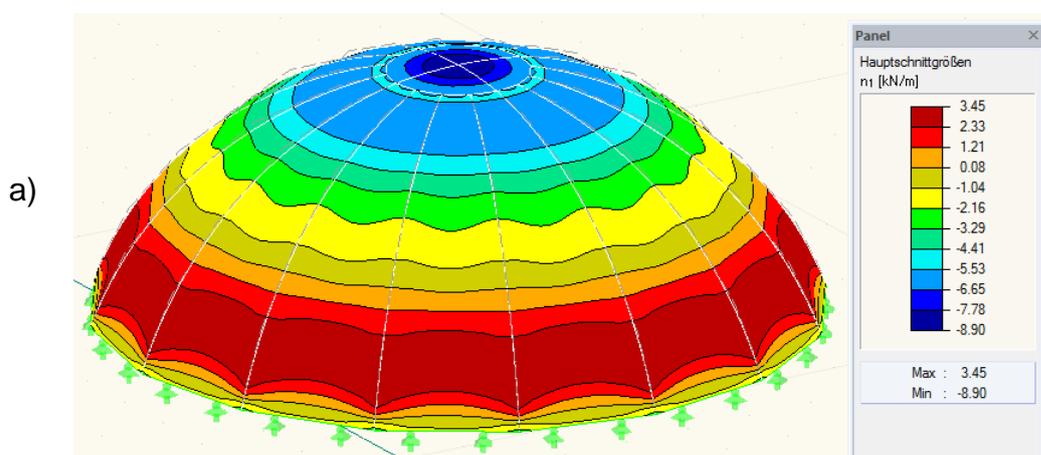


Abbildung 2.25: Auflagerreaktionen Kugelabschnitt

Normalkraft

Wenn man die Normalkräfte in Ringrichtung betrachtet, ergibt sich qualitativ das gleiche Ergebnis wie bei der Halbkugel. Einzig die berechnete Normalkraft ist etwas geringer. Auch bei den Normalkräften in Meridianrichtung sind die Normalkraftwerte tendenziell etwas geringer.



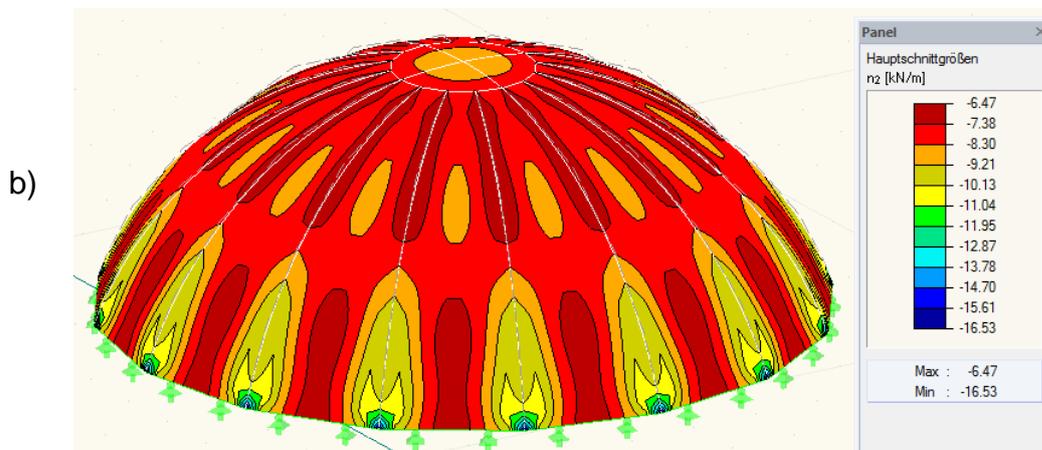


Abbildung 2.26: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt: a) Normalkräfte n₁ in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n₂ in Radialrichtung

Biegemoment

Den Biegemomenten kommt aufgrund ihrer geringen errechneten Größe keine große Bedeutung zu. Biegemomente m₁ sind in Abbildung 2.27 angeführt, Biegemoment m₂ ist wegen seiner geringen Größe nicht angegeben. Die geringen Momente erklären sich durch den eingestellten Membranspannungszustand der Schale.

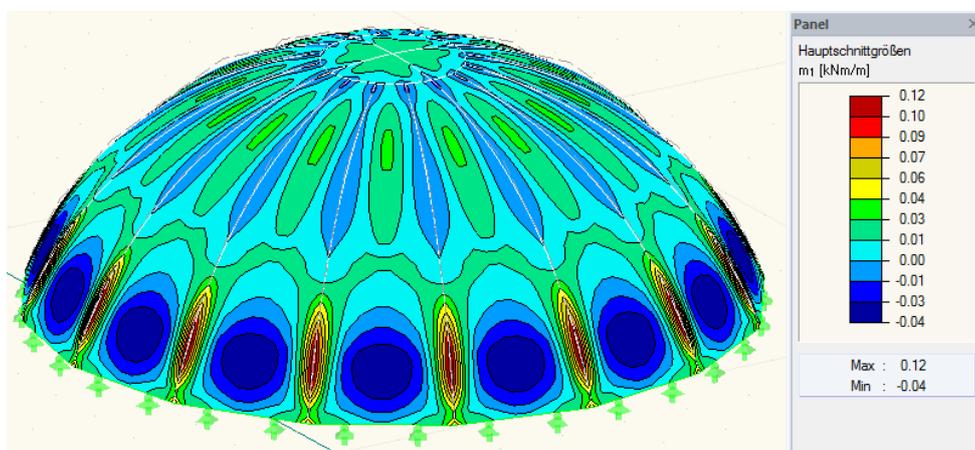


Abbildung 2.27: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt: Biegemomente m₁

2.4.3 Kugelabschnitt-Variante

Die Anzahl der Formen, die mit der „Pneumatic Wedge Method“ herstellbar sind, kann durch Änderung gewisser Parameter wesentlich erhöht werden. Es kann zum Beispiel ein Verschieben des Scheitelpunkts bzw. der Scheitellinie aus dem Zentrum oder eine Variation des Basiskreises oder einer erzeugenden Geraden schon große Wirkung zeigen [9].

In diesem Beispiel wird der Kugelabschnitt von Kapitel 2.4.2 als Ausgangsform genommen. Es wird der Scheitelpunkt 1,5 m seitlich verschoben. Damit ergibt sich die Freiform, die in Abbildung 2.28 dargestellt ist. Die maximale Höhe der Struktur beträgt 2,2 m.



Abbildung 2.28: Kugelabschnitt mit verschobenem Scheitelpunkt

Durch den Vershub des Scheitelpunktes entstehen verschieden stark gekrümmte Elemente. Je weiter der Basiskreis vom Scheitelpunkt entfernt ist, desto größere Krümmungsradien sind vorhanden. In Abbildung 2.29 ist das die rechte Seite. Es ist darauf zu achten, die minimal herstellbaren Krümmungsradien nicht zu unterschreiten. Der E-Modul wurde entsprechend den verschiedenen Krümmungen im Rechenmodell angepasst.

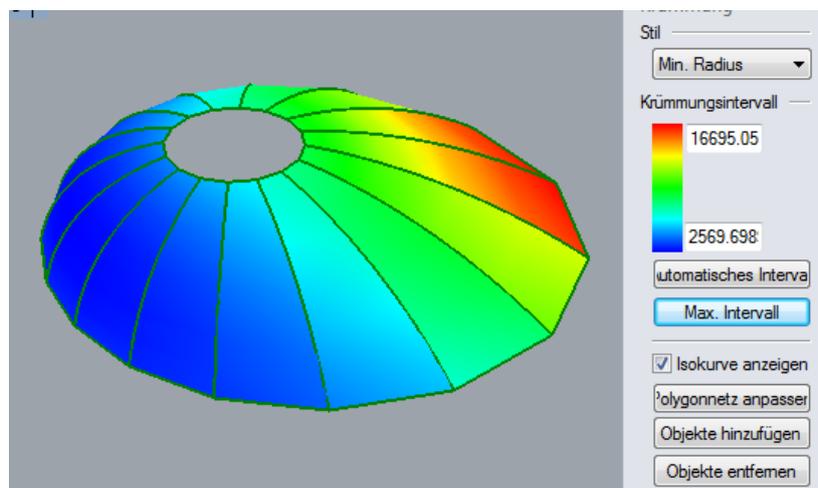


Abbildung 2.29: Krümmungen Kugelabschnitt-Variante

Verformung

Bei der Verformung kann man die gewohnte Durchbiegung an der Kappe beobachten. Man sieht aber in Abbildung 2.30 schön, dass sich jene Seite nach unten verformt, bei der der Basiskreis weiter vom Scheitelpunkt entfernt ist. An der gegenüberliegenden Seite neigt die Schale dazu sich nach außen zu verformen. Die Schale wird quasi entlang der Längsachse Richtung links gedrückt.

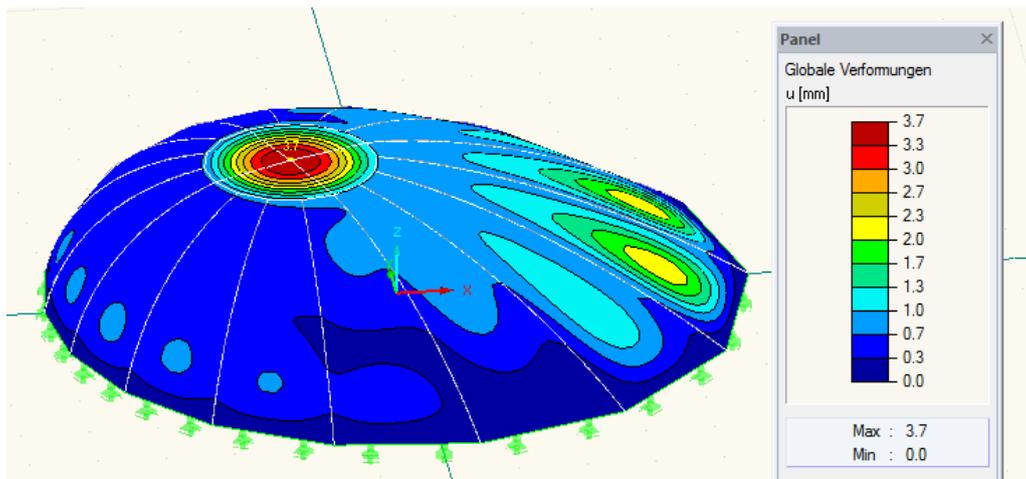


Abbildung 2.30: Verformung Kugelabschnitt-Variation

Auflagerreaktionen

In den Auflagerreaktionen zeigt sich, dass die Neigung der Schale entscheidenden Einfluss auf die horizontale Lagergröße hat. Die Werte bewegen sich im Bereich von 2,4-9,4 kN/m. Bei den Vertikalkräften ist die Differenz zwischen den einzelnen Segmenten nicht gravierend.

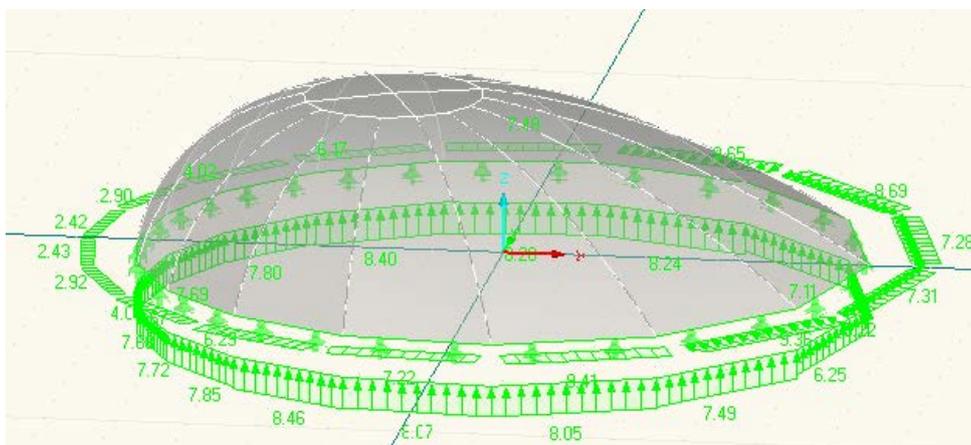


Abbildung 2.31: Auflagerreaktionen Kugelabschnitt-Variante

Normalkraft

Die Normalkräfte sind in Abbildung 2.32 dargestellt. Bei den Kräften n_1 in tangentialer Richtung kann man erkennen, dass sich im linken, steileren Bereich ein Zugbereich ausbildet. Hingegen herrscht im flachen Bereich über die komplette Schalenhöhe Druck. Diese Tatsache bestätigt, dass die Schale von rechts Richtung steilerer Seite drückt und deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Verformung.

In Meridianrichtung steht der Kugelabschnitt komplett unter Druck. Man kann deutlich erkennen, bei welchen Segmenten eine Anpassung des E-Moduls vorgenommen wurde. Je steifer der Betonquerschnitt eingegeben wurde, umso mehr Normalkräfte wurden auch abgeleitet.

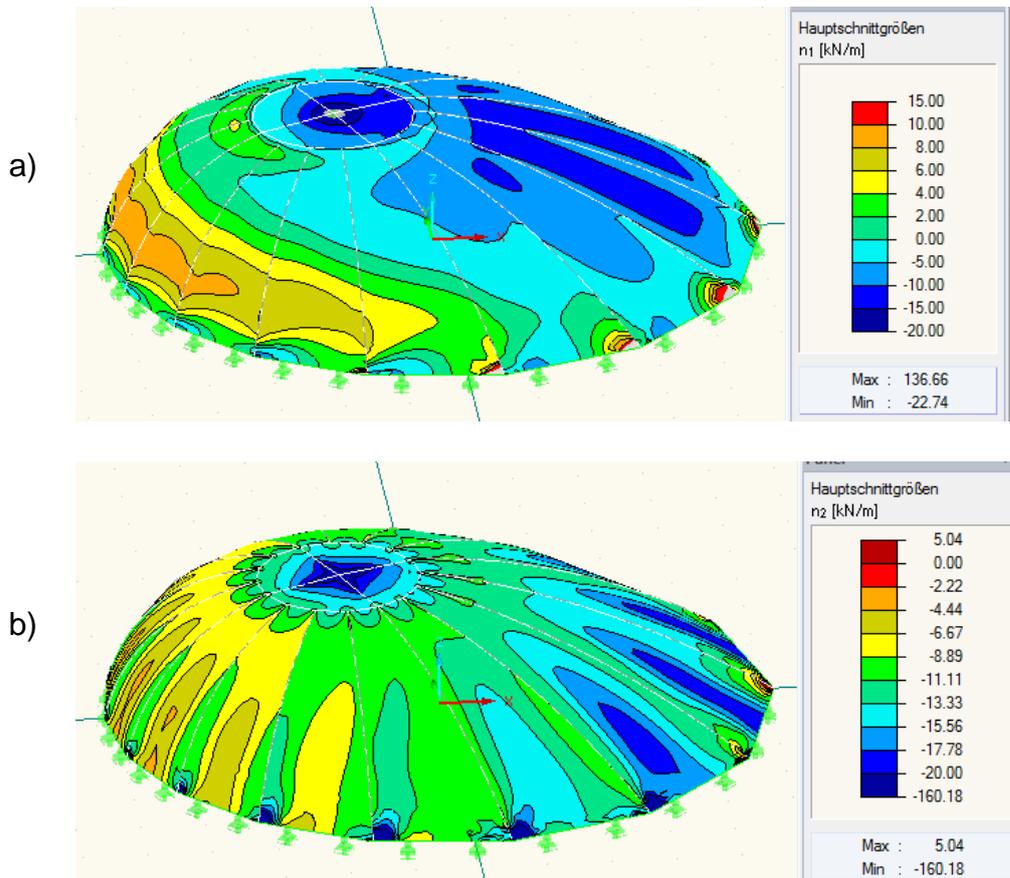


Abbildung 2.32: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt-Variante: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung

Biegemoment

Die Biegemomente ergeben sich wie beim symmetrischen Kugelabschnitt. Im Bereich der größten Verformungen, in denen die Schale seine Grundform verlässt, treten auch die größten Momente auf. Zusätzlich kommt es zu lokalen Spitzen im Bereich der Verbindungskanten der Einzelsegmente.

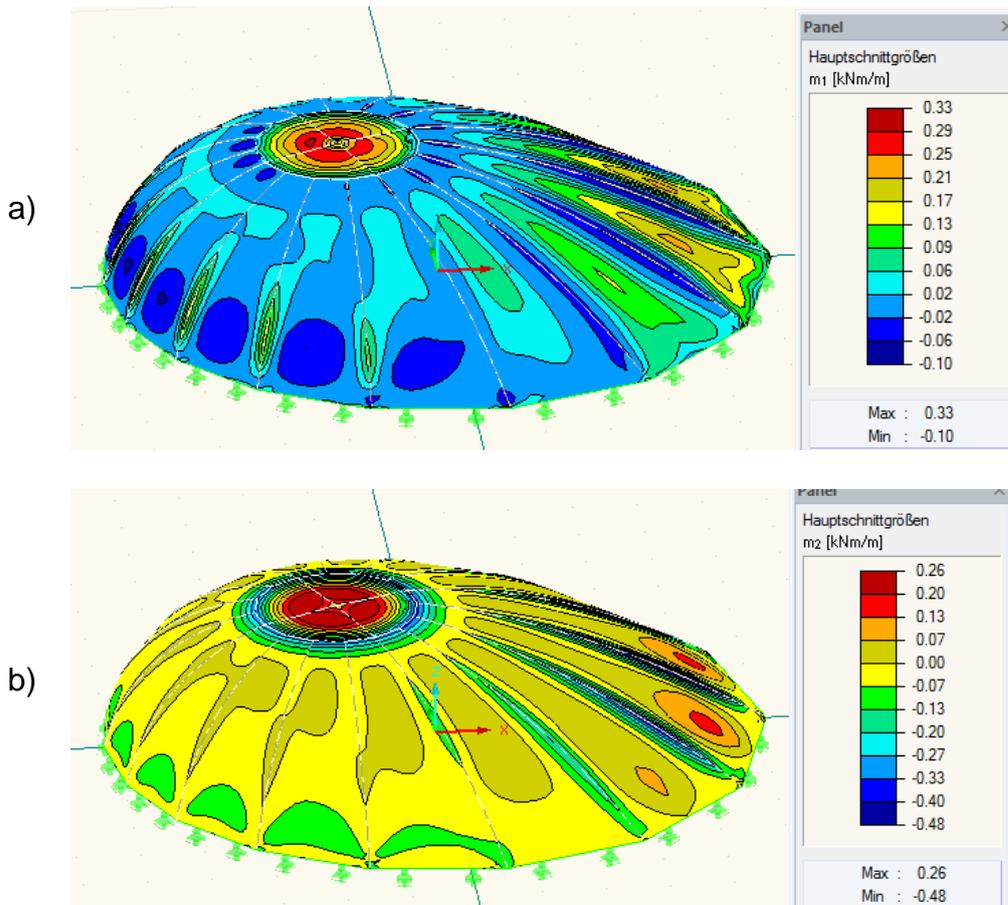


Abbildung 2.33: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt-Variante: a) Biegemomente m_1
b) Biegemomente m_2

2.4.4 Zylinder

Ein Kreiszyylinder entsteht durch Verschiebung eines Kreises parallel zu einer Geraden durch den Kreismittelpunkt der Achse, die nicht in der Ebene des Kreises liegt [9]. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Formen weist der Zylinder nur eine einfache Krümmung auf. In Abbildung 2.34 ist ein möglicher Umformungsprozess eines Zylinders abgebildet.



Abbildung 2.34: : Umformungsprozess Zylinder [4]

Im Falle eines Zylinders kann man auf die Segmentierung verzichten. Es gibt keine Fugen, die sich beim Aufstellvorgang schließen müssen. Eine rundumlaufende Vorspannung ist beim Zylinder nicht möglich. Es müsste mit linearen Vorspannelementen zwischen den Segmenten gearbeitet werden. Zur Hebung kann wieder ein Hebeplan eingesetzt werden. Die Größenbegrenzung für das Luftkissen ergibt sich durch die maximal aufnehmbare Zugkraft, die mit der Kesselformel ermittelt werden kann.

Zur Berechnung wurde ein Zylinder mit einem Radius von 5,5 m gewählt. Der entsprechende E-Modul beträgt 3085 N/mm².

Verformung

In Abbildung 2.35 ist die Verformung des Zylinders unter Eigengewicht und Schnee abgebildet. Die Durchbiegung in Zylindermitte ist mit über 1 m extrem hoch. Das bedeutet, dass der Bau der Zylinderschale in der berechneten Konfiguration nicht möglich ist. Die verringerte Steifigkeit, die dem Umformungsprozess geschuldet ist und die dünne Schalendicke machen den Zylinder so nicht realisierbar. Man sieht in diesem Fall auch schön, wie effektiv die Tragwirkung von zweifach gekrümmten Schalen im Vergleich zu einfach gekrümmten ist. Denn andere zweifachgekrümmte Schalen in derselben Größenordnung erfahren unter der gleichen Belastung nur sehr geringe Verformungen.

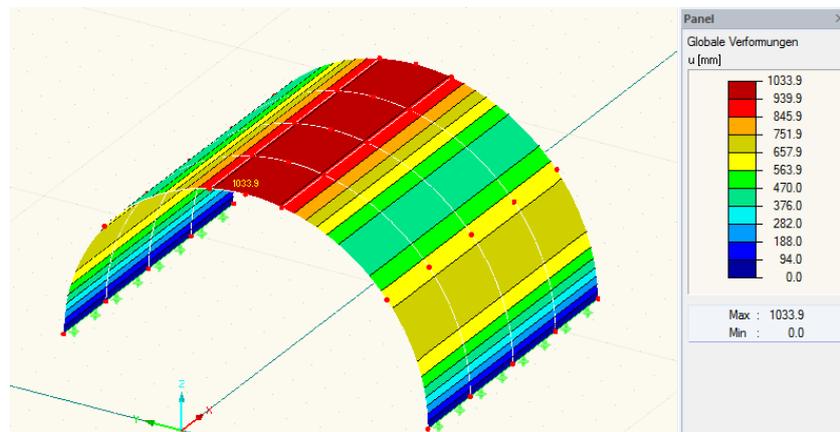


Abbildung 2.35: Verformung Zylinder

Der Bau in der berechneten Größenordnung mit den bisher getroffenen Annahmen ist nicht möglich. Um solche geometrischen Formen trotzdem sinnvoll mit der „Pneumatic Wedge Method“ herzustellen, sind Abänderungen nötig. Man könnte zum Beispiel die Schalendicke erhöhen. Ein weiterer Lösungsansatz wäre die Aufbringung einer zusätzlichen Betonschicht nach der Umformung unter temporärer Beibehaltung des aufgeblasenen Luftkissens unter der Struktur.

2.4.5 Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten

Es ist natürlich möglich einzelne oben vorgestellte Formen zu verbinden, zum Beispiel einen Zylinderabschnitt mit 2 Halbkugelabschnitten zu koppeln. Eine Möglichkeit einer solchen Kombination kann man in Abbildung 2.36 sehen.



Abbildung 2.36:: Umformungsprozess Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten [4]

Der Zylinderbereich ist einfach gekrümmt und die Halbkugelabschnitte erfahren eine 2-fache Krümmung. Daher ist besonderes Augenmerk auf den Übergangsbereich zu legen. Aufgrund der dort vorhandenen abrupten Krümmungsänderung ist mit einer erhöhten Beanspruchung zu rechnen.

Bei der Herstellung können idente Schalungselemente für den Halbkuppelbereich verwendet werden. Der Hebeplan muss der länglichen

Grundform angepasst werden. Zur Unterstützung beim Hebevorgang werden wieder rundumlaufende Spannritzen eingesetzt. Für die Berechnung wurde ein Radius von 5,5 m der einzelnen Elemente gewählt.

Verformung

In Abbildung 2.37 kann man gut erkennen, dass der Tragmechanismus des Zylinders mit seiner 1-fachen Krümmung wesentlich schlechter ist als die der Halbkugelelemente. Dementsprechend finden sich in diesem Bereich auch die größten Verformungen wieder. In Schalenmitte befindet sich die größte Durchbiegung. An den Längsseiten kommt es im Teil des einfachen Zylinders zu einer Ausbauchung. Bei den Halbkugelelementen bilden sich keine wesentlichen Verformungen aus.

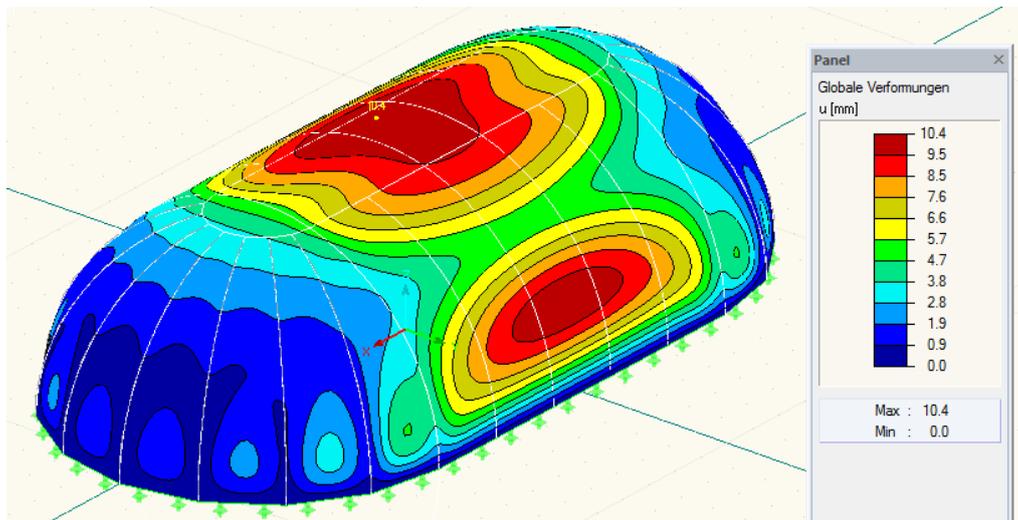


Abbildung 2.37: Verformungen Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten

Auflagerreaktion

Die Auflagerreaktionen sind entlang des Umfanges unterschiedlich verteilt. Die geringsten Lasten kommen im Bereich des Zylinderabschnittes am Boden an. Der weiche Zylinder entzieht sich der Lastabtragung und verlagert seine Lasten in Richtung der 2-fach gekrümmten Halbkugелеlemente. Darum bilden sich unter den Übergangsegmenten von Halbkugel zu Zylinder die größten Auflagerreaktionen aus. Dieses Phänomen ist vor allem bei den vertikalen Größen ersichtlich (Abbildung 2.38).

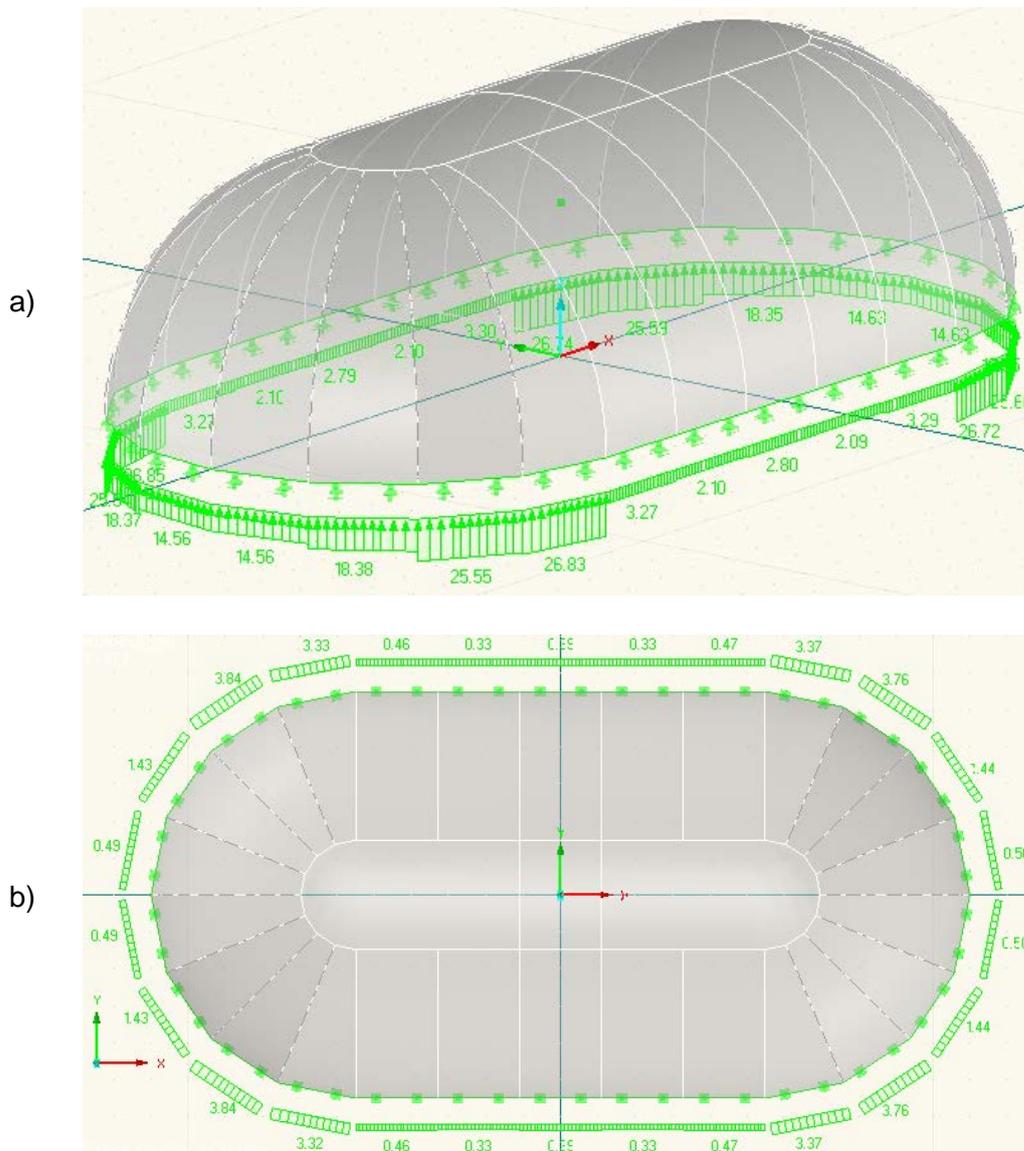


Abbildung 2.38: Berechnungsergebnisse Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten: a) vertikale AR b) horizontale AR

Normalkraft

Aus Abbildung 2.39 sind sehr gut die Steifigkeitsverhältnisse erkenntlich. Der Zylinderbereich gibt nach und es bildet sich bei den Normalkräften in Meridianrichtung ein Druckbogen hin zu den Halbkugелеlementen aus. Damit sind auch die geringen Auflagerkräfte im Bereich des Zylinders erklärbar. Der Kantenbereich zwischen den Segmenten mit der erhöhten Steifigkeit bildet sich genauso wieder aus. Bei den Normalkräften in Ringrichtung reicht der Zugbereich etwa bis $2/3$ der Höhe hinauf. Die 50 mm dicke Schale ist in der Lage, die vorhandenen Schnittkräfte aufzunehmen.

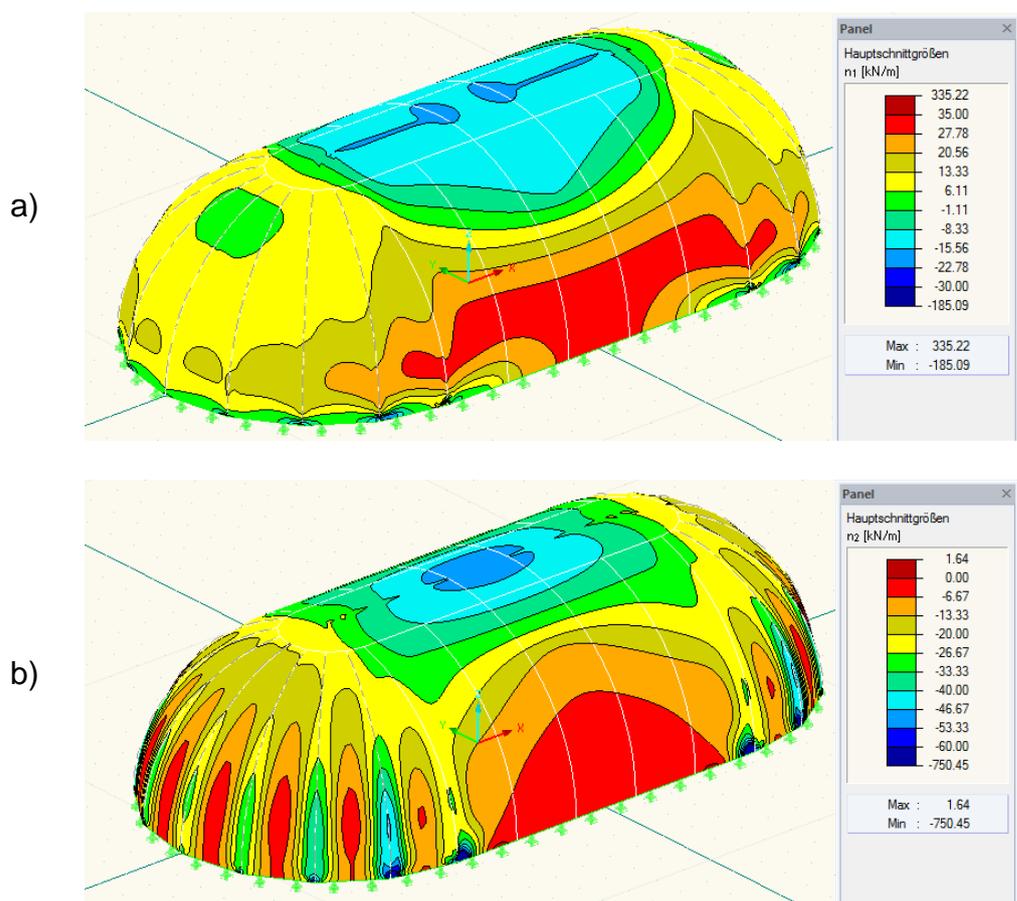


Abbildung 2.39: Berechnungsergebnisse Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung

Biegemoment

Wie schon in den vorangegangenen Beispielen ist auch diese Freiformfläche durch die Membrantragwirkung geprägt. Daher sind die in Abbildung 2.40 dargestellten Momente im Vergleich zu den Normalkräften klein. Lediglich im Kantenbereich kommt es zu örtlichen Spitzen.

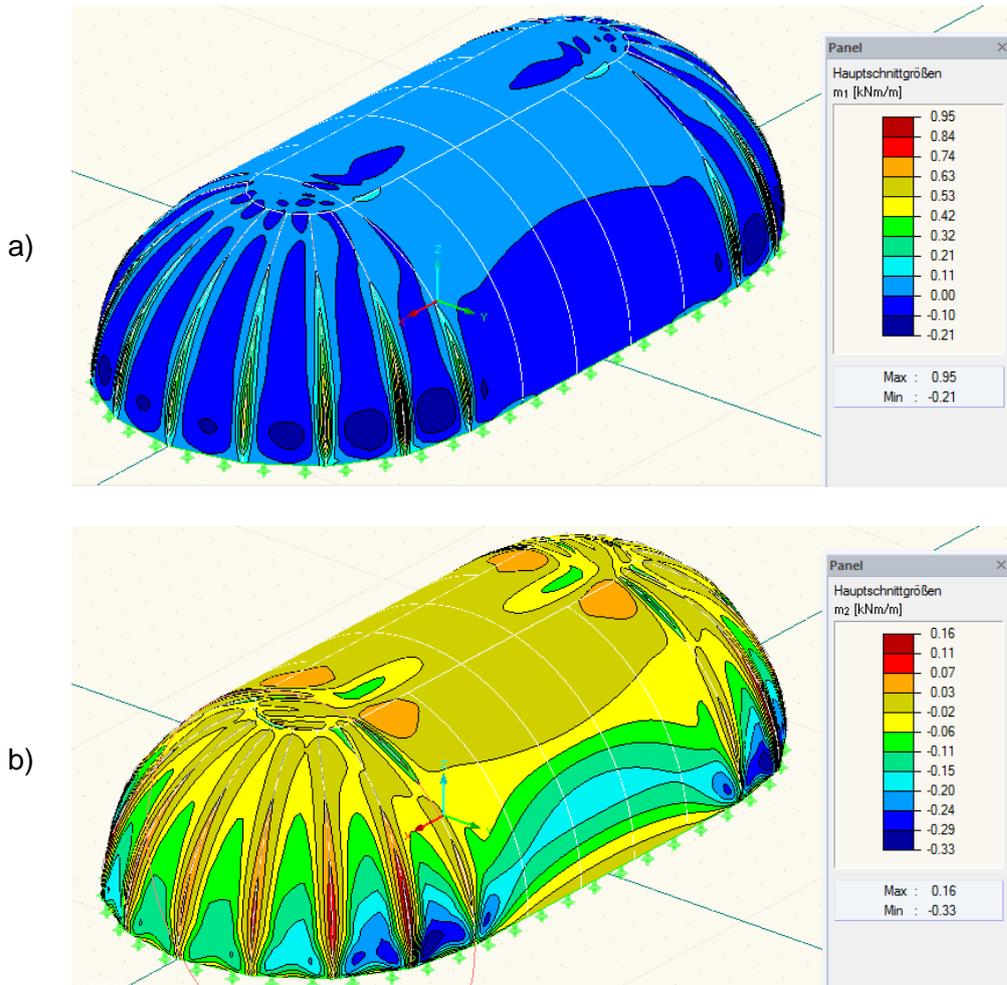


Abbildung 2.40: Berechnungsergebnisse Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten: a) Biegemomente m1 b) Biegemomente m2

2.4.6 Halbellipsoid

Ein Ellipsoid lässt sich durch Gleichung (2-34) allgemein beschreiben.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2-34)$$

x, y, z Koordinaten

a, b, c Länge der Halbachsen



Abbildung 2.41: Umformungsprozess Halbellipsoid [4]

Das Ellipsoid besitzt zwar ebenso wie die Kugel eine stetige positive Gaußsche Krümmung, diese ist aber nicht konstant sondern ändert sich kontinuierlich. Die Ausführung mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist möglich. Eine Segmentation funktioniert, aber die Abstände zwischen den Segmenten sind aufgrund der unterschiedlichen Verzerrungen verschieden groß.

Die Form des Ellipsoids eignet sich besonders gut zur Umformung mittels Hebeplane. Der Einsatz von Spannritzen ist nur unterstützend. Dabei kommt es beim Spannen der Spannglieder zu einer unterschiedlich hohen Belastung der Betonsegmente. Bei einem langen Ellipsoid sind die Umlenkkräfte an den Spitzen dementsprechend größer als an den Längsseiten.

Das berechnete Ellipsoid ist 21 m lang, 11 m breit und 5,3 m hoch. Die Form wurde mit 24 Betonsegmenten diskretisiert.

Verformung

Die größte Verformung von 9,2 mm findet in Schalenmitte statt, bezogen auf die Abmessungen des Halbellipsoids ein kleiner Wert. An der Längsseite kommt es im unteren Bereich zu einer geringen Verformung nach außen.

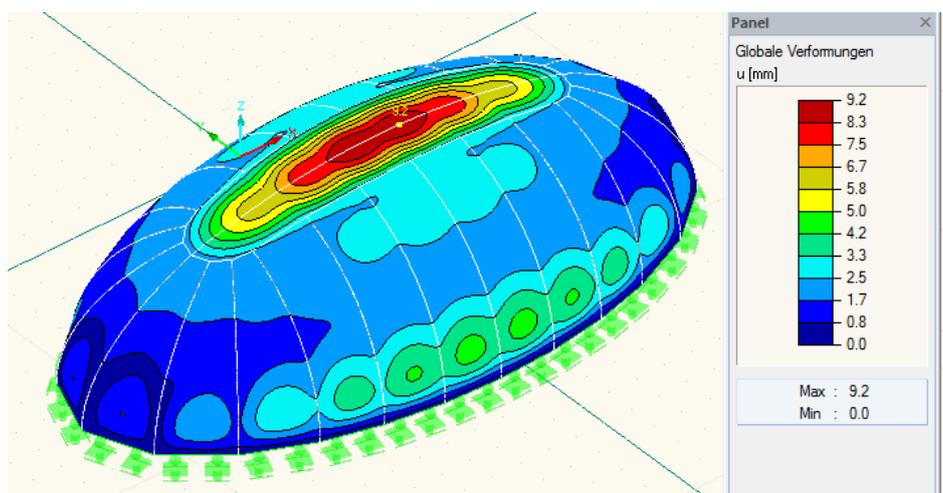


Abbildung 2.42: Verformung Halbellipsoid

Auflagerreaktion

In Abbildung 2.43 sind die berechneten Auflagerreaktionen zu sehen. Die Größe der Lagerreaktionen an der Längsseite ist geringer als die der Breitseite. Ein ähnlicher Effekt ist beim Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten aufgetreten.

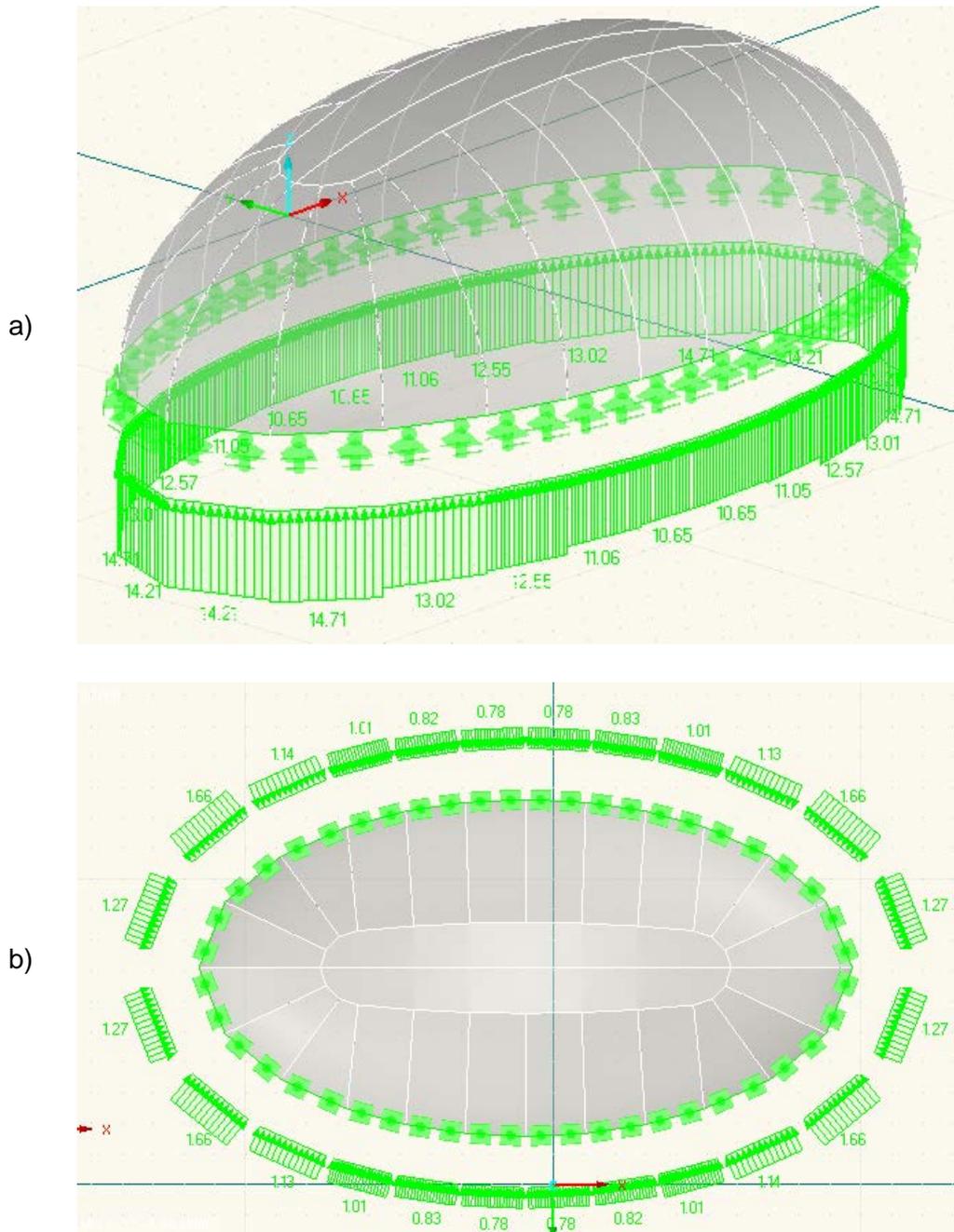


Abbildung 2.43: Berechnungsergebnisse Halbellipsoid: a) vertikale AR b) horizontale AR

Normalkraft

Betrachtet man die Normalkräfte in Meridianrichtung (Abbildung 2.44) erkennt man, dass die komplette Schale unter Druck steht. Die größte Druckkraft ergibt sich mit ca. 60 kN/m (1,2 N/mm²) im Scheitel. Man sieht auch, dass die Breitseite, in der eine stärkere räumliche Krümmung vorherrscht, vermehrt zur Lastabtragung herangezogen wird. Bei den Kanten kommt es aufgrund schon erklärter Effekte zu erhöhten Werten.

Bei den Normalkräften in Ringrichtung ergibt sich ein Kräfteverlauf wie bei den bis jetzt betrachteten Formen. Der obere Teil der Schale steht unter Druck, der untere Teil steht unter Zug.

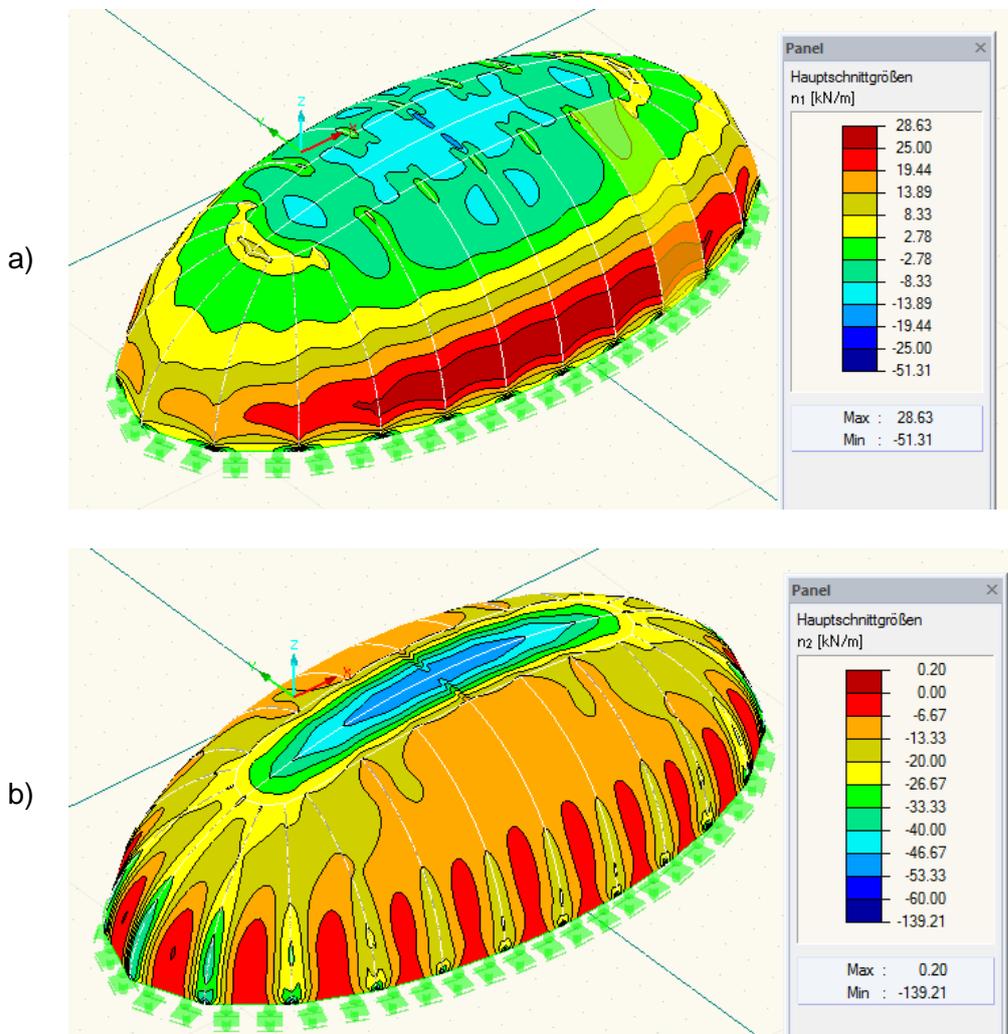


Abbildung 2.44: Berechnungsergebnisse Halbellipsoid: a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung

Biegemoment

Bei den Biegemomenten m_1 ist der Maximalwert von $0,74 \text{ kNm/m}$ örtlich eine Spitze im Kantenbereich. Im Rest der Schale entsteht sonst kaum ein Biegemoment. Bei den Biegemomenten m_2 kommt es beim Übergang der Segmente zum Scheitel zum Maximalwert. Dieser lässt sich durch eine Kante bei der Modellierung in RFEM erklären. Bei realen Bauwerken wäre der Übergang fließend und es würde kein Moment in der Größenordnung auftreten.

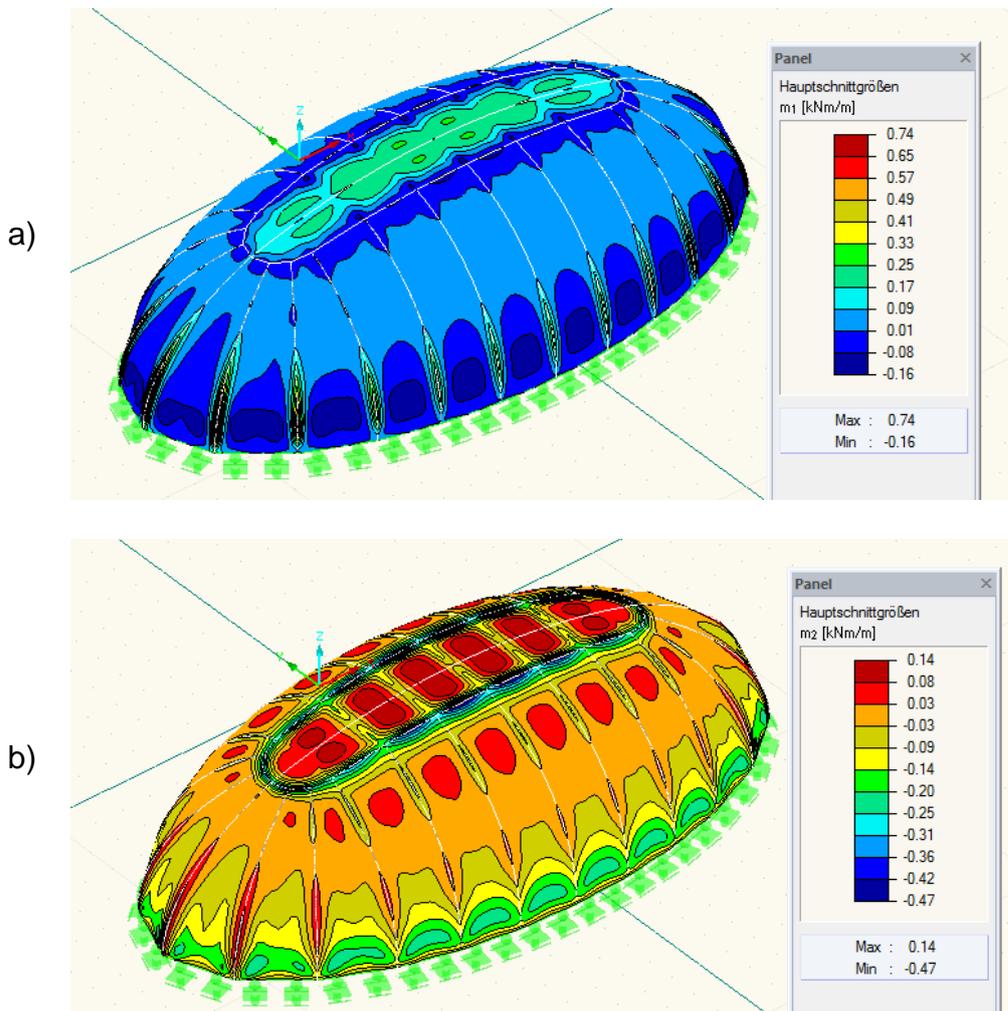


Abbildung 2.45: Berechnungsergebnisse Halbellipsoid: a) Biegemomente m_1 b) Biegemomente m_2

2.4.7 Ellipsoidabschnitt

Für den Ellipsoidabschnitt gilt hinsichtlich Anwendbarkeit der „Pneumatic Wedge Method“ das Gleiche wie beim Halbellipsoid. Einen Ausblick auf den Einsatz der Methode bekommt man in Abbildung 2.46. Durch die verschiedenen Segmentformen ist der Planungs- und der Schalungsaufwand relativ hoch.



Abbildung 2.46: Umformungsprozess Ellipsoidabschnitt [4]

Je niedriger die Höhe des Ellipsoidabschnittes gewählt wird, desto geringer fällt auch die Krümmungsverzerrung aus, die entsteht, wenn man die Schale in die Ebene transformiert. Die Schale fällt flacher aus und geht in wesentlich spitzerem Winkel in die Auflager über. Es treten dort deutlich mehr Horizontalkräfte auf als beim Halbellipsoid, der die entstehenden Druckspannungen in der Schale fast vertikal ins Auflager ableitet [9].

Der berechnete Ellipsoidabschnitt hat eine Länge von 21 m, eine Breite von 11 m und eine Höhe von 3,7 m.

Verformung

Das Verformungsbild entspricht jenem der Versuchsschale und wurde bereits in Kapitel 2.3.4 eingehend erläutert.

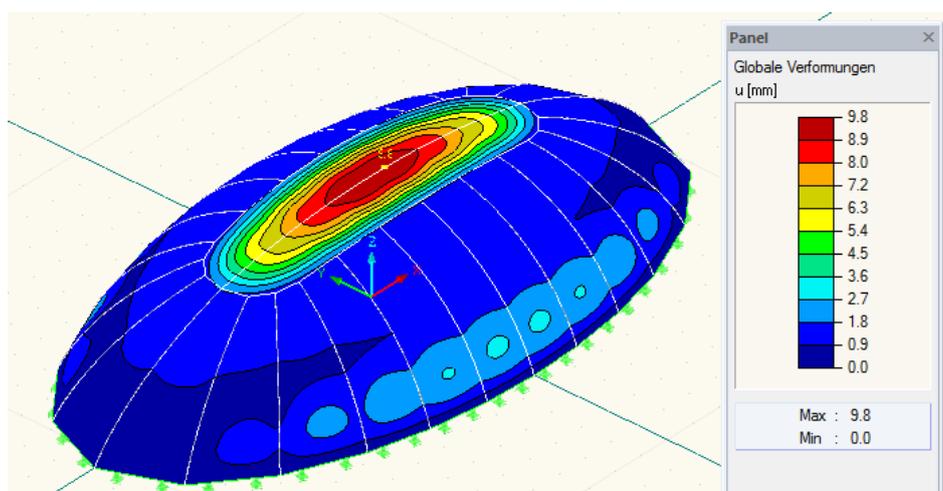


Abbildung 2.47: Verformung Ellipsoidabschnitt

Normalkraft

Bei den Normalkräften in Meridianrichtung gibt es eine bessere Lastabtragung über die schmalen Enden des Ellipsoidabschnitts. Die Verteilung der Normalkräfte ist regelmäßig. Die ganze Kuppel steht unter Druck mit einem Maximalwert von ca. 60 kN/m ($1,2 \text{ N/mm}^2$) in Schalenmitte. Bei den in Ringrichtung wirkenden Normalkräften bildet sich im unteren Teil der Schale ein Bereich mit Zug aus, der sein Maximum an der Längsseite erreicht.

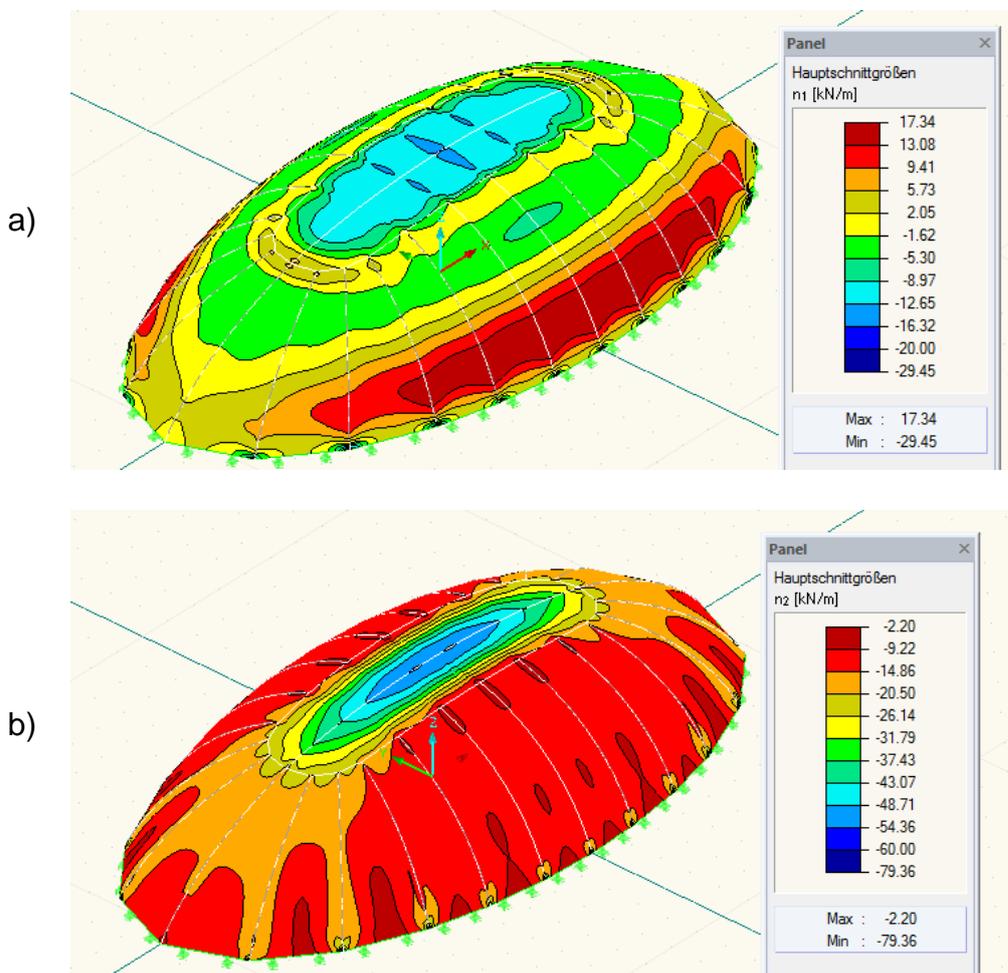


Abbildung 2.49: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt: a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung

Biegemoment

In Abbildung 2.50 sind die Biegemomente des Ellipsoidabschnitts dargestellt. Der maximal auftretende Wert von 0,56 kNm/m tritt beim Übergang der Segmente in den Scheitelbereich auf. Das lässt sich durch eine ausgebildete Kante im Rechenmodell erklären. In der Realität ist diese Kante nicht ausgeprägt und die berechneten örtlichen Momente entstehen nicht in diesem Ausmaß.

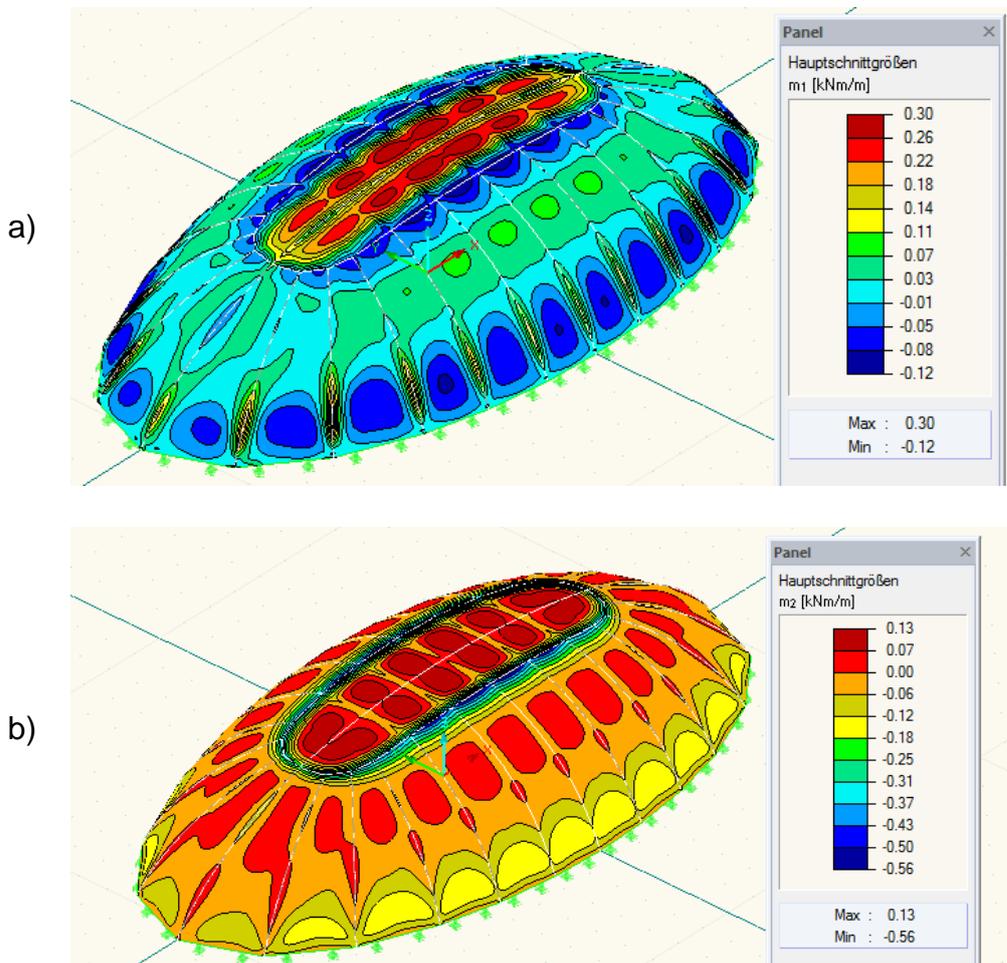


Abbildung 2.50: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt: a) Biegemomente m_1
b) Biegemomente m_2

2.4.8 Ellipsoidabschnitt-Variante

Wie schon bei der Variante des Kugelabschnittes ist es möglich die Grundform des Ellipsoids zu verändern. Bei den gemachten Anpassungen bleibt trotzdem eine positive Gaußsche Krümmung über den gesamten Körper erhalten. Die Form bleibt abwickelbar. Die Herstellbarkeit mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist weiterhin gegeben. Allerdings steigt der Planungs- und Arbeitsaufwand für Herstellung an.

Bei der gewählten Variante wurde einerseits der Scheitelpunkt seitlich verschoben und andererseits die Basisellipse verzerrt. Somit kann man von einer Freiformfläche sprechen, die mit der Ausgangsform nur mehr wenig Gemeinsamkeit besitzt. Die genannten Änderungen führen zur Freiform in Abbildung 2.51.

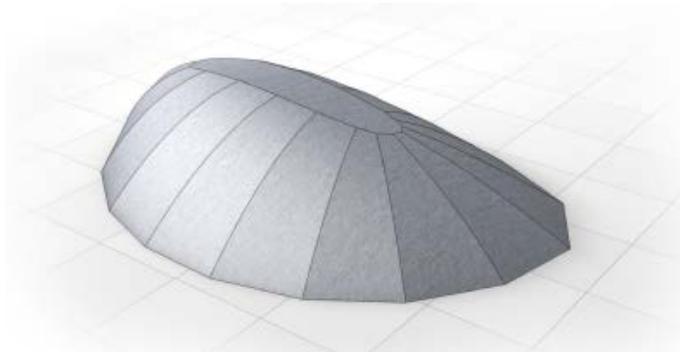


Abbildung 2.51: Ellipsoidabschnitt mit verschobenem Scheitel und verzerrter Basisellipse

Die berechnete Form besitzt die Abmessung von ca. 15,5x11x2,9 m. Durch die gewählte Geometrie ändert sich auch die Krümmung der einzelnen Segmente kontinuierlich. In Abbildung 2.52 ist der Krümmungsverlauf abgebildet. Im Rechenmodell wurde der E-Modul dementsprechend je Segment angepasst.

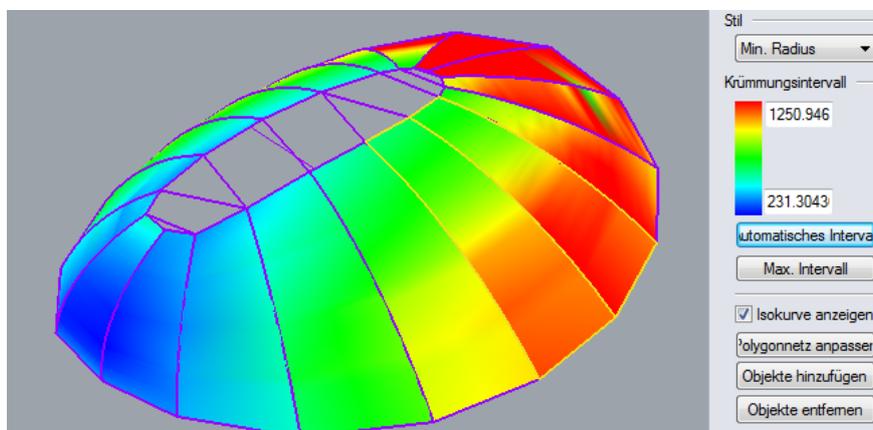


Abbildung 2.52: Ellipsoidabschnitt-Variante: Minimaler Krümmungsradius

Verformung

Die unter Belastung erhaltene Verformung ist in Abbildung 2.53 dargestellt. Die größten Durchbiegungen befinden sich im Bereich des Scheitels und in den flachen Teilen der Freiform. Die Maximalverformung von 2,4 mm befindet sich in jenem Bereich, der am weitesten von der Spitze entfernt ist und die geringste Neigung besitzt. Im linken Teil, der stark geneigt ist, tendiert die Schale im Fußbereich dazu, etwas nach außen gedrückt zu werden. Ähnliches ist schon bei der Variante des Kugelabschnittes mit verschobenem Scheitel zu beobachten gewesen.

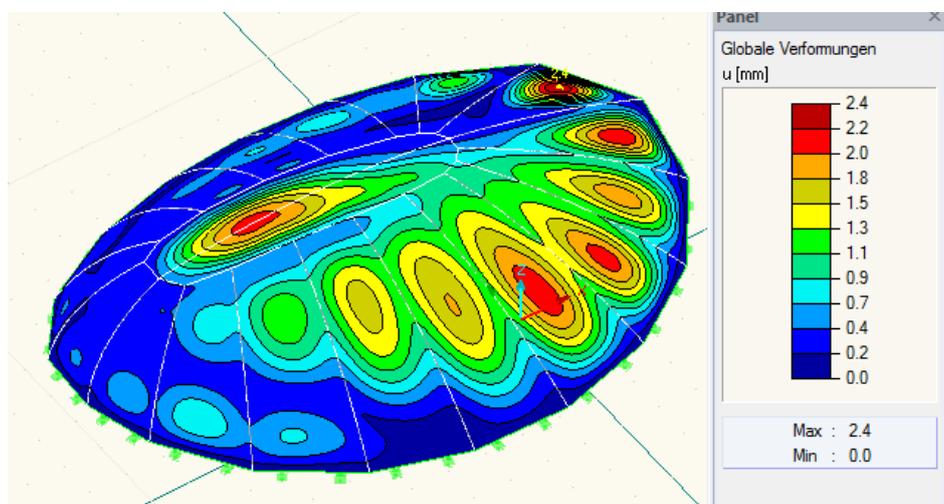


Abbildung 2.53: Verformung Ellipsoidabschnitt-Variante

Auflagerreaktion

Die größten vertikalen Auflagerreaktionen erhält man an den Längsseiten. In dem Bereich ist die Freiform am breitesten und erfährt somit auch höchste Belastung durch Schnee und Eigengewicht. Weiters ist die Schale in diesem Bereich noch steil genug um eine effektive Lastabtragung zu gewährleisten. Den schmalen Seiten kommen kleinere vertikale Auflagerkomponenten bei, etwa aufgrund der geringen Lasteinflussfläche im linken Bereich. Bei den horizontalen Auflagerreaktionen sieht man wieder den Zusammenhang von Neigung der Schale mit den erhaltenen Auflagergrößen.

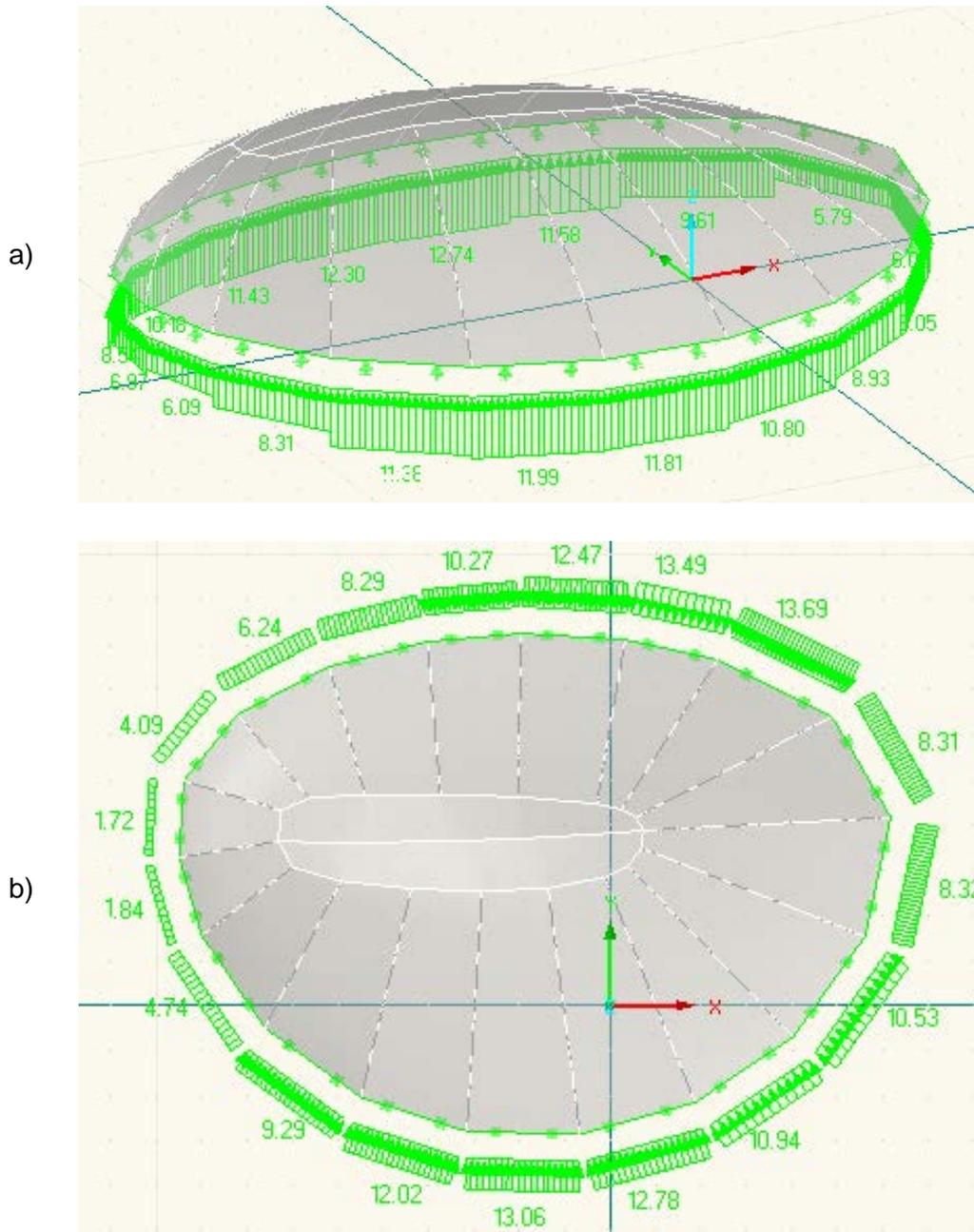


Abbildung 2.54: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt-Variante: a) vertikale AR b) horizontale AR

Normalkraft

Der Verlauf der Normalkräfte ist aus Abbildung 2.55 ersichtlich. Es ergibt sich bei den Normalkräften in Radialrichtung folgendes Bild: Der rechte Teil der Schale und der Scheitelbereich erfahren Druckbelastung, der linke Teil steht unter Zugbelastung. Die Schale wird also Richtung Scheitelverschiebung gedrückt.

Bei den Normalkräften in Meridianrichtung ergibt sich eine den Auflagerreaktionen entsprechende Ausbildung. Der linke steile Teil bekommt nur relativ wenig Druck. Beim rechten Teil mit der großen Lasteinflussfläche ergeben sich hingegen höhere Werte für die Normalkraft.

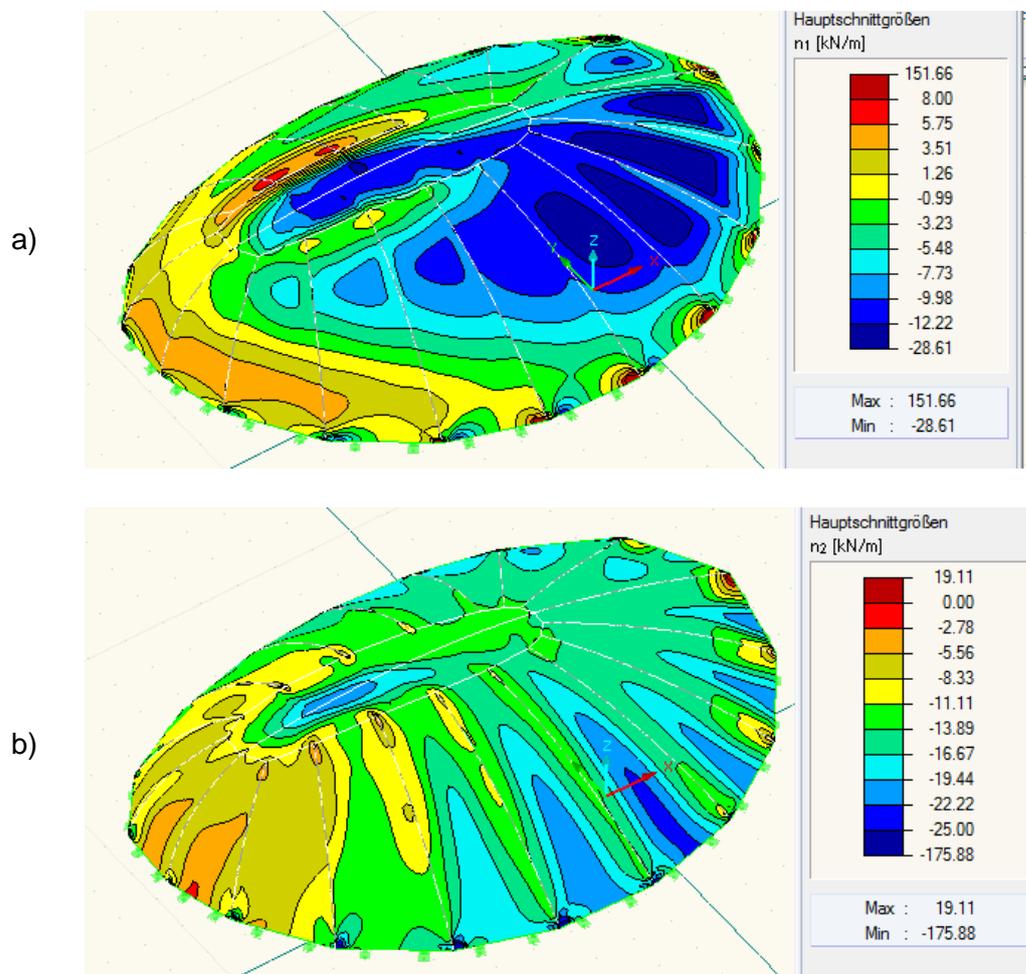
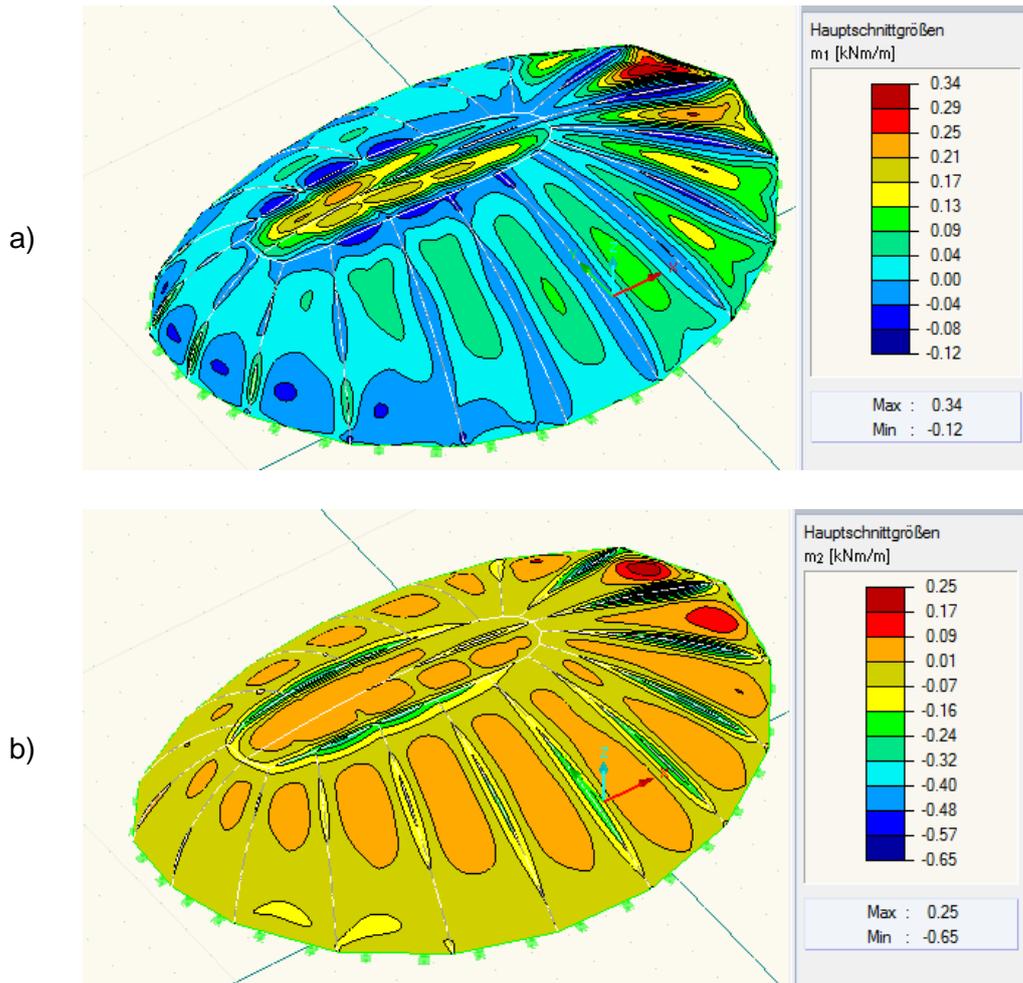


Abbildung 2.55: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt-Variante a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung

Biegemoment

Das Biegemoment m_1 bekommt seinen Maximalwert an der Stelle der größten Durchbiegung. Durch diese Verformung entsteht Biegung in der Schale. Der punktuelle Maximalwert von $0,34 \text{ kNm/m}$ (Bruchmoment= $0,8 \text{ kNm/m}$) kann von der 50 mm dicken Schale aber aufgenommen werden.



**Abbildung 2.56: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt-Variante:
a) Biegemomente m_1 b) Biegemomente m_2**

2.4.9 Paraboloid

Ein elliptisches Paraboloid lässt sich durch Gleichung (2-35) allgemein beschreiben.

$$x^2 + y^2 = z \quad (2-35)$$

x, y, z, \dots Koordinaten



Abbildung 2.57: : Umformungsprozess Paraboloid [4]

Ein Paraboloid ist rotationssymmetrisch und besitzt eine sich ändernde positive Gaußsche Krümmung. Im Vergleich zur Halbkugel sind mit einem Paraboloid bei gleicher Grundrissabmessung größere Raumhöhen und bessere Platzausnutzung möglich. Die Transformation von einer ebenen Platte verlangt aber demnach auch größere Verzerrungen, vor allem im Randbereich (Abbildung 2.57).

Der Planungs- und Arbeitsaufwand ist aufgrund der Symmetrie verhältnismäßig gering. Folgend aus den großen Verzerrungen im Randbereich wird der Abstand zwischen den Segmenten groß. Zum Aufstellen reicht zu Beginn das Luftkissen aus. Die Zielhöhe ist aber nur mit dem Einsatz des Spanngliedes zu erreichen.

Das berechnete Paraboloid besitzt einen Grundflächendurchmesser von 10 m und eine Höhe von 5,7 m.

Verformung

Das Paraboloid ähnelt der Halbkugel. Das ist auch gut an den Verformungen in Abbildung 2.58 zu erkennen. Es kommt lediglich zu Durchbiegungen am Scheitel, an der die Krümmung am geringsten ist.

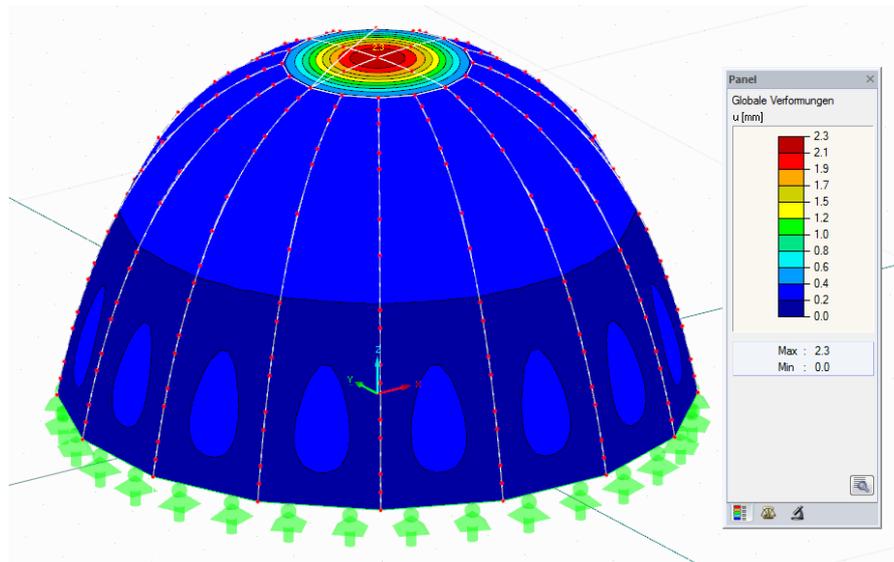


Abbildung 2.58: Verformung Paraboloid

Auflagerreaktion

Die Verteilung der Auflagerreaktionen entspricht der Symmetrie des Paraboloids. Das Paraboloid weist im Fußbereich eine geringe Krümmung auf, die Betonsegmente stehen dementsprechend steil. Daher sind die vertikalen Auflagerreaktionen bedeutend größer als die horizontalen. Sie stehen im Verhältnis 1:5. Zum Vergleich: Bei der Halbkugel ist das Verhältnis 1:15 und beim in Kapitel 2.4.2 gewählten Kugelabschnitt 1:2,5.

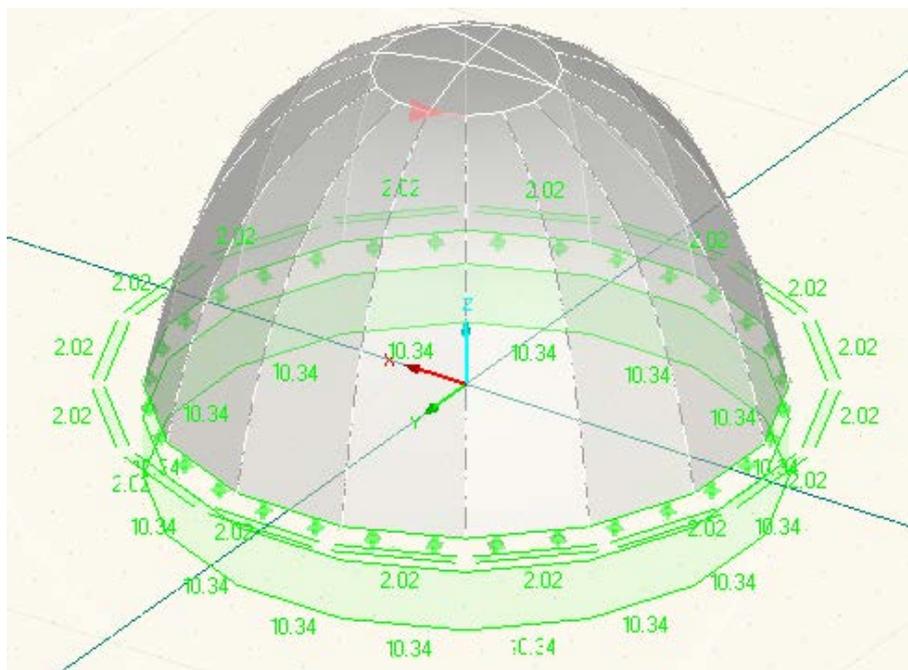


Abbildung 2.59: Auflagerreaktionen Paraboloid

Normalkraft

Die Ergebnisse der Normalkraft sind mit denen der Halbkugel vergleichbar. In Ringrichtung ist der untere Bereich der Schale unter Zug, der Scheitelbereich unter Druck. Die Normalkräfte in Meridianrichtung sind gleichmäßig verteilt und erreichen am Scheitel den Maximalwert.

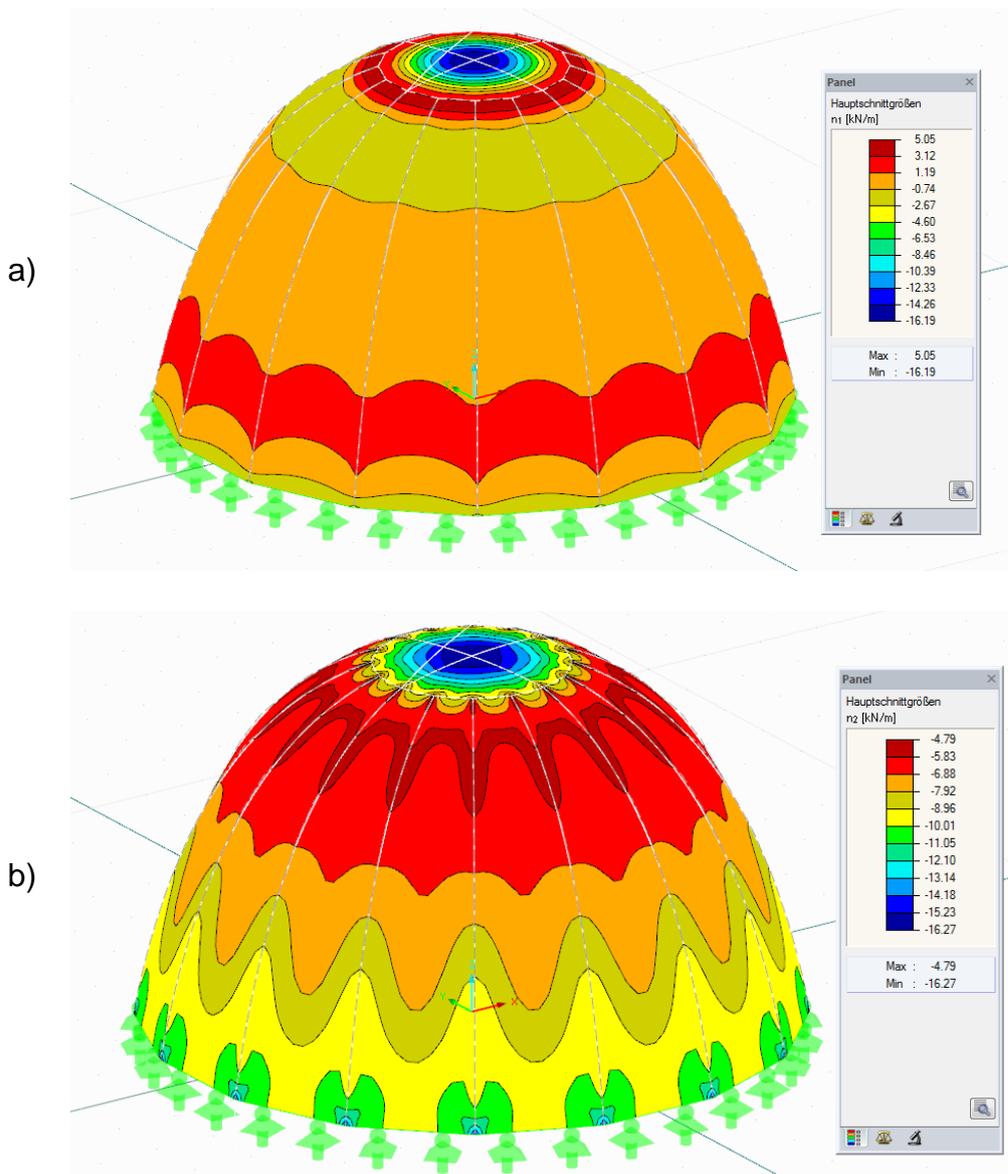


Abbildung 2.60: Berechnungsergebnisse Paraboloid: a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung

Biegemoment

Die Biegemomente sind zur Vervollständigung der Ergebnisse in Abbildung 2.61 angeführt. Der Maximalwert, der in einem örtlich begrenzten Bereich erreicht wird, beträgt 0,25 kNm/m. Durch den eingestellten Membranspannungszustand entstehen nur kleine Biegemomente.

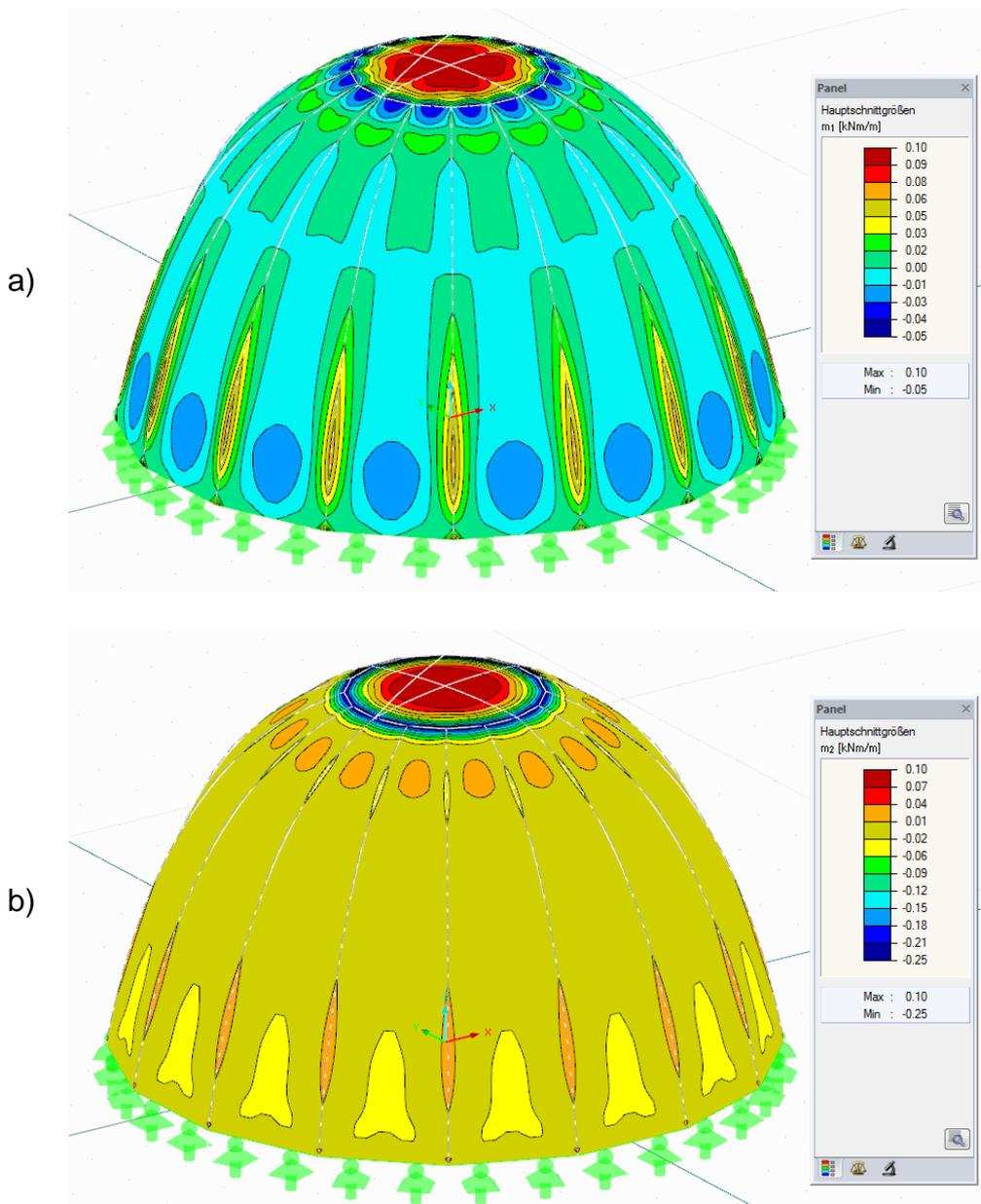


Abbildung 2.61: Berechnungsergebnisse Paraboloid: a) Biegemomente m_1 b) Biegemomente m_2

3 Bau einer freigeformten Schalenstruktur

3.1 Arbeitsvorbereitung

3.1.1 Schalungsbau

Die zur Herstellung der Schale benötigten Schalungselemente wurden in der Produktionsstätte Amstetten/St. Martin der Fa. Doka in Amstetten unter Mithilfe der dortigen Arbeiter angefertigt. Der Bau erfolgte zwischen 17.03.2014 und 20.03.2014.

Für den Versuchsaufbau sind folgende Schalungen notwendig:

- ◆ 24 Schalungskeile
- ◆ 24 Randabschalungen
- ◆ 2 Schalungen für den Ankerblock

Schalungskeil: Es sind 12 verschiedene Typen der Schalungskeile notwendig, um die gesuchte Geometrie der Schale abzubilden. Dazu wird die in Form geschnittene Platte der Grundfläche seitlich beplankt. Aus Transportgründen bestehen die Schalungskeile aus drei Einzelteilen, die beim Versuchsaufbau vor Ort zusammenschraubt werden. In Abbildung 3.1 ist beispielhaft der Plan eines Keiles dargestellt. Auf die im Plan ausgewiesenen Ausschalhilfen wurde verzichtet.

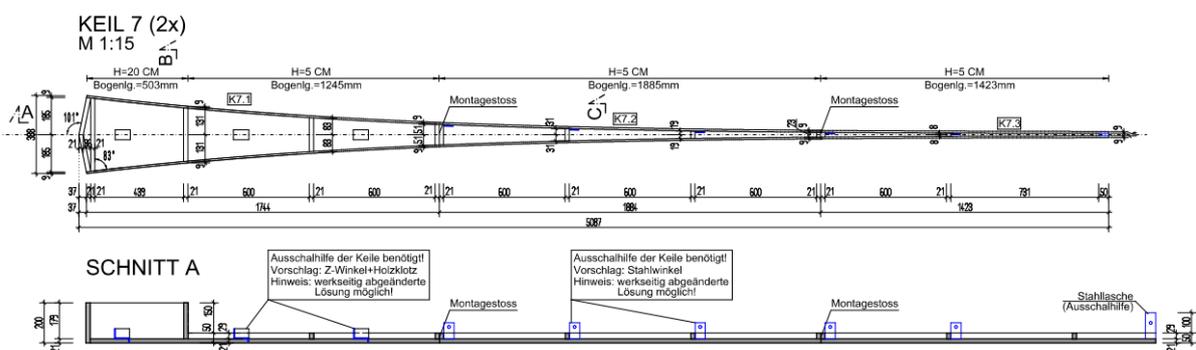


Abbildung 3.1: Schalungskeil

Randabschalungen: Wie bei den Schalungskeilen sind auch hier 12 verschiedene Randabschalungstypen notwendig. In Abbildung 3.2 ist beispielhaft der Plan einer Randabschalung dargestellt. Der innere bogenförmige Teil bildet die Betonabschalung und wird als verlorene Schalung zur besseren Führung der Spannlitzen genutzt. Daher sind Schrauben angebracht, um einen ausreichenden Verbund zwischen Schalung und Beton

herzustellen. Der untere Teil wird geneigt ausgeführt, um nach vollständigem Aufstellen der Schale horizontal am Boden aufzustehen. In diesem Bereich sind auch die Kanten abgefast. Der Aufsatzkasten ist zur Erhöhung der Steifigkeit des Schalelements notwendig, um beim Vorspannvorgang der Stahlseile größere Verformungen des Randabschalelements zu verhindern. Dieser Aufsatzkasten wird beim Ausschalen auch wieder entfernt.

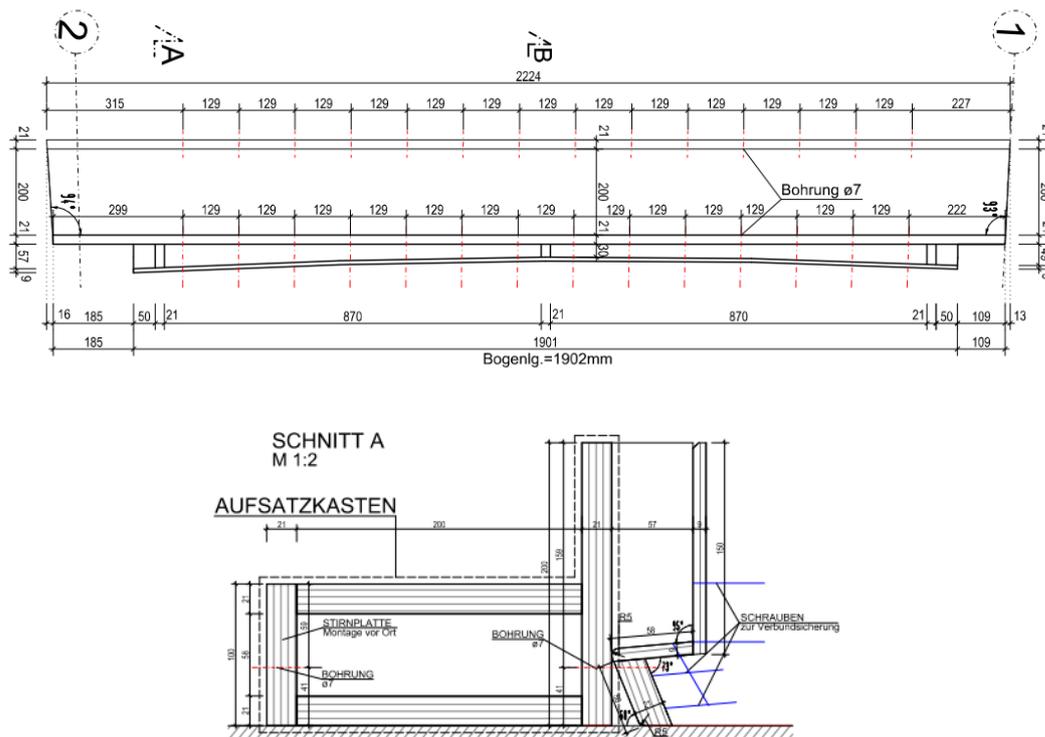


Abbildung 3.2: Randabschalung

Schalung für Ankerblock: An diesem Kasten wird die Endverankerung der Vorspannkabel angebracht. Die Seitenwände der Schalung sind geneigt ausgebildet. Damit ist gewährleistet, dass die rundum laufenden Spannritzen ohne Zusatzverkrümmung bis zur Endverankerung eingebaut werden können. In Abbildung 3.3 ist eine solche Schalung beispielhaft dargestellt.

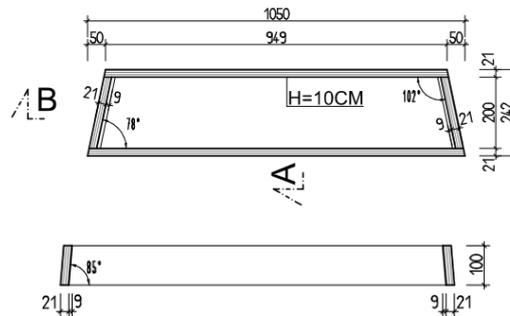


Abbildung 3.3: Schalung für Ankerblock

3.1.2 Stahlbauteile

Gegenspannring:

Der Gegenspannring besteht aus einem 30 mm hohen Flachstahl. Seine Außenabmessungen betragen 1,90 x 8,00 m. Im Flachstahl sind Löcher zum einfädeln der Stahlseile gebohrt, um ein späteres Vorspannen der Seile zu ermöglichen. Im Inneren des ovalen Gegenspannrings ist konventionelle Bewehrung mit $\text{Ø}6/15$ in Form einer Bewehrungsmatte angeordnet. Außen rundum sind jeweils zwischen den vorgebohrten Löchern Bewehrungsstäbe $\text{Ø}6$ mm mit einer Länge von 150 mm angeschweißt. Diese Stäbe verhindern das Reißen der Betonplatte entlang des Flachstahls.



Abbildung 3.4: Gegenspannring

Querverschubsicherung:

Um Relativverschiebungen der Betonsegmente zueinander während des Aufstellvorganges zu verhindern, werden diese Stahlbauteile benötigt. Sie ermöglichen sozusagen eine Kommunikation der einzelnen Elemente miteinander. Diese Querverschubsicherung besteht aus U-Profilen mit jeweils 2 Langlöchern in der Stegfläche. Diese Langlöcher besitzen eine Länge von 100 mm und werden zur Befestigung an den Betonelementen benötigt. Insgesamt wurden 48 Stück dieser Profile an der Versuchsschale montiert.



Abbildung 3.5: Querverschubsicherung

Abstandhalter:

Mit den Abstandhaltern wird die 30 mm Planfuge zwischen den Betonsegmenten sichergestellt. Sie bestehen aus einem 265 mm langen Rechteckprofil, an dem ein Blech angeschweißt ist. An diesem Blech wird ein Buchenholzklotz mit der Abmessung 30x50x200 mm montiert. Insgesamt wurden 160 Stück als Abstandhalter verwendet.

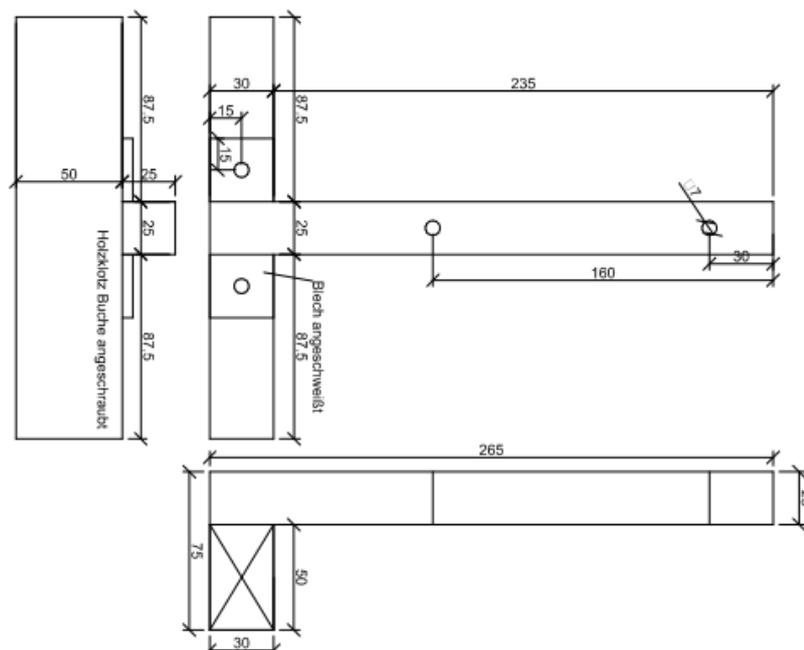


Abbildung 3.6: Abstandhalter

3.1.3 Pneu

Für die Herstellung des Hebepneus und der pneumatischen Keile wird das Material Riverseal 200 verwendet. Es ist ein Produkt der Firma Rivertex und wird normalerweise für Schwimmwesten verwendet. In Tabelle 3.1 sind die Materialdaten angeführt.

Tabelle 3.1: Materialeigenschaften Pneu

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Bezeichnung: | Rivertex Riverseal 200 |
| Material: | Ether TPU/Nylon MD/MT |
| Stoff: | Nylon 235 Dtex |
| Gewicht: | 275 g/m ² +/- 5% |
| Reißfestigkeit nach ISO 1421: | 1000 N/50mm |
| Einreißfestigkeit nach ISO 4674: | 40 N/50mm |
| Schweißnahtfestigkeit: | 400 N/50mm |

Hebepneu:

Die Form des Pneus ist der Grundrissform der Versuchsschale angenähert. Der Hebepneu ist außen rundum abgeschweißt. Die Schweißnaht liegt 500 mm innerhalb der späteren Betonaußenkante. Zum Einblasen der Luft sind 4 Einfüllstutzen in der Mitte des Pneus vorgesehen.

Keilförmige Pneus:

Die ebene Platte des Großversuchs besitzt 24 Segmente und damit auch 24 keilförmige Pneus. Bedingt durch die gewünschte Form der Schale bedarf es 12 verschiedener Typen der keilförmigen Pneus. An beiden Längsseiten ist ein Keder mit der Kederfahne angenäht. Dort wird später das Kederprofil eingefädelt.

3.1.4 Bewehrung

Stahlseile

In Kapitel 2.1.1 ist schon erläutert, warum Stahlseile als Biegebewehrung der Schale verwendet werden. Beim Großversuch kommt derselbe Seiltyp wie bei den Vorversuchen an der rechteckigen Betonplatte zum Einsatz. Die Materialdaten sind in Tabelle 2.2 zu sehen. Insgesamt werden zum Bau der Schale rund 1500 m Niro-Seil benötigt.

Konventionelle Bewehrung

Für die Querbewehrung wird Bewehrungsstahl BSt 550 mit einem Durchmesser von 6 mm verwendet. Rund 1300 m sind nötig, um die Schale zu bewehren. Die Materialdaten sind aus Tabelle 3.2 abzulesen.

Tabelle 3.2: Materialdaten BSt 550

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| Bezeichnung: | BSt 550 |
| Streckgrenze: | 550 N/mm ² |
| E-Modul: | 200000 N/mm ² |
| Nenndurchmesser: | 6 mm |
| Nennquerschnittsfläche: | 28,3 mm ² |
| Nennmasse je Meter: | 0,222 kg/m |

3.1.5 Druckluft

Seitenkanalverdichter:

Für den Großversuch kommen Seitenkanalverdichter der Firma Ventur zum Einsatz. In Abbildung 3.7 ist der verwendete Typ SC 30 zu sehen.



Abbildung 3.7: Seitenkanalverdichter

Aus der Arbeitslinie Abbildung 3.8 kann man die Förderleistung ablesen. Bei dem erforderlichen Luftdruck von 16 mbar im Pneu schafft das Gerät eine Fördermenge von 300 m³/h. Bei einem Volumen der Schale von etwas unter 300 m³ reicht ein Seitenkanalverdichter aus. Jedoch sind damit Risiken betreffend Leckagen, Leistungsschwankungen oder eines Ausfalls nicht abgedeckt. In Summe waren am Bauplatz 4 Seitenkanalverdichter vorhanden.

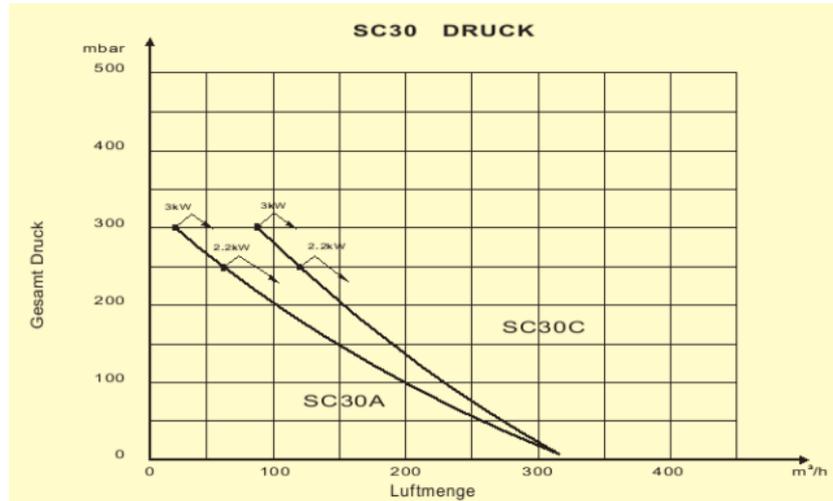


Abbildung 3.8: Arbeitslinie Seitenkanalverdichter

Druckluftsteuerung:

Die 24 pneumatischen Keile werden an 2 Ventilinseln angeschlossen. Die Steuereinheit ist mit einem Touch-Panel verbunden. Somit ist die getrennte Steuerung jedes einzelnen pneumatischen Keiles möglich. Die benötigte Druckluft wird mit einem Kompressor erzeugt.



Abbildung 3.9: Steuereinheit mit Kompressor

3.2 Versuchsaufbau

Die Schale wurde am Laborgelände der TU Wien, den Aspanggründen, Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien errichtet. Der Bauplatz ist in Abbildung 3.10 rot markiert zu sehen.

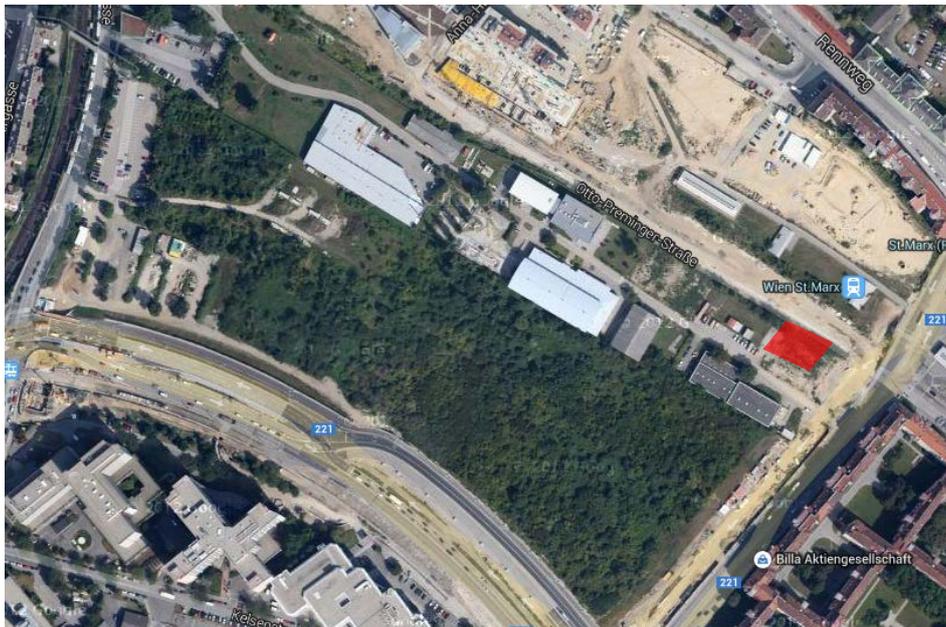


Abbildung 3.10: Bauplatz Großversuch

3.2.1 Untergrund

Für die Anwendung der „Pneumatic Wedge“ Baumethode ist ein ebener Untergrund Voraussetzung. Daher musste der vorgesehene Bauplatz noch dementsprechend aufbereitet werden. Diese Arbeiten führte die Fa. STRABAG zwischen 31.03.2014 und 03.04.2014 durch. Dazu wurde mit dem am Bauplatz vorhandenen Schottermaterial die benötigte Fläche eingeebnet. Zur Erreichung einer ansprechenden Verdichtung wurde der Untergrund mittels Rüttelwalze verdichtet. Auf einer Fläche von ca. 15x22 m, der späteren Aufstellungsfläche, betonierte die Baufirma eine 100 mm starke unbewehrte Sauberkeitsschicht. Die Bodenplatte wurde abschließend mit einem Flügelglätter geflügelt um eine glatte Oberfläche zu erhalten. Durch diese Maßnahme kann man die Reibung zwischen Untergrund und Versuchsschale beim Aufstellvorgang minimieren. In Abbildung 3.11 ist die fertiggestellte Sauberkeitsschicht zu sehen.



Abbildung 3.11: Sauberkeitsschicht Großversuch

3.2.2 Pneu

Vor Auflage des Hebpneus erfolgt eine Lagemarkierung am Untergrund. Der Pneu soll möglichst faltenfrei aufgelegt werden, da jede Falte später in der Untersicht der Schale sichtbar ist. In Pneumitte befinden sich die vier Einfüllstutzen. Zur Manipulation und zum Straffen des Luftkissens sind mehrere Personen erforderlich. Für größere Projekte ist es sinnvoll, die Folien erst vor Ort zu einem dichten Kissen zu verschweißen und Hebemöglichkeiten zur Manipulation mit einem Kran vorzusehen.



Abbildung 3.12: Auflage Pneu

Die keilförmigen Pneus werden in einem Arbeitsschritt mit den Schalungskeilen verlegt.

3.2.3 Schalung

In Abbildung 3.13 ist die aufgelegte Holzschalung zu sehen. Die Randabschalungen verlaufen rund um das Bauwerk. Die einzelnen Betonsegmente werden mit Hilfe der Schalungskeile geschalt. Unter diesen Schalungskeilen liegen die keilförmigen Pneus. Bei den Schalungskeilen gibt es ein Loch in der Bodenplatte, um für die Ventile der keilförmigen Pneus Platz zu schaffen.

Bei der Abbildung 3.13 fehlen noch 2 Schalungselemente, nämlich die Schalung für den aufgesetzten Ankerblock und die Abschaltung des 200 mm hohen Außenbereichs zwischen den Schalungskeilen.



Abbildung 3.13: Schalung Großversuch

Beim Spannen der Stahlseile kann es zum Verschieben der Schalung kommen. Daher werden außen punktuell Bretter an der Sauberkeitsschicht fixiert.

3.2.4 Bewehrung

Die fertig verlegte Bewehrung ist in Abbildung 3.14 zu sehen. Der Einbau der Bewehrung erfolgte in folgenden Schritten:

1. Einhub des Gegenspannrings in seine Endposition und Einbau der Abstandhalter.
2. Einfädeln der Kederschiene in die Keder der keilförmigen Pneus. Die Kederschiene besitzt in 150 mm Abständen eine Bohrung zum Durchstecken der Bewehrung
3. Einbau der konventionellen Bewehrung. Die Bewehrungsseisen $\varnothing 6$ werden an Ort und Stelle abgelängt und in die Kederschiene beidseits durchgesteckt. Pro Stab wird ein Abstandhalter montiert, um die Betondeckung einzuhalten.

4. Einbau der Stahlseile. Die Stahlseile werden durch die vorgebohrten Löcher des Gegenspannrings und der Randabschalung durchgefädelt. Durch die Auffächerung bilden sich im Außenbereich zu große Abstände zwischen den Stahlseilen. Daher werden im Randbereich zusätzliche Seile eingezogen.
5. Spannen der Stahlseile. Um die Stahlseile in die gewünschte gerade Form zu bekommen, ist ein Spannen der Seile notwendig. Die Fixierung erfolgt außen an den Randabschalungselementen.
6. Einbau Lagefixierung der Querverschubsicherung. Diese bestehen aus einer quadratischen Grundplatte mit einer aufgeschweißten Gewindestange. Ein Durchstanzen ist bei späterer Belastung damit nicht möglich. Es werden 4 Lagesicherungen pro Betonsegment eingebaut. An diesen Gewinden werden später die U-Profile aufgeschraubt.
7. Einbau Bewehrungskorb des Ankerblockes.



Abbildung 3.14: Fertig verlegte Bewehrung

3.2.5 Betonage

Die ebene Platte wurde am 22.04.2014 betoniert. Der Beton kam von der Fa. Wopfinger. Es wurde ein C30/37 XC1 GK16 F45 PB CEMII 42,5N verbaut.

Vor Beginn der Betonage wurde die Schalung gründlich mit Schalöl eingestrichen, um ein leichtes Ausschalen zu gewährleisten. Zuerst wurde rundum der 200 mm hohe Teil betoniert. Danach wurden abschnittsweise die einzelnen Betonsegmente betoniert und abgezogen. Der Vorgang ist auch in Abbildung 3.15 zu sehen. Es ist prinzipiell auch eine andere Reihenfolge, etwa von außen nach innen, möglich. Der Beton wurde mittels Rüttler gut verdichtet. Zur Nachbehandlung wurde die Betonplatte mehrmals ausgiebig bewässert.



Abbildung 3.15: Betonage Großversuch

Nach 5 Tagen wurde die Betonplatte wieder ausgeschalt. Die Randabschalung wird einfach von demjenigen Teil, der im Betonkörper verbleibt, abgeschraubt. Danach folgt das Entfernen der Schalungskeile. Dabei ist auf die darunter liegenden pneumatischen Keile zu achten. Jede entstandene Leckage führt zu Luftaustritt und muss wieder verschlossen werden. In Abbildung 3.16 sieht man die Betonplatte mit bereits entferntem Schalungskeil.



Abbildung 3.16: Ausgeschaltete Betonplatte

Bei der Betonage der Betonplatte kam es lokal zu Fehlstellen. Die in Abbildung 3.17 dargestellte Fehlstelle ist durch einen Fehler beim Einbau entstanden. Der Beton im Randbereich wurde zu Beginn eingebracht. Bis zur Betonage des restlichen Segments ist zu viel Zeit vergangen und der Beton war bereits teilweise hydratisiert.



Abbildung 3.17: Fehlstelle im Beton

3.2.6 Querverschubsicherung, Abstandhalter

Die Stahlprofile werden auf die vorgesehenen Gewinde geschraubt. Die Verwendung von Langlöchern ist unbedingt erforderlich, um Lageungenauigkeiten der Gewindestangen auszugleichen. Die Profile werden nur ganz leicht angeschraubt um die Betonsegmente beim Verkrümmen nicht zu hindern. Durch das Überlappen der Stahlprofile auf die benachbarten Segmente ist eine Kommunikation der Einzelsegmente miteinander möglich. Es wird damit verhindert, dass sich die benachbarten Segmente unterschiedlich verschieben, bzw. werden diese mitgezogen, falls sich ein Element im Fall von Imperfektionen schlechter krümmen lässt.

Von den Abstandhaltern werden pro Fuge 5 Stück montiert. Sie gewährleisten einen durchgehenden Abstand der Segmente von 30 mm. Die Fuge beginnt sich von oben weg zu schließen. Bei Kontakt erfolgt über den Buchenholzklötz eine Kraftübertragung. Danach setzt sich der Fugenschluss und die Verkrümmung des Betonelements unterhalb des Abstandhalters fort. In Abbildung 3.18 sind die montierte Querverschubsicherung und Abstandhalter zu sehen.



Abbildung 3.18: Eingebaute Querverschubsicherung und Abstandhalter

3.2.7 Spannglied

Die Spannglieder wurden von der Fa. Grund- Pfahl- und Sonderbau verlegt. Ein Spannglied beginnt beim Ankerblock, läuft rund um den Grundriss und endet wieder im selben Ankerblock. An beiden Enden werden hydraulische Pressen angesetzt. Damit ist gewährleistet, dass kein zu großer Spannkraftverlust infolge Reibung entsteht. Das zweite Spannglied und ein identer Aufbau beginnt an der gegenüberliegenden Längsseite.

Beim Umformungsprozess kommt es zu einer Umfangsverkleinerung von 6,12 m. Der Bereich des Spanngliedes der während der Umformung durch die Spannpresse gezogen wird, muss von seiner Ummantelung befreit werden. In Abbildung 3.19 sind die angesetzten hydraulischen Pressen und die 2 rundum laufenden Spannglieder zu erkennen.



Abbildung 3.19: Spannpressen und Spannglieder

3.2.8 Luftschlauch

Der letzte Punkt der Aufbauarbeiten ist der Anschluss sämtlicher Luftschläuche. 4 Schläuche wurden von den Einfüllstutzen des Hebepneus zu den Seitenkanalverdichtern verlegt. Von jedem pneumatischen Keil geht jeweils eine Leitung zu den 2 Ventilinseln.



Abbildung 3.20: angeschlossene Luftschläuche an Seitenkanalverdichter und Ventilinsel

3.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde am 29.04.2014, 6 Tage nach Betonage der Betonplatte, durchgeführt.

3.3.1 Messtechnik

Um den Versuch kontrolliert durchführen zu können, sind Kenntnis von Luftdruck und Höhenentwicklung wichtig. Genauso benötigt man eine ausreichende bildliche Dokumentation des Aufstellvorganges.

Messung Luftdruck

Der Luftdruck im Hebeplan wurde mit Hilfe einer Schlauchwaage gemessen. Vom Einfüllstutzen läuft eine Messleitung zur Messeinrichtung, die in Abbildung 3.21 a) dargestellt ist. Dort wird die Druckdifferenz an den unterschiedlich hoch stehenden Wassersäulen abgemessen. Man braucht nur von der Skala ablesen, die am Brett markiert ist.

Bei den keilförmigen Pneus gibt es kurz nach dem Ventil einen Abzweiger. Dieser ist in Abbildung 3.21 b) zu sehen. Diese Messleitung wird zur Regelung benötigt und ist wie die Luftleitung an die Ventilinsel angeschlossen.



a)



b)

Abbildung 3.21: a) Messeinrichtung Luftdruck b) Abzweiger Messleitung

Höhenmessung

Die Einschätzung, ob sich die Betonplatte in die Höhe bewegt, bzw. wie viel, ist mit freiem Auge nur schwer erkennbar. Deswegen wurde zur Höhenmessung ein Nivelliergerät eingesetzt. In Schalenmitte wurde eine Messlatte mittels Dreibein fixiert. Das Nivelliergerät zum Messen befand sich auf der Böschung neben dem Bauplatz. In regelmäßigen Abständen wurde die Schalenhöhe während des Versuches abgelesen und protokolliert. In Abbildung 3.22 ist die Messlatte und das Nivelliergerät zu sehen.



Abbildung 3.22: Höhenmessung mit Nivelliergerät

Abstandsmessung

Durch die Gestalt der Freiformfläche entstehen bei der Abwicklung zur ebenen Platte verschieden große Abstände zwischen den Betonsegmenten. Durch die Transformation schließen sich diese Fugen. Man möchte daher wissen, ob sich alle Fugen gleichmäßig schließen oder ob gewisse Segmente schneller zusammenwachsen. Es wurden daher regelmäßig während des Versuches die Abstände der Fugen im Fußpunkt gemessen und protokolliert.

Kamera

Um den Verlauf der Umformung bildlich festzuhalten und bestimmte Vorgänge noch einmal genauer überprüfen zu können, wurde der gesamte Versuch gefilmt. Es kamen 3 Kameras zum Einsatz, um den Aufstellvorgang aus verschiedenen Perspektiven festzuhalten.

Die erste Videokamera wurde am Dach des Fertigungstechnikinstituts, das sich neben dem Bauplatz befindet, aufgestellt. Mit der Videokamera wurde der gesamte Vorgang in HD-Qualität aufgenommen.

Die zweite Kamera, eine GoPro, hatte ihren Standpunkt auf der Böschung neben dem Bauplatz. Die Positionierung erfolgte über eine Hilfskonstruktion, die in Abbildung 3.23 zu sehen ist. Mit dieser Kamera wurde die gegenüberliegende Seite der Schale aufgenommen. Es wurden im 10 Sekunden Abstand Fotos mit der Auflösung von 2592x1944 aufgenommen. Von dieser Position wurde neben dem Aufstellvorgang auch der gesamte Versuchsaufbau dokumentiert.

Die dritte Kamera, eine GoPro, wurde auf Bodenhöhe positioniert und liefert damit Aufnahmen aus einer anderen Perspektive. Es wurden Fotos im 10 Sekundenabstand mit einer Auflösung von 2592x1944 gemacht.



Abbildung 3.23: Aufstellort GoPro

3.3.2 Umformungsprozess

Der Versuch wurde am Versuchstag, dem 29.04.2014, um 08:15 gestartet. In Abbildung 3.24 ist die Betonplatte in ihrer Anfangslage zu sehen. Der komplette Aufbau, der in Kapitel 3.2 beschrieben wurde, ist abgeschlossen. Es konnte mit dem Einblasen der Luft begonnen werden. In den pneumatischen Keilen wird in einer 1.Stufe ein Luftdruck von 20 mbar eingestellt. Die Druckluft dafür wird von einem Kompressor erzeugt. In einer 2.Stufe wird der Luftdruck auf 30 mbar erhöht. Es wird zu Beginn kontrolliert, ob es Druckverluste in den einzelnen Pneus gibt. Für das Einblasen der Luft in den Hebepneu wird zu Beginn nur einer der 4 Seitenkanalverdichter benützt. Hier ist der anvisierte Luftdruck 14 mbar.



Abbildung 3.24: Startposition Versuch

Durch das Einblasen der Luft in den Hebepneu beginnt sich die Schale in der Mitte zu heben. Die Spannglieder werden nur gestrafft, um an der Betonplatte weiterhin eng anzuliegen. Die Höhenentwicklung wird mit dem Nivelliergerät verfolgt. In Abbildung 3.25 hat die Schale eine Höhe in Schalenmitte von 0,5 m. Die Wachstumsrate in die Höhe beträgt ca. 18 mm/min.



Abbildung 3.25: Versuch - Höhe 0,5 m

Die Wachstumsrate in die Höhe steigt nach einer langsameren Anfangsphase auf 27 mm/min an. Damit besitzt die Versuchsschale eine Stunde nach Versuchsstart eine Höhe von 1,50 m. In dieser Position ist die Struktur in Abbildung 3.26 abgebildet. Man sieht, dass sich die Betonplatte in der Mitte schon verkrümmt. Durch die Querverschubsicherung gibt es keinen Versatz der einzelnen Betonsegmente. In den Randbereichen ist nur eine schwache Krümmung vorhanden. Man kann an den Spannpressen die bereits vollzogene Umfangsverkleinerung erkennen. Die Fugen zwischen den Segmenten sind deutlich kleiner geworden.



Abbildung 3.26: Versuch - Höhe 1,5 m

Die Umformung der Betonplatte mit dem Hebeplan funktioniert gut bis zu einer Schalenhöhe von 2,15 m. Danach schaffte man es nicht mehr, die Schale im Außenbereich genug zu verkrümmen. Es kam an einer Stelle eher zum Abheben der gesamten Struktur. Daher wurde mit den Spannpressen vorsichtig Kraft aufgebracht, um den Umformungsprozess zu unterstützen. Mit dieser Maßnahme schieben sich die Ränder der Betonsegmente weiter nach innen. Die Fugen zwischen den Segmenten waren schon bis zur Höhe des ersten Querverschubriegels auf ein Sollmaß von 30 mm geschrumpft. In Abbildung 3.27 ist schon ein deutliches Einrücken der Ränder im Vergleich zur Startposition zu erkennen.



Abbildung 3.27: Versuch - Höhe 2,15 m

Die weitere Umformung erfolgte unter Zuhilfenahme der Spannglieder. Die Spannglieder sind nur vorsichtig in kleinen Schritten anzuziehen, um die Schale nicht zu beschädigen. Die Wachstumsrate sank dadurch auf 12 mm/min. Die Höhenmessung mit Nivellier war nur bis zu einer Höhe von 2,7 m, bis das Ende der Messlatte erreicht war, möglich. Die letzten 200 mm bis zur Erreichung der Endhöhe von 2,9 m, wurden durch zusätzliche Krafteinwirkung der Spannglieder bewirkt.

In Abbildung 3.28 ist die Versuchsschale in ihrer Endposition zu sehen. Die Planform wurde erreicht und alle Betonsegmente verkrümmen sich wie geplant. Der Fugenschluss ist bis zum Fußpunkt bei allen Segmenten erfolgt. An der Betonverfärbung der Sauberkeitsschicht kann man erkennen, dass die Außenkante der Schale während der Transformation über 1 m nach innen gewandert ist.



Abbildung 3.28: Versuch - Endposition

3.3.3 Abschluss

Nach Abschluss der Umformung ist es notwendig die Spannglieder in ihrer Position zu verkeilen. In Abbildung 3.29 sind die bereits verkeilten Spannglieder am Ankerblock zu sehen. Mit diesem geschlossenen Zugring ist die Standsicherheit der Schale gewährleistet. Danach erfolgte der Abbau der gesamten Spannvorrichtung.



Abbildung 3.29: Verkeilte Spannglieder in Endposition

Danach wurden Seitenkanalverdichter und Kompressor abgedreht und sämtliche Luftschläuche wieder entfernt.

3.4 Auswertung

3.4.1 Probewürfel

Zur Qualitätsbestimmung des eingebauten Betons wurden auch 3 Probewürfel (Abbildung 3.30) betoniert. Die Kantenlänge der Würfel beträgt 150 mm. Diese wurden am Tag des Versuchs, eine Woche nach Betonage im Labor der TU-Wien geprüft. Dabei hat man Werte laut Tabelle 3.3 erhalten.



Abbildung 3.30: Probewürfel

Tabelle 3.3: Ergebnisse Druckwürfel

| Nr. | Gewicht [kg] | Rohdichte [g/cm ³] | Bruchlast [kN] | Spannung [N/mm ²] |
|-------------------|--------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| 1 | 7,81 | 2,31 | 570,9 | 25,37 |
| 2 | 7,83 | 2,32 | 604,2 | 26,85 |
| 3 | 7,83 | 2,32 | 587,3 | 26,10 |
| Mittelwert | | | | 26,11 |

3.4.2 Höhenentwicklung

Die Messung der Höhe erfolgte wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben mit einem Nivelliergerät. Die Messlatte befand sich genau in Schalenmitte, dem geplanten höchsten Punkt. Man kann in der grafischen Aufbereitung erkennen, dass die Umformung eigentlich sehr gleichmäßig verlaufen ist. In der Startphase stellte sich noch ein relativ kleines Höhenwachstum von 18 mm/min ein.

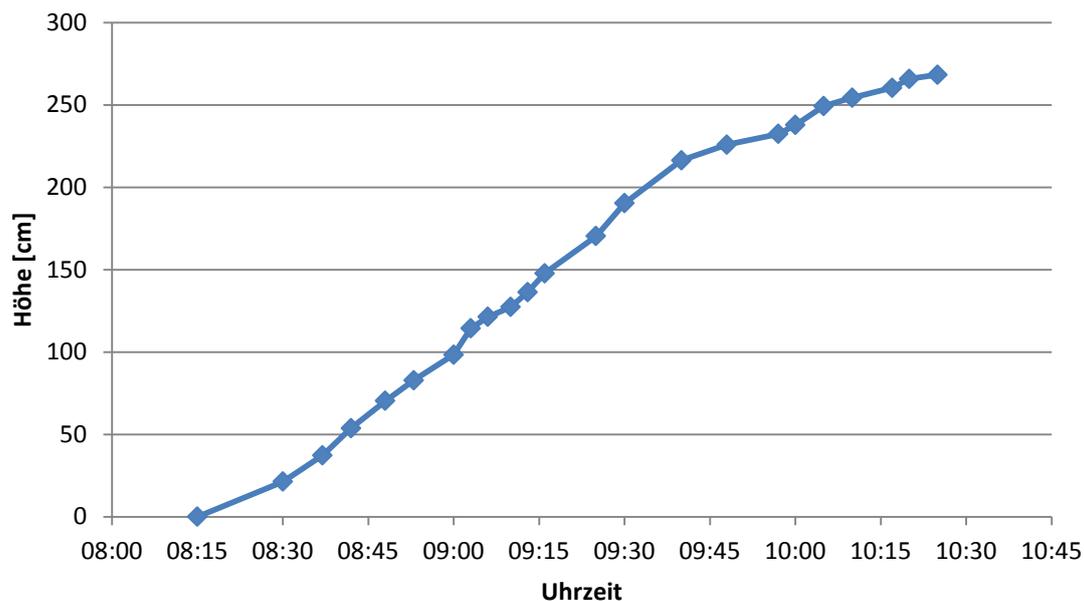


Abbildung 3.31: Höhenentwicklung Großversuch

Danach stieg die Wachstumsrate auf konstante 27 mm/min an. Man kann daraus schließen, dass der Umformungsprozess mit dem Hebezeug sehr gleichmäßig und kontrolliert vonstatten geht. Für die Betonsegmente bedeutet diese Gleichmäßigkeit eine schonende Belastung.

Ab der Höhe von 2,16 m erfolgte die Umformung unter Zuhilfenahme der Spannglieder. Jedes Anziehen der Spannritzen bildet sich als kleiner Sprung in der Höhenentwicklung ab. Insgesamt kommt es dadurch zu einem Rückgang der Wachstumsrate.

Das Diagramm in Abbildung 3.31 endet bei einer Höhe von 2,7 m. Bei dieser Höhe wurde das Ende der Messlatte erreicht und eine Messung mit dem Nivelliergerät war nicht mehr möglich. Die Anhebung der letzten 200 mm ist somit nicht mehr protokolliert. Insgesamt dauerte der gesamte Umformungsprozess ca. 2 Stunden.

3.4.3 Fugenschluss

Während des Versuches wurde regelmäßig der Abstand zwischen den Betonelementen notiert. Die Messung erfolgte am Fußpunkt mit einem Maßstab. In Abbildung 3.32 sind die erhaltenen Daten grafisch aufbereitet. Die gemessenen Elementabstände in den 24 Fugen sind eingetragen. Es gilt je weiter ein Punkt vom Mittelpunkt des Diagrammes entfernt ist, umso größer ist die vorhandene Fugenbreite. Damit bekommt man einen Eindruck wie sich die Fugenbreiten in Bezug auf den Baufortschritt verändert haben.

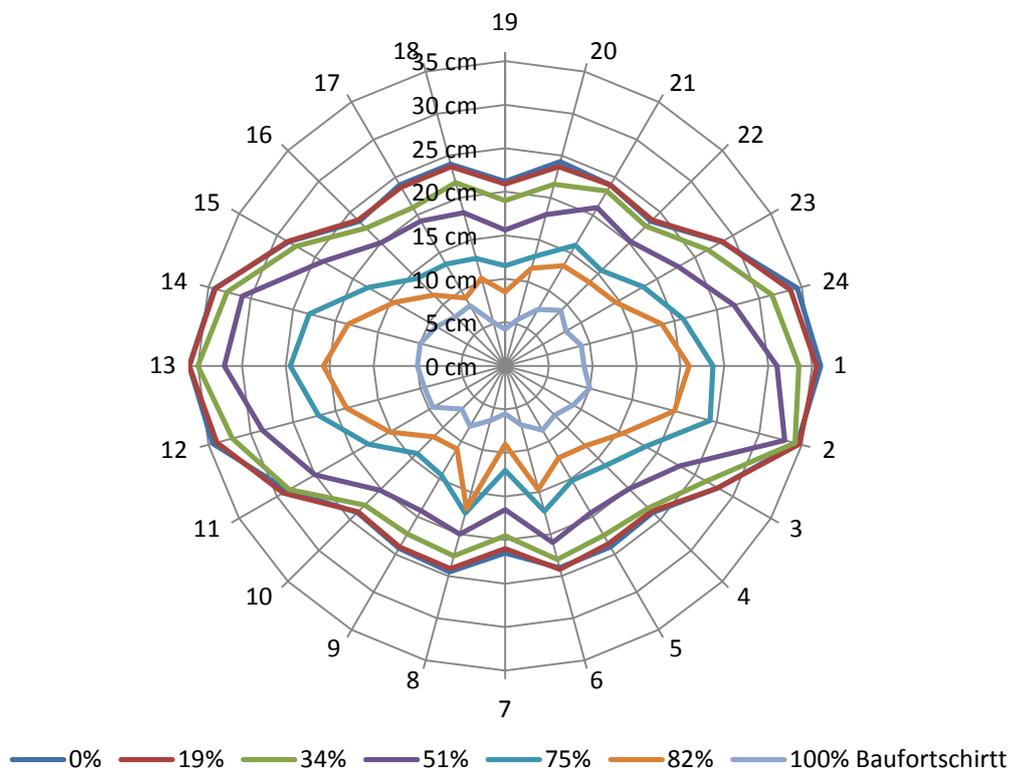


Abbildung 3.32: Segmentabstand aller Fugen

Man kann erkennen, dass sich die Fugen der Breitseite gleichmäßig geschlossen haben. Die Basisellipse ist in diesem Bereich stärker gekrümmt als die Längsseite. Damit wird auch durch die Spannglieder eine größere Umlenkraft eingebracht. Fuge 6 und 8 auf der Längsseite schließen sich daher erst relativ spät im Vergleich zu den anderen Fugen.

Die Fuge 21 hinkt im Baufortschritt den anderen Fugen hinterher. An dieser Stelle kam es bei der Umformung immer wiederholt zu einem Anheben der gesamten Schale.

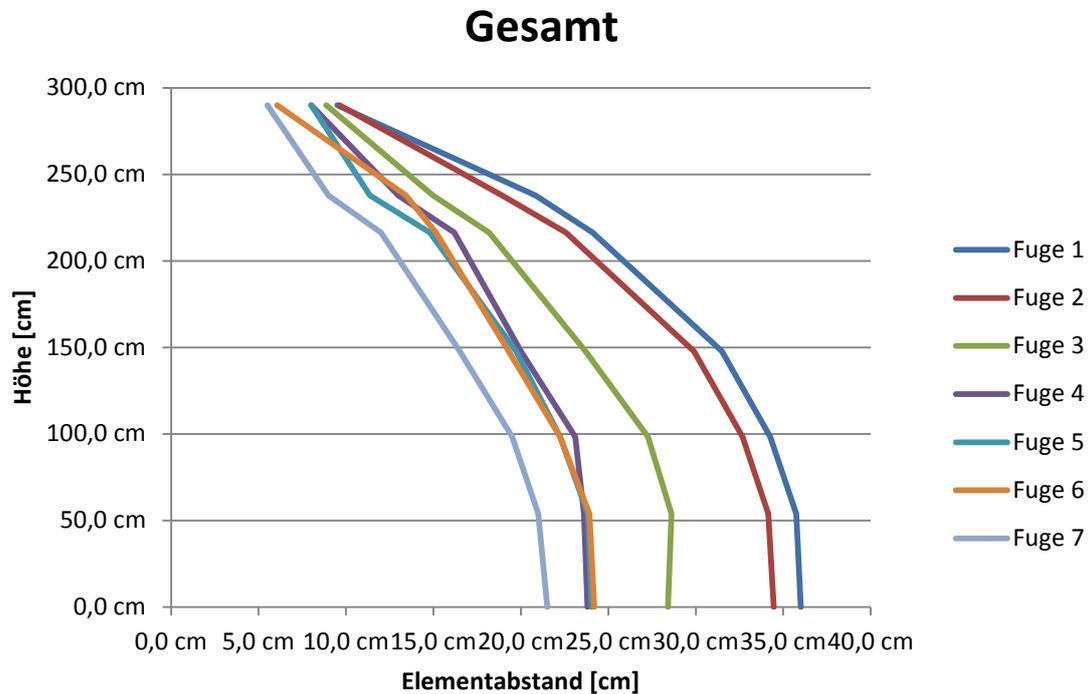


Abbildung 3.33: Fugenschluss aller Fugen

In Abbildung 3.33 ist die Abstandsentwicklung der Segmente bezogen auf die Bauhöhe aufgetragen. Im Diagramm wurde jeweils der Mittelwert gleichartiger Fugen verwendet. Fuge 1-3 zeigen einen absolut gleichmäßigen Fugenschluss. Bei den Fugen 4-7 sind teilweise starke Knicke im Verlauf ersichtlich. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 3.34 Fuge 3 und 6 noch einmal extra herausgegriffen. Man sieht ganz klar, dass es bei Fuge 6 zu großen Streuungen im Verlauf kommt. Die Diagramme aller Fugen sind im Anhang zu finden.

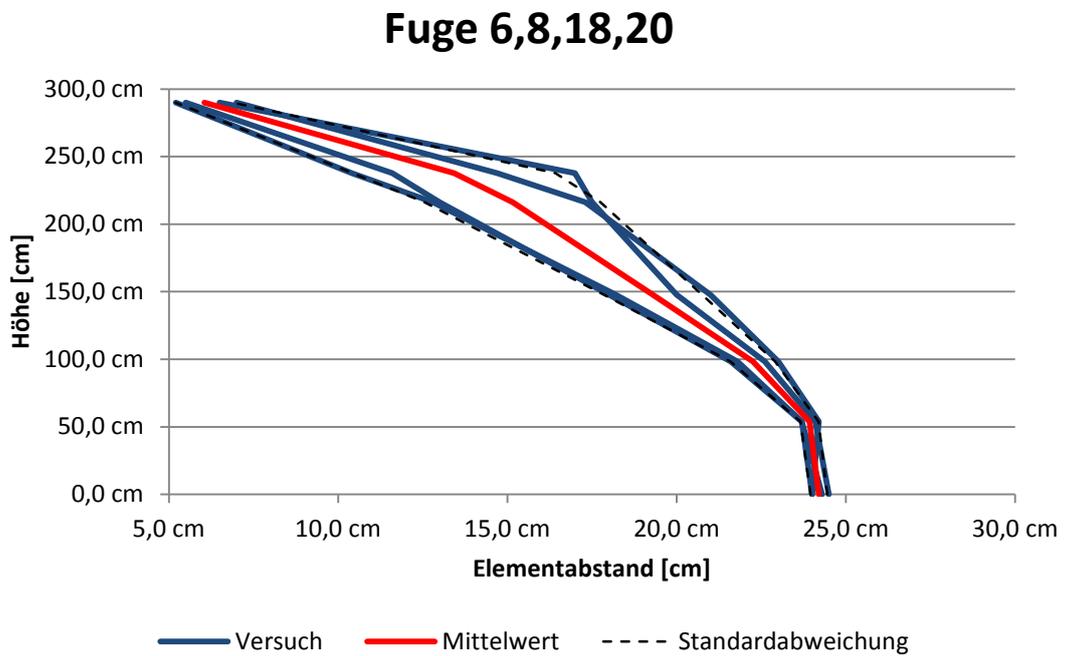
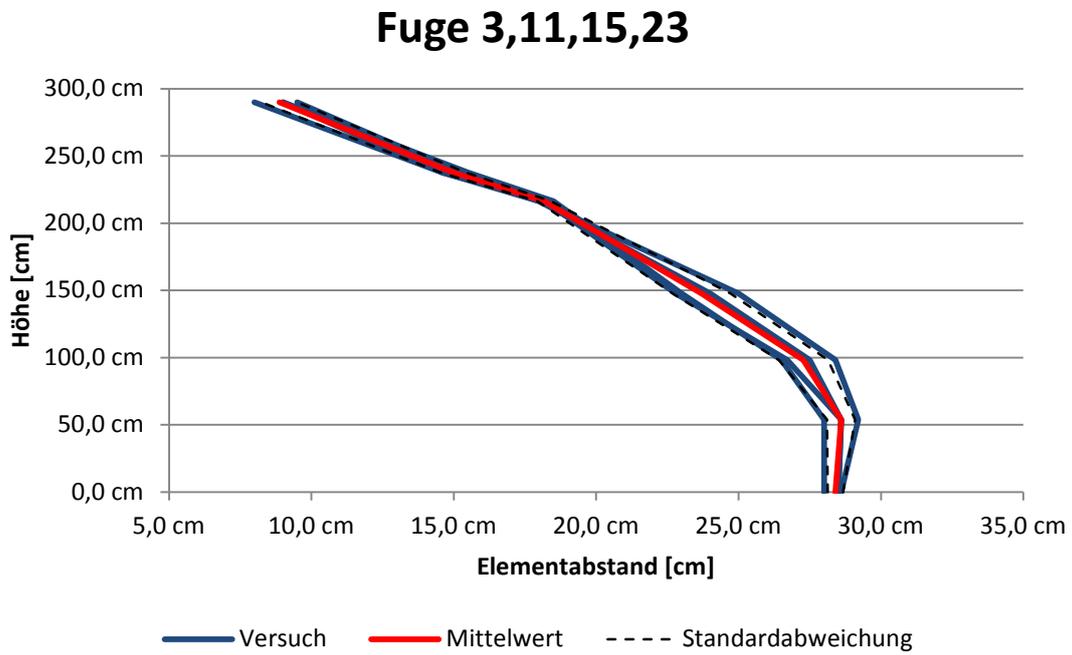


Abbildung 3.34: Diagramm Fugenschluss

3.4.4 Optik

Ziel des Versuches war es, eine freigeformte Betonfläche herzustellen, die der Gestalt entspricht, die in Kapitel 2.2.1 beschrieben ist. Wenn man den Endzustand der Schale (Abbildung 3.28) rein optisch mit der Sollform vergleicht, kann man den Versuch als gelungen betrachten.

In Abbildung 3.35 sind Ausschnitte der Schale im Endzustand zu sehen. In a) ist ein einzelnes Betonsegment zu sehen. Es ist eine gleichmäßig ausgebildete Krümmung zu erkennen. Man sieht auch das eingestellte Rissbild. Die Risse haben sich gleichmäßig ausgebildet und laufen in Ringrichtung der Schale. Zwischen den Segmenten ist auch kein wesentlicher Höhenversatz zu erkennen. Durch die im Bild zu sehenden Stahlprofile ist dieses Ergebnis auch zu erwarten. In b) ist der Scheitel der Schale zu sehen. Die Risse beginnen dort ca. 0,3 m vor dem Beginn der Einzelsegmente. In diesem Bereich beginnt sich die Schale stärker zu krümmen.



a)



b)

Abbildung 3.35: Rissbildung a) eines Betonsegments b) im Scheitelbereich

Die Fugen zwischen den Segmenten haben sich - bis auf die Planfuge von 30 mm - vollständig geschlossen. Das ist in Abbildung 3.36 zu erkennen. Dieses Foto zeigt die Elementfuge im Fußbereich. Der Holzklötz ist mit einem Stück des pneumatischen Keils eingeklemmt.



Abbildung 3.36: Fugenschluss der Schale

3.5 Weiterverarbeitung der Schale

3.5.1 Schalenerschließung

Um den Innenraum der Schale nutzen zu können ist eine Öffnung notwendig. Diese wurde in Form einer Tür realisiert. Die Tür befindet sich in der Mitte eines Betonsegments an der Längsseite der Schale und hat eine Breite von 0,8 m und eine Höhe von 2,2 m.

Zur Herstellung wurde zuerst ein Querverschubprofil entfernt. Danach wurden die seitlichen Betonstege neben der Tür an die Profile der Nachbarsegmente angeschraubt. Nach Sicherung des Segmentes konnte die Tür mit einem Winkelschleifer herausgeschnitten werden. In Abbildung 3.37 ist die Schale mit hergestellter Öffnung zu sehen.



Abbildung 3.37: Schale mit Öffnung

Vor Betreten der Schale muss noch der Hebeplan entfernt werden. Dieser haftet an der Betonschale. In Abbildung 3.38 bekommt man einen Eindruck wie es im Inneren aussieht. Man kann im Hintergrund den blauen Hebeplan erkennen, der noch vollflächig am Beton klebt. Im Vordergrund sieht man bereits die entstandene Betonoberfläche mit ihrer Oberflächenstruktur.



Abbildung 3.38: Innenansicht Schale

3.5.2 Verfüllung der Fugen

Um eine Kraftübertragung über die Fugen zu gewährleisten und die volle Tragfähigkeit der Schale zu erreichen, ist ein Verfüllen der Fugen notwendig. Dazu ist ein entsprechend aushärtendes Vergussmaterial, zum Beispiel Zementmörtel, zu verwenden.

Zuerst müssen aber die Reste der pneumatischen Keile aus den Fugen entfernt werden. Diese sind in Abbildung 3.38 noch zwischen den Betonsegmenten deutlich erkennbar. Danach kann man abschnittsweise die Abstandshalter entfernen und die Fugen verfüllen.

Die Profile der Querverschubsicherung können im Anschluss entfernt werden. Sie haben keine Bedeutung mehr, da eine volle Kraftübertragung über die Fugen hergestellt und ein vollständiger Verbund vorhanden ist.

3.5.3 Schalenabschnitt

Mit dem Einbringen von Öffnungen bzw. dem Wegschneiden von Teilen der Schale entstehen neue Gestaltungsmöglichkeiten. Das mögliche Einsatzgebiet wird damit erheblich erweitert. Sohm führt in [9] mögliche Gestalten und Nutzungsmöglichkeiten an. Zum Beispiel könnte der Schalenabschnitt in Abbildung 3.39 als Bühnenüberdachung fungieren.

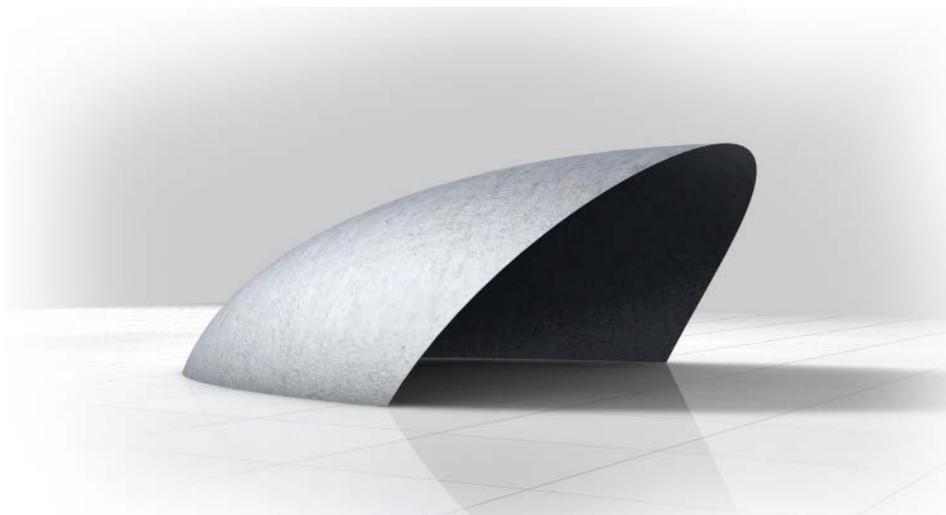


Abbildung 3.39: möglicher Schalenabschnitt

Um solche Formen herzustellen muss zwangsläufig das rundumlaufende Spannglied durchtrennt werden. Damit fehlt jenes Element, das den nach außen wirkenden Auflagerschub aufgenommen hat. Daher ist vor dem Abschneiden des Spanngliedes, ein Ersatz zu finden, der die Kräfte ableitet.

Dies kann etwa mit einem ausreichend großem Fundament geschehen. Es ist auch möglich die Schalenseiten mit einer bewehrten Aufbetonschicht zusammenzuhängen.

Beim Einbringen großer Öffnungen, bzw. Teilabschnitt von Teilen, wird die Schale geschwächt. Daher ist eine gründliche Prüfung der inneren und äußeren Standsicherheit der gewünschten Schalengestalt notwendig. Um die Tragfähigkeit und Stabilität weiterhin sicherzustellen, ist die Aufbringung einer bewehrten Spritzbetonschicht sinnvoll. Nach Aushärtung der zusätzlichen Betonschicht können die Öffnungen ausgebrochen werden.

4 Abschluss

4.1 Verbesserungsvorschläge

Um die Entwicklung der „Pneumatic Wedge Method“ weiter voranzutreiben und die Effizienz der Baumethode zu steigern, ist bei einem zukünftigen Einsatz auf folgende Punkte zu achten:

- **Hebepneu**: Zur leichten Manipulation des Hebepneus sind, besonders bei großen Schalen, geeignete Anhebemöglichkeiten vorzusehen. Für große Schalen muss man auch die Möglichkeit einer Schweißung des Pneus vor Ort in Betracht ziehen.
- **Schalungskeile**: Schalungskeile sind als ein Teil ohne Stückelung vorzusehen. Damit wird die Steifigkeit des Schalungskeiles wesentlich erhöht und die Formgenauigkeit der Betonsegmente verbessert.
- **Zusätzliche Folie**: Das verwendete Material für den Hebepneu haftet sehr gut am Betonkörper und ist nur schwer zu entfernen. Daher sollte der Hebepneu mit einer zusätzlichen Folienschicht abgedeckt werden, die nicht oder nur wenig am Beton anhaftet.
- **Bohrlochdurchmesser**: Die Bohrungen im Gegenspannring und in der Randabschalung haben mit einem ausreichend großen Durchmesser zu erfolgen. Damit gestaltet sich das Einfädeln der Stahlseile wesentlich einfacher.
- **Betonage**: Für die Betonage ist ausreichend Personal einzuplanen. Mit einer raschen Verarbeitung des Betons können Fehlstellen, wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, verhindert werden.

4.2 Empfehlungen für die Anwendung der Methode bei größeren Projekten

Die gebaute Versuchsschale hat eine Größe von 17,6x10,8x2,9 m. Für Bauwerke sind diese Abmessungen oft zu klein. Es werden Schalen mit wesentlich größeren Spannweiten benötigt. Es stellt sich die Frage, ob solche Bauwerke genauso mit der „Pneumatic Wedge Method“ hergestellt werden können bzw. welche Anpassungen der Baumethode erforderlich sind. In Kapitel 4.2.1 werden diese Fragen anhand eines realen Beispiels erläutert.

4.2.1 Wildbrücke AM 2 bei Koralmbahn

Bei hochrangigen Straßen und Eisenbahntrassen muss Wild die Möglichkeit einer sicheren Überquerung gegeben werden. Abhängig von der Topografie kommen Wildunterführungen, Wildüberführungen und Wildquerungen mittels Tunnel zum Einsatz.

Die Bahnstrecke der Koralmbahn verläuft (Abbildung 4.1) von Graz nach Klagenfurt. Entlang der Strecke sind einige Wildquerungen notwendig. Im Streckenabschnitt Aich-Mittlern ist eine Wildüberführung geplant. Aufgrund der vorherrschenden Dammlage bietet sich eine Wildbrücke an.

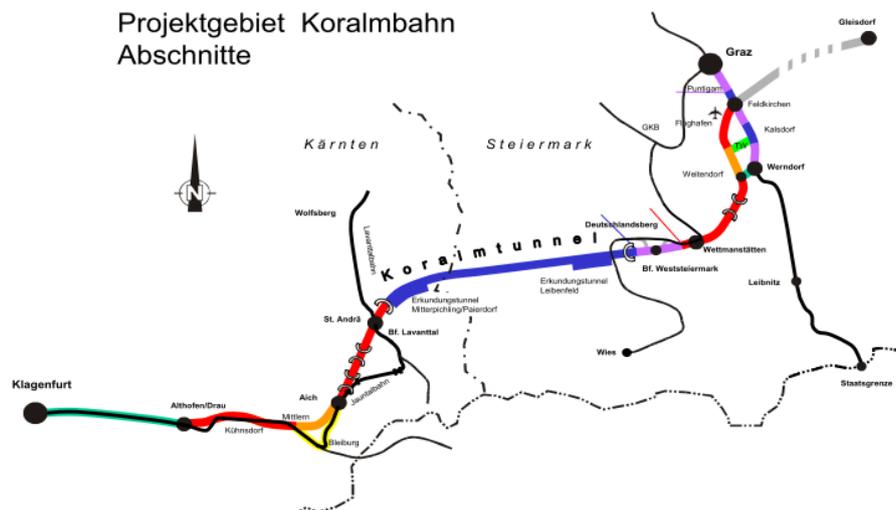


Abbildung 4.1: Bahnstrecke der Koralmbahn [15]

Das Tragwerk dieser Brücke soll aus einer Schale bestehen. In Abbildung 4.2 bekommt man einen Eindruck, wie die grundsätzliche Konstruktion aussieht. Aus der grau dargestellten Schale werden die 2 Portale ausgebrochen. Der Rest der Schale wird mit Erdmaterial eingeschüttet.



Abbildung 4.2: Wildbrücke [9]

Zur Dimensionierung der Schale ist es essentiell, die Größe des benötigten Bahnquerschnitts zu kennen. Diesen Querschnitt erhält man aus Addition des Lichtraumprofils der Züge und eines Sicherheitsraumes. Der Sicherheitsraum ergibt sich aus dynamischen und sicherheitstechnischen Überlegungen. Lt. [15] ist für die Wildbrücke AM 2 eine Querschnittsgröße von 120 m² erforderlich.

In [12] wurden bereits Überlegungen zur Größe der Schale angestellt. Diese Schale besitzt im Zustand ohne Öffnungen eine Länge von 50 m, eine Breite von 33 m und eine Höhe von 7,3 m.

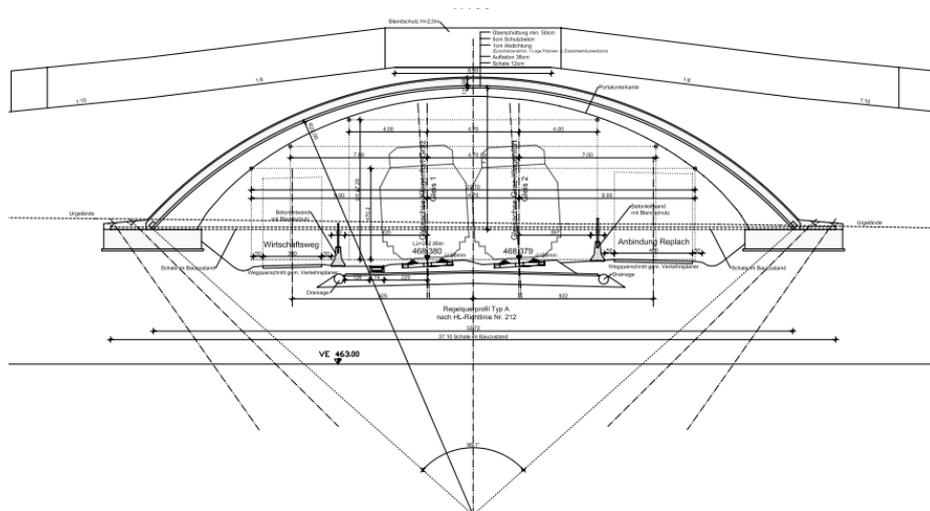


Abbildung 4.3: Querschnitt Wildbrücke [12]

Damit ist die für den Bau der Wildbrücke erforderliche Schale erheblich größer als die Versuchsschale. Dementsprechend kann man den Versuchsaufbau nicht eins zu eins wiederholen. Um die Schale mit der „Pneumatic Wedge Method“ zu bauen, muss man Anpassungen vornehmen:

- **Untergrund:** Es muss mittels temporärer Konstruktion eine ebene Unterlage für die ebene Platte geschaffen werden. Nach dem Aufstellvorgang soll diese Konstruktion wieder leicht entfernbar sein.
- **Hebepneu:** Es ist abzuklären, ob ein Hebepneu dieser Größe vorab herstellbar ist. Als Alternative wird der Hebepneu vor Ort geschweißt. Jedenfalls sind Vorkehrungen zu treffen, um den Pneu per Kran heben zu können. Um das mechanische Ziehen des Pneus in die exakte Lage zu erleichtern ist es sinnvoll außerhalb des abgeschweißten Bereiches Ösen in das Material einzuarbeiten.

- **Pneumatische Keile**: Die größeren Spannweiten haben auch größere Segmentabstände zur Folge. Durch Einsatz der pneumatischen Keile können während dem Umformungsprozess Stabilitätsprobleme ausgeschlossen werden.
- **Krümmung**: Eine größere Schale bringt automatisch auch größere Krümmungsradien mit sich. Dieses begrenzende Maß der Herstellbarkeit lässt durch die kleinere Krümmung auch Transformation einer dickeren Betonplatte zu.
- **Schalendicke**: Um den großen Spannweiten gerecht zu werden, ist eine Erhöhung der Schalendicke notwendig. Durch diese Verstärkung reduzieren sich Verformungen und das Zusatzgewicht, das während dem Auftrag der Spritzbetonschicht auf der Schale lastet, kann aufgenommen werden. Eine erste Abschätzung ergibt eine Schalendicke von ca. 100-120 mm.
- **Betonage**: Zur Betonage wird ausreichend Personal benötigt. Es ist zu berücksichtigen, dass der Betoneinbau länger als bei einer durchschnittlichen Hochbaudecke dauert.
- **Seitenkanalverdichter**: Die Anzahl der Seitenkanalverdichter ist dem großen Volumen des Hebeplans anzupassen.
- **Spritzbeton**: Die aufgestellte Schale ist unbedingt mit einer Lage Spritzbeton zu versehen. Die damit erzielte Erhöhung der Tragsicherheit wird beim Portalausbruch benötigt. Weiters können damit zusätzliche Lasten von Erdaufschüttungen aufgenommen werden.
- **Fundamente**: Vor dem Abtrennen der Spannglieder ist die Ausbildung ausreichend großer Fundamente erforderlich, die den Horizontalschub aufnehmen.

4.3 Zusammenfassung und Ausblick

Zweifach gekrümmte Schalen zeichnen sich durch ihre Ästhetik und gute Tragfähigkeit aus. Der Bau solcher Betonschalen mit den konventionellen Herstellungsverfahren ist arbeitsintensiv und teuer. Es besteht Bedarf an einer wirtschaftlichen, universell einsetzbaren Baumethode. Die „Pneumatic Wedge Method“ wird all diesen Anforderungen gerecht.

Der erfolgreich durchgeführte Großversuch hat bewiesen, dass mit der „Pneumatic Wedge Method“ der Bau von freigeformten Betonschalen möglich ist. Damit wurde der nächste Schritt nach der Herstellbarkeit von Kugelabschnitten hin zu völlig freigeformten Schalenformen vollzogen. Der nächste Punkt der Entwicklung befasst sich mit der Weiterverarbeitung der Betonschale, nach Fertigstellung des Aufstellvorganges. Dazu werden derzeit Tests mit Teilabschnitten der Versuchsschale durchgeführt.

Es wurde gezeigt, dass der Bau großer Schalen möglich ist. Damit eröffnen sich für die „Pneumatic Wedge Method“ neue Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten. Ein mögliches neues Einsatzgebiet wäre etwa der Bau von Wildbrücken.

Die baupraktische Herstellbarkeit von Schalen mit der „Pneumatic Wedge Method“ wurde an mehreren Versuchsschalen bewiesen. Es ist zu hoffen, dass diese Baumethode den Sprung aus der Forschung in die Praxis schafft. Damit wäre es gelungen, dem Betonschalensbau wieder mehr Attraktivität zu verleihen.

Literaturverzeichnis

- [1] KROMOSER, B.; KOLLEGER, J.: *Herstellung von Schalenträgwerken aus Beton mit der "Pneumatic Wedge Method"*. Beton und Stahlbetonbau (in Druck), Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2014.
- [2] HEINLE, E.; SCHLAICH, J.: *Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen*. Stuttgart: DVA 1996.
- [3] KIRSCH, G; RICHERT, C.: *Das DITIB-Gemeindezentrum mit Moschee in Köln-Ehrenfeld*. Beton 5/2011, Verlag Bau+Technik GmbH.
- [4] MUTTONI, A.; LURATI, F.; RUIZ, M.F.: *Concrete shells – towards efficient structures: construction of an ellipsoidal concrete shell in Sitzerland*. Structural Concrete 1, Volume 14, March 2013, S. 43-50.
- [5] HEENE, G.: *Baustelle Pantheon: Planung – Konstruktion – Logistik*. Verlag Bau+Technik 2008.
- [6] <http://www.jdarchitekten.de> (Stand 11.03.2014).
- [7] OTTO, F.: *Pneu und Knochen*, Mitteilung des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1995.
- [8] <http://www.monolithic.org/topics/domes> (Stand 11.03.2014).
- [9] SOHM, M.: *Entwurf von geeigneten Schalenformen für die "Pneumatic wedge method"*. Diplomarbeit, TU Wien, 2014.
- [10] SCHWEIGHOFER, A.: *Planung und Berechnung der größten Eiskuppel der Welt*. Diplomarbeit, TU Wien, 2007.
- [11] KOLLEGER, J.; KROMOSER, B.: *Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen*. Österreichisches Patent AT511948. 2013.
- [12] SCHNEIDER, B.: *Ermittlung der Biegesteifigkeit und der Verformbarkeit von gerissenen Stahlbetonquerschnitten*. Diplomarbeit, TU Wien, 2008.
- [13] KOLLEGER, J.: *Betonbau 1 nach EC 1992-1-1*. IV. Auflage Skriptum TU Wien, 2011.
- [14] KRAPPENBAUER, R.; KRAPPENBAUER, T.: *Bautabellen*. Verlag Jugend und Volk, 2004.
- [15] KARI, H.: *Herstellung von Wildbrücken ohne Schalung und Traggerüst*. Brückenbautagung, Wien 2008.
- [16] KROMOSER, B.: *Freiformflächen aus Beton*. Endbericht FFG Branchen-Forschungsprojekt, 2014.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1.1: Tragverhalten einer Kugelschale [2] | 1 |
| Abbildung 1.2: Messehalle Freistadt..... | 2 |
| Abbildung 1.3: Moschee Köln-Ehrenfeld [3] | 3 |
| Abbildung 1.4: Einkaufszentrum Il diamante | 4 |
| Abbildung 1.5: Zementwerk in Ontario, Kanada..... | 5 |
| Abbildung 1.6: Schalung Einkaufszentrum Il diamante..... | 6 |
| Abbildung 1.7: Bau der Stadthalle Albuquerque [2] | 7 |
| Abbildung 1.8: Pantheon in Rom [5] | 7 |
| Abbildung 1.9: Merkez-Moschee, Duisburg [6] | 8 |
| Abbildung 1.10: pneumatischem Schalungssystem, Betonaufbringung von außen [7] | 9 |
| Abbildung 1.11: pneumatisches Schalungssystem, Betonaufbringung von innen [8]..... | 9 |
| Abbildung 1.12: Entstehung einer Binshell [2]: a) Verlegung der Bewehrung b) Betoniervorgang c) Aufstellvorgang d) Endzustand..... | 11 |
| Abbildung 1.13: Umformungsprozess von einer ebenen Betonplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale [1] | 12 |
| Abbildung 1.14: Systemskizze | 13 |
| Abbildung 1.15: Schnitt durch Pneu und Stahlbetonsegmente | 13 |
| Abbildung 1.16: Unterbauplanum..... | 14 |
| Abbildung 1.17: keilförmige Abschalelemente | 14 |
| Abbildung 1.18: Auflage keilförmiger Pneus und Abschalelemente..... | 15 |
| Abbildung 1.19: Schalung für die ebene Betonplatte | 15 |
| Abbildung 1.20: Gegenspannring und Bewehrung in Plattenmitte | 16 |
| Abbildung 1.21: Bewehrung nach abgeschlossener Verlegung | 16 |
| Abbildung 1.22: Betonplatte nach Betonage | 17 |
| Abbildung 1.23: Betonsegment mit Abstandhalter | 17 |
| Abbildung 1.24: Anordnung von Spannglied und Spannvorrichtung..... | 18 |
| Abbildung 1.25: Anbringen der Luftschläuche | 18 |
| Abbildung 1.26: Betonschale im Umformungsprozess | 19 |
| Abbildung 1.27: Hydraulischer Vorspannzylinder..... | 19 |
| Abbildung 2.1: Edelstahl Drahtseile 7x19 | 21 |
| Abbildung 2.2: Kraft-Durchbiegung-Diagramm | 22 |
| Abbildung 2.3: M- κ -Diagramm | 23 |
| Abbildung 2.4: Luftkissen bei Belastungstest..... | 24 |
| Abbildung 2.5: Grundform Großversuch [9] | 26 |
| Abbildung 2.6: a) Segmentierte Schale [9] b) abgewickelter Grundriss | 27 |
| Abbildung 2.7: Endzustand Versuchsschale [9] | 28 |
| Abbildung 2.8: Krümmungsradius der Segmente | 29 |
| Abbildung 2.9: Momenten-Krümmungs-Beziehung [12] | 30 |

Abbildung 2.10: Berechnung der Spannungen für den Rechteckquerschnitt im Zustand II [13] 32

Abbildung 2.11: Momenten-Krümmung-Diagramm 34

Abbildung 2.12: RFEM-Modell 38

Abbildung 2.13: Verformung Großversuch 39

Abbildung 2.14: Auflagerreaktionen Großversuch a) AR in Vertikalrichtung b) AR in Radialrichtung 41

Abbildung 2.15: Berechnungsergebnisse Großversuch: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung 42

Abbildung 2.16: Berechnungsergebnisse Großversuch: a) Biegemomente m_1 b) Biegemomente m_2 43

Abbildung 2.17: Umformungsprozess Halbkugel [9] 44

Abbildung 2.18: Verformungen Halbkugel 45

Abbildung 2.19: Auflagerreaktionen Halbkugel 46

Abbildung 2.20: Berechnungsergebnisse Halbkugel: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung 47

Abbildung 2.21: Berechnungsergebnisse Halbkugel: Biegemomente m_1 47

Abbildung 2.22: Umformungsprozess Kugelabschnitt [4] 48

Abbildung 2.23: Abmessungen Kugelabschnitt 49

Abbildung 2.24: Verformungen Kugelabschnitt 49

Abbildung 2.25: Auflagerreaktionen Kugelabschnitt 50

Abbildung 2.26: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung 51

Abbildung 2.27: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt: Biegemomente m_1 51

Abbildung 2.28: Kugelabschnitt mit verschobenem Scheitelpunkt 52

Abbildung 2.29: Krümmungen Kugelabschnitt-Variante 52

Abbildung 2.30: Verformung Kugelabschnitt-Variation 53

Abbildung 2.31: Auflagerreaktionen Kugelabschnitt-Variante 53

Abbildung 2.32: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt-Variante: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung 54

Abbildung 2.33: Berechnungsergebnisse Kugelabschnitt-Variante: a) Biegemomente m_1 b) Biegemomente m_2 55

Abbildung 2.34: : Umformungsprozess Zylinder [4] 56

Abbildung 2.35: Verformung Zylinder 57

Abbildung 2.36: : Umformungsprozess Zylinder in Kombination mit 2 Halbkugelabschnitten [4] 57

Abbildung 2.37: Verformungen Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten 58

Abbildung 2.38: Berechnungsergebnisse Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten: a) vertikale AR b) horizontale AR 59

Abbildung 2.39: Berechnungsergebnisse Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten: a) Normalkräfte n_1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n_2 in Radialrichtung 60

Abbildung 2.40: Berechnungsergebnisse Zylinder mit 2 Halbkugelabschnitten: a) Biegemomente m1 b) Biegemomente m2..... 61

Abbildung 2.41: Umformungsprozess Halbellipsoid [4]..... 62

Abbildung 2.42: Verformung Halbellipsoid 62

Abbildung 2.43: Berechnungsergebnisse Halbellipsoid: a) vertikale AR b) horizontale AR..... 63

Abbildung 2.44: Berechnungsergebnisse Halbellipsoid: a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung 64

Abbildung 2.45: Berechnungsergebnisse Halbellipsoid: a) Biegemomente m1 b) Biegemomente m2 65

Abbildung 2.46: Umformungsprozess Ellipsoidabschnitt [4] 66

Abbildung 2.47: Verformung Ellipsoidabschnitt 66

Abbildung 2.48: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt: a) vertikale AR b) horizontale AR 67

Abbildung 2.49: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt: a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung 68

Abbildung 2.50: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt: a) Biegemomente m1 b) Biegemomente m2..... 69

Abbildung 2.51: Ellipsoidabschnitt mit verschobenen Scheitel und verzerrter Basisellipse 70

Abbildung 2.52: Ellipsoidabschnitt-Variante: Minimaler Krümmungsradius..... 70

Abbildung 2.53: Verformung Ellipsoidabschnitt-Variante 71

Abbildung 2.54: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt-Variante: a) vertikale AR b) horizontale AR..... 72

Abbildung 2.55: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt-Variante a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung 73

Abbildung 2.56: Berechnungsergebnisse Ellipsoidabschnitt-Variante: a) Biegemomente m1 b) Biegemomente m2..... 74

Abbildung 2.57: : Umformungsprozess Paraboloid [4] 75

Abbildung 2.58: Verformung Paraboloid 76

Abbildung 2.59: Auflagerreaktionen Paraboloid..... 76

Abbildung 2.60: Berechnungsergebnisse Paraboloid: a) Normalkräfte n1 in Tangentialrichtung b) Normalkräfte n2 in Radialrichtung..... 77

Abbildung 2.61: Berechnungsergebnisse Paraboloid: a) Biegemomente m1 b) Biegemomente m2 78

Abbildung 3.1: Schalungskeil..... 79

Abbildung 3.2: Randabschalung..... 80

Abbildung 3.3: Schalung für Ankerblock 81

Abbildung 3.4: Gegenspannring..... 81

Abbildung 3.5: Querverschubsicherung..... 82

Abbildung 3.6: Abstandhalter 82

Abbildung 3.7: Seitenkanalverdichter 84

Abbildung 3.8: Arbeitslinie Seitenkanalverdichter..... 85

| | |
|---|-----|
| Abbildung 3.9: Steuereinheit mit Kompressor..... | 85 |
| Abbildung 3.10: Bauplatz Großversuch..... | 86 |
| Abbildung 3.11: Sauberkeitsschicht Großversuch | 87 |
| Abbildung 3.12: Auflage Pneu..... | 87 |
| Abbildung 3.13: Schalung Großversuch | 88 |
| Abbildung 3.14: Fertig verlegte Bewehrung | 89 |
| Abbildung 3.15: Betonage Großversuch | 90 |
| Abbildung 3.16: Ausgeschalte Betonplatte..... | 90 |
| Abbildung 3.17: Fehlstelle im Beton | 91 |
| Abbildung 3.18: Eingebaute Querverschubsicherung und Abstandhalter..... | 92 |
| Abbildung 3.19: Spannpressen und Spannglieder | 92 |
| Abbildung 3.20: angeschlossene Luftschläuche an Seitenkanalverdichter und Ventilinsel | 93 |
| Abbildung 3.21: a) Messeinrichtung Luftdruck b) Abzweiger Messleitung | 94 |
| Abbildung 3.22: Höhenmessung mit Nivellier..... | 95 |
| Abbildung 3.23: Aufstellort GoPro | 96 |
| Abbildung 3.24: Startposition Versuch | 97 |
| Abbildung 3.25: Versuch - Höhe 0,5 m | 97 |
| Abbildung 3.26: Versuch - Höhe 1,5 m | 98 |
| Abbildung 3.27: Versuch - Höhe 2,15 m | 99 |
| Abbildung 3.28: Versuch - Endposition..... | 99 |
| Abbildung 3.29: Verkeilte Spannglieder in Endposition..... | 100 |
| Abbildung 3.30: Probewürfel | 101 |
| Abbildung 3.31: Höhenentwicklung Großversuch | 102 |
| Abbildung 3.32: Segmentabstand aller Fugen | 103 |
| Abbildung 3.33: Fugenschluss aller Fugen | 104 |
| Abbildung 3.34: Diagramm Fugenschluss | 105 |
| Abbildung 3.35: Rissbildung a) eines Betonsegments b) im Scheitelbereich | 106 |
| Abbildung 3.36: Fugenschluss der Schale | 107 |
| Abbildung 3.37: Schale mit Öffnung | 108 |
| Abbildung 3.38: Innenansicht Schale | 108 |
| Abbildung 3.39: möglicher Schalenabschnitt..... | 109 |
| Abbildung 4.1: Bahnstrecke der Koralmbahn [15]..... | 112 |
| Abbildung 4.2: Wildbrücke..... | 112 |
| Abbildung 4.3: Querschnitt Wildbrücke [12] | 113 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 2.1: Materialdaten Betonplatte..... | 20 |
| Tabelle 2.2: Materialdaten Stahlseile..... | 21 |
| Tabelle 2.3: Ergebnisse Vorversuch Pneu | 24 |
| Tabelle 3.1: Materialeigenschaften Pneu | 83 |
| Tabelle 3.2: Materialdaten BSt 550..... | 84 |
| Tabelle 3.3: Ergebnisse Druckwürfel..... | 101 |

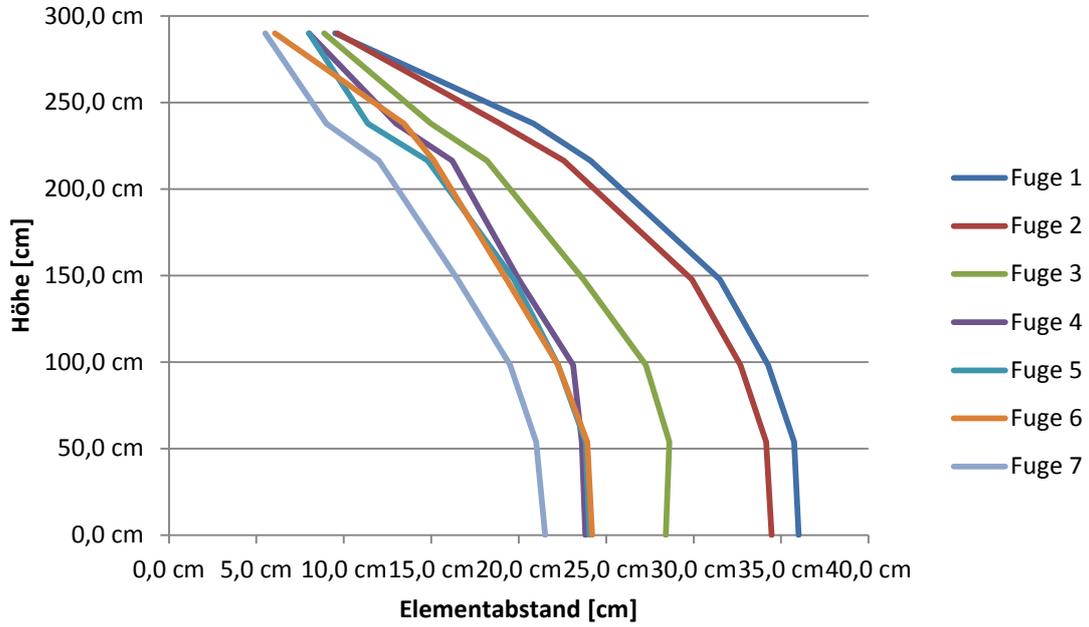
Anhang

Anhang A: Diagramme Fugenschluss

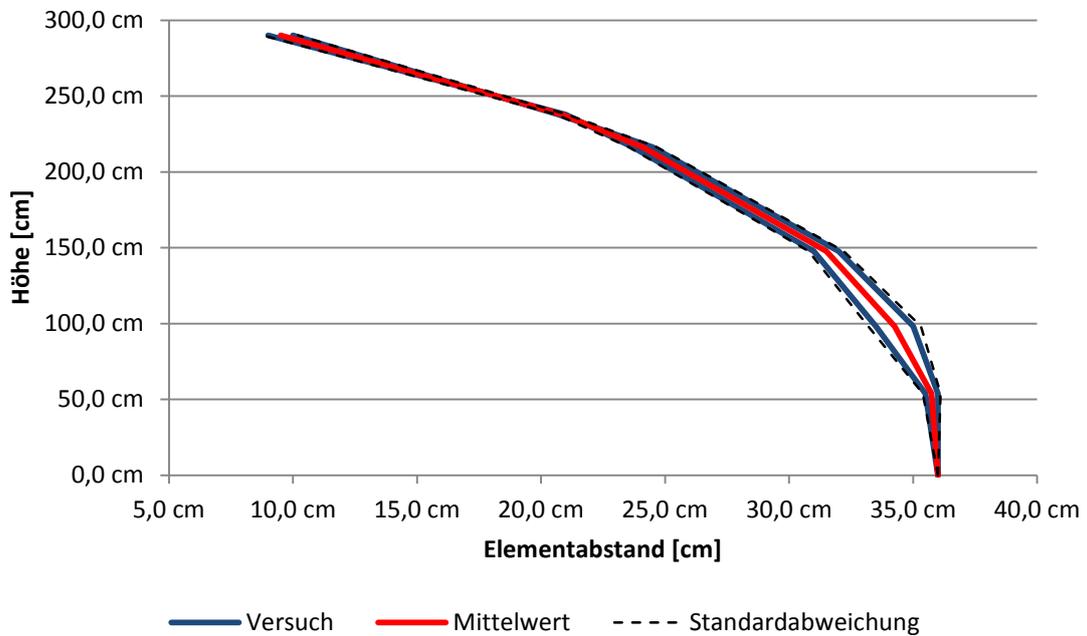
Anhang B: Abschalelemente

Anhang C: Schalungsplan

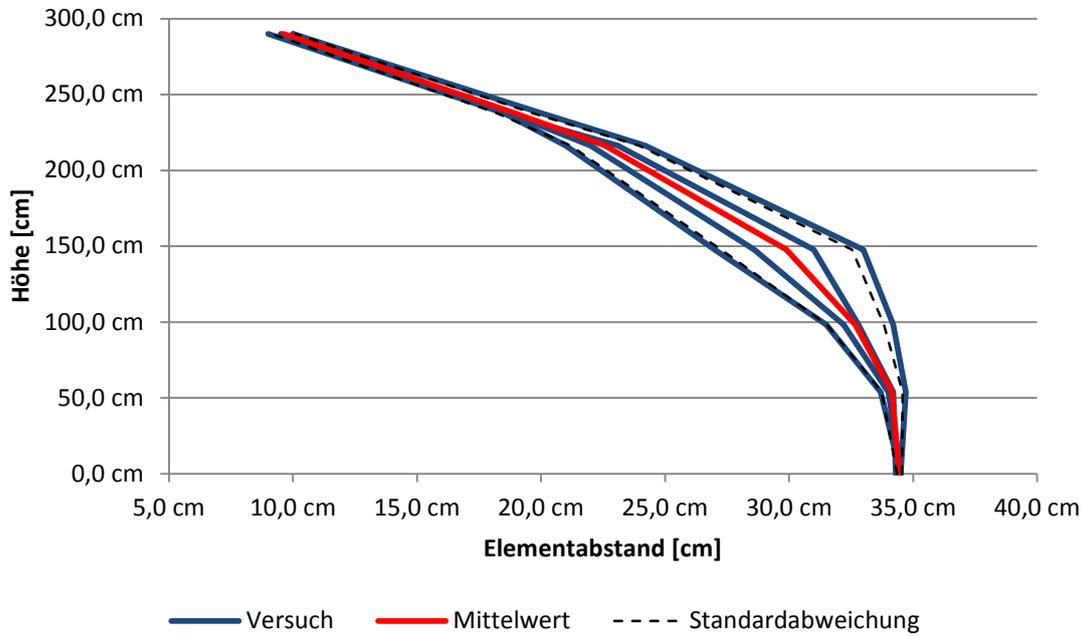
Gesamt



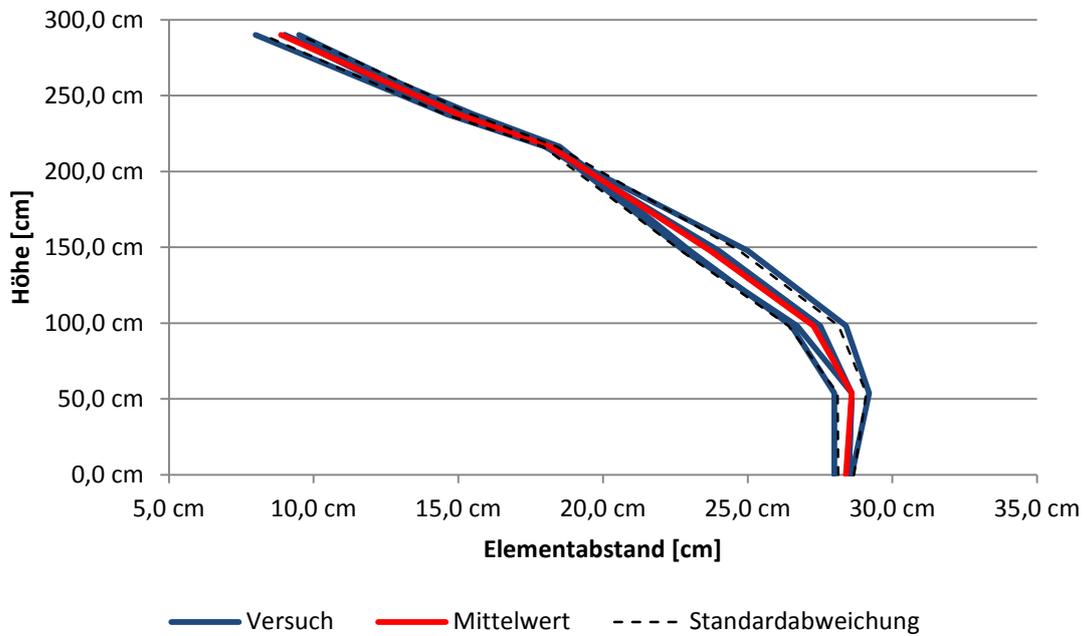
Fuge 1,13



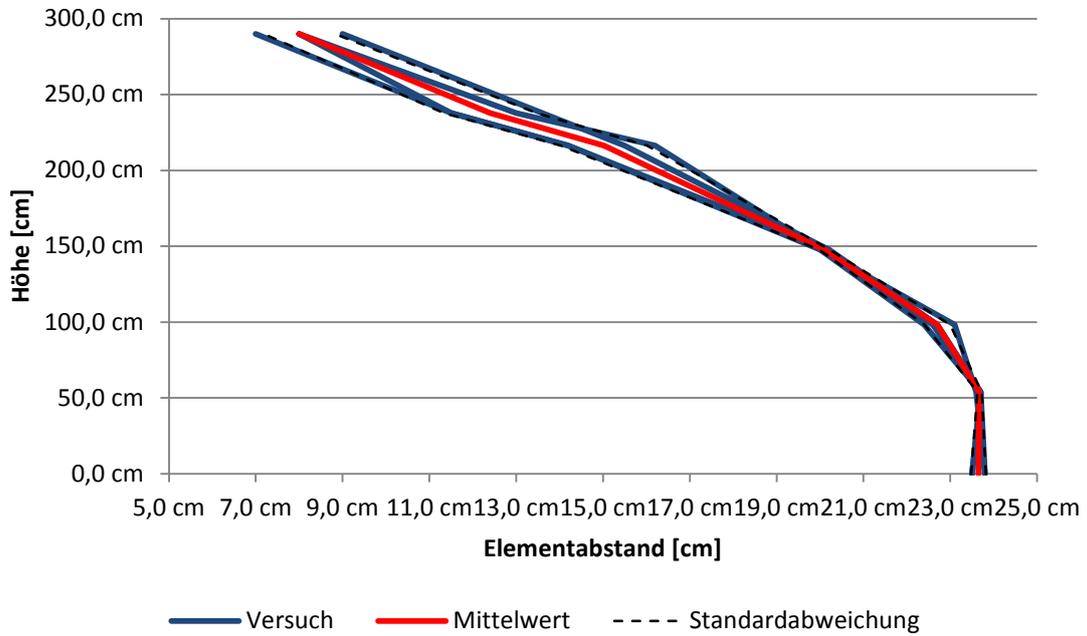
Fuge 2,12,14,24



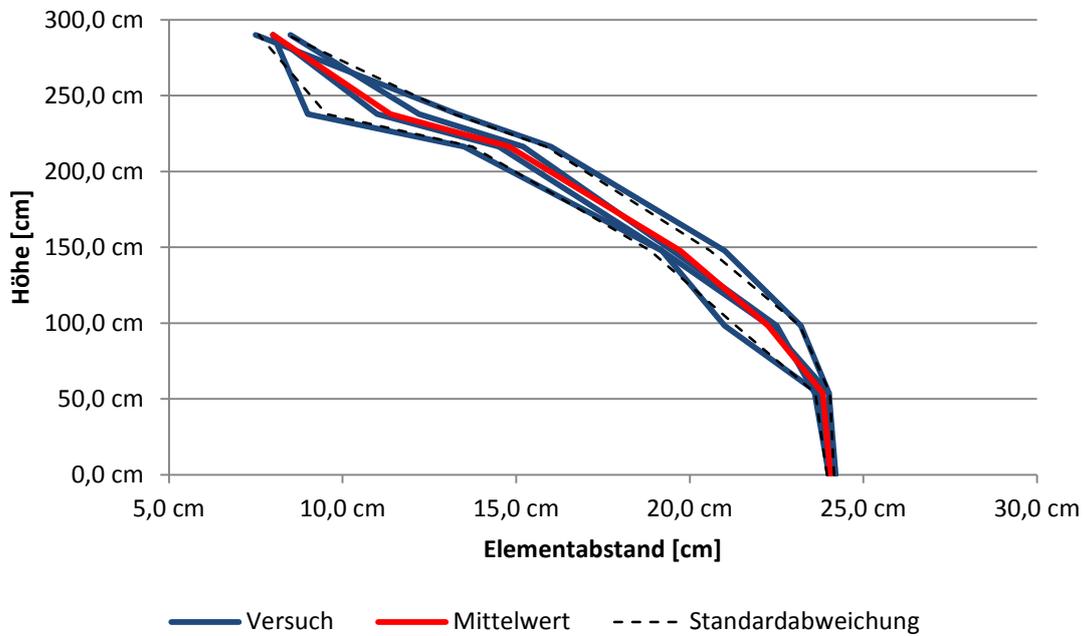
Fuge 3,11,15,23



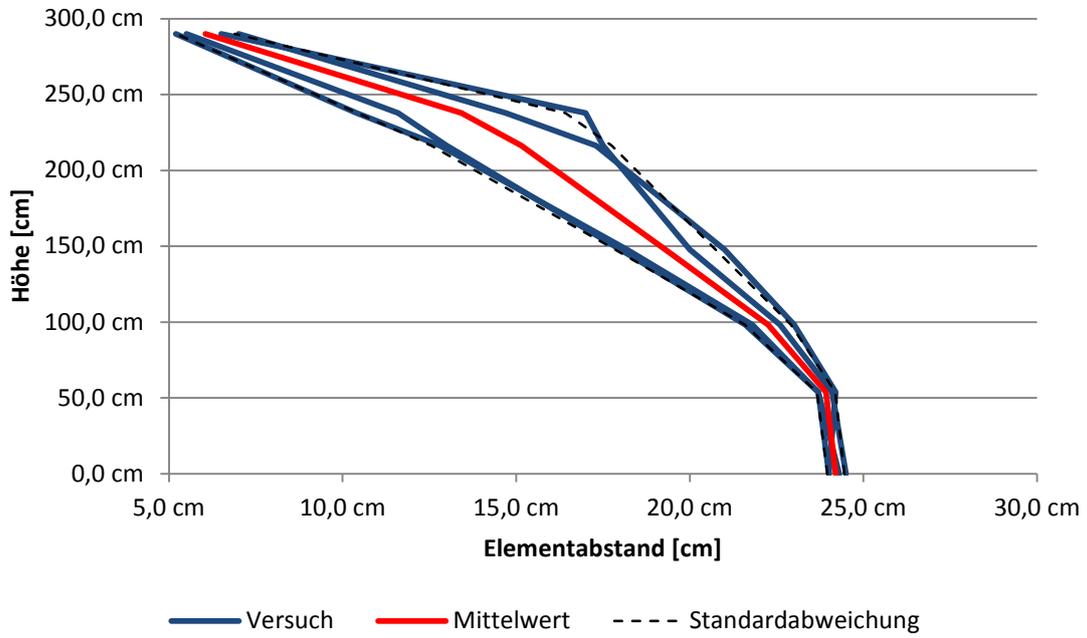
Fuge 4,10,16,22



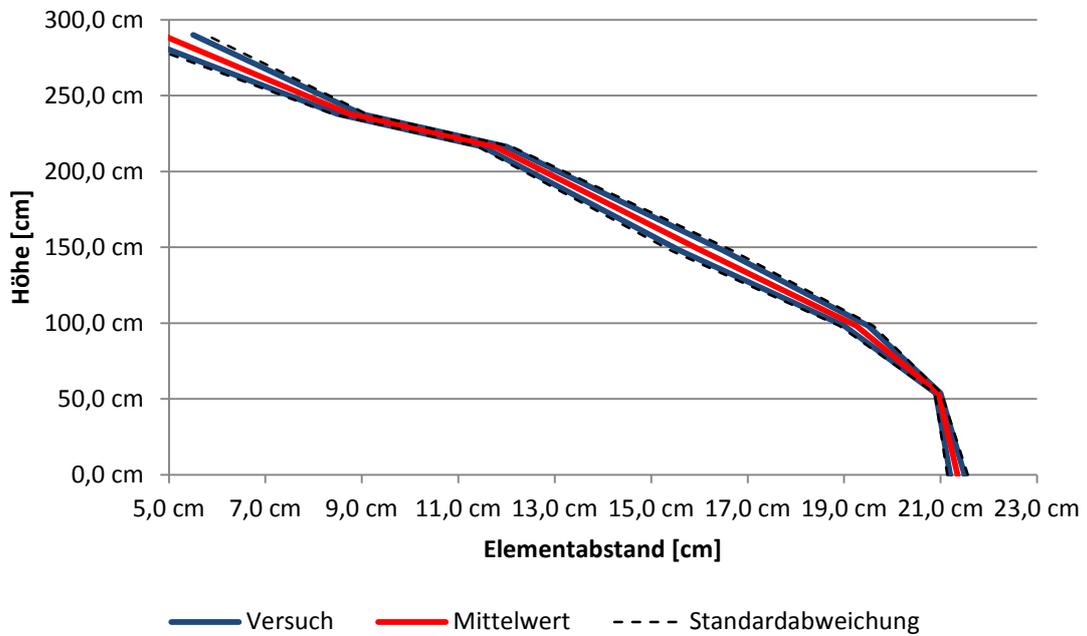
Fuge 5,9,17,21



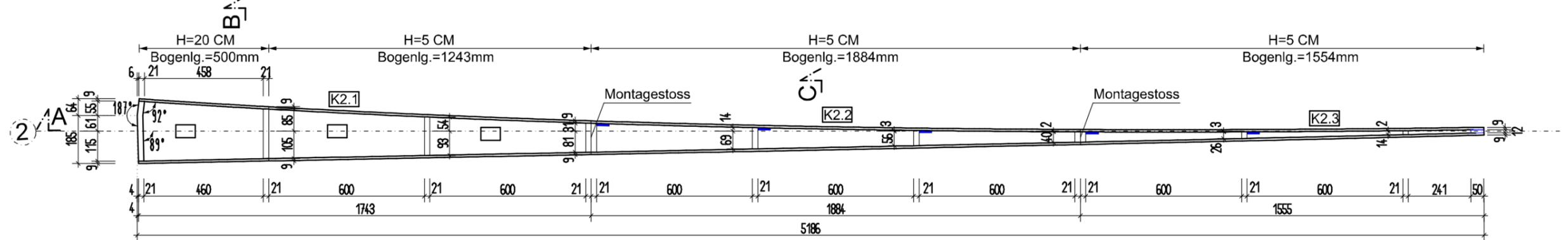
Fuge 6,8,18,20



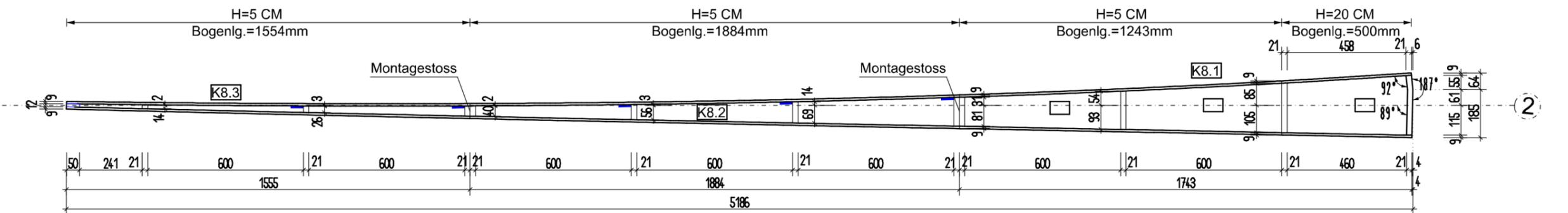
Fuge 7,19



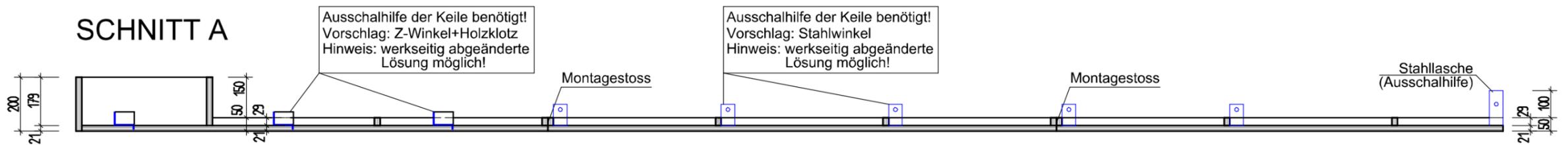
KEIL 2 (2x)
M 1:15



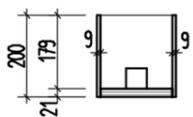
KEIL 8 (2x)
M 1:15



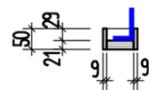
SCHNITT A



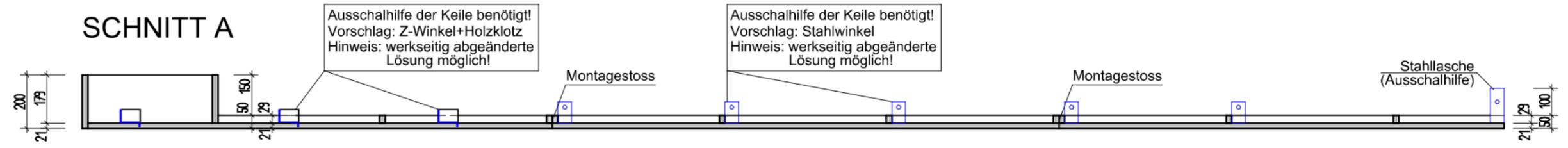
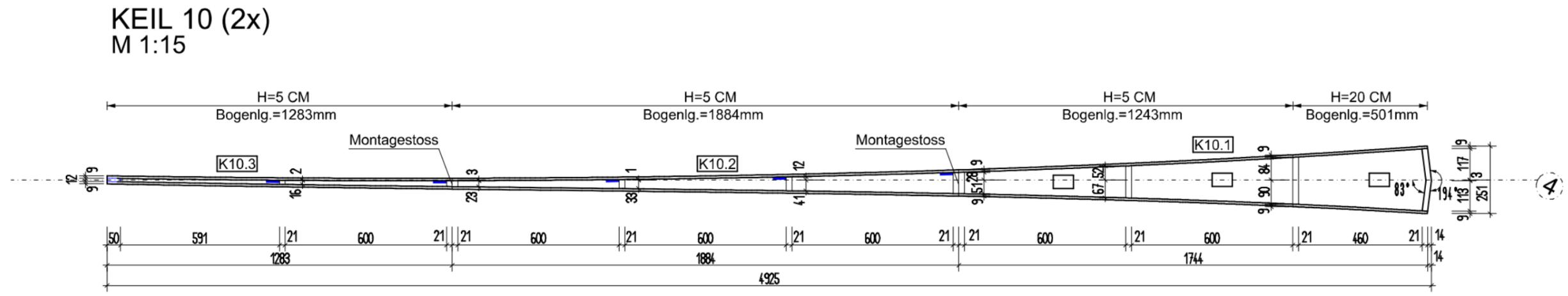
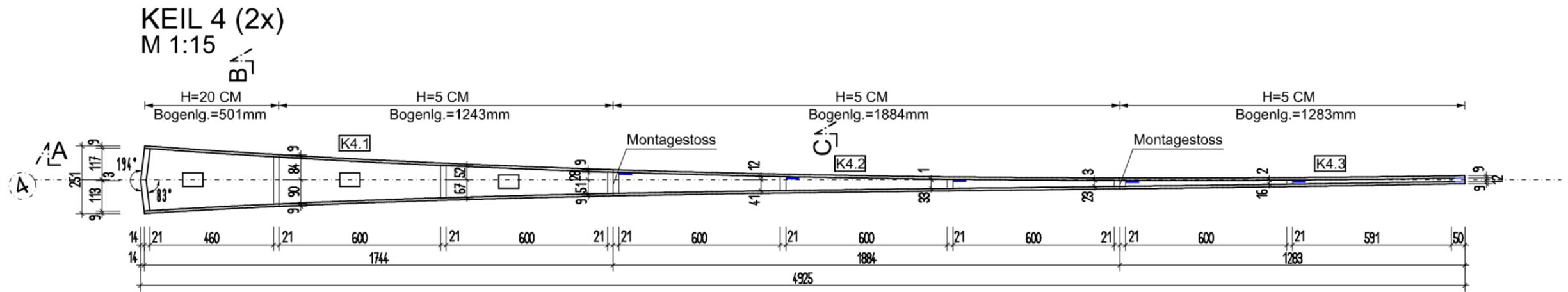
SCHNITT B



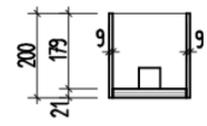
SCHNITT C



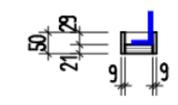
| | |
|------------------------------------|-------------------|
| Planinhalt: Schalungsplan Keil 2+8 | M 1:15 |
| Projekt: Freiformflächen aus Beton | |
| Plan Nr.: 2 | Datum: 19.02.2014 |
| Verfasser: Markus Waglechner | |



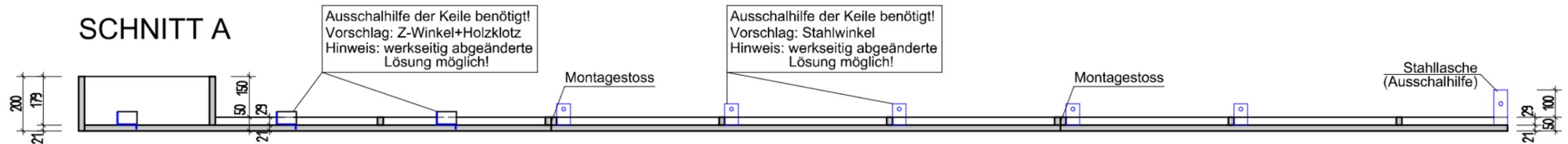
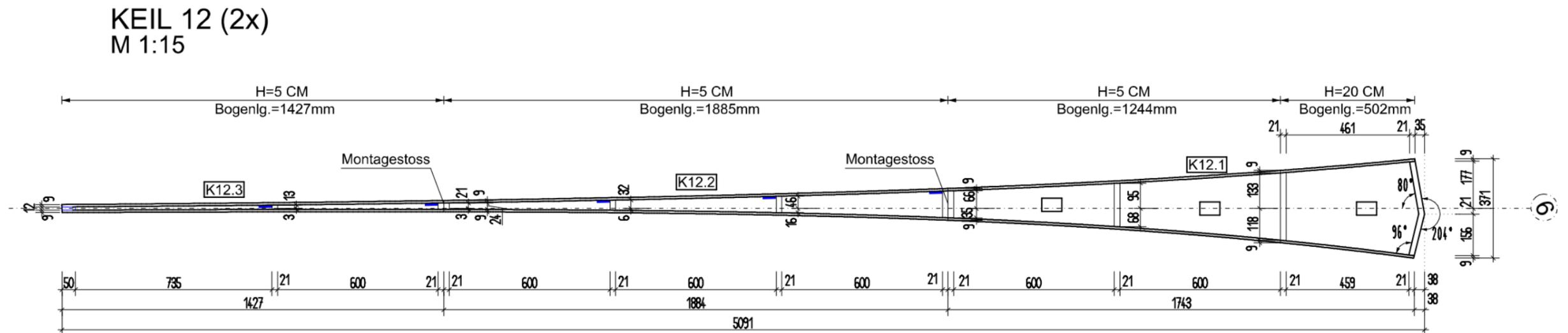
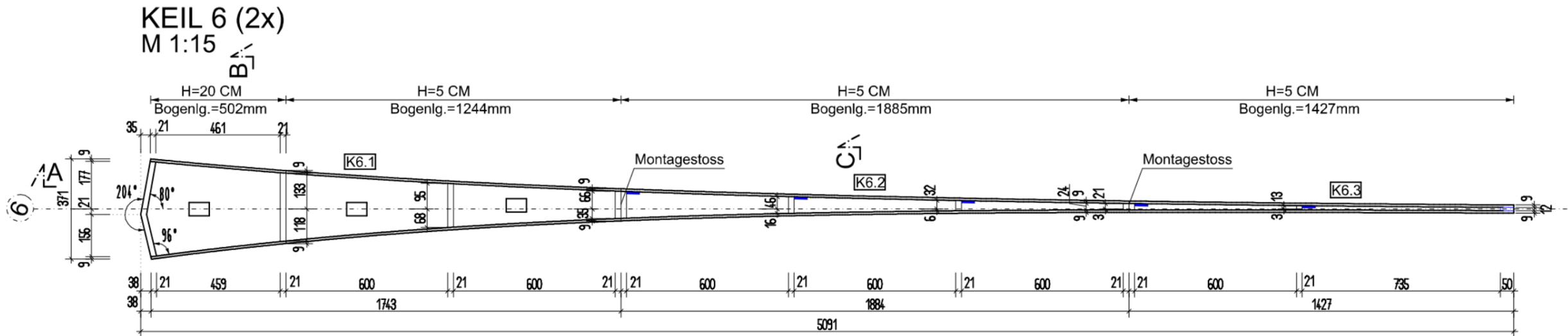
SCHNITT B



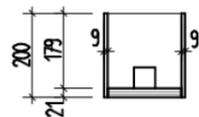
SCHNITT C



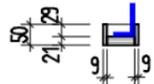
| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Planinhalt: Schalungsplan Keil 4+10 | M 1:15 |
| Projekt: Freiformflächen aus Beton | |
| Plan Nr.: 4 | Datum: 19.02.2014 |
| Verfasser: Markus Waglechner | |



SCHNITT B

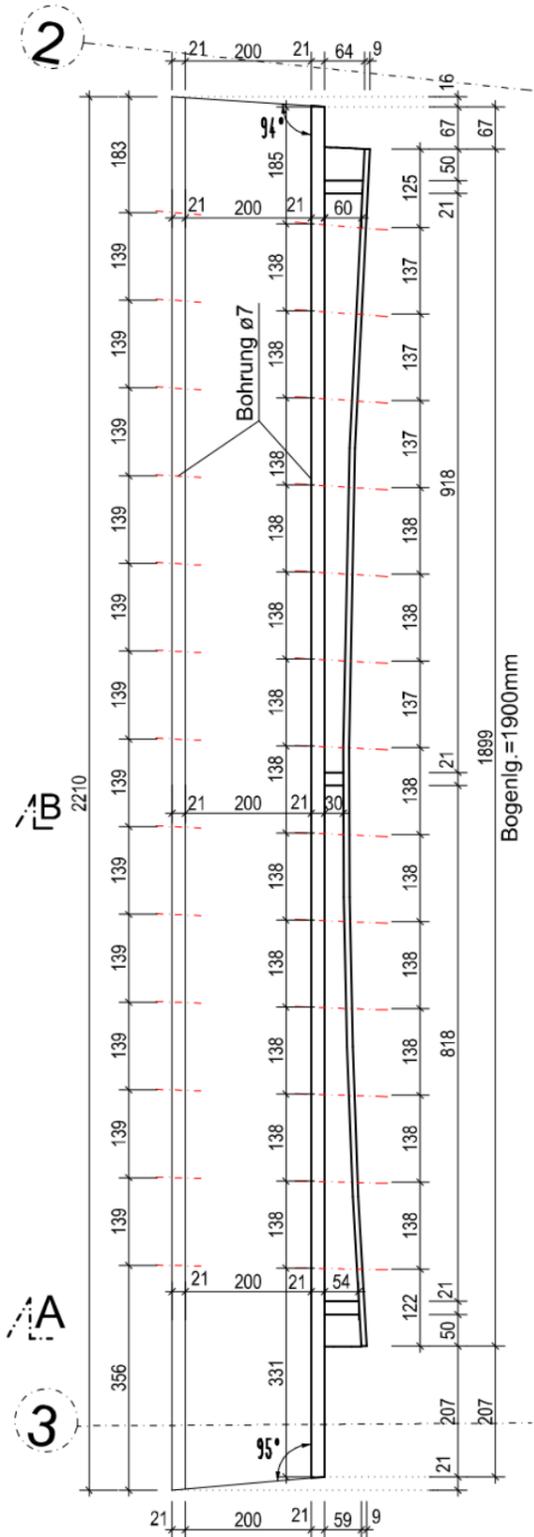


SCHNITT C

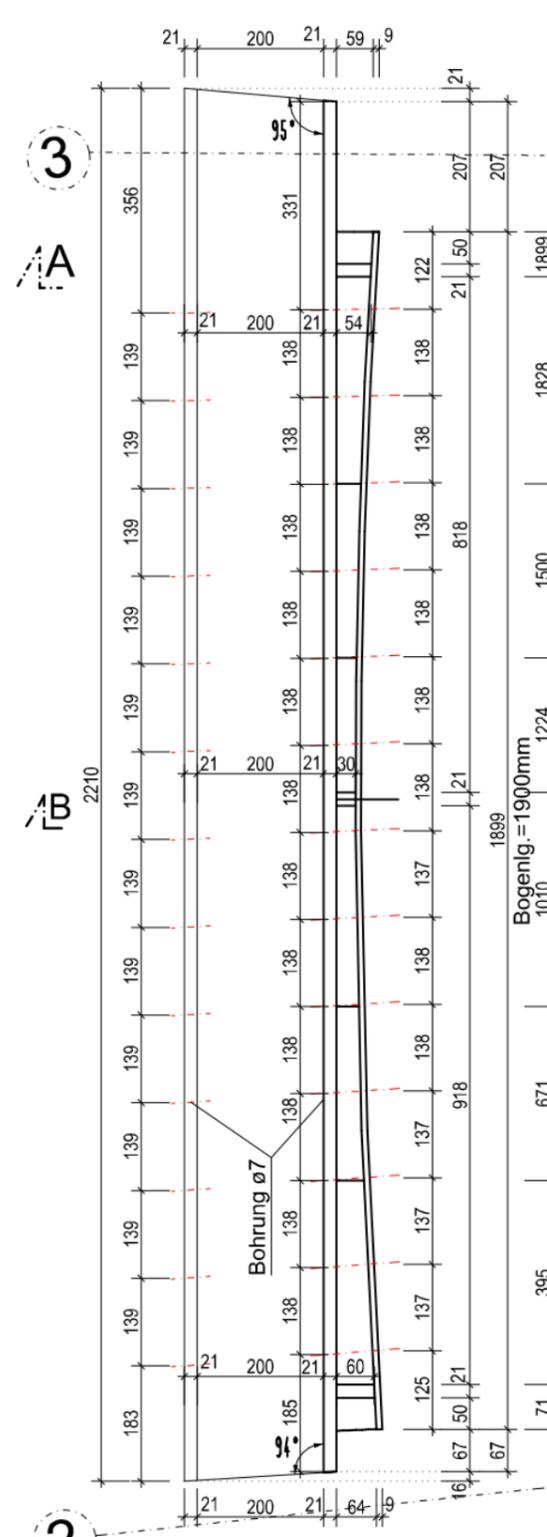


| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Planinhalt: Schalungsplan Keil 6+12 | M 1:15 |
| Projekt: Freiformflächen aus Beton | |
| Plan Nr.: 6 | Datum: 19.02.2014 |
| Verfasser: Markus Waglechner | |

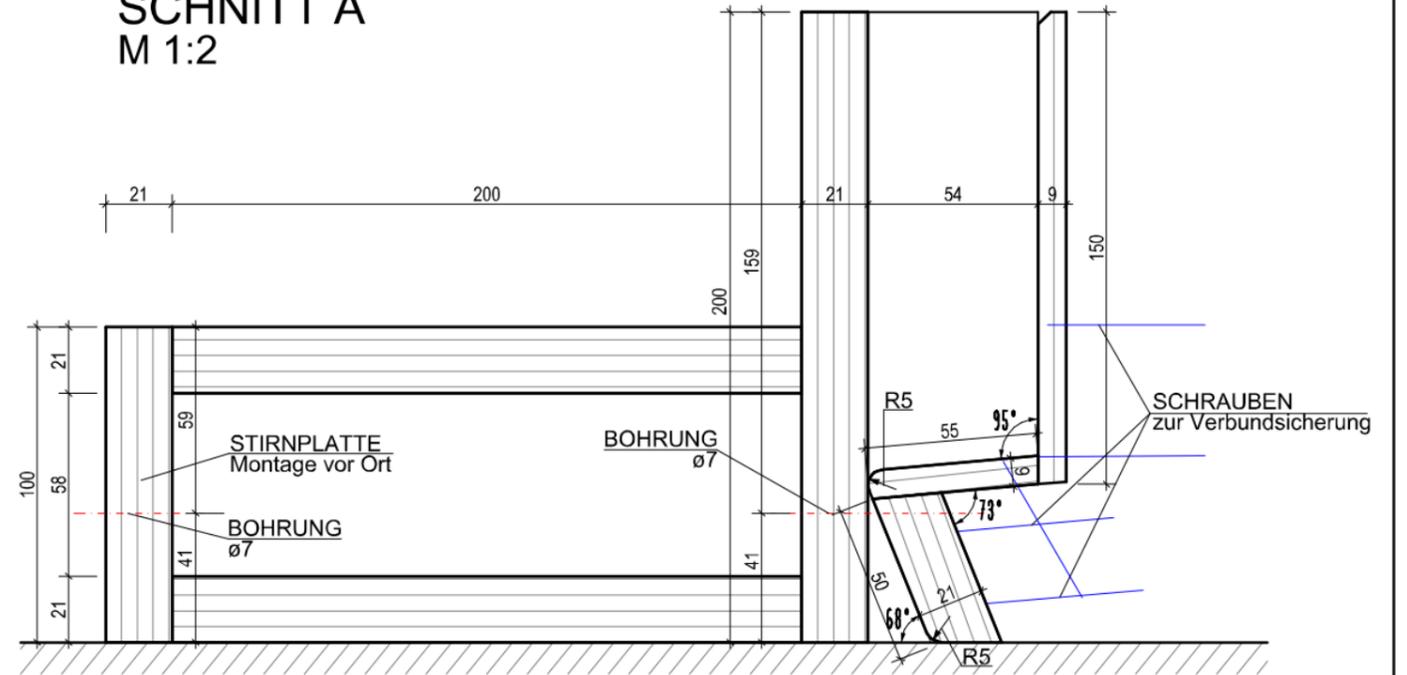
ABSCHALUNG 8 (2x)
M 1:10



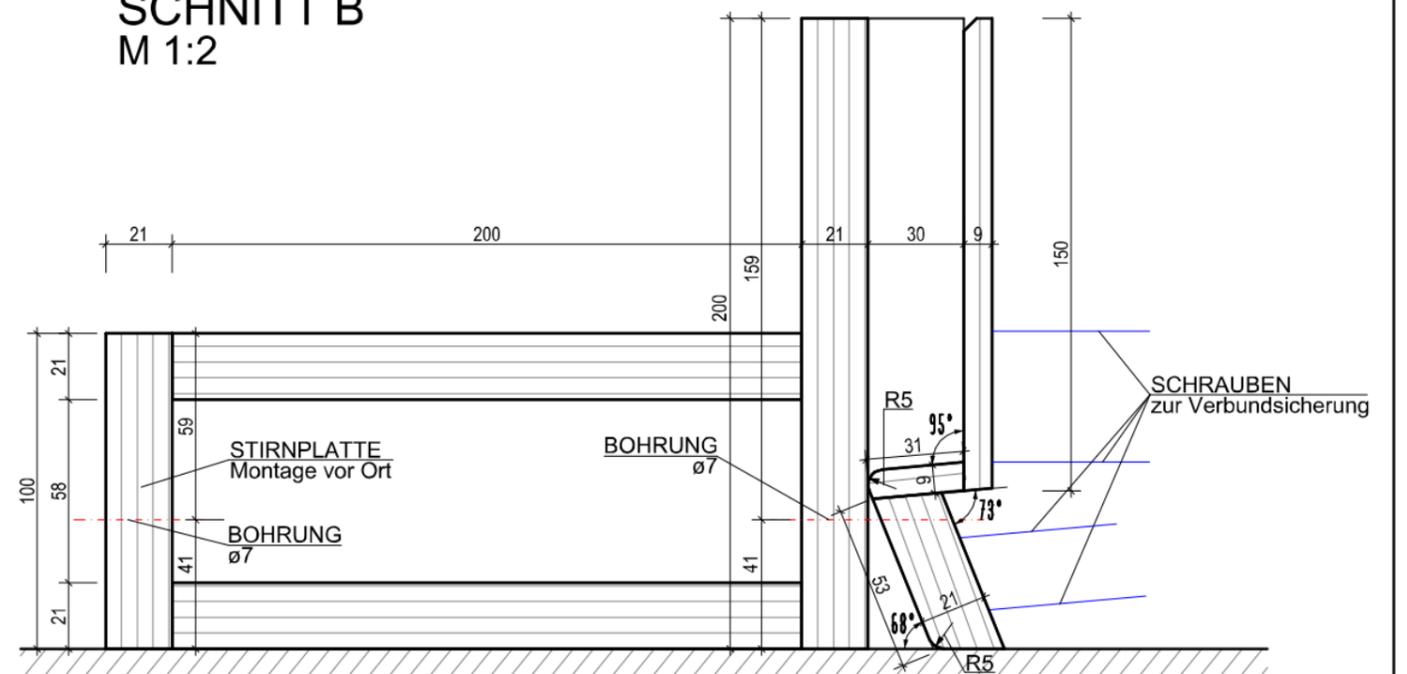
ABSCHALUNG 2 (2x)
M 1:10



SCHNITT A
M 1:2

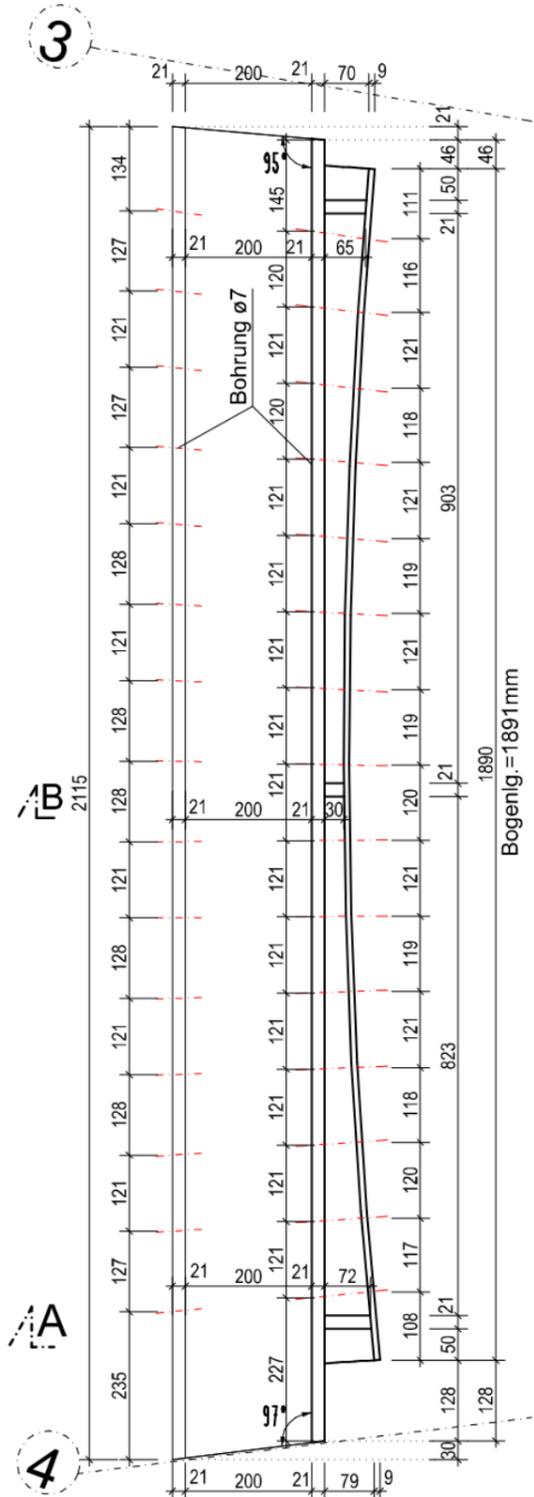


SCHNITT B
M 1:2

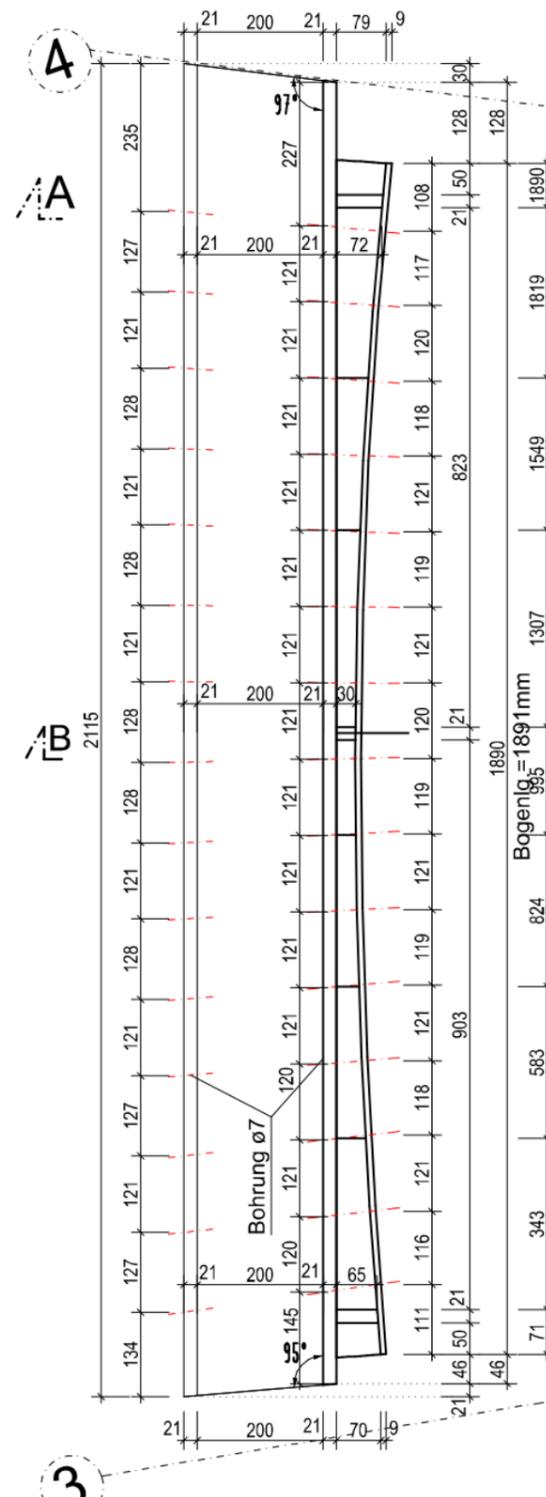


| | |
|--|-------------------|
| Planinhalt: Schalungsplan Abschalung 2+8 | M 1:2/10 |
| Projekt: Freiformflächen aus Beton | |
| Plan Nr.: 8 | Datum: 19.02.2014 |
| Verfasser: Markus Waglechner | |

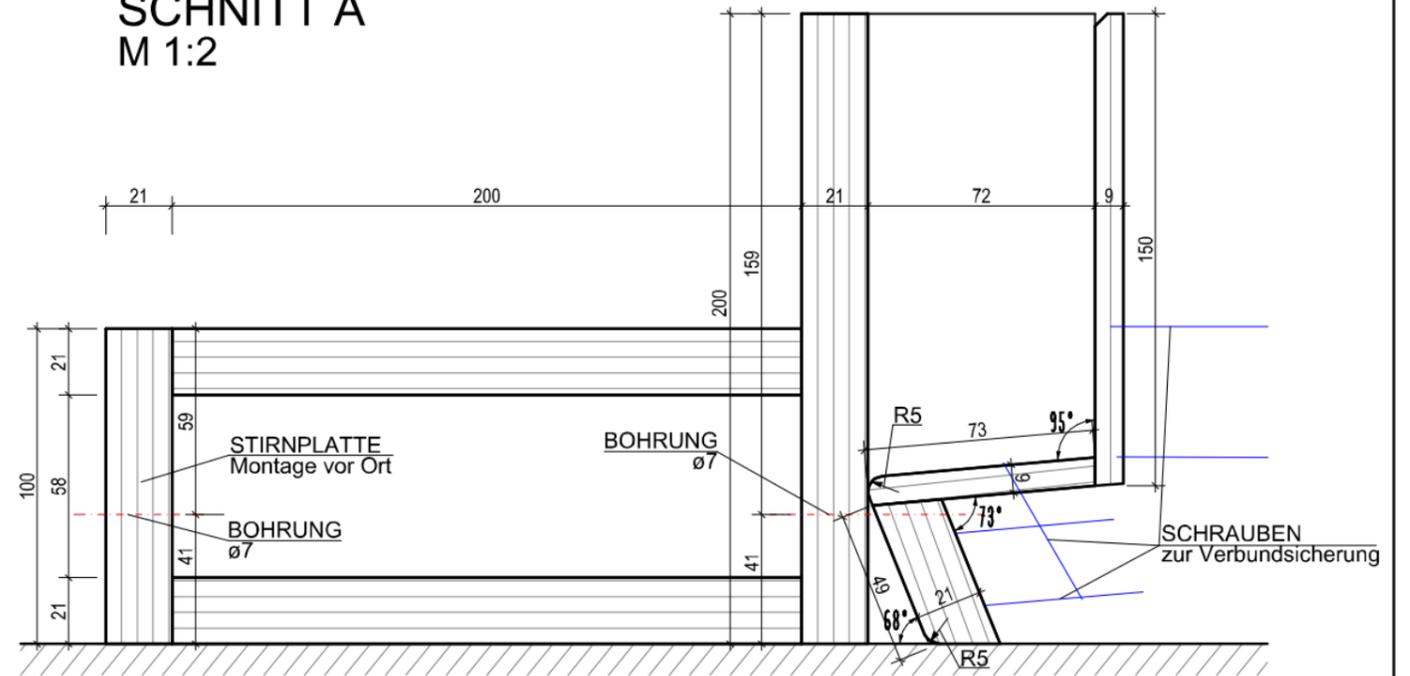
ABSCHALUNG 9 (2x)
M 1:10



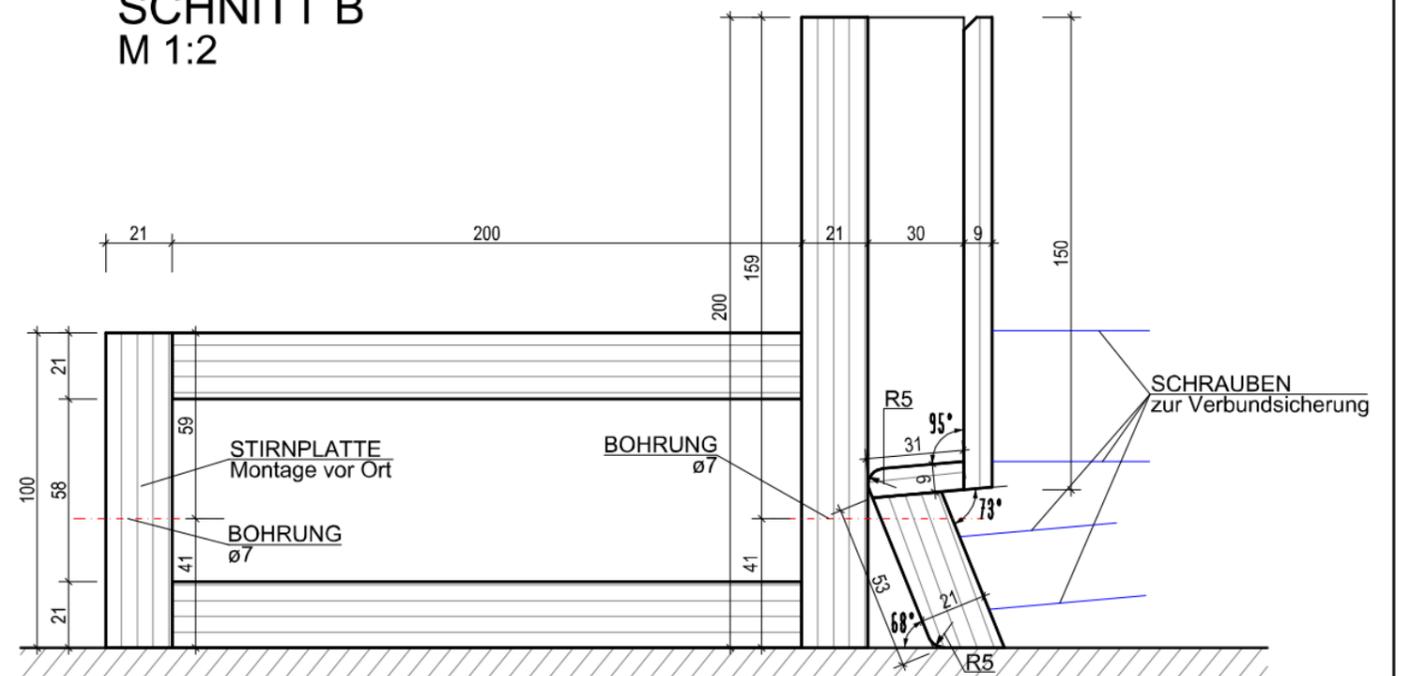
ABSCHALUNG 3 (2x)
M 1:10



SCHNITT A
M 1:2

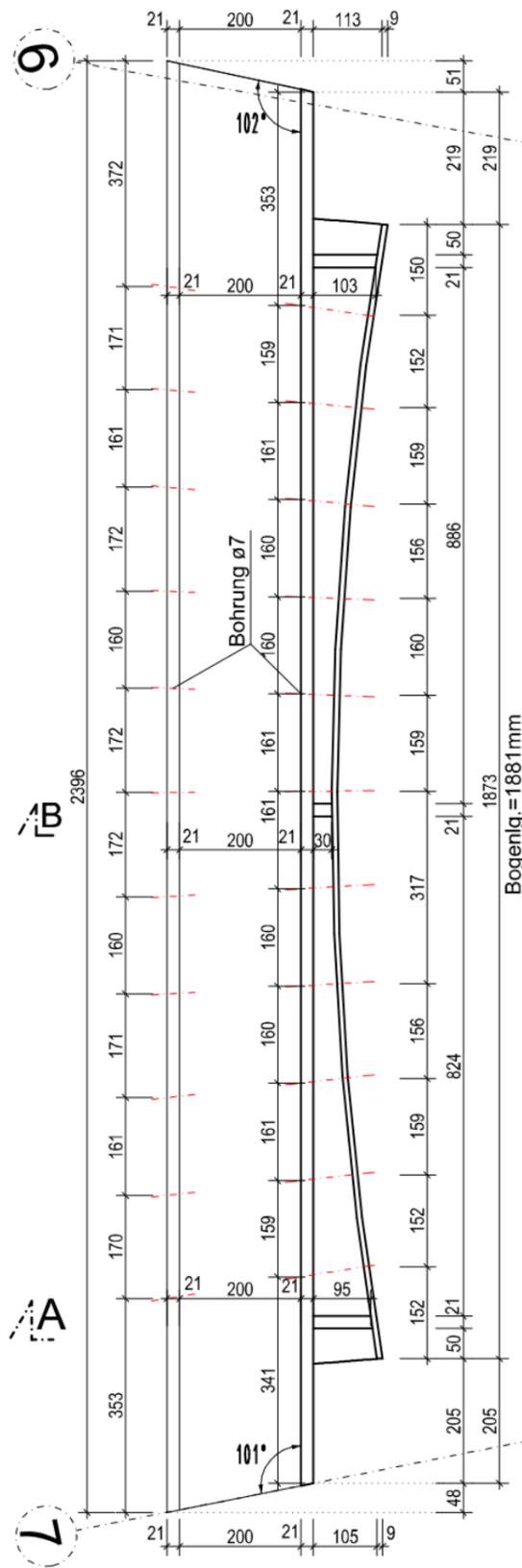


SCHNITT B
M 1:2

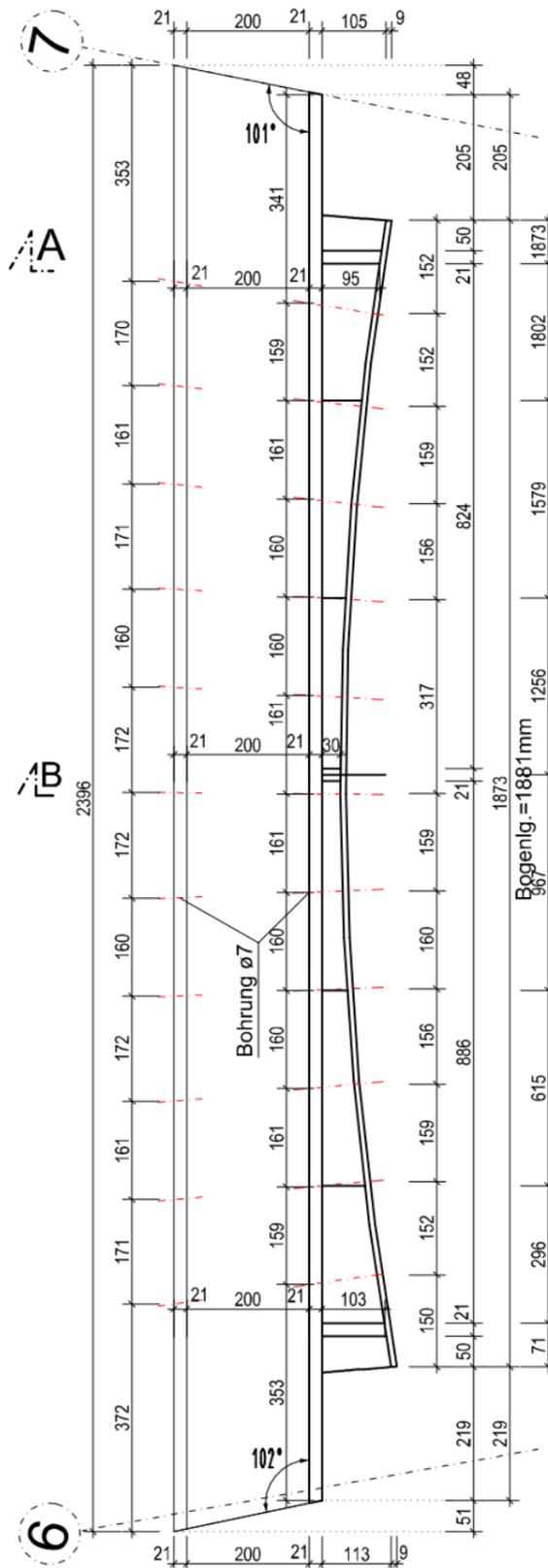


| | |
|---|-------------------|
| Planinhalt: Schalungsplan Abschaltung 3+9 | M 1:2/10 |
| Projekt: Freiformflächen aus Beton | |
| Plan Nr.: 9 | Datum: 19.02.2014 |
| Verfasser: Markus Waglechner | |

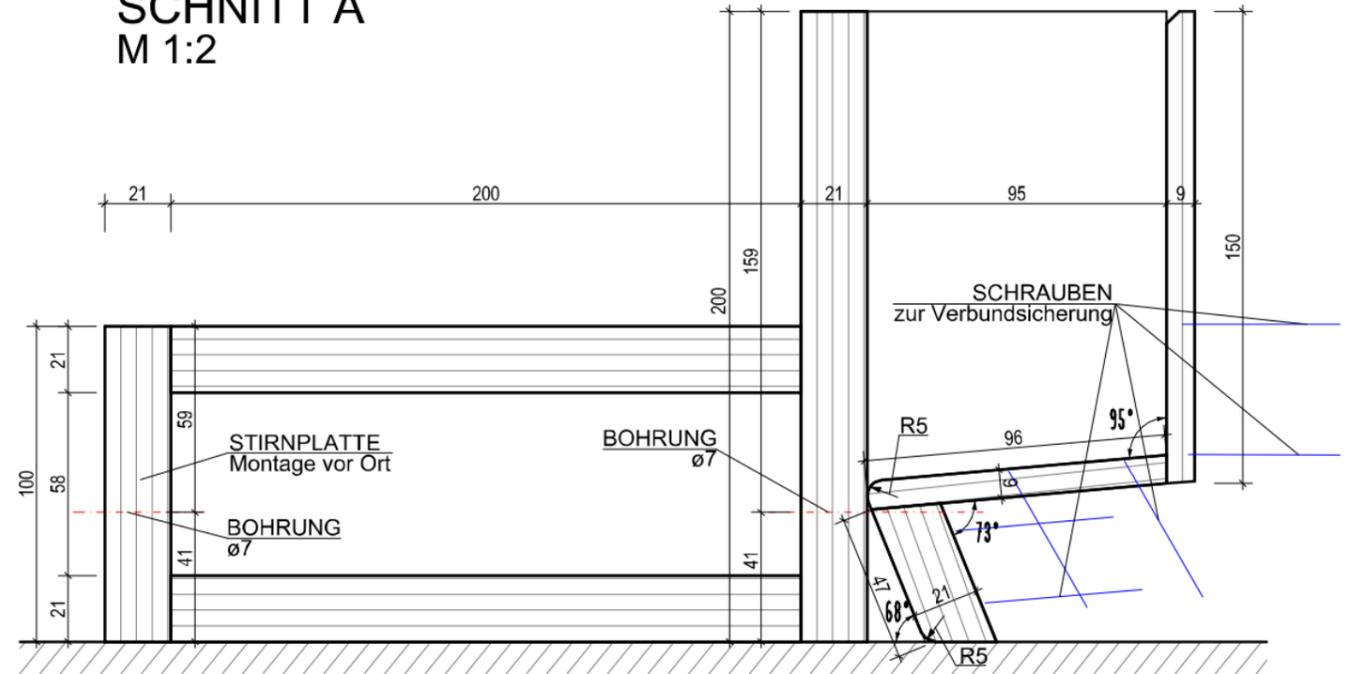
ABSCHALUNG 12 (2x)
M 1:10



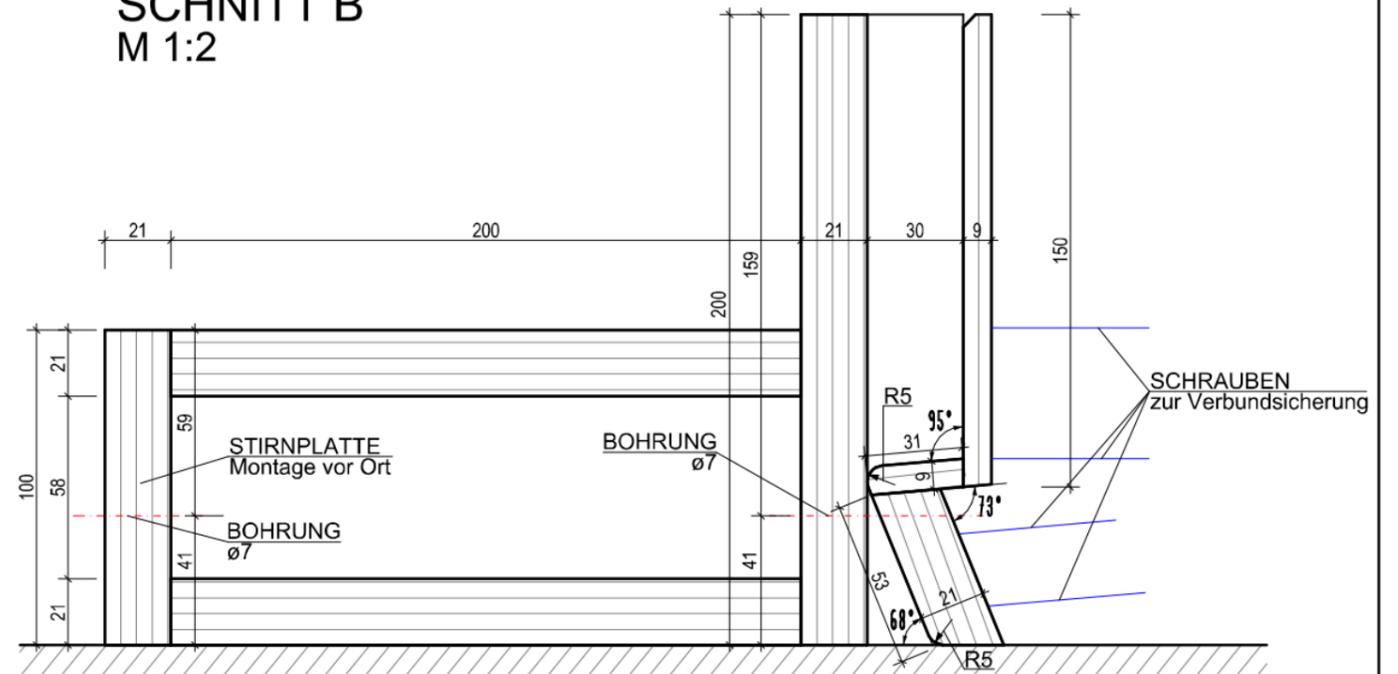
ABSCHALUNG 6 (2x)
M 1:10



SCHNITT A
M 1:2



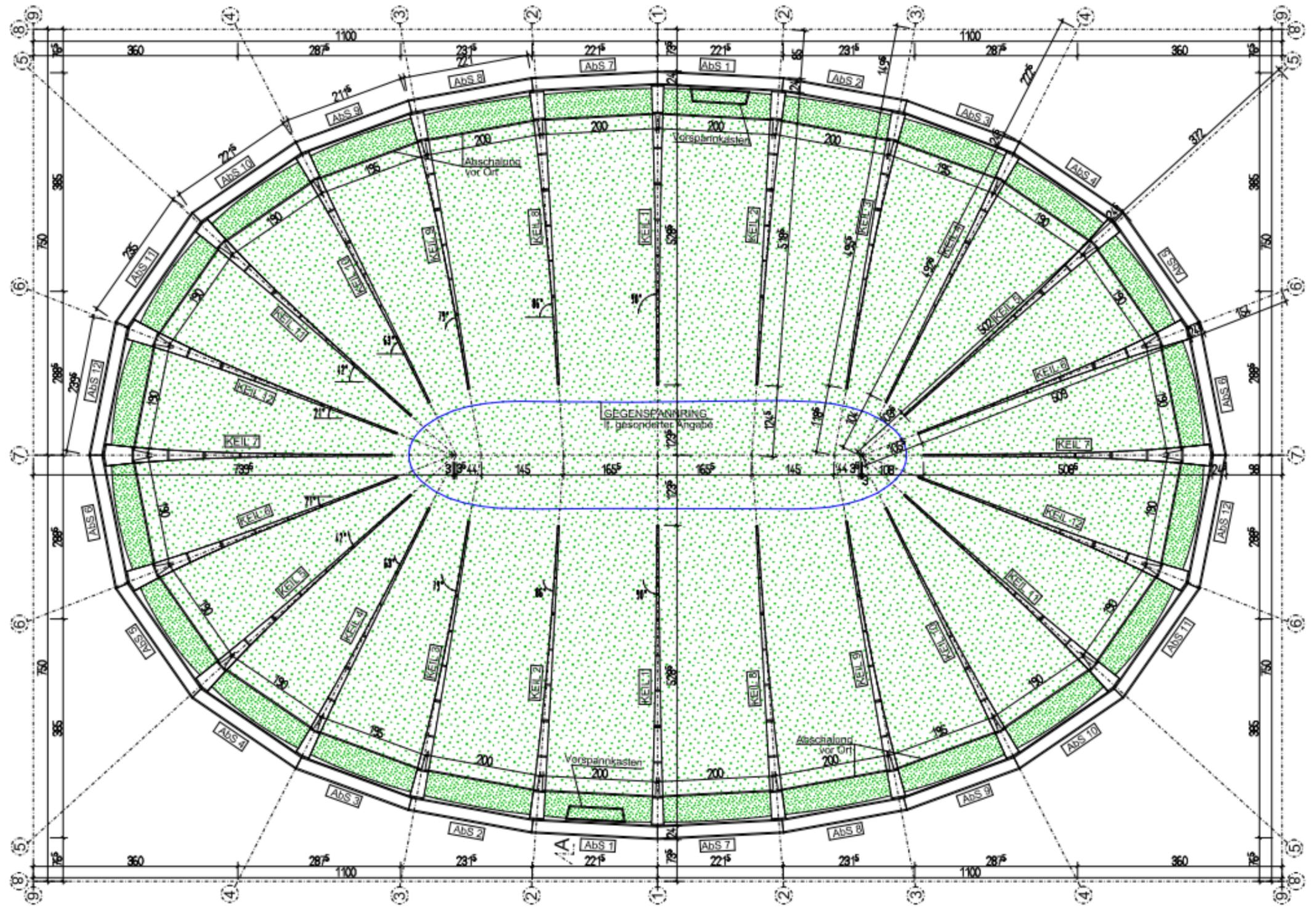
SCHNITT B
M 1:2



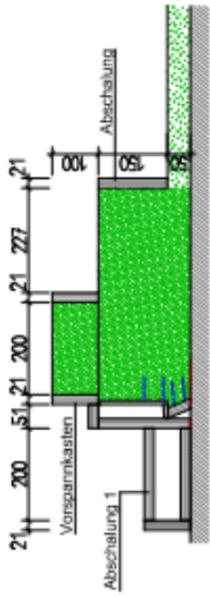
Planinhalt: Schalungsplan Abschaltung 6+12 M 1:2/10
 Projekt: Freiformflächen aus Beton
 Plan Nr.: 12 Datum: 19.02.2014
 Verfasser: Markus Waglechner

GRUNDRISS

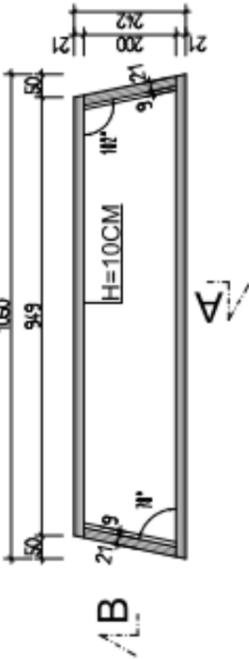
M 1:50



SCHNITT A
M 1:10



GR Vorspannkasten (2x)
M 1:10



Schnitt B



Legende:

- BETON H=5 CM
- BETON H=20 CM



| | |
|-------------------------------------|-------------------|
| Planinhalt: Schalungsplan Grundriss | M 1:10/50 |
| Projekt: Freiformflächen aus Beton | |
| Plan Nr.: 13 | Datum: 19.02.2014 |
| Verfasser: Markus Waglechner | |