

Johann-Wilhelm Heyden

Räumliche Knotenstabtragwerke

**in Ausführung mit
Kreuzbalken und Induo - Verbundankertechnik**

Räumliche Knotenstabtragwerke

**in Ausführung mit
Kreuzbalken und Induo - Verbundankertechnik**

**Von der Fakultät für Architektur
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen**

**zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation**

**vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Johann-Wilhelm Heyden
aus Birkesdorf jetzt Düren**

**Berichter:
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Wilfried Führer
Universitätsprofessor Dipl.-Ing. Hartwig N. Schneider**

Tag der mündlichen Prüfung: 27 März 2001

**Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Hochschulbibliothek online verfügbar**

Vorwort

Am Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre) ist meine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter neben der kollegialen Atmosphäre vor allem durch das ingenieure Denken des Lehrstuhlinhabers Prof. Dr.-Ing. Wilfried Führer und die vielen Gespräche mit ihm außerhalb der Tagesordnung geprägt. Ich danke ihm herzlich für die Anregung zu diesem Dissertationsthema, wissend um meine fachliche Stärke, die ich in die Arbeit einbringen konnte und für sein persönliches Engagement in Unterstützung und Betreuung.

Herzlich danke ich auch Herrn Prof. Dipl.-Ing. Hartwig N. Schneider, der spontan bereit war, die vorliegende Arbeit zu begleiten und das Koreferat zu übernehmen.

Ausgangspunkt und Grundlage der vorliegenden Arbeit ist der patentierte Verbundankerkörper der Induo - Systemholztechnik, Korschenbroich.

Besonders möchte ich dem Geschäftsführer Herrn Dipl.-Betriebsw. Paul Reichartz danken, der sich anregen ließ, den Einsatz dieser Verbundankertechnik für räumliche Knotenstabtragwerke analysieren und weiterentwickeln zu lassen. Gemeinsam mit seinem Team hat er mich bei der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit mit anregenden Diskussionen und bezüglich technischer Fragen zur Ankerfertigung hilfreich unterstützt.

Ebenso gilt mein herzlicher Dank den studentischen Mitarbeitern, den Herrn Eckehardt Esters, Lars Heimann, Florian Mähl und Sascha Meis, für ihre fachlich kompetente Unterstützung und ihrem großen persönlichen Einsatz.

Weitere dankenswerte Unterstützung erhielt ich von Herrn Dipl.-Ing. Jochen Dahlhausen in praxisorientierten Diskussionen und wertvollen Anregungen zu Knotenkonstruktionen sowie in der Realisierung der Modellprototypen.

Ein weiterer Dank geht an meine Kollegen im Lehrstuhl, u.a. an Frau Dipl.-Ing. Katrin Leitner für die Erörterung geometrischer und statischer „Probleme“. Insbesondere gilt dieser Dank Frau Dr.-Ing. Evelin Rottke für die strukturelle und sprachliche Korrektur meiner Arbeit.

Danken möchte ich zum Schluß meiner Frau, Dipl.-Ing. Christine Heyden, mit der ich viele fachliche Erörterungen führte, und die mir immer hilfreich zur Seite stand.

Abstract

The main objective of the thesis is to show new directions for the development of three-dimensional joined member structures in wood.

The Induo-dowell-anchor was developed by Induo Systemholztechnik GmbH and is being used as an efficient device for connections in timber construction since 1998. During the industrial production of structural timbers, i.e. quartered logs, the dowell-anchor can be placed at any position in direction of the longitudinal axis of the joist. The dowell technique means that the joist is being “nailed-up” inside at a right angle to its axis. This enables the anchor to survey and transmit high tension and compression forces.

Focussing on good exploration of axial forces, the thesis explores, how the dowell-anchor-technique can be used for three-dimensional space trusses which are fully acting on axial forces. The structural advantages of space truss systems will be analysed. On this basis the Induo-dowell-anchor-technique will be explored and developed further. This technique offers the potential of prefabrication for cross beams, which are an environmentally friendly element of timber-frame constructions.

The thesis wants to provide a basis and an orientation for the construction, the structural analysis and the finding of the right proportions for space trusses in wood. It is designed to be of practical help for architects and structural engineers during the design phase as well as during the execution of work. Furthermore the invention of the “screwed connector inside the bar” together with the “concrete joint” is pioneering for the construction of structural timber-frames and opens new horizons for the design of three-dimensional joined member structures.

Kurzzusammenfassung

Die Dissertation zeigt neue Wege für die Entwicklung von Knotenstabtragwerken in Holz auf. Der Induo-Verbundanker, eine Entwicklung der Firma Induo Systemholztechnik GmbH, stellt ein leistungsfähiges Verbindungsmittel dar, das seit 1998 im konstruktiven Holzbau Anwendung findet. In der industriellen Produktion von Konstruktionshölzern, z.B. Kreuzbalken, wird der Verbundanker an beliebiger Position in Richtung der Stablängsachse eingebracht. Mit der Verbundtechnik, einer "Innenvernagelung" quer zur Stabachse, ist der Anker vor allem in der Lage, Normalkräfte des Stabelements aufzunehmen und weiterzuleiten. Unter dem Gesichtspunkt der günstigen Normalkraftbeanspruchung wurde im Rahmen der Dissertation untersucht, inwieweit die Induo-Verbundankertechnik insbesondere für räumliche Knotenstabtragwerke als rein normalkraftbeanspruchbare Tragsysteme verwendet werden kann. Die strukturellen Vorteile von Raumtragwerken und das Potential der Induo-Verbundtechnik mit den Möglichkeiten der Konfektionierung und Elementierung in Verbindung mit dem Kreuzbalken als ressourcenschonendes Holzbauelement werden analysiert und weiterentwickelt.

Die vorliegende Arbeit dient als Grundlage und Orientierung für die Konstruktion, Statik und Proportionsfindung von räumlichen Knotenstabtragwerken in Holz. Für Architekten und Bauingenieure in der Praxis und in der Ausbildung ist diese Arbeit eine Hilfe von der Entwurfsphase bis hin zur Ausführung. Darüber hinaus weist die Erfindung der Stabinnenverschraubung in Verbindung mit dem Massivknoten innovative Wege im konstruktiven Holzbau auf, der den räumlichen Knotenstabtragwerken weitere Perspektiven eröffnet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Kreuzbalken in Ausführung mit Induo – Verbundankertechnik	17
3	Allgemeine Grundlagen der räumlichen Knotenstabtragwerke	21
3.1	Geometrie	
3.1.1	Ebene Trägerflächen	22
3.1.2	Gekrümmte Trägerflächen	22
3.1.3	Freigeformte Trägerflächen	24
3.1.4	Theorie der Raumpackungen	24
3.1.5	Die Grundkörper	26
3.1.6	Regelmäßigkeit	26
3.1.7	Gekrümmte und verzerrte Stabtragwerke	27
3.1.8	Optimierungsziele	27
3.2	Tragverhalten von räumlichen Knotenstabtragwerken	
3.2.1	Tragwirkung der Raumfachwerke	28
3.2.2	Stabilität und Steifigkeit	29
3.2.3	Umlenkungseffekte	31
4	Analyse und Wertung ebener Knotenstabtragwerke	31
4.1	Klassifizierung von ebenen Knotenstabtragwerken	31
4.1.1	Halboktaeder und Tetraeder	37
4.1.2	Halboktaeder und Halbcuboktaeder	39
4.1.3	Halboktaeder und Tetraeder	41
4.1.4	Cubus mit Diagonalenmaximum	43
4.1.5	Cubus mit Diagonalenminimum	45
4.1.6	Halboktaeder und Antishenoid	47
4.1.7	Oktaeder und Tetraeder	49
4.1.8	Oktaeder, Tetraeder und Prisma	51
4.2	Berechnung	53
4.2.1	Halboktaeder und Tetraeder	56
4.2.2	Halboktaeder und Halbcuboktaeder	57
4.2.3	Halboktaeder und Tetraeder	58
4.2.4	Cubus mit Diagonalenmaximum	59
4.2.5	Cubus mit Diagonalenminimum	60
4.2.6	Halboktaeder und Antishenoid	61
4.3	Statische Auswertung der räumlichen Knotenstabtragwerke 1 – 6	62

4.4 Abwandlung der Parameter und ihre Auswirkungen	
4.4.1 Veränderte Stützweiten	64
4.4.2 Auflagerprinzipien	66
4.4.3 Verhältnis von Spannweite zu Bauhöhe	67
4.4.4 Anzahl der Gurtlagen	69
4.5 Näherungsverfahren zur Ermittlung des Verhältnisses von Spannweite zu Bauhöhe	70
4.6 Hexagonale Systeme	71
5 Analyse und Wertung gekrümmter Knotenstabtragwerke	73
5.1 Grundlagen gekrümmter Knotenstabtragwerke	
5.1.1 Geometrie	73
5.1.2 Tragverhalten	75
5.2 Stabwerktonnen	
5.2.1 Grundlagen	81
5.2.2 Klassifizierung der Stabwerktonnen	83
5.2.3 Berechnung von Stabwerktonnen	87
5.2.3.1 Einlagige Systeme	89
5.2.3.2 Zweilagige Systeme	99
5.3 Stabwerkskuppeln	
5.3.1 Grundlagen	103
5.3.2 Klassifizierung der Fachwerkskuppeln	
5.3.2.1 Radialkozentrische Kuppeln	108
5.3.2.2 Homogennetz – Kuppeln	114
5.3.2.3 Ensphere - Kuppeln	115
5.3.2.4 Geodätische Kuppeln	116
5.3.3 Berechnung der Stabwerkskuppeln	
5.3.3.1 Geodätische Kuppel	119
5.3.3.2 Modifizierte Ringnetzkupe	121
6 Knotenkonstruktionen	123
6.1 Historische und marktgängige Beispiele	124
6.1.1 Einlagige Systeme	125
6.1.2 Zweilagige Systeme	131
6.1.3 Mehrlagige Systeme	136
6.2 Knotenausbildung in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik	
6.2.1 Übernahme von marktgängigen Knotenausbildungen	143
6.2.2 Abwandlung konventioneller Knotenprinzipien	145
6.2.3 Neue Knotenausbildungen	150

6.3 Anschlußkonstruktionen der Knoten	
6.3.1 Übernahme von marktgängigen Knotenanschlußkonstruktionen	155
6.3.2 Abwandlung konventioneller Knotenanschlußprinzipien	156
6.3.3 Neu entwickelte Knotenanschlüsse	158
6.4 Stabendenausbildung	
6.4.1 Versuchsteil A: Knoten / Stab = 2 / 3	165
6.4.2 Versuchsteil B: Knoten / Stab = 1 / 1	169
6.4.3 Zusammenhang zwischen Knotenproportion und Stabendenausbildung	171
6.4.4 Fazit	172
6.5 Zusammenfassung und Schlußfolgerung	173
 7 Brandschutz	 175
7.1 Grundlagen des Brandsicherheitskonzeptes	
7.1.1 Anforderungen	175
7.1.2 Beanspruchung und Beanspruchbarkeit	176
7.1.3 Parameter für die Brandberechnung	177
7.1.4 Brandsicherheitskonzept	178
7.1.5 Vorschlag für den Tragwerkentwurf	179
7.2 Simulationsberechnung für den Brandfall	180
7.2.1 Grundlagen für die Berechnung	
7.2.2 Parameter für die Berechnung	
7.2.3 Brandsimulation	
 8 Gestaltungsbeispiele	 183
8.1 Tank- und Servicestation	183
8.2 Ausstellungspavillon	186
8.3 Werkhofüberdachung	190
8.4 Ferienhaus	192
8.5 Domkirche S. Mass. Kolbe	193
 9 Zusammenfassung	 195
 10 Anhang	 201
10.1 Belastungsgrenzen	203
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke	209
10.3 Gekrümmte Knotenstabtragwerke	262
10.4 Brandsimulation	311
 11 Literaturverzeichnis	 323

1 Einleitung

Raumfachwerke stellen als Weiterentwicklung der ebenen Fachwerkbinder eine Ergänzung zu den Massivkonstruktionen Platte, Scheibe und Schale dar. Durch industrielle Vorfertigung erlebten sie seit den 60er Jahren eine weite Verbreitung, und werden auch heute noch häufig für große Raumstrukturen, Hallen- und Fassadenkonstruktionen angewandt. Wesentliche Beteiligte an dieser Entwicklung, die Ende des 19. Jahrhunderts einsetzte, sind u.a. A. Föppl, J. W. Schwedler, R. B. Fuller, M. Mengerlinghausen, Z. S. Makowski, F. Otto.

Knotenstabtragwerke sind Kombinationen stabförmiger Einzelglieder, die durch Knotenpunkte gruppenweise zusammengefaßt werden. Die Flächen zwischen den Stäben sind in den meisten Konstruktionskonzepten statisch nicht an der Funktion des Tragens beteiligt. Sie beeinflussen jedoch wesentlich die Wahl der Geometrie, wenn sie zusätzlich raumabschließende Funktionen, wie Geschoß- bzw. Dachflächen oder Fassaden, übernehmen.

Ebene Stabfachwerke unterscheiden sich von räumlichen Strukturen in der Form, daß alle Stäbe in einer Ebene liegen, und alle äußeren Kräfte in dieser Stabebene wirken, in der die Stäbe angeordnet sind.

Bei Raumfachwerken, sind die Stäbe in mehreren, sich schneidenden Ebenen angeordnet, so daß jeder Stab zu zwei oder mehr ebenen Fachwerken gehört. Sie können durch Kräfte in beliebiger Richtung beansprucht werden.

Diese Eigenschaft, kombiniert mit der Möglichkeit von Lastumlagerungen innerhalb der Tragstruktur, zeichnet die Raumfachwerke mit einer großen Flexibilität aus. Trotz ihrer komplexen Strukturen bezüglich Statik, Form und Konstruktion ist ihr Einsatz bei einer optimierten Tragwerkplanung oft wirtschaftlicher als andere konventionelle Tragsysteme. Die elementierte Tragwerkstruktur von Stäben und Knoten führt zu einem aufgelösten und leichten Tragwerk mit großen Vorteilen in der werkseitigen Vorfertigung und der Montage vor Ort.

Diese Bauweise stellt hohe Ansprüche an Material und Konstruktion, die der hochleistungsfähige Baustoff Stahl, in ausgeführten Projekten bevorzugt, erfüllt. Vorteile des Stahls sind unter anderem die hohe Tragfähigkeit des Materials mit niedrigem Konstruktionsvolumen, die ausgereifte Fügetechnik und kleine Maßtoleranzen.

Eingeschränkt werden diese Vorzüge unter anderem bezüglich Alterungsbeständigkeit und Brandschutz. Die Oberflächenbehandlung muß auf Witterungseinflüsse abgestimmt werden, eventuell kombiniert mit geforderten brandschutztechnischen Maßnahmen. Dies kann eine Einschränkung der architektonischen Qualität bedeuten.

Holz hat von Natur aus, im Gegensatz zu Stahl, auch als brennbarer Baustoff eine Feuerwiderstandsfähigkeit in tragenden Bauelementen (z.B. F 30-B). Raumfachwerke als Holzkonstruktionen sind ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen oder in Abstimmung mit einem Brandsicherheitskonzept ausführbar. Die gestalterische Aussagekraft der hölzernen Tragstruktur wird nicht durch zusätzliche Maßnahmen beeinträchtigt. Die visuellen und haptischen Qualitäten des Baustoffes Holz beeinflussen insbesondere als sichtbare tragende Konstruktion maßgeblich das gestalterische Konzept im architektonischen Kontext.

Die Fügung von Stäben ergibt Anschlußprobleme an den Gelenkpunkten in hölzernen Raumfachwerken. Die Stäbe benötigen zum Aufnehmen und Absetzen der Kräfte besondere konstruktive Verbindungsmittel, deren Anschlußprinzipien bisher eine Erhöhung der Stabquerschnitte bedingen.

Demgegenüber bietet die Induo Vertriebs- und Verwaltungsgesellschaft mbh ihren Induo – Verbundanker als ein Verbindungssystem in Ausführung mit Kreuzbalken an, das im konstruktiven Holzbau einen neuen Weg in der Verbindungstechnik aufweist.

Der Kreuzbalken, ein Konstruktionsholz aus Viertelsegmenten zusammengesetzter Balken mit rechteckigem oder quadratischen Querschnitt, bildet die Grundlage für eine serielle Fertigung von formstabilen, maßgenauen und hochbelastbaren Holzbalken (Kapitel 2). In Kombination mit dem Induo – Verbundanker, der in die Kreuzbalken – Konstruktionshölzer paßgenau und ähnlich einem Dübel an beliebiger Stelle in Richtung der Stablängsachse eingebracht werden kann, ist eine hochleistungsfähige und flexibel angepaßte Verbindungstechnik möglich, mit einer Verschraubungstechnik, die bisher nur im Stahlbau bekannt war. Durch die Lage des Induo – Verbundankers im Kreuzbalken und die Anschlußtechnik werden die Bauelemente in Stablängsachse nur normalkraftbeansprucht bzw. Normalkräfte in die Baukonstruktion aufgenommen und abgegeben.

Der Gesichtspunkt der günstigen Beanspruchung (durch Normalkraft), die Möglichkeit der Konfektionierung und Elementierung in Verbindung mit der Kreuzbalkentechnik als ressourcenschonendes Holzbauelement sowie günstige Brandschutzaspekte gaben den Anstoß das Potential dieses innovativen Verbindungssystems aufzuzeigen. Ziel ist es dabei, die Leistungsfähigkeit dieser Technik für normalkraftbeanspruchte Tragsysteme, den Fachwerken und insbesondere den räumlichen Knotenstabtragwerken, zu untersuchen und Wege ihrer Einsatzmöglichkeiten in die Praxis neu zu entwickeln.

Zweckmäßige Formen von Raumfachwerken mit ebenen und gekrümmten Trägerflächen werden aufgezeigt und die Ordnungsprinzipien mit ihren geometrischen Strukturen analysiert (Kapitel 4 u. 5). Erläutert wird die Auswirkung von homogenen und regulären Strukturen auf die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf Regelstablängen und Regelknoten. Im Gegensatz dazu stehen die freien Geometrien und Formen mit unterschiedlichen Stablängen und individuellen Knotenformen.

Unter Einhaltung der maximalen Stab-, Knoten- und Verbundankerkräfte führen statische Berechnungen an exemplarischen Knotenstabtragwerken zur Ermittlung der Grenzen für Stützweite und Schlankheit.

Für die Planung und Ausführung wird die konstruktive Detailausbildung der Gelenkpunkte von Knotenstabtragwerken untersucht (Kapitel 6). Literatur- und Marktrecherchen geben einen Überblick zu historischen und aktuellen Raumtragwerkknoten. Sie bilden die Grundlage für die Übernahme, Abwandlung und Neuentwicklung von Knotensystemen in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik.

Aspekte der Stabendenausbildung finden hinsichtlich ihrer gestalterischen, konstruktiven und statischen Anforderung Berücksichtigung und fließen in die architektonische Bewertung des Gesamttragwerkes ein.

Für das Sicherheitskonzept bezüglich des Brandschutzes liegt der besondere Augenmerk sowohl auf der Gesamtkonstruktion des Knotenstabtragwerkes als auch auf der Detailausbildung einzelner Konstruktionselemente mit ihrer Verknüpfung untereinander (Kap. 7).

Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsschwerpunkte werden im Detail und im Gesamtkontext anhand von Zeichnungen, maßstäblichen Modellen und Computeranimationen in fotorealistischer Darstellung herausgearbeitet und dokumentiert.

Das Potential der strukturellen Vorteile von räumlichen Knotenstabtragwerken in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik wird in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt, analysiert und weiterentwickelt, mit dem Ziel

- architektonisch ansprechend
- ingenieurtechnisch optimal
- ökologisch sinnvoll und
- ökonomisch konkurrenzfähig

zu sein. In diesem Sinne ist die Ausarbeitung eine Grundlage und Orientierung bei der Entwicklung von räumlichen Holzstabtragwerken von der Entwurfphase bis hin zur Ausführung.

Fußnoten zu Kap.1:

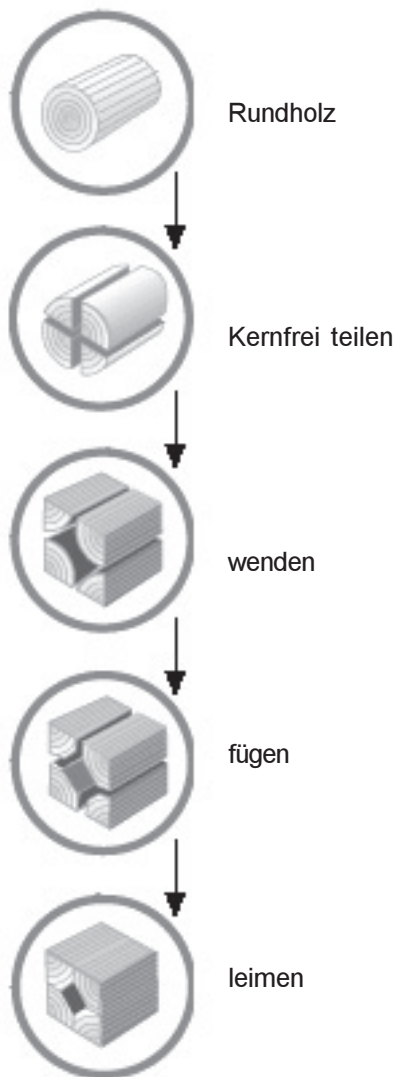
¹ Rühle, 1970, Bd.2, S. 61

² Rühle, 1970, Bd.2, S. 61, Bsp. neue Messe Leipzig

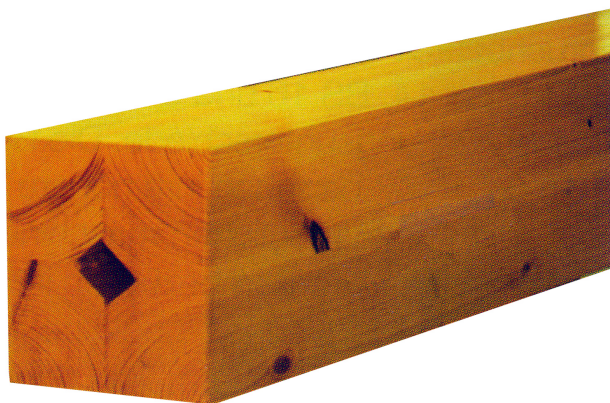
³ Rühle, 1970, Bd.2, S. 61

⁴ Mengerlinghausen, 1975, S. 24

⁵ Mengerlinghausen, 1975, S. 25



Herstellung des Kreuzbalkens



zusammengesetzter Kreuzbalken

2 Kreuzbalken in Ausführung mit Induo - Verbundankertechnik

2.1 Kreuzbalken

Kreuzbalken sind Konstruktionshölzer, die aus vier miteinander verleimten, parallelen viertelholzähnlichen Segmenten bestehen. Diese bilden sich beim Zuschnitt von vorsortierten Rundhölzern der Sortierklassen S 10 bzw. S 13 bei gleichzeitiger Entfernung der Markröhre. Die Segmente werden untereinander in der Form neu angeordnet, daß die inneren Jahresringe nach außen gerichtet sind.

Die erhöhte Dichte und die Verharzung der inneren Jahresringe führt zu einer größeren Holzhärte im Vergleich zum jüngeren Neuholz der äußeren Jahresringe. Die neue Position der größeren Holzhärte auf der Außenseite der Kreuzbalken erhöht die Festigkeitswerte des Gesamtquerschnittes bei gleichem Trägheitsradius gegenüber einem gleichdimensionierten natürlich gewachsenen Querschnitt. Nach dem Verleimprozeß entsteht ein Konstruktionsholz, dessen werkstoffbezogenen Festigkeiten über denen von Vollholz gleicher Sortierklasse liegen und mit den Werten von Brett-schichtholz vergleichbar sind. Bei der Herstellung ist dieser Vergütungsprozeß im Rahmen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, Zulassungsnummer Z – 9.1 – 314, nach den Bestimmungen des Deutschen Instituts für Bautechnik in Berlin sichergestellt. Für Bemessung und Berechnung nach DIN 1052 oder nach Eurocode 5 können die statisch relevanten Materialkennwerte und Querschnittswerte für Kreuzbalken der Zulassung entnommen werden.

Kreuzbalken können aus heimischen Nadelhölzern hergestellt werden, wobei der äußere Teil eines Stammes wie auch Durchforstungsholz Verwendung finden. Damit ist der Kreuzbalken ein die Ressourcen ausschöpfender und umweltschonender Baustoff.

Durch Feuchtigkeitsänderungen im Holz verursachte Zwängungen werden durch die symmetrische Anordnung der Viertelhölzer und die rechtwinklig aufeinandertreffenden Jahresringe größtenteils abgebaut. Die dadurch erreichte Formstabilität, Passgenauigkeit und fast vollständige Rissefreiheit hat Vorteile im statischen und konstruktiven Gefüge sowie optische Vorzüge bei der Verwendung im sichtbaren Bereich.

Durch die Konstruktionsgeometrie und die faserparallele Fügeflächenbearbeitung der Kreuzbalkenleimbinder stellen die Ansichtsflächen ein ausgeglichenes Massivholzbild dar. Jede Außenfläche erhält durch die Leimfuge nur eine Zäsur der Maserungsstruktur. Bei Verwendung von transparent aushärtendem Leim ist diese Fuge kaum

sichtbar. Verastungen und Astlöcher sind optisch entschärft, indem die hauptbelasteten äußeren Ansichtsflächen im Kreuzbalken nach innen gerichtet sind.

2.2 Induo – Verbundanker



Verbundankerkörper

Der Induo – Verbundanker ist eine Entwicklung der Induo - Systemholztechnik, Vertriebs- und Verwaltungsgesellschaft mbh & Co. KG in Korschenbroich, und national wie international patentrechtlich geschützt (Patentschrift DE 197 01 458 C 1).

Der aus Temperguß (Materialbezeichnung GTW – 40) nach DIN 1692 gefertigte Ankerkörper besitzt einen quadratischen Querschnitt mit mehreren Stiftreihen quer zur Stablängsachse. Als kraftübertragende Verbindungselemente zum Holzbalken ist die Anschlußcharakteristik dieser Stifte mit den Stäben der Verankerungstechnik von Stabdübeln nach DIN 1052 vergleichbar.

An der Kopfseite des Ankerkörpers befindet sich eine Bohrung mit Innengewinde M 16 oder M 20 zum Anschrauben außenliegender Bauteile über Gewindschrauben bzw. -stangen. Diese Verschraubungstechnik besitzt die Konstruktions- und Tragfähigkeitseigenschaften des Stahlbaus.

Eine galvanische Verzinkung schließt den Herstellungsprozeß des Verbundankers ab.

Die Induo - Verbundanker können prinzipiell in verschiedenen Längen und Dimensionen angefertigt werden. Grundlage dieser Dissertation ist der Ankerkörper mit einem Querschnitt von 28 x 28 mm und einer Gesamtlänge von 213 mm.

Im Laufe dieser Arbeit wurde eine innovative Verschraubungstechnik von Holzbalken, die sogenannte rückwärtige Stabinnenverschraubung (Kap.6.3.3.1), entwickelt. Dieses Konstruktionsprinzip erfordert eine Modifizierung des Verbundankers. Statt der einseitigen Bohrung mit Gewinde erhält der Verbundanker eine glattschaftige Gesamtdurchbohrung für eine innenliegende Imbusverschraubung.

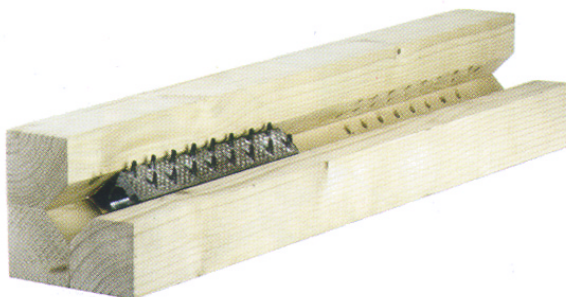
2.3 Fertigung des Kreuzbalkens in Ausführung mit Induo - Verbundanker



Kreuzbalken



Induo-Verbundanker



Kreuzbalken mit eingelegtem Induo-Verbundanker

Im Zentrum des Kreuzbalkenquerschnittes entsteht durch das Zusammenfügen der Viertelsegmente eine rhombusförmige Aussparung. Die industrielle Fertigung der Kreuzbalken in Ausführung mit Induo - Verbundankern ist in mehrere Produktionsschritte gegliedert:

- Viertel- bzw. Halbstäbe werden zunächst mit einem leichten Übermaß auf die jeweils vorgegebene Länge des Fertigelementes zugeschnitten, gehobelt und mit der für Kreuzbalkenleimbinder typischen Innenöffnung durch Ausfräsung hergestellt.
- Die Viertel- bzw. Halbstäbe erhalten anschließend entsprechend der Zahnstellung des Ankerkörpers das Bohrbild an jeweils definierter Stelle, welches der endgültigen Lage des Verbundankers im fertigen Kreuzbalkenleimbinder entspricht. Die hierfür angewandten Bohrtechniken sind sowohl in der Holzverarbeitenden Industrie als auch in Unternehmen der Besenproduktion Stand der Technik.
- Die auf Fertiglänge vorproduzierten und mit Bohrbildern versehenen Viertel- bzw. Halbstäbe werden nach Einlegen des Induo - Verbundankers, gemäß den Vorschriften zur Herstellung, zu fertigen Kreuzbalkenleimbindern verleimt. Anschließend erfolgt ein maßgenauer Längenzuschnitt bzw. Abbund.

Der aus der Kreuzbalkenherstellung fertigungsbedingte innenliegende Hohlraum stellt für den Balken keinen Fehler in Form eines fehlenden Querschnittes dar, sondern bietet für das Induo - Verbundsystem eine Chance in diese rautenförmige Röhre passgenau den Ankerkörper ohne großen Aufwand einzulegen.

Darüber hinaus gab diese Röhre den Anstoß für die rückwärtige Stabinnenverschraubung, eine innovative Anschlußtechnik für Konstruktionshölzer, als eine Entwicklung der vorliegenden Arbeit (Kap. 6.3.3.1).

Mit der Verbundtechnik als sogenannte Innenvermagerung quer zur Stabachse und der deckungsgleichen Lage von Balken- und Ankerlängsachsen zur Kraftwirkungslinie kann der Induo - Verbundanker insbesondere Normalkräfte des Konstruktionsholzes aufnehmen und absetzen. Mit der Verschraubungstechnik über den Gußankerkörper sind hochleistungsfähige Verbindungsstrukturen im Holzbau ausführbar, die bisher dem Stahlbau vorbehalten sind.

Durch die verdeckte Innenlage ist im Brandfall der Ankerkörper vor einer direkten Beflammung geschützt. Der Kreuzbalken selbst weist wie Brettschichtholz gegenüber Vollholz ein günstiges Abbrandverhalten auf. Bei entsprechender Dimensionierung des Holzquerschnittes

ist die Einstufung von Bauteilen aus Kreuzbalken in Kombination mit Induo - Verbundanker in eine Feuerwiderstandsklasse möglich.

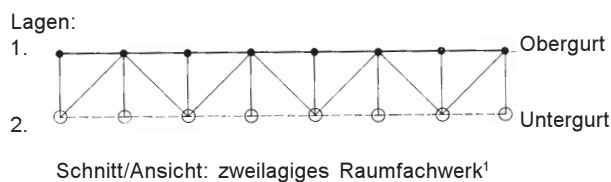
Kreuzbalken mit den an beiden Enden eingelegten Induo - Verbundankern bilden den Induo - Stab. Durch die beschriebene Anschlußtechnik ist er prädestiniert Grundelement für normalkraftbeanspruchte Systeme, insbesondere für räumliche Knotenstabtragwerke, zu sein. Maßhaltige und serielle Fertigung der Induo - Stäbe zeigen die Möglichkeit zum Erstellen eines Baukastenprinzips auf.

3 Allgemeine Grundlagen der räumlichen Knotenstabtragwerke

Die Entscheidung für ein bestimmtes Knotenstabtragwerk macht im konkreten Einzelfall immer eine genaue Untersuchung der Anforderungen an das Tragsystem erforderlich. Neben der ästhetischen Wirkung des Systems spielen wirtschaftliche, statische und geometrische Parameter die entscheidende Rolle.

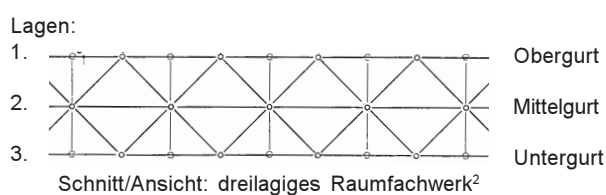
Schon bei der Auswahl der geometrischen Struktur mit dem Ziel der Optimierung ist die Tragwirkung der oft hochgradig statisch unbestimmten Systeme zu berücksichtigen. Die Knotenwinkel und Stablängen müssen zudem später mit hoher Präzision bestimmt und hergestellt werden. Bei kleinen bis sehr kleinen Serien ergeben sich hier hohe Einzelpreise.

Dank moderner EDV – Technik ist die Bewältigung auch komplexer räumlicher Strukturen beherrschbar geworden, jedoch aufwendig geblieben.



3.1 Geometrie

Stabtragwerke können, je nach der Anzahl der parallelen Ebenen, ein-, zwei- oder mehrlagig sein. Die meisten ebenen Knotenstabtragwerke sind zweilagig, besitzen also eine Obergurt- und eine Untergurtebene. Gekrümmte Knotenstabtragwerke, Tonnen und Kuppeln, hingegen sind bei gebräuchlichen Spannweiten meist einlagig.



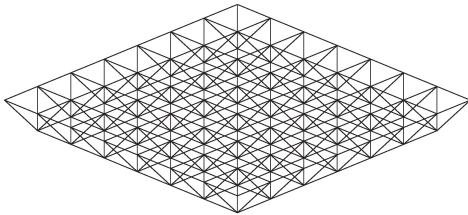
Im Bauwesen wird im allgemeinen die Krümmung als Kehrwert des Radius definiert. Stabtragwerke lassen sich nach dem Grad ihrer Krümmung unterscheiden¹:

3.1.1 Ebene Trägerflächen

Ebene Trägerflächen weisen keine Krümmung auf, da ihr Radius als unendlich angenommen wird.

$$\text{Ebene} = \frac{1}{\infty}; \quad \text{Radius } r = \infty$$

Für ebene Knotenstabtragwerke sind auch andere Bezeichnungen üblich wie z.B. Flächentragroste, Raumfachwerkplatten...

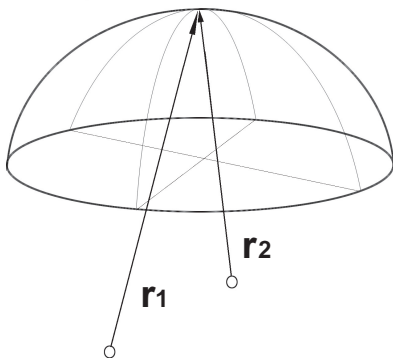


3.1.2 Gekrümmte Trägerflächen

Das Gauß'sche Krümmungsmaß einer Fläche ist definiert mit:

$$G = \frac{1}{r_1 \times r_2}$$

An einem Punkt der Fläche sind r_1 und r_2 die Krümmungsradien in zwei Schnittebenen, die in diesem Punkt senkrecht zueinander stehen. Je nach Art der Fläche kann G positiv, negativ oder null sein.



Einfach gekrümmte Flächen

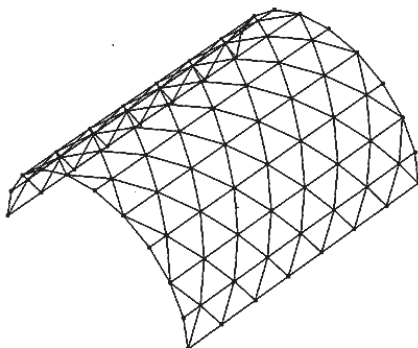
Gauß'sches Krümmungsmaß: 0

$$G = \frac{1}{r_1 \times \infty} = 0$$

$$r_1 = \text{positiv} \\ r_2 = \infty$$

Einfach gekrümmte Flächen sind abwickelbar (d. h. sie sind im Modell leicht aus Papier zu bilden).

- Beispiele:
- Zylinder (Kreiszyylinder, elliptischer Zylinder etc.)
 - Kegel (Kreiskegel, elliptischer Kegel etc.)



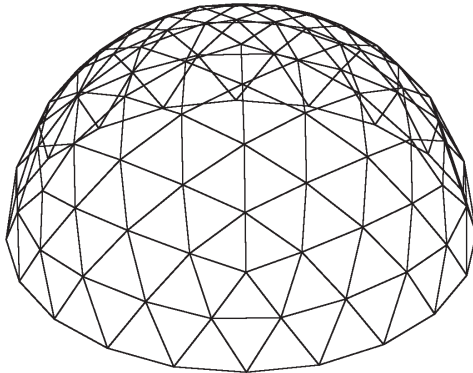
Doppelt gleichsinnig gekrümmte Flächen

Gauß'sches Krümmungsmaß: positiv

$$G = \frac{1}{r_1 \times r_2} = \textit{positiv}$$

$r_1 = \text{positiv}$

$r_2 = \text{positiv}$



andere Bezeichnungen: - kuppelförmig
- synklastisch

Beispiele: - Kugel
- Rotationsparaboloid
- Rotationsellipsoid

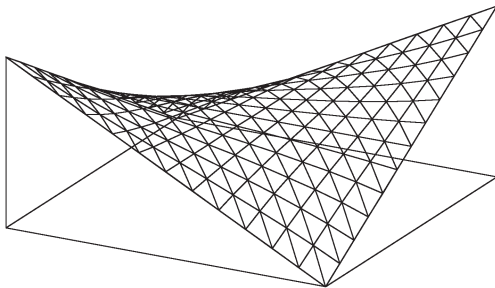
Doppelt gegensinnig gekrümmte Flächen

Gauß'sches Krümmungsmaß:

$$G = \frac{1}{r_1 \times r_2} = \textit{negativ}$$

$r_1 = \text{positiv}$

$r_2 = \text{negativ}$



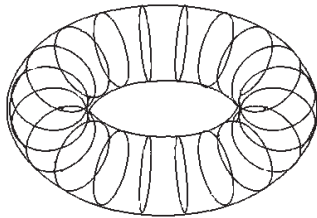
andere Bezeichnungen: - sattelförmig
- antiklastisch

Beispiele: - Hyperbolisches Paraboloid
- Konoid

Wechselndes Krümmungsmaß

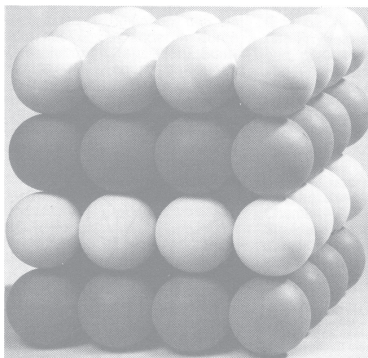
Die Fläche ist zum Teil kuppelförmig, zum Teil sattelförmig gekrümmt.

Beispiel: Torus



3.1.3 Freigeformte Trägerflächen

Die Fläche folgt keiner der drei oben genannten Prinzipien.



cubisch - dichteste Raumpackung³

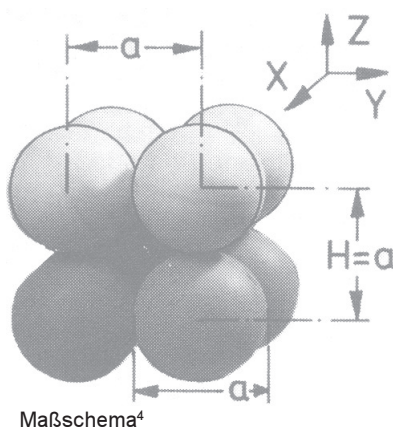
3.1.4 Theorie der Raumpackungen

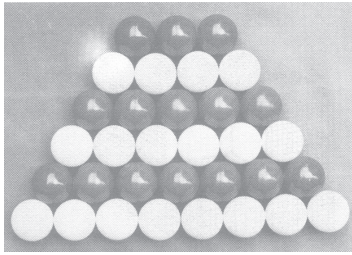
Cubisch - dichteste Raumpackungen

Die Geometrie der Raumfachwerke beruht auf der lückenlosen Raumpackung von Körpern². Zugrunde liegen hierbei Überlegungen zu den cubischen Raumpackungen.

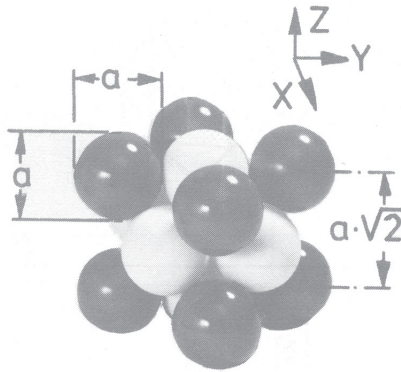
Die cubisch – dichteste Kugelpackung erhält man, wenn Kugeln in einer Ebene so angeordnet werden, daß jede Kugel in der Ebene vier benachbarte Kugeln berührt. Die Mittelpunkte dieser Kugeln bilden ein Quadrat.

Ordnet man nun mehrere parallele Ebenen von Kugeln, die in der Ebene dicht gepackt sind, übereinander an, so bilden jeweils acht Kugeln die Eckpunkte eines Cubus. In dem entstehenden Raumraster weisen die Kugelmittelpunkte benachbarter Kugeln überall den gleichen Abstand auf³.

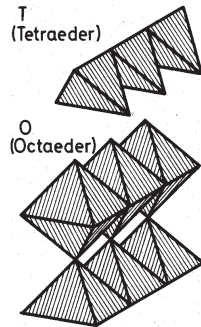




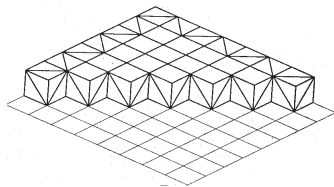
Prinzip der hexagonal-dichtesten Raumpackung⁵



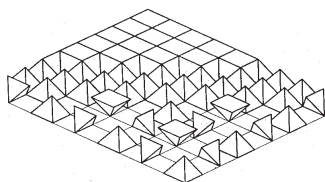
Maßschema⁶



Raumpackung aus Oktaedern und Hexaedern bei der hexagonal-dichtesten Raumpackung⁷



ebene Platte aus Cubuselementen⁸



ebene Platte aus Tetraedern und Halb-Oktaedern⁹

Hexagonal - dichteste Raumpackungen










Neben der "cubisch-dichtesten" gibt es auch die "hexagonal – dichteste" Kugelpackung. Dabei liegen die Kugeln zwar auf quadratischen Netzgrundriß, die obere Kugelebene ist jedoch zur untersten so verschoben, daß jede Kugel in der Lücke zwischen 4 anderen und nicht genau auf einer andern zu liegen kommt.⁴

Daher ist die Höhe der oberen Kugel über der Mitte der unteren nicht mehr gleich dem Kugeldurchmesser sondern $\frac{1}{2} a \sqrt{2}$ ⁵. Die Verbindungen zwischen den Kugelmittelpunkten umschließen abwechselnd einen halben Oktaeder und einen Tetraeder. Die halben Oktaeder und die Tetraeder ergeben zusammen eine lückenlose Raumpackung⁶.

Sieht man die Kanten dieser Körper als Stäbe, und die Ecken als Knoten, so lassen sich räumliche Fachwerke bilden, die halbe Oktaeder und Tetraeder umschließen. Durch diese Methode erhält man Packungen regelmäßiger Körper, d.h. Körper mit gleich langen Kanten und gleichen Winkeln zwischen parallelen Ebenen⁷.

Diese Raumpackungen erster Ordnung können zu abgeleiteten Raumpackungen weiterentwickelt werden, indem man mit Hilfe zusätzlicher Schnittebenen die Cubus-Elemente, Oktaeder und Tetraeder in bestimmter Ordnung schneidet und so Segmente erzeugt.

Abgeleitete Raumpackungen zweiter Ordnung haben sich als wichtig für den Bau von Raumfachwerken erwiesen. Sie bringen eine Reduzierung der Stab- und Knotenzahlen durch Ausdünnung der Netze⁸.

Form	Bezeichnung
	Tetraeder
	Hexaeder (Würfel)
	Oktaeder
	Pentagon- dodekaeder
	Ikosaeder
	Kuboktaeder
	Rhomben- dodekaeder
	Oktaedron truncum
	Rhomben- kuboktaeder

wichtige reguläre und halbreguläre Polyeder¹⁰

3.1.5 Die Grundkörper

Von den fünf platonischen Körpern sind Cubus, Oktaeder und Tetraeder besonders für Raumpackungen geeignet, während Pentagon-Dodekaeder und Ikosaeder nur mit speziellen "Füllkörpern" im Raum stapelbar sind⁹.

Als Grundelemente für den Aufbau räumlicher Fachwerkstrukturen bieten sich die fünf platonischen Körper an, die alle gleiche Seitenlängen besitzen.

Wichtig ist die Wahl eines statische stabilen Grundelementes. Hierzu sei zu den platonischen Körpern folgendes angemerkt:

1. Tetraeder (allgemein Vierfläche) sind statisch bestimmt.
2. Der Cubus ist im Gegensatz zum Tetraeder statisch nicht stabil. Er wird erst stabil, wenn in jede der 6 Seitenflächen eine Diagonale eingesetzt ist.
3. Das Oktaeder ist von Natur aus stabil.
4. Das Pentagon-Dodekaeder mit seinen 12 Fünfecken ist von Natur aus statisch nicht stabil. Es wird erst stabilisiert durch die Anordnung von je zwei Diagonalen in jedem Fünfeck, oder durch die Aufteilung der Fünfecke in 5 Dreiecke.
5. Auch das Ikosaeder ist – da ausschließlich aus Dreiecken geformt – statisch stabil.¹⁰

3.1.6 Regelmäßigkeit

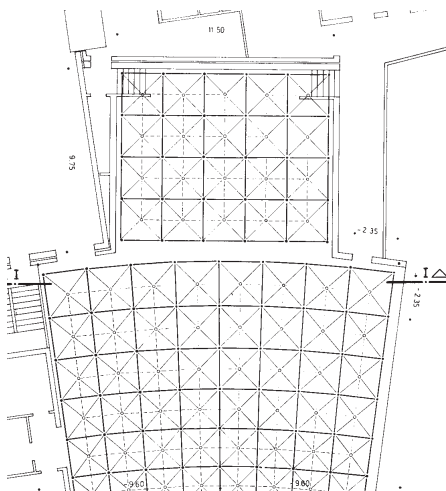
Bei mehrlagigen Systemen unterscheidet man regelmäßige, abgeleitete und unregelmäßige Raumfachwerke.

Regelmäßige Raumbachwerke setzen sich ausschließlich aus platonischen Körpern oder deren Abkömmlingen zusammen. Dabei sind die Stablängen gleich, oder auf maximal drei Größen beschränkt¹¹.

Abgeleitet sind solche Stabwerke, die aus regelmäßigen oder unregelmäßigen RFW durch Veränderung der Stablänge und Konstruktionshöhen unter Beibehaltung der grundsätzlichen Zuordnung der Stäbe und Knoten gewonnen werden¹². Dadurch entstehen relativ viele verschiedene Stablängen, die jedoch in bestimmter Form geordnet sind.

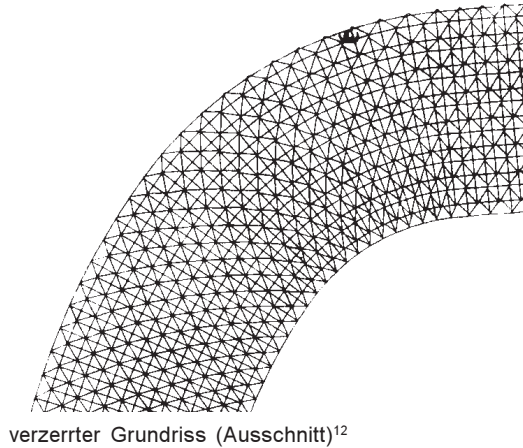
Unregelmäßige Raumfachwerke sind völlig individuell zusammengesetzt, wodurch eine Vielzahl unterschiedlicher Stablängen, Knotenwinkel und Flächen auftritt.

Die wirtschaftlichsten Strukturen sind regelmäßige und abgeleitete Raumfachwerke¹³.



Projektbeispiel mit regelmäßigem (oben) und abgeleitetem
Raumfachwerk (unten)¹¹

3.1.7 Gekrümmte und verzerrte Stabtragwerke



verzerrter Grundriss (Ausschnitt)¹²

Ebene räumliche Fachwerke lassen sich geometrisch relativ einfach zusammensetzen und kommen daher mit sehr wenigen unterschiedlichen Stab- und Knotentypen aus.

Gekrümmte Systeme sind nur bei einlagigen, einfach gekrümmten Tragstrukturen (Stabwerkstonnen) mit maximal drei Stablängen umsetzbar. Sobald eine zweite Netzebene hinzukommt, oder das Tragwerk doppelt gekrümmt ist, erhöht sich der Aufwand erheblich.

Eine ähnliche Problematik ergibt sich für verzerrte Grundrißformen, die von der "idealen" Grundrißgeometrie Rechteck (bei Kuppeln der Kreis) abweichen.

3.1.8 Optimierungsziele

Ziel für die Wahl eines Grundmoduls ist dessen statische Stabilität, da bei Raumfachwerken meist bewußt darauf verzichtet wird, die Eindeckungsplatten zur Aussteifung heranzuziehen. Die Struktur wird deshalb aus dreieckigen Elementen zusammengesetzt.

Optimierungsziel ist außerdem, eine möglichst geringe Anzahl unterschiedlicher Knoten- und Stabtypen zu erzeugen. Die günstigste Stablänge wird dabei durch die Knicklänge, sowie durch die Maximalgrößen der Eindeckplatten bestimmt. Eine einfache Geometrie erleichtert auch die Herstellung und Ausführung der Eindeckelemente.

Man wird daher für ebene Tragwerke auf Strukturen, die zumindest in Teilen aus den steifen Grundelementen Tetraeder oder Oktaeder bestehen, zurückgreifen. Bei gekrümmten Strukturen werden überwiegend dreiläufige Netze eingesetzt¹⁴.

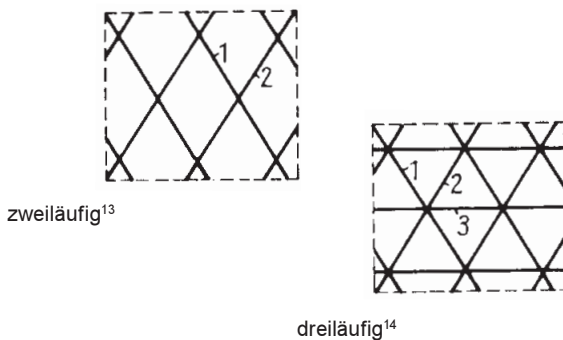
3.2 Tragverhalten von räumlichen Knotenstabtragwerken

Raumfachwerke sind in den meisten Fällen hochgradig statisch unbestimmte Systeme, die besonders für größere Spannweiten interessante und leistungsfähige Tragwerke bilden können.

Wichtig ist die Unterscheidung in einlagige und mehrlagige Strukturen. Einlagige Netze sind nur bei gekrümmten Trägerflächen möglich und dann auf Grund ihres geringen Materialverbrauches wirtschaftlich interessant. Allerdings sind sie aus Gründen der Gesamtstabilität nur für kleinere Tragwerke einsetzbar und verlangen eine gewisse Momentenübertragung an den Knotenpunkten.

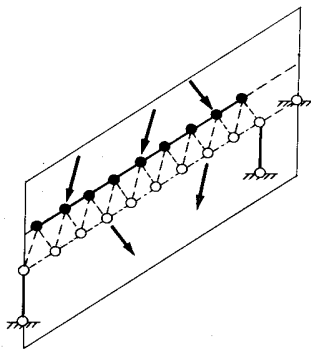
Mehrlagige Strukturen enthalten nur gelenkige Knoten und können große und größte Spannweiten überbrücken.

Einlagige und zweilagige Knotenstabtragwerke können je nach Anzahl der sich kreuzenden Stabscharen zwei-, drei- oder mehrläufig sein¹⁵.

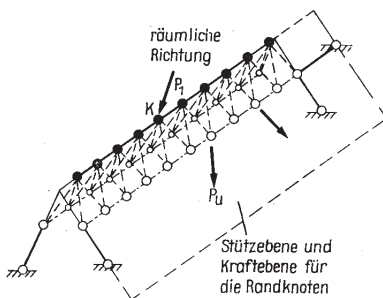


zweiläufig¹³

dreiläufig¹⁴



Ebenes Fachwerk¹⁵



v-förmiges Fachwerk¹⁶

3.2.1 Tragwirkung der Raumfachwerke

Ebene Fachwerke bestehen im allgemeinen aus gewählten Dreieckstrukturen.

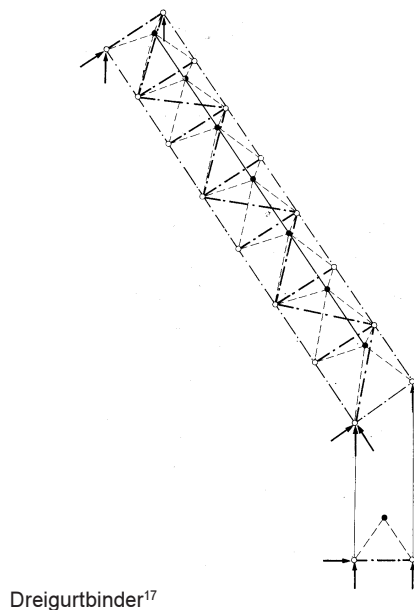
3 Stäbe an ihren Enden über Knoten verknüpft, bilden ein statisch unverschiebliches Dreieck, die Randkontur einer aufgelösten Scheibe.

Das systematische Addieren jeweils zwei weiterer Stäbe und einem Knoten führt in ihrer Reihung zur Bildung von ebenen Knoten-Stab-Fachwerken.

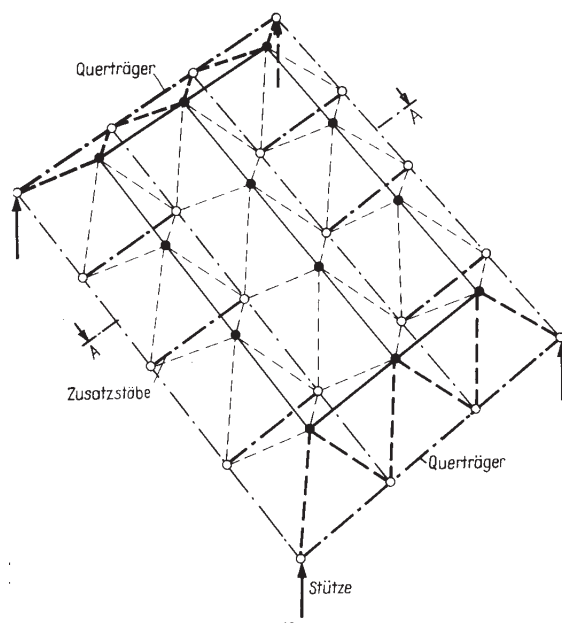
Im statischen System stellen die Knoten ideale Gelenkpunkte dar, die momentenfrei im Schnittpunkt der Stabachsen Normalkräfte aufnehmen und weiterleiten.

Ohne Momentenbeanspruchung verbleiben auch die einzelnen Stäbe unter der Voraussetzung, daß auf das Gesamtsystem einwirkenden äußeren Kräfte über die Gelenkpunkte eingeleitet und abgeführt werden.

Das ebene Knotenstabfachwerk kann auftretende Kräfte nur in seiner Ebene aufnehmen. Aus dieser Ebene abweichende Kräfte werden nicht vom Fachwerk aufgenommen und zu den Auflagern weitergeleitet.



Dreigurtbinder¹⁷



räumliches Flächentragwerk¹⁸

Fügt man z.B. an den gemeinsamen Obergurtknoten zwei Fachwerkträger v-förmig zusammen, so können auch aus beliebigen Raumrichtungen Kräfte an diesen Knotenpunkten aufgenommen werden. Die äußeren Kräfte erhalten Widerstand in den Obergurtknoten und über Kraftzerlegungen fließen sie als innere Kräfte, als Normalkräfte mit Druck oder Zug, in den beiden Fachwerkträgerebenen weiter zu den Auflagern. In dieser statischen Betrachtung bleibt für die Stabilität des v-förmigen Trägersystems die Forderung bestehen, daß äußere Kräfte an den Untergurtknoten nur in der jeweiligen Trägerebene abgeleitet werden.

Erhalten die Untergurtknoten untereinander eine Verknüpfung in Form eines weiteren Fachwerks, so sind auch diese Punkte in der Lage, aus beliebigen Richtungen Kräfte aufzunehmen.

Dieses statisch bestimmte und torsionssteife Gesamtsystem führt als Raumfachwerk die Bezeichnung "Dreigurtträger".

So wie in der Ebene das Dreieck durch systematische Ergänzung von Stäben und Knoten zum Fachwerk entwickelt wurde, so entwickelt sich räumlich die dreieckige Querschnittsstruktur des Dreigurtbinders durch Ergänzung jeweils zweier Fachwerke mit gemeinsamer Gurtlage zu einem räumlichen Flächentragwerk.

Jeder Stab eines räumlichen Stabfachwerks liegt in mehreren oder vielen sich schneidenden Ebenen, so daß jeder Stab zwei oder mehreren Fachwerken angehört.

Äußere Kräfte können aus beliebiger Richtung an jeden Knotenpunkt angreifen. Durch Kraftzerlegung werden sie als innere Kräfte in Richtung der anschließenden Stabachsen als Normalkraft (Druck- bzw. Zugkraft) momentenfrei zu den Auflagern transportiert¹⁶.

Das ebene, mehrlagige Raumfachwerk kann durch Verkürzung einer Stabebene gekrümmt werden, auf die beschriebene Tragwirkung des Einzelelementes hat dies keinen Einfluß. Zumindest einfach gekrümmte Strukturen lassen sich auf diese Art vergleichsweise einfach aus den ebenen Raumfachwerken ableiten.

3.2.2 Stabilität und Steifigkeit

Für die Stabilität räumlicher Fachwerkstrukturen im allgemein gilt das Föppl'sche Gesetz:

Bezeichnet man beim materiellen Bauwerk die Zahl der Knoten mit "k" (entsprechend den Ecken E der mathematischen Figur) und die Zahl der Stäbe mit "s" (entsprechend den Seiten S der mathematischen Figur), so gelten für Fachwerke (in denen die Flächen F nicht durch materielle Platten ausgefüllt sind) folgende Stabilitätsbedingungen:

1. Bei Fachwerken in der Ebene

$$2k - s = 3$$

2. Bei Fachwerken im Raum

$$3k - s = 6$$

Bei räumlichen Fachwerken gewinnt man somit ein Urteil durch Vergleich der tatsächlichen Stabzahl mit der Zahl der Knoten.

Statisch labil (und ungeeignet) sind Fachwerke, bei denen die Zahl der Stäbe "s" im Verhältnis zur Zahl der Knoten "k" zu klein ist, nämlich

$$s < 3k - 6.$$

Statisch bestimmt sind Fachwerke, bei denen die Zahl der Stäbe "s" genau im richtigen Verhältnis zur Zahl der Knoten "k" ist nach der Formel

$$s = 3k - 6.$$

Dieser Zustand heißt auch "statisch stabil".

Statische unbestimmt sind Fachwerke mit "statische überzähligen Stäben", d.h. wenn die Beziehung besteht:

$$s > 3k - 6.^{17}$$

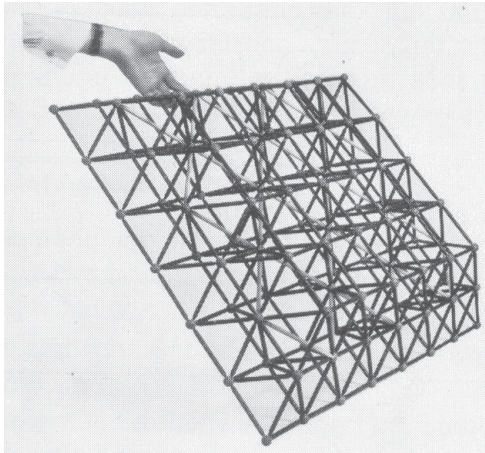
In der praktischen Anwendung sind jedoch einige Ergänzungen zum Föppl'schen Gesetz erforderlich:

1. Das Föppl'sche Grundgesetz gilt uneingeschränkt nur für die platonischen Körper.
2. Für RFW-Konstruktionen, die eine große Anzahl von Knoten und Stäben aufweisen, kann das Föppl'sche Grundgesetz allein nicht mit Bezug auf die Gesamtzahl aller Knoten und Stäbe zur Beurteilung der Stabilität angewandt werden.

Vielmehr gelten für solche RFW die nachstehenden Kriterien:

3. Statisch stabil im ganzen und in allen Teilen sind nur jene RFW, die ausschließlich aus Elementarkörpern zusammengesetzt sind, für die im einzelnen das Föppl'sche Grundgesetz gilt.
4. statische bedingt stabil sind RFW, die teilweise aus stabilen und teilweise aus nichtstabilen Elementarkörpern zusammengesetzt sind.
5. RFW aus nicht-stabilen Elementarkörpern bedürfen einer Zusatzstabilisierung.¹⁸

Stabilität

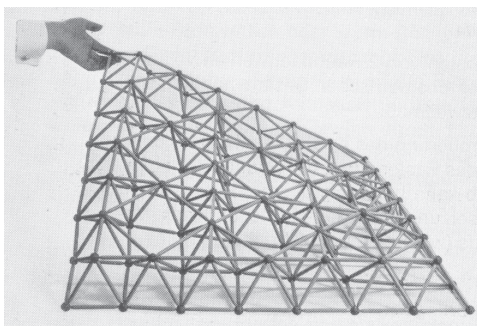


stabiles Raumfachwerk¹⁹, torsionssteif

Als stabil bzw. torsionssteif werden solche Raumfachwerke bezeichnet, die unter dem Einfluß äußerer Kräfte nur elastische Formänderungen, jedoch keine bleibenden Verformungen erfahren.

Labil bzw. torsionsweich werden Raumfachwerke bezeichnet, die schon unter dem Einfluß relativ geringer Kräfte durch Änderung der Winkel zwischen den Stäben an den Knoten ihre Form ändern. Man unterscheidet Labilität in allen Raum-Achsen von der Labilität in bestimmte Richtungen. Diese Platten heißen drillweich.

RFW können auch von außen, z.B. durch eine besondere Form der Abstützung stabilisiert werden. Dann spricht man von Fremd-Stabilisierung¹⁹.



Labiles Raumfachwerk²⁰, torsionsweich

Nicht eigenstabile Systeme benötigen bei der Montage besondere Vorkehrungen, reagieren aber tolerant auf ungleiche Auflagersetzungen, ein Effekt, der auch bei drillweichen Platten zu beobachten ist. Bei stabilen Fachwerktypen können solche Setzungen zu unangenehmen Spannungsspitzen führen und müssen daher in der Berechnung der Stützen und Fundamente berücksichtigt werden²⁰.

Entscheidend für die Stabilität ist die Zusammensetzung des Tragwerkes, also die Wahl der Grundkörper. Werden ausschließlich stabile Grundkörper verwandt, so ist auch das Raumfachwerk statisch stabil, bei teilweise nicht stabilen Elementen ist das Tragwerk bedingt stabil, und bei der Verwendung nur nicht-stabiler Körper wird eine Zusatzstabilisierung erforderlich²¹.

3.2.3 Umlenkungseffekte

Bei den meisten Knoten-Stab-Tragwerken können einzelne Stäbe entfernt werden, ohne die Tragkonstruktion als ganzes zu zerstören. Dies liegt in dem gezielten Zusammenwirken sehr vieler Bauelemente begründet, was kennzeichnend für die Raumfachwerke ist; an einem Knoten treffen meist mehr als die zur Stabilität des Punktes erforderlichen drei Stäbe zusammen²². Z.B. Im Brandfall macht sich diese Toleranz in Form von Lastumlagerungen positiv bemerkbar.

Fußnoten zu Kap. 3

- ¹ Krauss, Seminarreader S. 7
- ² Mengerinhausen, 1983, S. 72
- ³ Mengerinhausen, 1983, S. 68
- ⁴ Mengerinhausen, 1983, S. 70 ff
- ⁵⁻⁹ Mengerinhausen, 1983, S. 73
- ¹⁰ Mengerinhausen, 1975, S. 28
- ¹¹⁻¹³ Mengerinhausen, 1975, S. 25
- ¹⁴ Büttner / Hampe, 1985, S. 247
- ¹⁵ Rühle, Bd. 2, 1970, S. 63
- ¹⁶ Büttner / Stenker, 1970, S. 37 ff
- ¹⁷ nach Mengerinhausen, 1975, S. 29
- ¹⁸ Mengerinhausen, 1975, S. 121
- ¹⁹ Mengerinhausen, 1975, S. 120
- ^{20, 21} Mengerinhausen, 1975, S. 121
- ²² Mengerinhausen, 1975, S. 120

Abbildungen zu Kap. 3

- ¹ Mengerinhausen, 1975, S. 48
- ² Mengerinhausen, 1975, S. 75
- ^{3, 4} Mengerinhausen, 1983, S. 68
- ^{5, 6} Mengerinhausen, 1983, S. 70
- ⁷ Mengerinhausen, 1983, S. 71
- ^{8, 9} Mengerinhausen, 1983, S. 72
- ¹⁰ Rühle, Bd. 2, 1970, S. 65
- ¹¹ Mengerinhausen, 1975, S. 62
- ¹² Mengerinhausen, 1975, S. 127
- ^{13, 14} Büttner / Hampe, 1985, S. 247
- ^{15, 16} Büttner / Stenker, 1970, S. 37
- ¹⁷ Büttner / Stenker, 1970, S. 38
- ¹⁸ Büttner / Stenker, 1970, S. 37
- ^{19, 20} Mengerinhausen, 1975, S. 120

4 Analyse und Wertung ebener Knotenstabtragwerke



Ein frühes Raumfachwerk: der „Eiffel-Turm“¹

Ebene Knotenstabtragwerke bzw. Raumfachwerke sind leistungsfähige Tragwerke zur stützenfreien Überbrückung großer Räume.

Interessant ist ihre Vielseitigkeit, da trotz der elementierten Grundstruktur aus Knoten und Stäben eine Vielzahl unterschiedlicher, individuell auf den Einzelfall abstimmbarer Konstruktionen möglich ist.¹

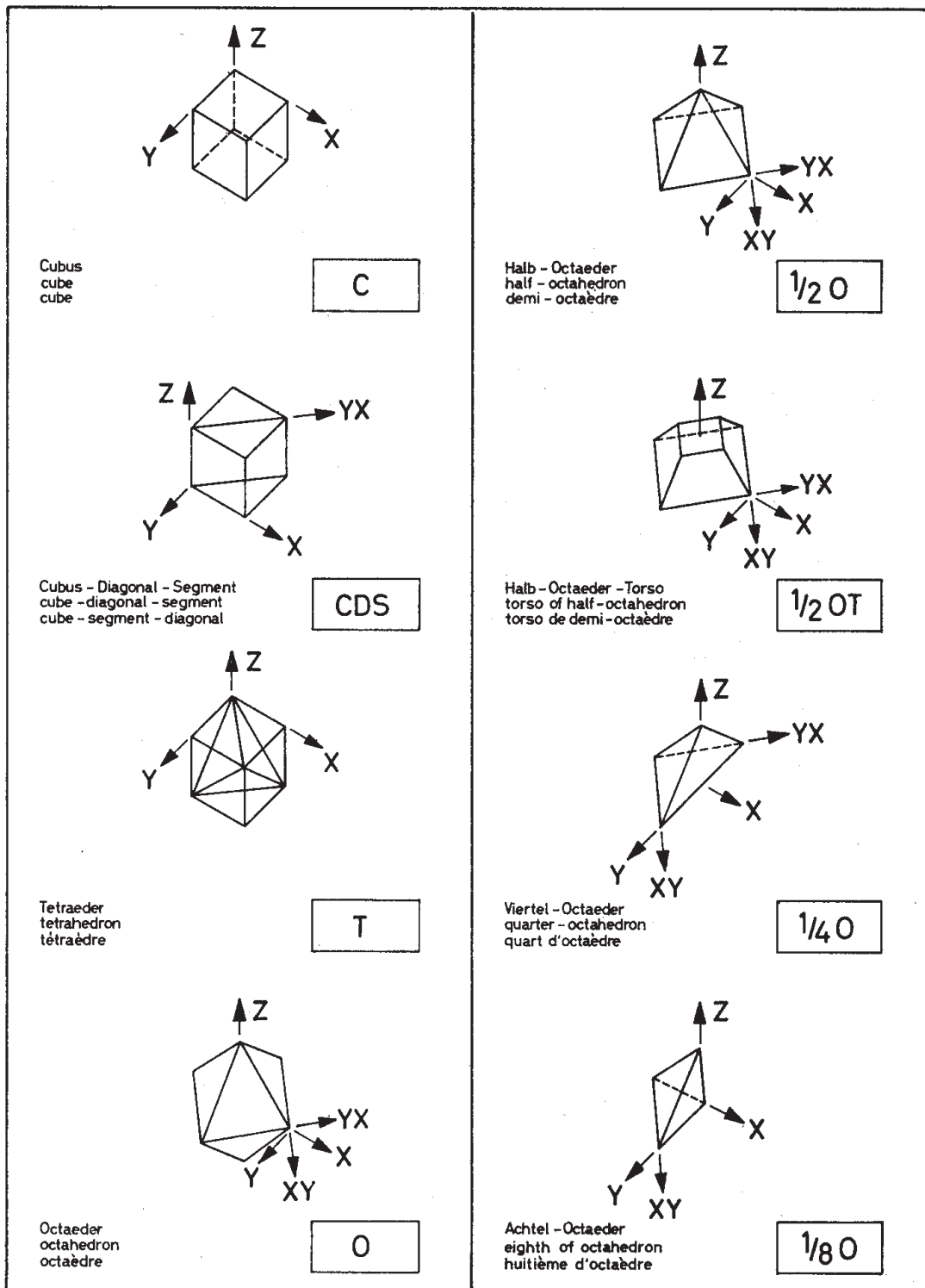
Historisch gesehen begann die Entwicklung mit den ersten Eisenkonstruktionen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, die durch A. Föppl u. a. recht bald erforscht wurden. Ein Höhepunkt in der frühen Entwicklungsphase der Raumfachwerke war der Pariser Eiffelturm 1889.

Die folgenden Jahrzehnte brachten eine weitere Entwicklung der Theorien und praktische Umsetzung, woraus nach dem zweiten Weltkrieg eine große Anzahl unterschiedlicher Konstruktionen entstand und das Raumfachwerk als sinnvolle Ergänzung zu den Massivplatten etablierte.

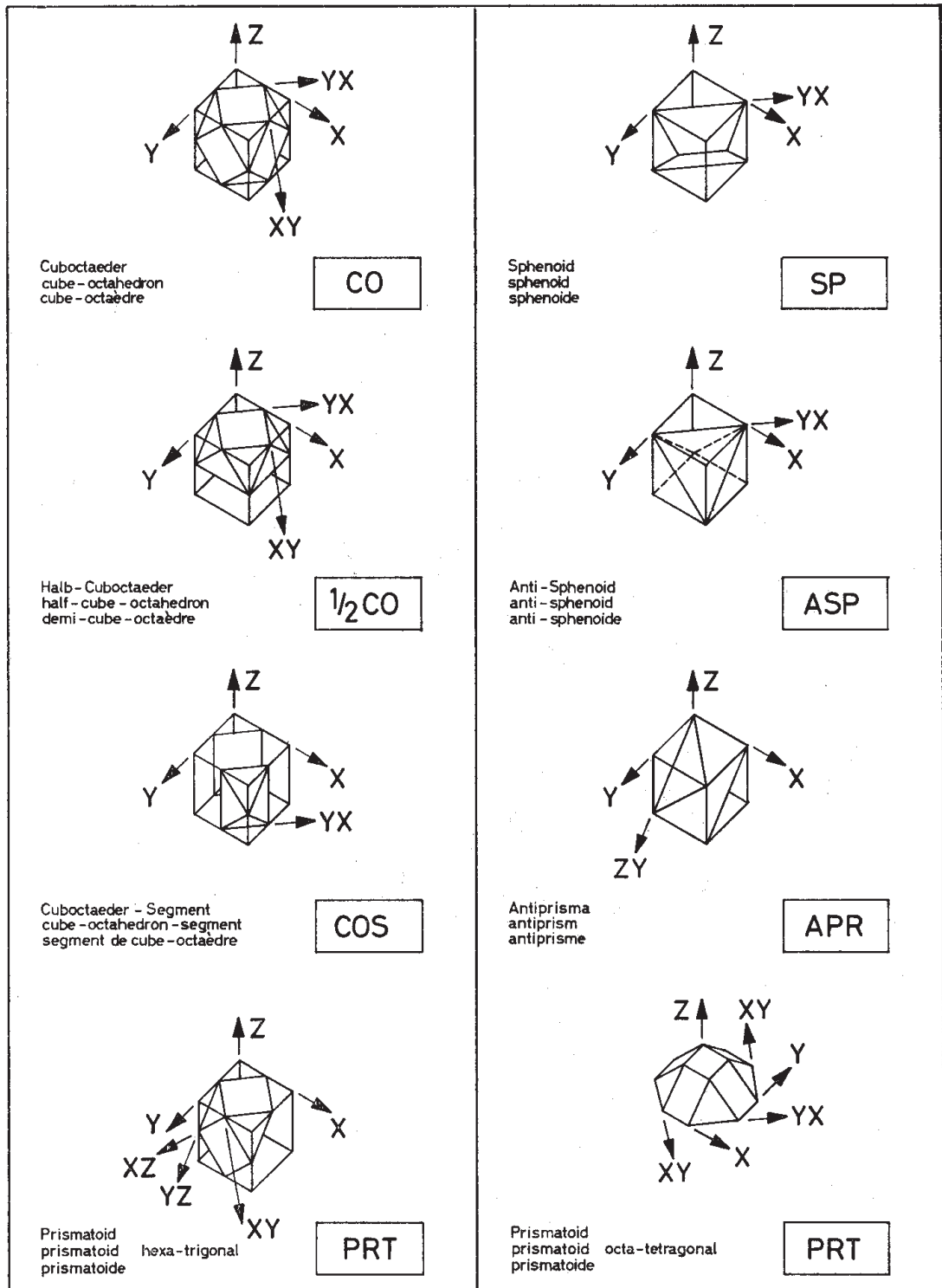
4.1 Klassifizierung von ebenen Knotenstabtragwerken

Die Auswahl der günstigsten Tragwerksform ist bei ebenen Knotenstabtragwerken bzw. Raumfachwerken in erster Linie von statischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig, da die geometrische Struktur relativ einfach zu erzeugen und Fertigungstechnisch umzusetzen ist.

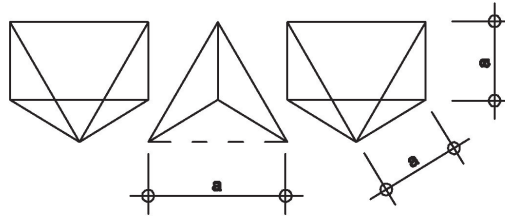
Die Bauformen der Knotenstabtragwerke werden durch Angabe ihrer Grundkörper gekennzeichnet, aus denen sie zusammengesetzt sind. Die stereometrischen Grundkörper werden durch ihre mathematischen Namen und abgekürzt durch Kennbuchstaben bezeichnet.²



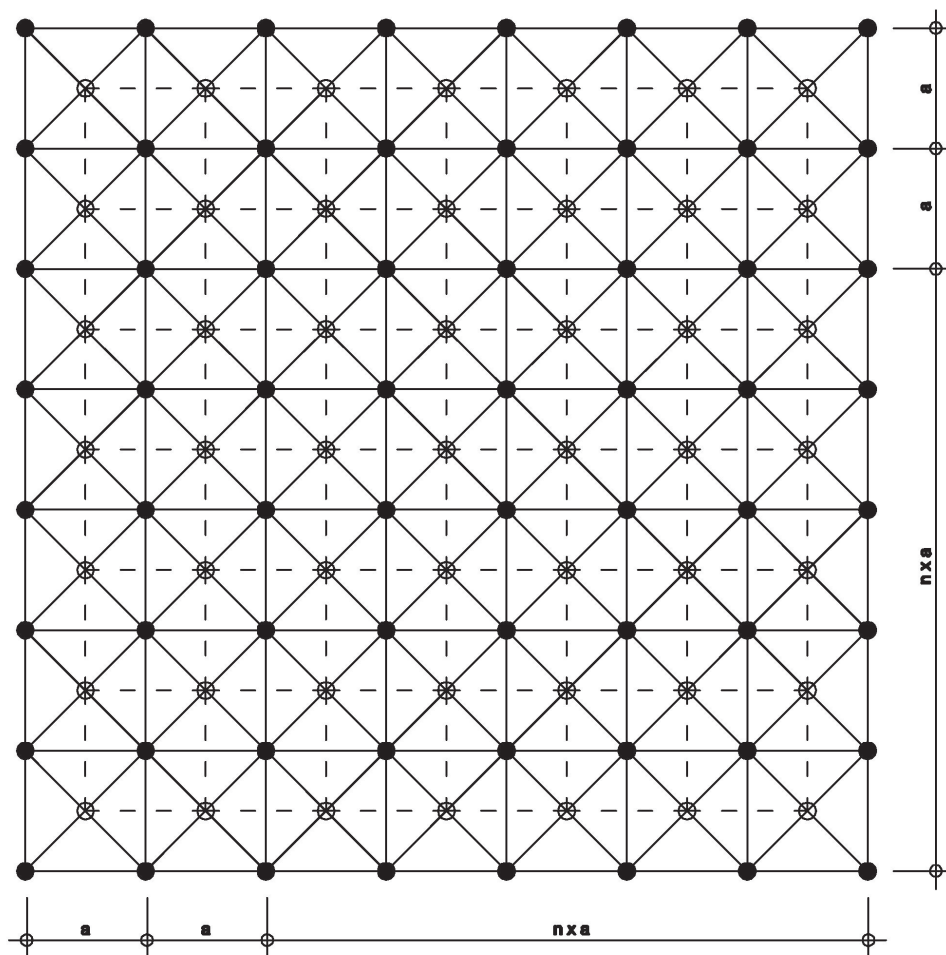
Die Grundkörper und ihre Bezeichnung²



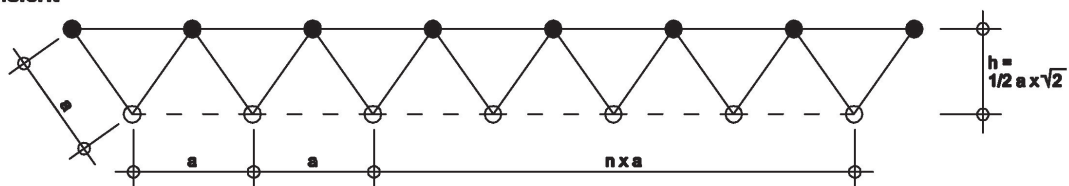
RSW 1



Aufsicht



Ansicht



4.1.1 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 1

Raumbausteine:

$\frac{1}{2} O + T$

Halboktaeder und Tetraeder

Raster: Ober- und Untergurte liegen auf quadratischen Rasterfeldern mit der Rastereinheit $a = 1$. Um eine halbe Rastereinheit sind die beiden Rasterfelder jeweils in x- und y-Richtung verschoben.

Gurtlage: Ober- und Untergurte liegen parallel zum Rand.

Bauhöhe: $h = \frac{1}{2} a \sqrt{2}$ bzw. $h \approx 0,71 a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Zwei Achsen, in x- und y-Richtung

⇒ zweiachsiges bzw. zweiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Gesamtkonstruktion ist nur bedingt stabil
Der Tetraeder ist in sich stabil, der Halboktaeder ohne Diagonale in seiner Quadratfläche jedoch nicht stabil

Anzahl der Regelstablängen: 1

Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 1 mit 8 Stabanschlüssen

Wirtschaftlichkeit: Die Kombination eines einzigen Regelstabtyps mit entsprechendem Regelknoten hat Vorteile für die Serienfertigung und Montage.

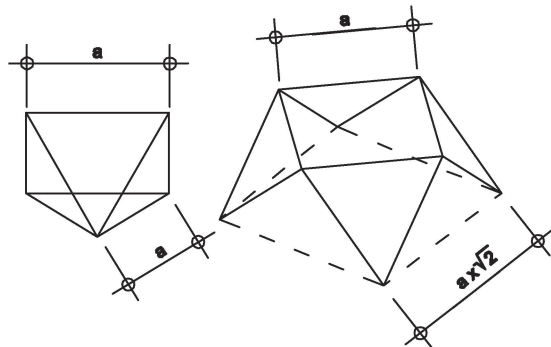
Eingeschränkt ist die Wirtschaftlichkeit durch eine relativ kleine Bauhöhe.

Die bedingte Stabilität erfordert besondere Maßnahmen im Randbereich z.B. allseitige Randlagerung.

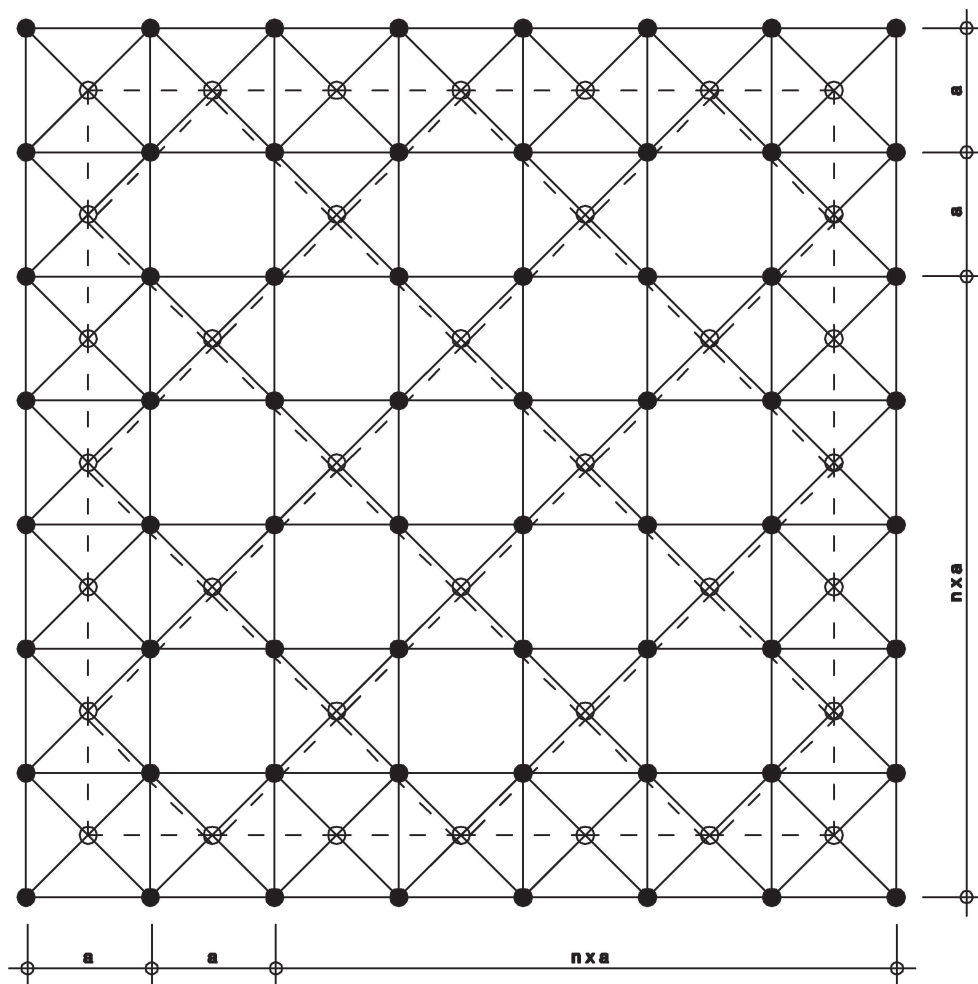
Die Anzahl der Bauelemente ist relativ mittelhoch, ergibt jedoch eine günstige Stablastverteilung bei kontinuierlicher Randauflagerung und bedeutet eine Sicherheitsreserve beim Ausfall einzelner Stäbe durch ein günstiges Lastumlagerungsverhalten.

Anwendung: Die geometrisch bedingte richtungsneutrale Untersicht in Kombination mit den einheitlichen Konstruktionselementen ergibt eine ansprechende architektonische Wirkung.

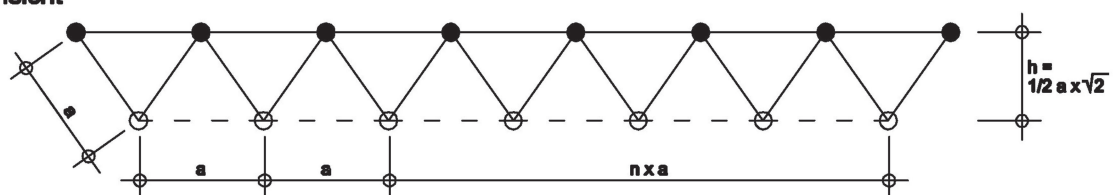
RSW 2



Aufsicht



Ansicht



4.1.2 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 2

Raumbausteine:

$\frac{1}{2} O + \frac{1}{2} CO$

Halboktaeder und Halbcuboktaeder

Raster: Im Ober- und Untergurt zwei verschieden große Quadratraster, relativ zueinander um 45° verdreht.

Gurtlage: Obergurt ist randparallel, der Untergurt dazu um 45° gedreht.

Bauhöhe: $h = \frac{1}{2} a \sqrt{2}$ bzw. $h \approx 0,71 a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Zwei Achsen, in x- und y- Richtung der Obergurtebene
 \Rightarrow zweiachsiges bzw. zweiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Beide Elementarkörper sind für sich alleine nicht stabil. Gesamtkonstruktion ist nur bedingt stabil. Zusätzliche Diagonalen in den Quadratflächen der Elementarkörper oder entsprechende Auflagerbedingungen im Randbereich erzeugen Steifigkeit.

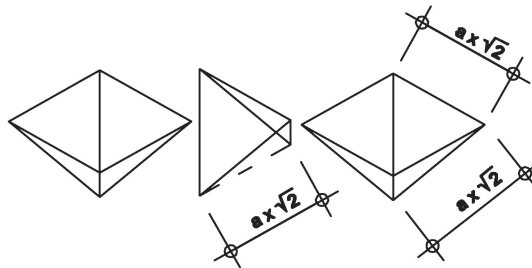
Anzahl der Regelstablängen: 2

Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 2 Knoten mit je 6 und 8 Stabanschlüssen

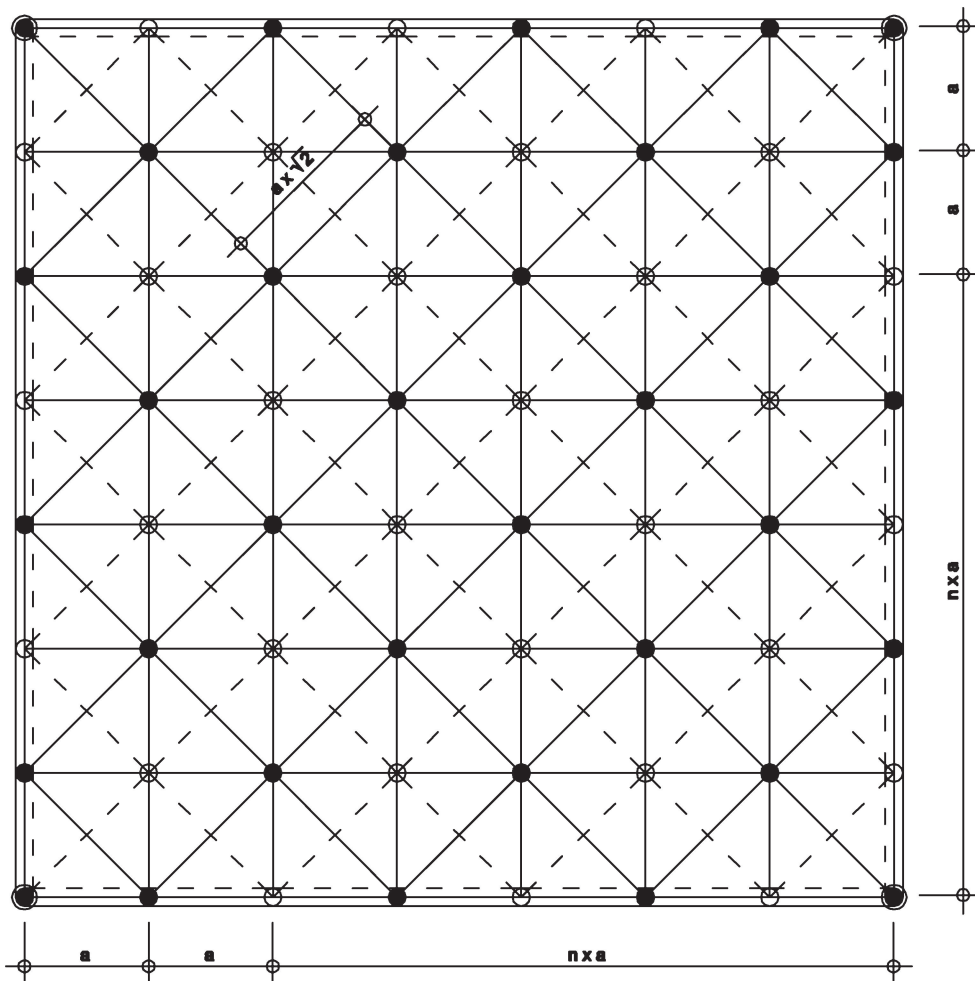
Wirtschaftlichkeit: Die reduzierte Anzahl der Bauelemente ergibt eine günstige Wirtschaftlichkeit, die jedoch durch die relativ geringe Bauhöhe eingeschränkt bleibt. Die Stablastverteilung ist nicht ausgeglichen und schränkt die Traglastreserven für die Lastumlagerung beim Ausfall einzelner Stäbe ein.

Anwendung: Die unterschiedlichen Stablängen im Ober- und Untergurt in Verbindung mit der 45° - Verdrehung zueinander ergibt eine spannungsvolle Untersicht. Optisch transparente Großzügigkeit wird durch die relativ große Anzahl von Diagonalen freigehaltenen Flächen erzeugt und unterstützt die Kombination von Tragwerk mit transparenter bzw. transluzenter Dachausbildung.

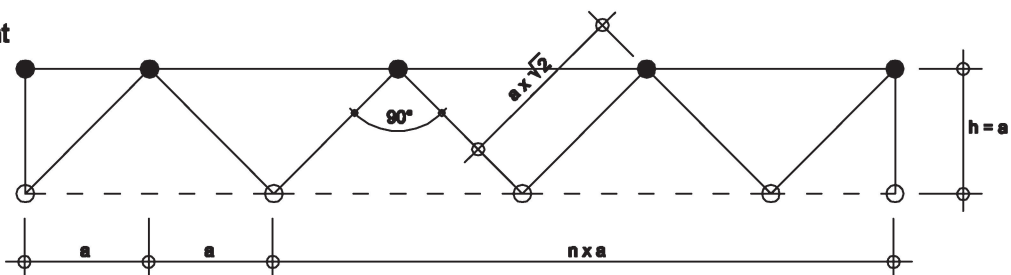
RSW 3



Aufsicht



Ansicht



4.1.3 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 3

Raumbausteine:

$\frac{1}{2} O + T$

Halboktaeder und Tetraeder

Raster: Ober- und Untergurte liegen auf quadratischen Rasterfeldern mit der Rastereinheit $a(\text{Feld}) = a(\text{Rand})\sqrt{2}$ und ist um 45° zum Rand gedreht. Um eine halbe Rastereinheit $a(\text{Feld})$ sind die beiden Raster gegeneinander verschoben.

Gurtlage: Ober- und Untergurte liegen im Winkel 45° zum Rand.

Bauhöhe: $h = a(\text{Rand})$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Zwei Achsen entsprechend zur Ober- und Untergurtlage
 \Rightarrow zweiachsiges bzw. zweiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Gesamtkonstruktion ist nur bedingt stabil
Der Tetraeder ist in sich stabil, der Halboktaeder ohne Diagonale in seiner Quadratfläche jedoch nicht stabil

Anzahl der Regelstablängen: 2

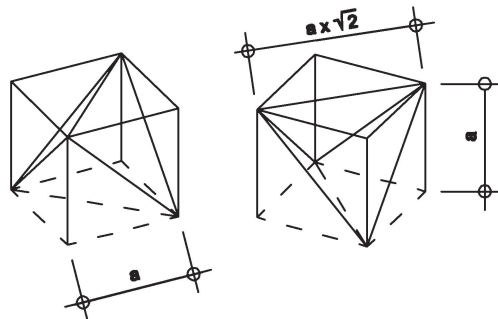
Anzahl der Regelknoten (im Feldebereich): 1 mit 8 Stabanschlüssen

Wirtschaftlichkeit: Die große Bauhöhe und die relativ geringe Anzahl der Einzelelemente ergeben eine günstige Wirtschaftlichkeit.

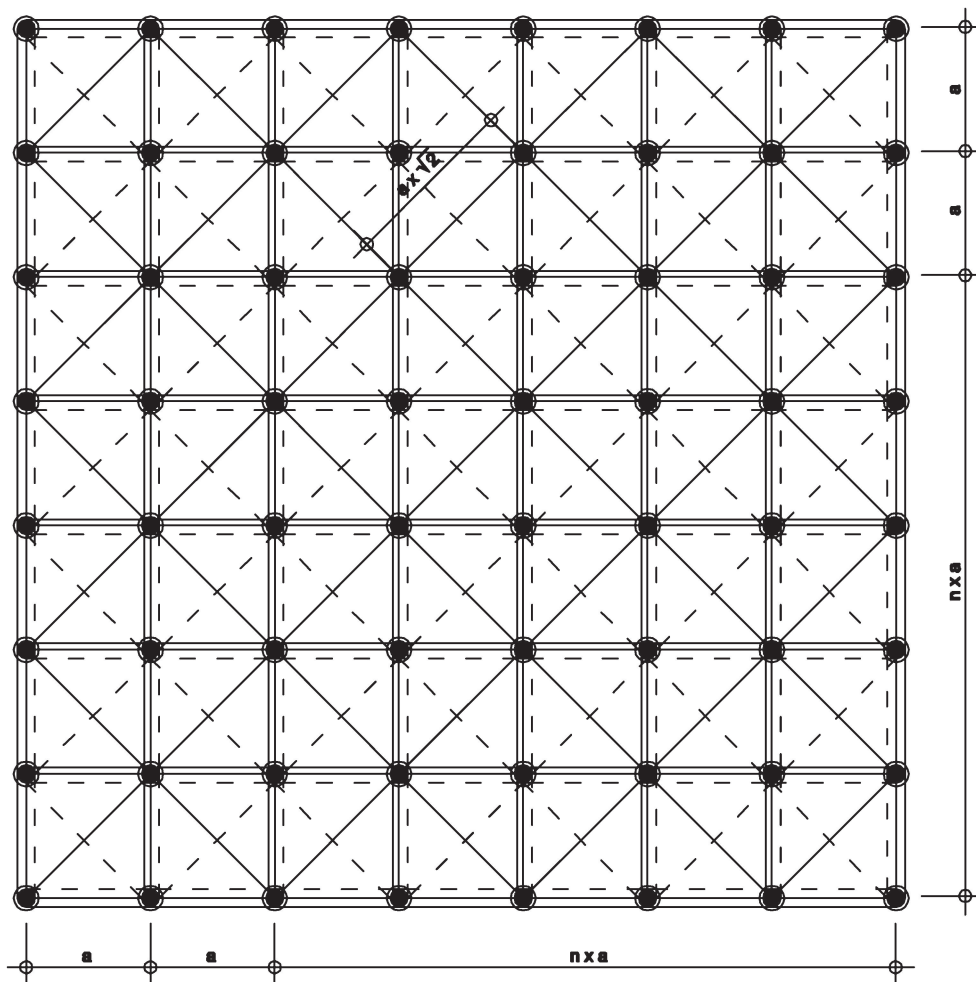
Die Reduzierung der Einzelelemente führt aber zu einem weniger günstigen Lastumlagerungsverhalten und damit zu eingeschränkter Sicherheitsreserve.

Anwendung: Das Tragwerk kommt zum Einsatz bei großen Spannweiten, bei eckgestützter Auflagersituation und bei Durchlauftragrosten mit wenigen Innenstützen.

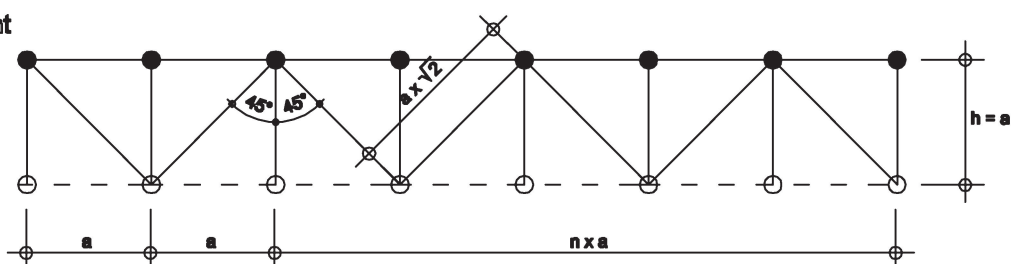
RSW 4



Aufsicht



Ansicht



4.1.4 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 4

Raumbausteine:

C (D max)

Cubus mit Diagonalenmaximum

Raster: Rasterlinien sind alle randparallel. Die Quadratflächen in den Obergurt-, Untergurt- und Diagonalebene sind gleich groß.

Gurtlage: Ober- und Untergurte liegen senkrecht übereinander randparallel auf den Rasterlinien incl. der Diagonalen. Im 45°-Winkel zu den Rändern sind in der Obergurt- und Untergurtebene zusätzliche Gurte eingefügt.

Bauhöhe: $h = a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Zwei Achsen, in x- und y- Richtung und zwei Achsen in 45° und 135°-Richtung.
⇒ vierachsiges bzw. vierläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Der Cubus, als Elementarkörper in allen seinen Flächen mit Diagonalen versehen, ist völlig steif. Dadurch ist auch die Gesamtstruktur völlig steif.

Anzahl der Regelstablängen: 2

Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 2 Knoten mit je 9 und 13 Stabanschlüssen

Wirtschaftlichkeit: Insgesamt sind die Stabkräfte klein und ausgeglichen verteilt bedingt durch die große Bauhöhe und die große Anzahl der statisch wirksamen Achsen.

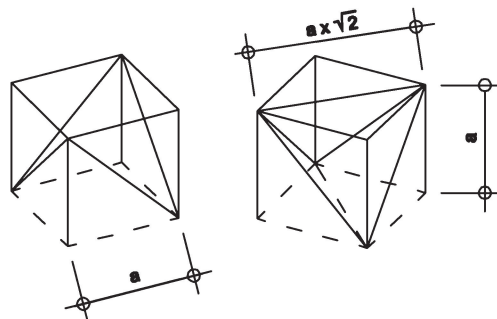
Die günstige Stablastverteilung hält hohe Sicherheitsreserven beim Ausfall einzelner Stäbe vor.

Die hohe Steifigkeit des Gesamtsystems ist empfindlich gegenüber Einzelsetzungen der Auflager und erfordert diesbezüglich besondere Konstruktionsmaßnahmen im Detail.

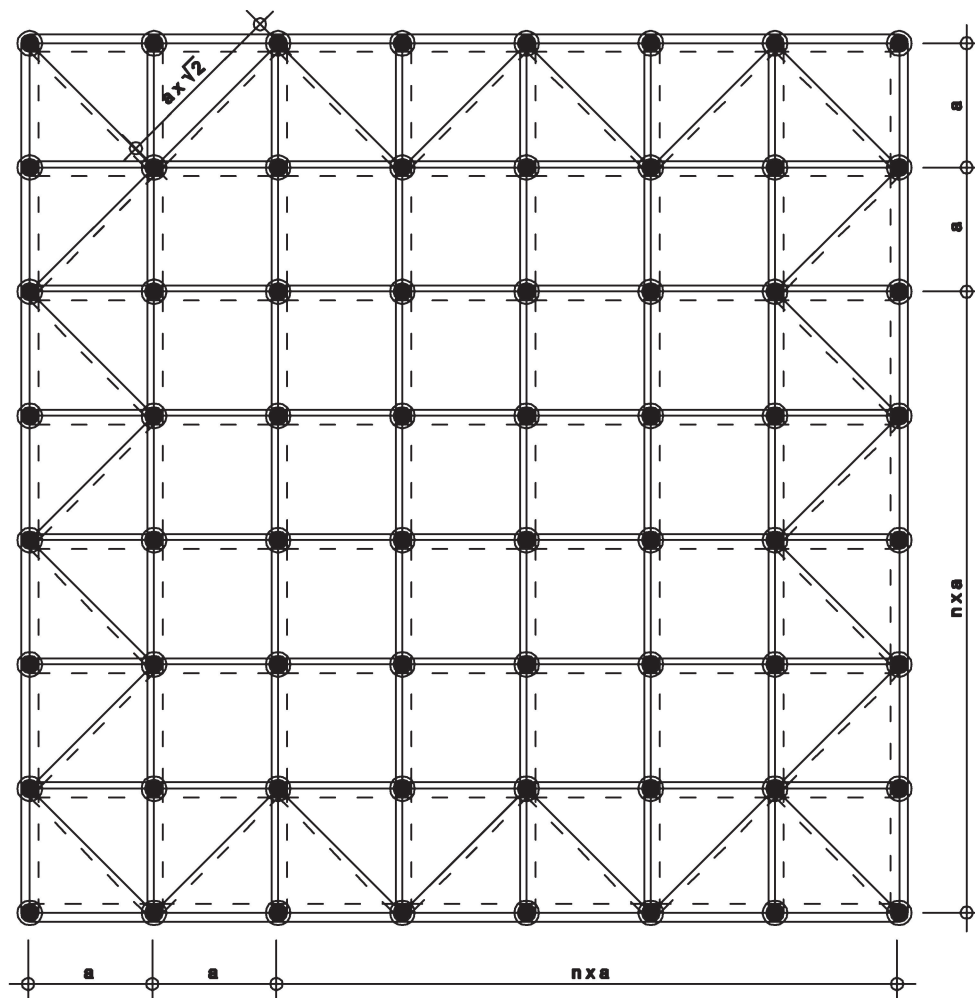
Die große Anzahl der Bauelemente hat eine komplexe Knotengeometrie und einen hohen Montageaufwand zur Folge.

Anwendung: Bei hohen Anforderungen an die Sicherheitsreserven der Tragkonstruktion fällt die Wahl auf dieses Tragwerkskonzept.

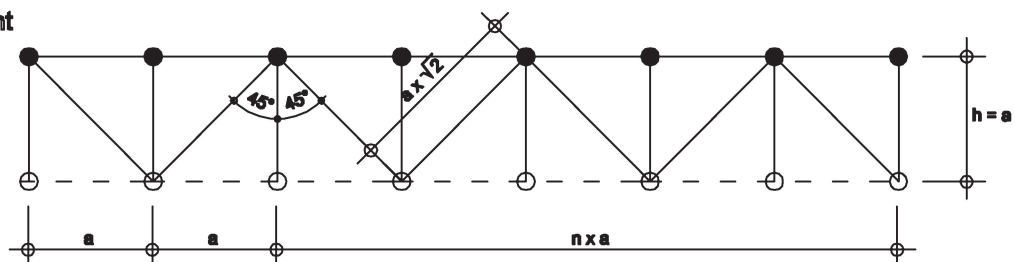
RSW 5



Aufsicht



Ansicht



4.1.5 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 5

Raumbausteine:

C (D min)

Cubus mit Diagonalenminimum

Raster: Rasterlinien in drei aufeinander senkrechten Ebenen sind alle randparallel. Die Quadratflächen in den Obergurt-, Untergurt- und Diagonalebene sind gleich groß.

Gurtlage: Ober- und Untergurte liegen senkrecht übereinander randparallel auf den Rasterlinien incl. der Diagonalen. Die Randquadrate in der Ober- und Untergurtebene sind mit je einer Diagonalen versehen.

Bauhöhe: $h = a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Zwei Achsen, in x- und y- Richtung

⇒ zweiachsiges bzw. zweiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Der Cubus, als Elementarkörper in all seine Flächen mit Diagonalen versehen, ist völlig steif. Durch Aneinanderreihung dieser Cuben im äußeren Randbereich ist das Gesamtrost steif trotz der Einsparung der Diagonalen in der Ober- und Untergurtebene.

Anzahl der Regelstablängen: 2

Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 2 Knoten mit je 5 und 9 Stabanschlüssen

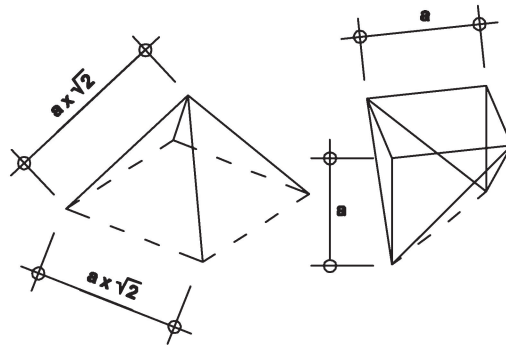
Wirtschaftlichkeit: Dieser Regeltyp stellt die Spar-RFW-Platte zu Typ Nr. 4 dar. Die große Bauhöhe h bewirkt wiederum relativ kleine Stabkräfte während sich durch die verringerte Zahl der Bauelemente die maximalen Stabkräfte erhöhen.

Die Stablastverteilung ist nicht ausgeglichen und reduziert die Traglastreserven für die Lastumlagerung beim Ausfall einzelner Stäbe.

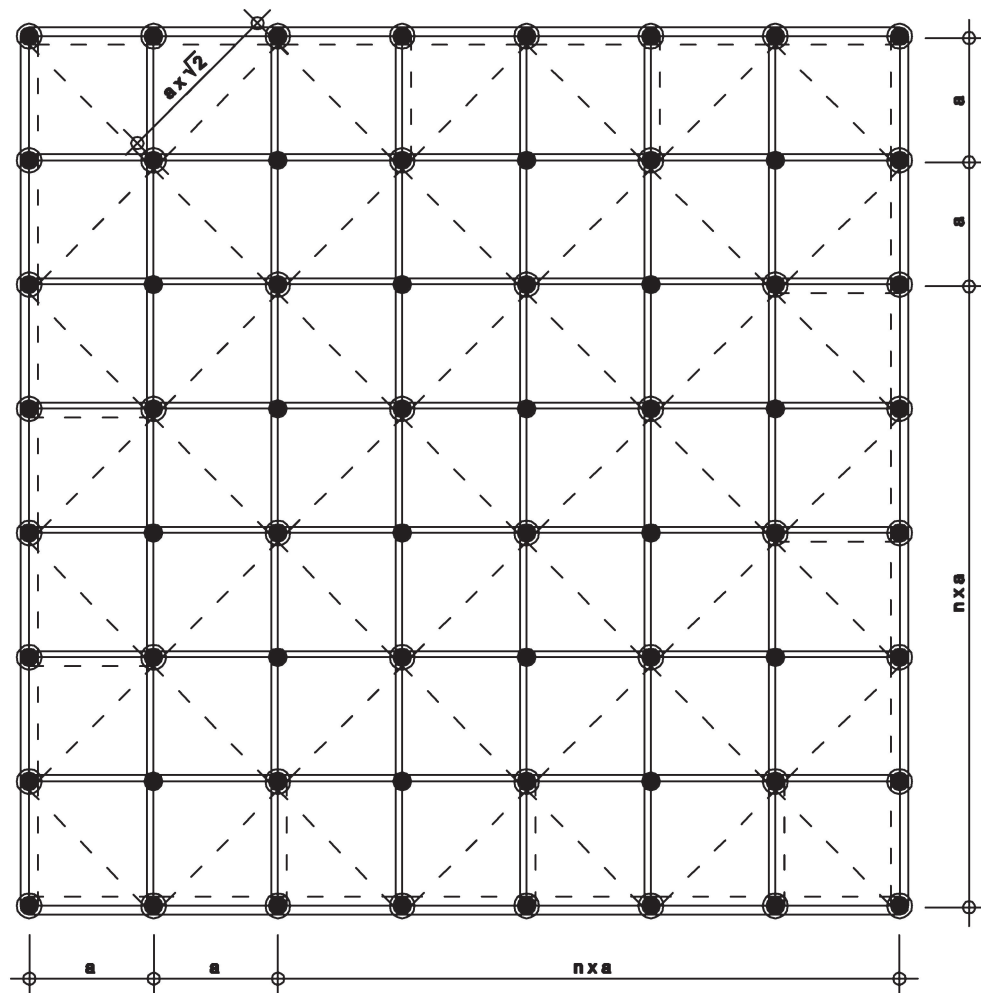
Die eingeschränkte Steifigkeit des Gesamtsystems ermöglicht geringe Einzelsetzungen der Auflager mit normalem Konstruktionsaufwand der Rand- und Auflagerausbildung.

Anwendung: Als Spar-RFW-Platte zu Typ Nr. 4 findet diese Struktur verbreitete Anwendung im Bereich orthogonaler Grundrisse mit der gestalterischen Forderung, die orthogonale Linieneinführung mittels der klar ablesbaren ebenen Fachwerkträger zu unterstreichen.

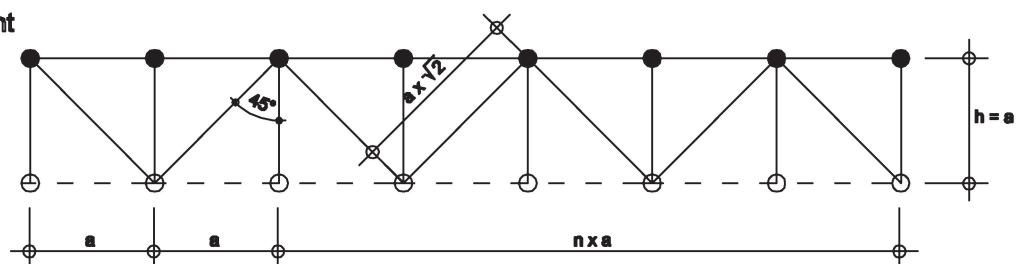
RSW 6



Aufsicht



Ansicht



4.1.6 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 6

Raumbausteine:

$\frac{1}{2}$ O + ASP

Halboktaeder und Antisphenoid

Raster: Im Ober- und Untergurt zwei verschieden große Quadratraster, relativ zueinander um 45° verdreht.

Gurtlage: Obergurt ist randparallel, der Untergurt dazu um 45° gedreht.

Bauhöhe: $h = a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Zwei Achsen, in x- und y- Richtung der Obergurtebene
⇒ zweiachsiges bzw. zweiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Gesamtkonstruktion ist nur bedingt stabil. Beide Elementarkörper sind für sich alleine nicht stabil.

Anzahl der Regelstablängen: 2

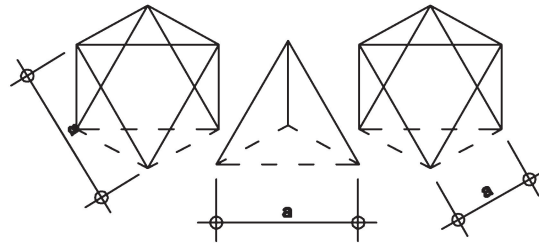
Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 2 Knoten mit je 5 und 9 Stabanschlüssen

Wirtschaftlichkeit: Durch die große Bauhöhe ergeben sich kleinere Stabkräfte. Dieser positive Eigenschaft erfährt aber Einschränkungen durch die reduzierte Anzahl der Bauelemente insbesondere in der Untergurtebene. Die Stabkraftführung in den Untergurten und Diagonalen ist komplex mit ungünstiger Stablastverteilung. Hohe Sicherheitsreserven beim Ausfall einzelner Stäbe können nicht vorgehalten werden. Bei umlaufender Auflagerung bzw. entsprechender Randausbildung erzielt dieser eine günstige Gesamtbilanz.

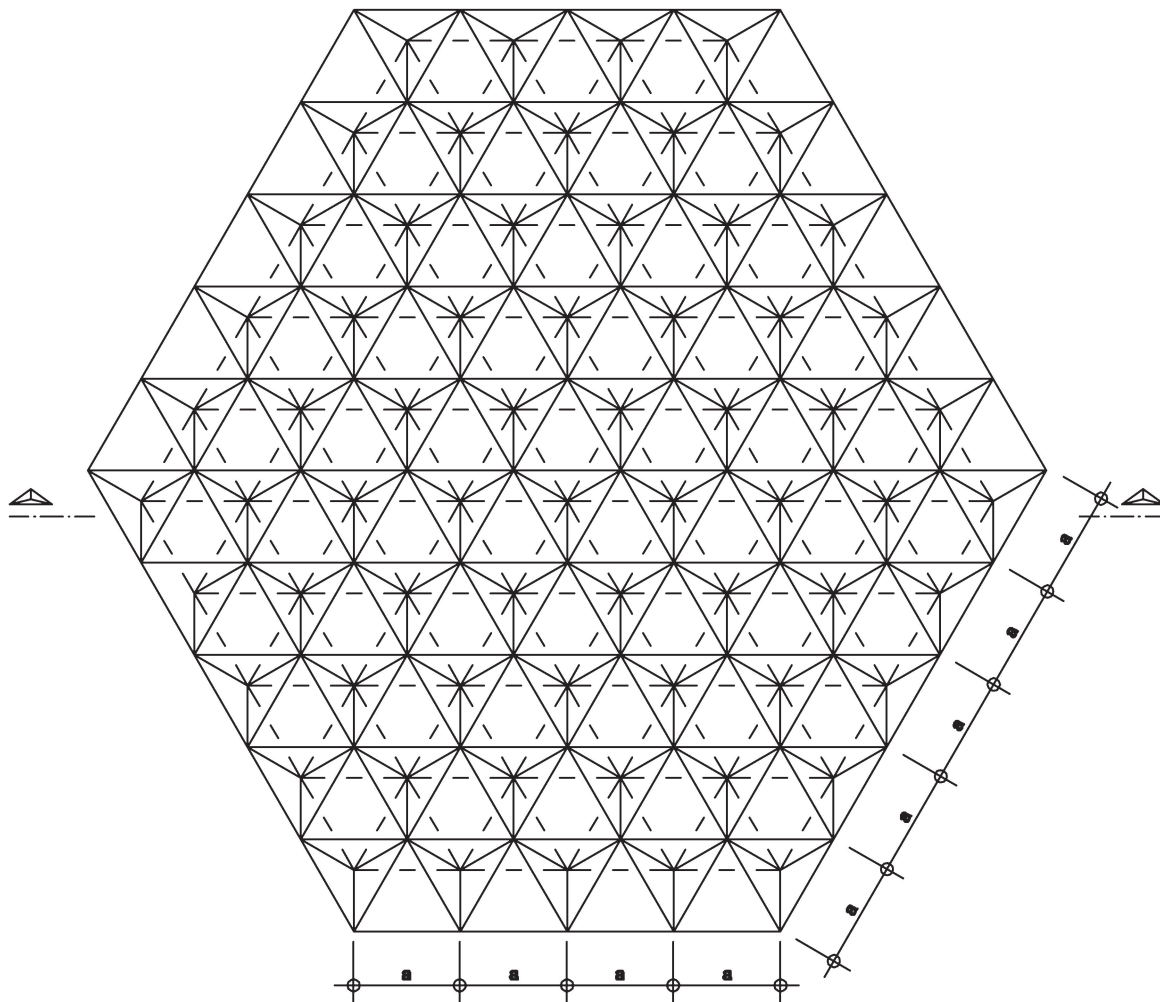
Anwendung: Zur Überbrückung mittlerer Spannweiten und bei ungünstigen Auflagerbedingungen, z.B. spätere Setzungserscheinungen, kommt dieser RFW-Typ in die engere Auswahl.

Die unterschiedlichen Stablängen im Ober- und Untergurt in Verbindung mit der 45°- Verdrehung zueinander setzen über die Gesamtfläche einen architektonisch spannungsvollen Akzent.

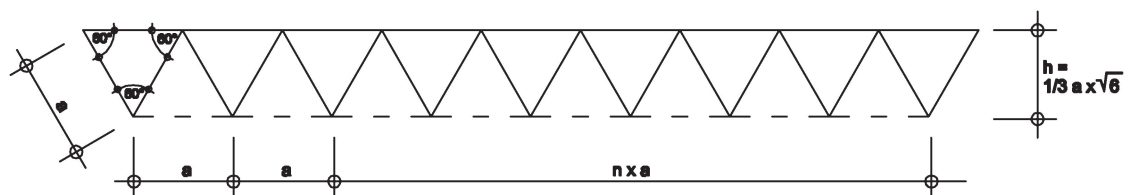
RSW 7



Aufsicht



Schnitt



4.1.7 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 7

Raumbausteine:

O + T

Oktaeder und Tetraeder

Raster: Ober- und Untergurte liegen auf dreieckiger Rasterstruktur, deren drei Richtungen jeweils im Winkel von 60° zueinander stehen. Die Rasterfelder sind in der Form versetzt, daß die Knotenpunkte im Dreiecksmittelpunkt des gegenüberliegenden Rasters liegen.

Gurtlage: Ober- und Untergurte liegen auf dem 60°-Winklraster randparallel zum hexagonalem Grundriß.

Bauhöhe: $h = 1/3 a \sqrt{6}$ bzw. $h \approx 0,82 a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Drei Achsen entsprechend zur Ober- und Untergurtlage im 60°-Winklraster
⇒ dreiachsiges bzw. dreiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Das Gesamtsystem und jede räumliche Modulation ist völlig steif, da Oktaeder und Tetraeder als Elementarkörper statisch stabil sind.

Anzahl der Regelstablängen: 1

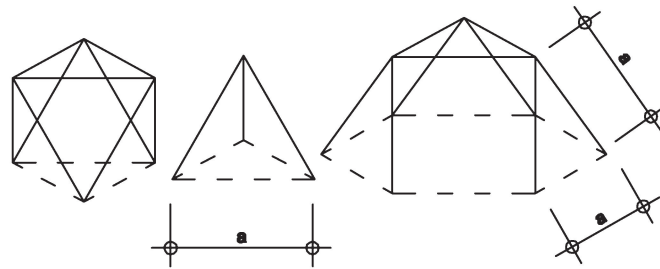
Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 1 mit 9 Stabanschlüssen

Wirtschaftlichkeit: Die Kombination eines einzigen Regelstabtypes mit entsprechendem Regelknoten hat Vorteile für die Serienfertigung und die Montage (siehe RFW 1). Die mittelgroße Bauhöhe schränkt die Wirtschaftlichkeit etwas ein.

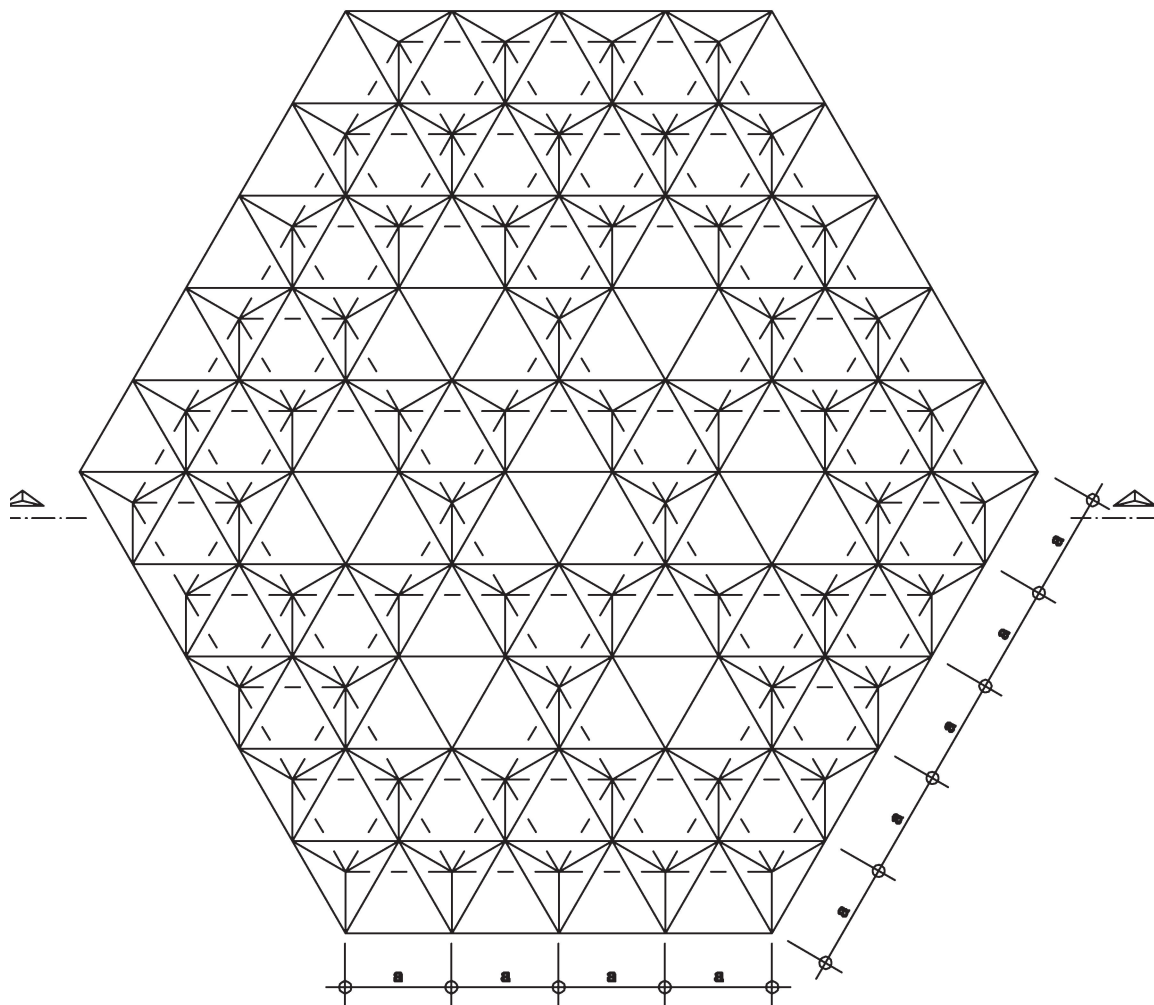
Die Anzahl der Bauelemente ist relativ hoch. Dadurch ist die Stablastverteilung sehr günstig und bedeutet eine Sicherheitsreserve beim Ausfall einzelner Stäbe. Die hohe Steifigkeit des Gesamtsystems ist empfindlich gegenüber Einzelsetzungen der Auflager und erfordert diesbezüglich besondere Konstruktionsmaßnahmen im Detail.

Anwendung: Die geometrisch bedingt richtungsneutrale Untersicht in Kombination mit den einheitlichen Konstruktionselementen ergibt eine ansprechende architektonische Wirkung. Bei hexagonalen Grundrissen kommt diese geometrische Struktur häufig zur Ausführung. Raumgreifende Konstruktionsmöglichkeiten ohne aufwendige Sondermaßnahmen ergeben einen großen Gestaltungsfreiraum.

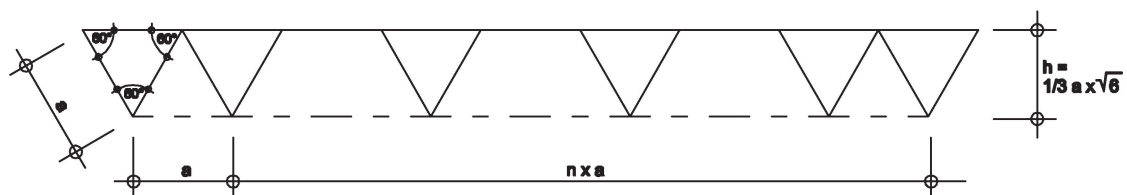
RSW 8



Aufsicht



Schnitt



4.1.8 Ebenes Knotenstabtragwerk: RSW 8

Raumbausteine:

O + T + PRT

Oktaeder, Tetraeder und Prismaetoid

Raster: Ober- und Untergurte liegen auf dreieckiger Rasterstruktur, deren drei Richtungen jeweils im Winkel von 60° zueinander stehen. Die Rasterfelder sind in der Form versetzt, daß die Knotenpunkte im Dreiecksmittelpunkt des gegenüberliegenden Rasters liegen.

Gurtlage: Ober- und Untergurte liegen auf dem 60° -Winkleraster randparallel zum hexagonalem Grundriß.

Bauhöhe: $h = 1/3 a \sqrt{6}$ bzw. $h \approx 0,82 a$

Zahl der statisch wirksamen Achsen: Drei Achsen entsprechend den Stäben in Ober- und Untergurtlage im 60° -Winkleraster; die Anzahl der Stäbe ist in der Untergurtebene verringert.

⇒ dreiachsiges bzw. dreiläufiges Flächentragrost

Gesamtstabilität: Das Gesamtsystem ist bedingt steif. Oktaeder und Tetraeder sind als Elementarkörper statisch stabil, jedoch der Prismaetoid erfordert entsprechende Maßnahmen im Rand- bzw. Auflagerbereich.

Anzahl der Regelstablängen: 1

Anzahl der Regelknoten (im Feldbereich): 3 Knoten mit je 7, 8 oder 9 Stabanschlüssen

Wirtschaftlichkeit: die Serienfertigung und die Montage werden zwar durch den einzigen Regelstabtyp unterstützt jedoch durch die unterschiedliche Anschlußkonfiguration der 3 Knoten etwas relativiert.

Die wirtschaftliche Einschränkung durch die mittelgroße Bauhöhe findet zum Teil einen Ausgleich bei der Reduzierung der Bauelemente in der Untergurtebene. Die Stablastverteilung ist nicht ausgeglichen und schränkt die Traglastreserven für die Lastumlagerung beim Ausfall einzelner Stäbe ein.

Anwendung: Als Sparfachwerkträgerrost zu RSW 7 findet diese Struktur verbreitet Anwendung im Bereich hexagonaler Grundrisse. Die Aussparungen in der Untergurt- und Diagonalebene setzen spannungsvolle Akzente in der im übrigen richtungsneutralen Untersicht.

Fußnoten zu Kap. 4.1

¹ Scheer / Koep, 1982, S. 27

² Mengerinhausen, 1975, S. 45

Abbildungen zu Kap. 4.1

¹ Mengerinhausen, 1975, S. 16

² Mengerinhausen, 1975, S. 45

4.2 Berechnung

Belastungsgrenzen

Für die einzelnen Konstruktionselemente der Raumfachwerk - Platten ergeben sich folgende Grenzwerte:

- Induo - Verbundanker ¹ 44 - 50 kN
- Verschraubung M16 8.8 ² 91 kN
- Zugstäbe 10/10 S10 ^{3,4} 74 kN
- Zugstäbe 10/10 S13 ^{3,4} 91 kN

Fußnoten:

- ¹ Blaß, H.J.; Optimierung des Induo-Verbundankers (Gutachten), Karlsruhe, 15.03.2000
² Wendehorst, Bautechnische Zahlentafeln, 26. Auflage, S. 714, Teubner Stuttgart 1994
^{3,4} Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Nr.: Z-9.1-314 (sowie -415, -425, -444)

Die druckbelasteten Kreuzbalken sind nach Eulerfall 2 knickgefährdet.

Die für die Konstruktion der Raumfachwerk - Platten ideale Stablänge beträgt 2,00 m für die verwendeten Kreuzbalken 10/10 in S10 bei Normalkraftbelastung.

Die aufnehmbare Druckkraft z_{ul} N beträgt dann 44kN. Dies entspricht der zulässigen Zugbeanspruchung der Induo - Verbundanker (in den Diagrammen als strichpunktierte Linie dargestellt). Somit ist das Tragverhalten ausgeglichen, da Zug- und Druckelemente bei allen untersuchten Raumfachwerk - Platten vom Betrag her sehr ähnliche Spitzenkräfte erhalten.

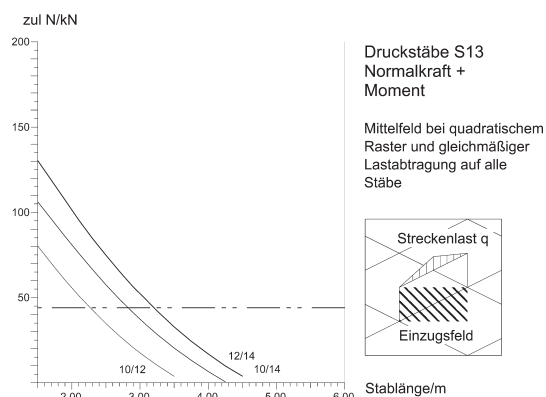
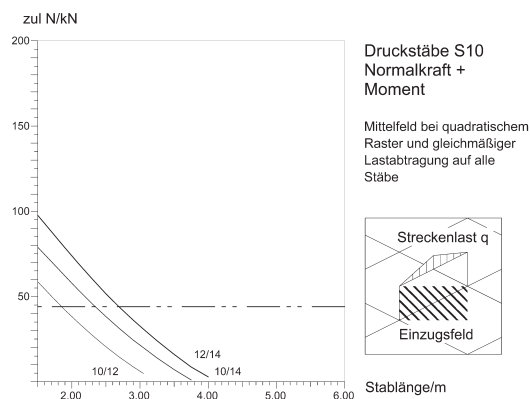
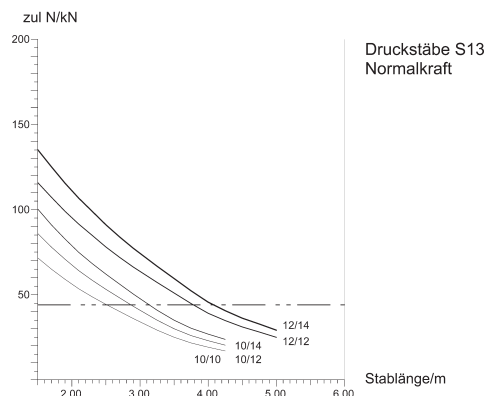
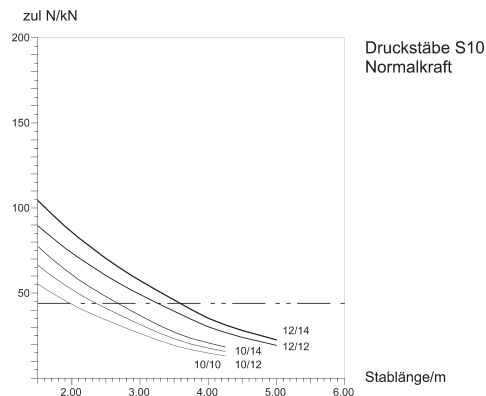
Die Werte für weitere Kreuzbalkenquerschnitte finden sich im Anhang.

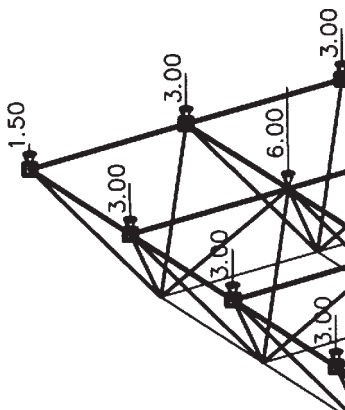
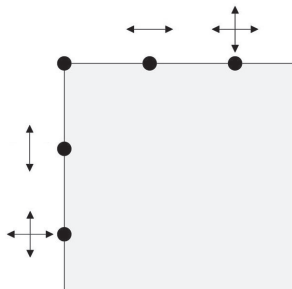
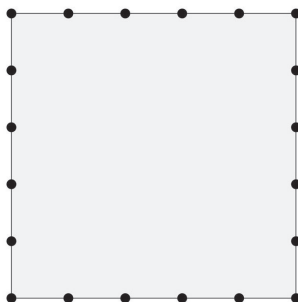
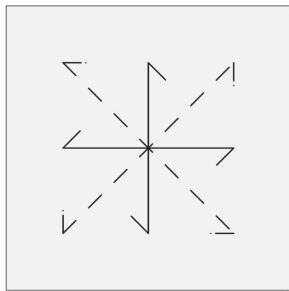
Die Wahl der Stablänge im Bereich des Idealwertes gewährleistet eine optimale Ausnutzung aller Konstruktionselemente.

Wird als Material für die Kreuzbalken S13 statt S10 verwendet, kann die Länge der Kreuzbalken bei einem Querschnitt 10/10 bei etwa 2,50 m liegen, wodurch sich aufgrund der Geometrie der Raumbausteine der Platten auch die statische Höhe h um 25% vergrößert.

Wird die Gesamtlast q aus Eigengewicht und Schnee nicht punktuell in die Knoten, sondern linienförmig in die Stäbe des Obergurtes eingeleitet, ergibt sich für die Kreuzbalken des Obergurtes eine deutlich ungünstigere Belastung.

Für diesen Fall ist eine Verstärkung des Obergurtes nötig, z.B. durch Verwendung rechteckiger Querschnitte; z.B. 10/14, und / oder höherwertigeren Holzes.





Parameter, gewählte Randbedingungen

Die statische Untersuchung der quadratischen Raumfachwerk - Platten RSW 1-6 erfolgt anhand standardisierter Parameter, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Platten können aufgrund ihrer Struktur die einwirkenden Lasten in zwei bis vier Richtungen abtragen, je nachdem ob sie sich statisch mehr wie Fachwerkroste oder drillsteife Platten verhalten. Die quadratische Form ist ideal für eine gleichmäßige Lastabtragung.

Als statisches System wird eine Einfeldplatte mit allseitiger Randlagerung verwendet, wie sie in der Praxis häufig Anwendung findet.

Die Auflagersituation wird dabei als statisch bestimmt angesetzt, d.h. es gibt ein unverbiegliches Auflager, ein in x - Achse und ein in y - Achse verschiebliches Auflager, alle anderen Auflager sind frei verschieblich. Darüber hinaus sind alle Auflager gelenkig gelagert, um Einspannungen auszuschließen.

Alle Knoten sind nach der Fachwerktheorie Gelenke. Die Gesamtlast aus Eigengewicht und Schnee von $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$ ($g = s = 0,75 \text{ kN/m}^2$) wird in Einzellasten umgerechnet und in die Knoten des Obergurtes eingeleitet, so daß die Stäbe der Raumfachwerk - Platte momentenfrei bleiben und nur Normalkräfte aufnehmen müssen.

Die Berechnung erfolgt nach DIN, als Material für die Stäbe der Raumfachwerk - Platte werden Kreuzbalken 10/10 in S10 verwendet.

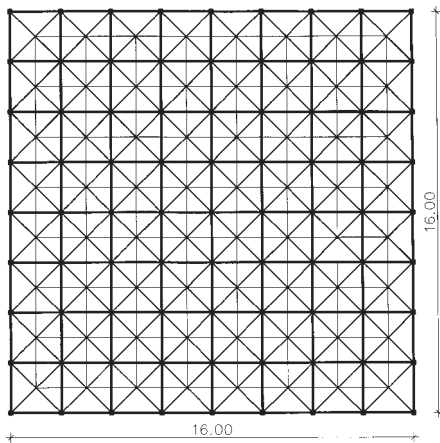
Der Anschluß der Induo - Verbundanker an die Knoten erfolgt über hochfeste Stahlschrauben M16 8.8.

Aus dem statischen Verhalten der Raumfachwerk - Platten und den Belastungsgrenzen der Konstruktionselemente ergeben sich für die vergleichende Berechnung der Typen 1-6 (RSW 1-6) die weiteren Parameter:

Rastermaß $a = 2,00 \text{ m}$ (RSW 3 = $1,33 \text{ m}$)
 Spannweite $l = 16,00 \text{ m}$

Die Raumfachwerk - Platte Typ 1 (RSW 1) wird aufgrund ihrer einfachen Struktur (Raumbaustein Halboctaeder und Tetraeder, eine Stablänge $l_{\text{Stab}} = \text{Rastermaß } a$) und ihres günstigen Tragverhaltens als Referenztragwerk verwendet.

Ihre Grenzspannweite beträgt mit den vorgegebenen Parametern $16,00 \text{ m}$.



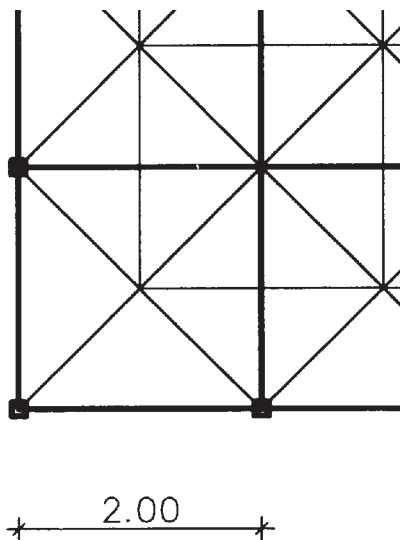
Darstellung der Ergebnisse

Dargestellt werden im folgenden für jeden Raumfachwerk - Plattentyp:

- Struktur
- Normalkräfte im Obergurt
- Normalkräfte in den Diagonalstäben (und Vertikalstäben bei RSW 3-6)
- Normalkräfte im Untergurt
- elastische Anfangsverformung (100 fach überhöht)

Die Auswertung der Ergebnisse bezieht sich jeweils auf das Referenztragwerk RSW 1. Die Strukturdaten der einzelnen RSW - Typen sind jeweils prozentual auf RSW 1 bezogen.

Die Ergebnisse sind im Anschluß an die Einzeluntersuchungen tabellarisch zusammengefaßt.

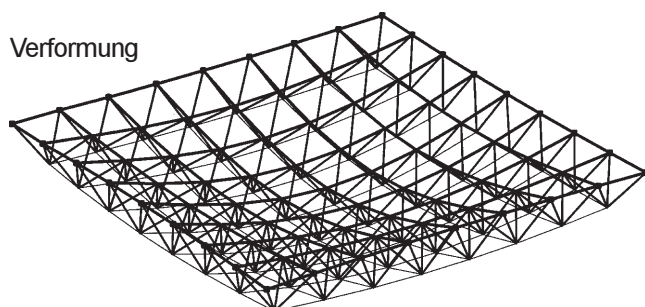
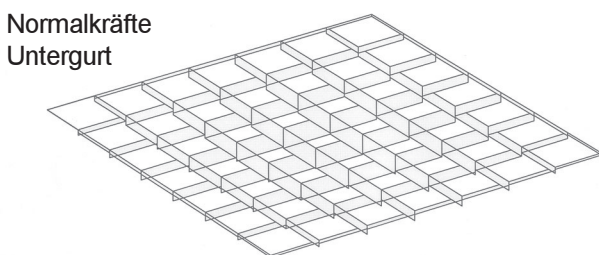
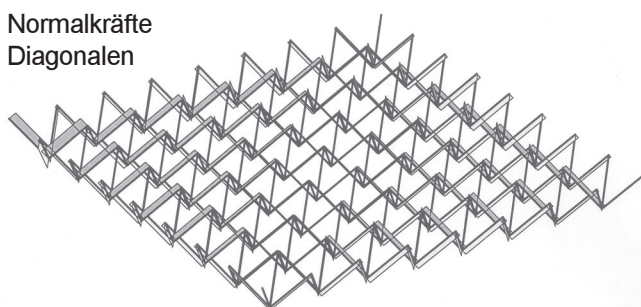
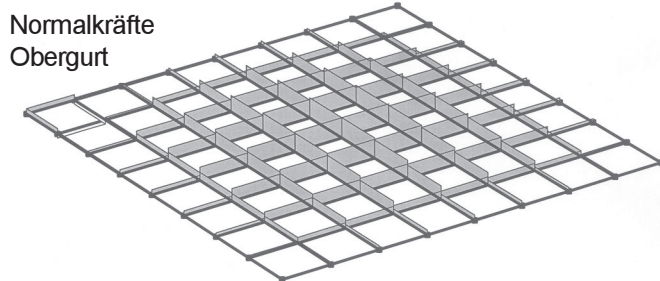
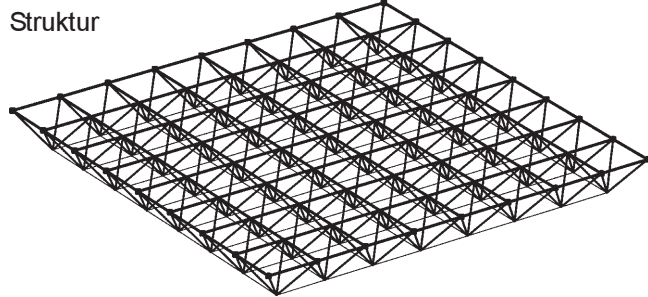


Traglasttabellen für Kreuzbalken sowie die ausführlichen Berechnungsergebnisse finden sich im Anhang, der Brandschutz wird in Kapitel 7.2 gesondert behandelt.

Auf die Berücksichtigung von Windlasten wird verzichtet, da sie von der Gesamtkonstruktion des Gebäudes abhängen und für die Raumfachwerk - Platten unkritisch sind.

4.2.1 Ebene Knotenstabtragwerke:

RSW 1



Strukturdaten

Raumbaustein	Halboktaeder + Tetraeder
Regelstablängen	1
Rastermaß a	2,00 m
Spannweite l	16,00 m
stat. Höhe h	1,41 m (100%)
h/l	1/11
Auflager	32 (100%)
Stäbe	512 (100%)
Knoten	145 (100%)
Material S10	9,22 m ³ (100%)

Statisches Verhalten

Die Lasten aus Eigengewicht und Schnee werden wie bei einer drillweichen Platte gleichmäßig zu allen vier Längsseiten abgetragen.

Der Obergurt ist daher ausschließlich druckbelastet, die Auslastung der Kreuzbalken in der Mitte der Platte liegt bei 90%.

Entsprechend ist der Untergurt ausschließlich zugbelastet. Hier ist die Belastungsgrenze der Induo - Verbundanker maßgebend, die in der Mitte der Platte ebenfalls zu 90% ausgelastet sind.

Aufgrund ihrer höheren Zugbelastbarkeit sind die Kreuzbalken im Untergurt maximal zu 54% ausgelastet.

Ebenso sind die Diagonalstäbe selbst im Randbereich der Platte, wo die Querkkräfte ihr Maximum erreichen, nur zu maximal 41% ausgelastet.

Über die Belastung aus Eigengewicht und Schnee hinaus können also horizontale Windkräfte aus der Fassade problemlos über die Raumfachwerkplatte übertragen werden.

Die elastische Anfangsverformung beträgt $l/1000$, wobei das geringe Schwindverhalten der Kreuzbalken und die Setzung der Induo - Verbundanker noch unberücksichtigt sind.

Auswertung

Spannweiten über 16 m sind mit RSW 1 bei den vorgegebenen Parametern nicht möglich.

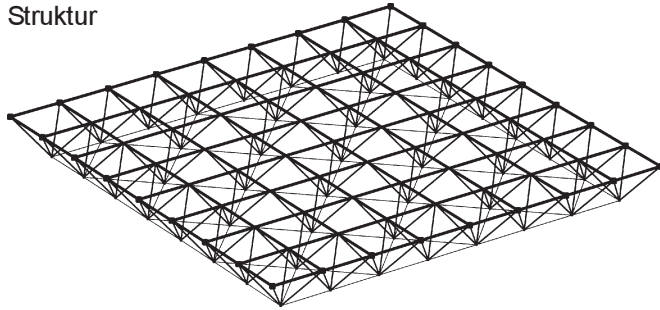
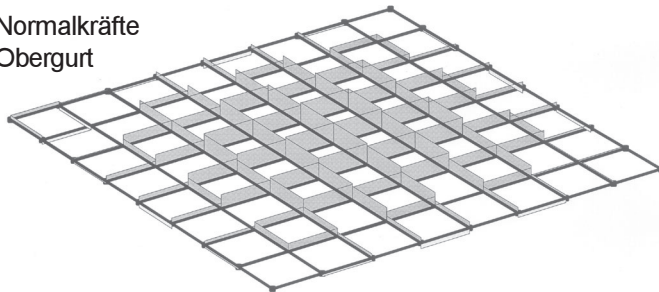
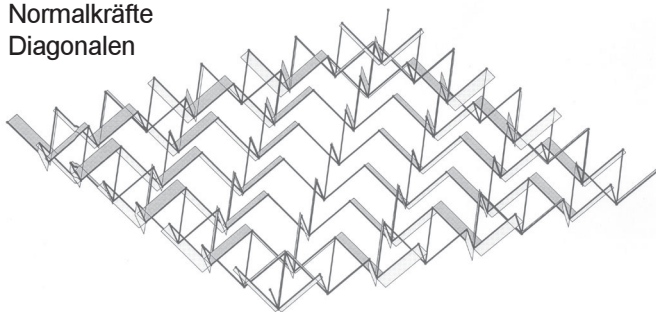
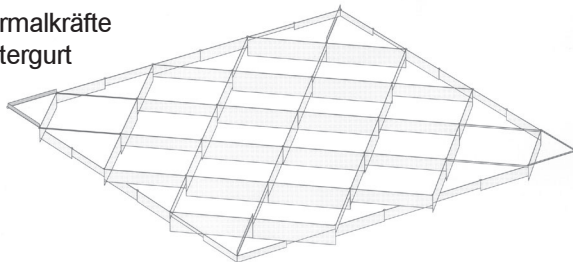
Werden zusätzliche Raumbausteine addiert, versagen die Kreuzbalken des Obergurtes und die Induo - Verbundanker des Untergurtes. Die Belastungsgrenze von 44 kN für Kreuzbalken und Verbundanker wird überschritten.

Wird das Rastermaß a vergrößert, um bei gleicher Anzahl von Raumbausteinen eine größere Spannweite und statische Höhe zu erreichen, versagt der Obergurt, weil die zulässige Druckbelastbarkeit der Kreuzbalken aufgrund der größeren Knicklänge sinkt.

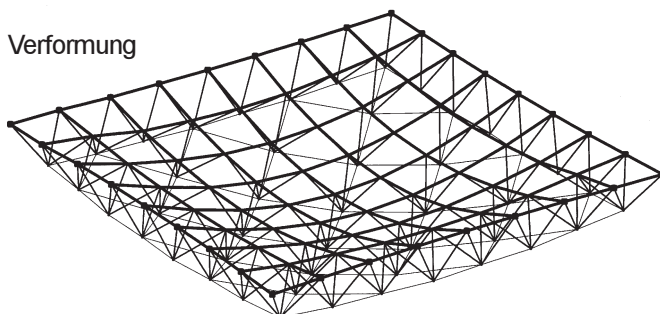
4.2.2 Ebene Knotenstabtragwerke:

RSW 2

Struktur

Normalkräfte
ObergurtNormalkräfte
DiagonalenNormalkräfte
Untergurt

Verformung



Strukturdaten

Raumbaustein	Halboktaeder + Halbcuboktaeder	
Regelstablängen	2	
Rastermaß a	2,00 m	
Spannweite l	16,00 m	
stat. Höhe h	1,41 m	(100%)
h/l	1/11	
Auflager	32	(100%)
Stäbe	405	(79%)
Knoten	127	(88%)
Material S10	7,70 m ³	(84%)

Statisches Verhalten

Bei RSW 2 handelt es sich vom Konstruktionstyp um eine Variante von RSW 1.

Der Obergurt entspricht dem von RSW 1, der Untergurt ist um 45 Grad gedreht, wodurch sich auch die Struktur der Diagonalstäbe ändert.

Insgesamt werden 21% weniger Stäbe benötigt, ohne daß die Kräfte in den kritischen Bereichen - Obergurt und Induo - Verbundankern - wesentlich steigen.

Das statische Verhalten ist ebenfalls mit RSW 1 vergleichbar, auch RSW 2 verhält sich wie eine drillwei- che Platte.

Die Druckstäbe des Obergurtes sind zu maximal 92%, die Zugstäbe des Untergurtes sind in Feldmitte zu 56% ausgelastet.

Die maximale Auslastung der Induo - Verbundanker liegt im Untergurt bei 94%.

Die Kräfte der Diagonalstäbe steigen stärker an als im Ober- und Untergurt, da sich nur am Rand Halboktaeder befinden.

Ihre maximale Auslastung im Randbereich der Platte bleibt mit 54% allerdings unkritisch, also können auch hier noch zusätzliche Lasten aus der Fassade aufgen- nommen werden.

Die elastische Anfangsverformung liegt mit l/940 nur geringfügig höher als bei RSW 1.

Auswertung

Wie bei RSW 1 ist auch bei RSW 2 mit den vorge- gebenen Parametern bei 16 m die Grenzspannweite erreicht.

Eine Erhöhung der Spannweite ist weder durch Addition von Raumbausteinen (Versagen der Induo - Zuganker), noch durch Vergrößerung des Rastermaßes (Versagen der Druckstäbe im Obergurt) möglich.

4.2.3 Ebene Knotenstabtragwerke:

RSW 3

Strukturdaten

Raumbaustein	Halboktaeder + Tetraeder	
Regelstablängen	3	
Rastermaß a	1,33 m	
Spannweite l	16,00 m	
stat. Höhe h	1,33 m	(94%)
h/l	1/12	
Auflager	28	(88%)
Stäbe	656	(128%)
Knoten	173	(119%)
Material S10	11,36 m ³	(123%)

Statisches Verhalten

RSW 3 ist strukturell aufgebaut wie RSW 1, allerdings insgesamt um 45 Grad gedreht. Dadurch verringern sich das Rastermaß und die statische Höhe h auf 1,33 m. RSW 3 verhält sich wie eine drillsteife Platte, das heißt die Lasten werden nicht nur zu den Längsseiten, sondern auch über die Ecken (Drillwirkung) abgetragen. Das Tragverhalten wird günstiger.

Dort bilden sich negative Drillmomente (Zugzone im Obergurt, Druckzone im Untergurt), die das Feld entlasten. Die Druckstäbe in Feldmitte sind dadurch nur zu 58% ausgelastet, die Zugstäbe im Untergurt zu 37% und die Diagonalstäbe sind im Randbereich zu 48% ausgelastet.

Die Auslastung der Induo - Verbundanker liegt mit 63% geringfügig höher als die Auslastung des Obergurtes, weil die diagonal liegenden Obergurtstäbe aus geometrischen Gründen nur 1,90 m lang und somit geringfügig tragfähiger sind.

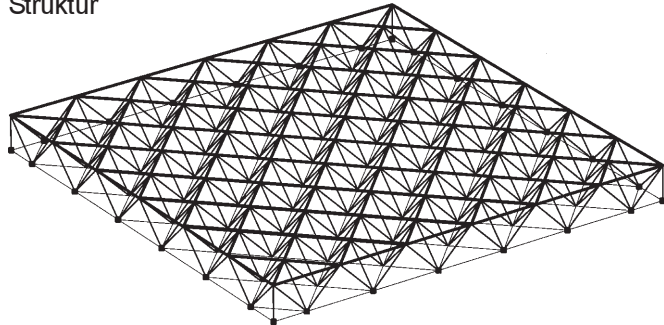
Die elastische Anfangsverformung liegt trotz geringerer statischer Höhe bei nur l/1600, was auf die Drillsteifigkeit der Raumfachwerk - Platte zurückzuführen ist.

Auswertung

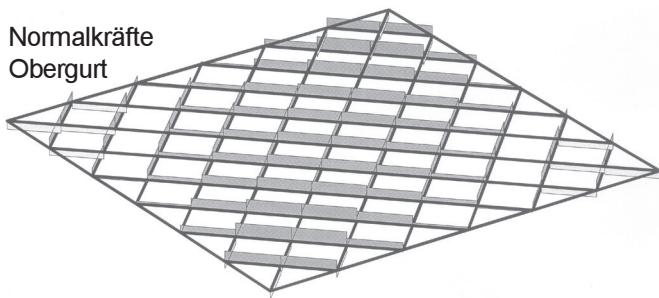
Aufgrund der Reserven vor allem in den Obergurtstäben und den Zugankern des Untergurtes läßt sich RSW 3 durch Addition von Raumbausteinen mit den vorgegebenen Parametern bis 20m spannen, l/h beträgt dann nur noch 1/15.

Werden die hochbelasteten Druckstäbe gegen Kreuzbalken 12/12 ausgetauscht, läßt sich diese Spannweite durch Vergrößerung des Rastermaßes auf 1,67m erreichen. Zwar vergrößert sich dadurch auch die statische Höhe, aber der konstruktive Aufwand ist geringer.

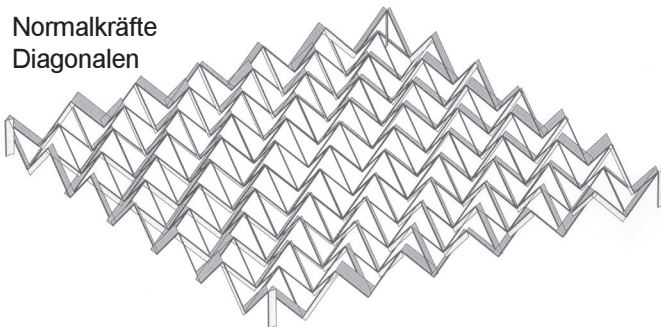
Struktur



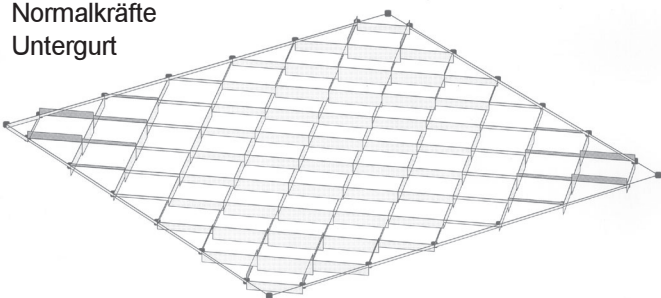
Normalkräfte
Obergurt



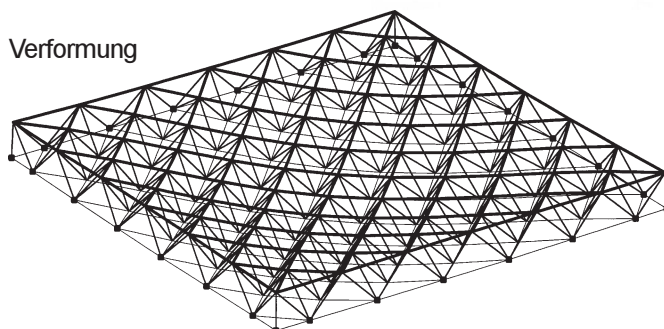
Normalkräfte
Diagonalen



Normalkräfte
Untergurt



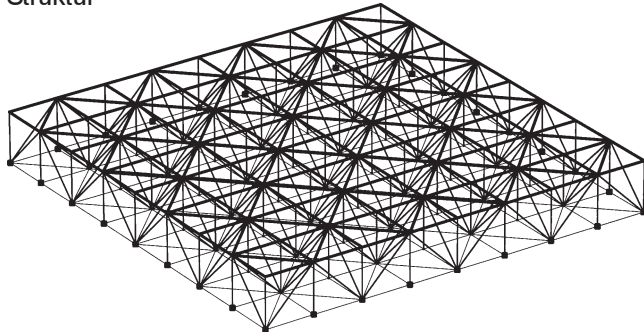
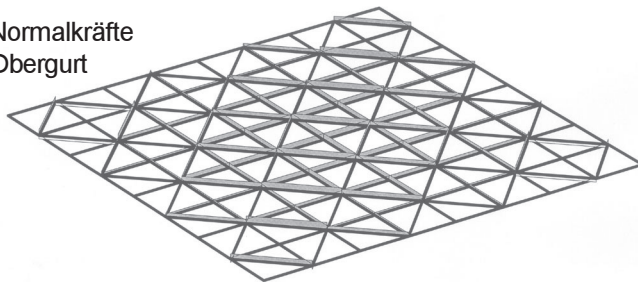
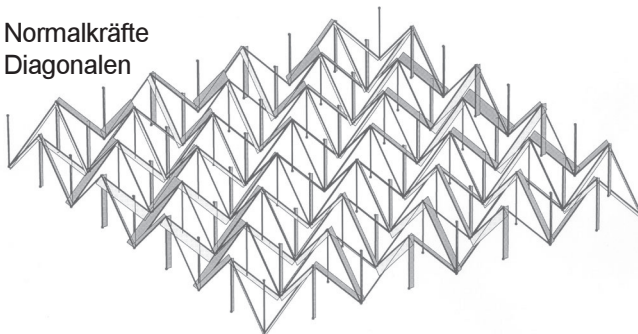
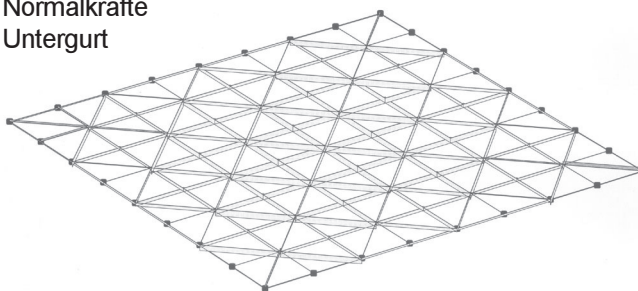
Verformung



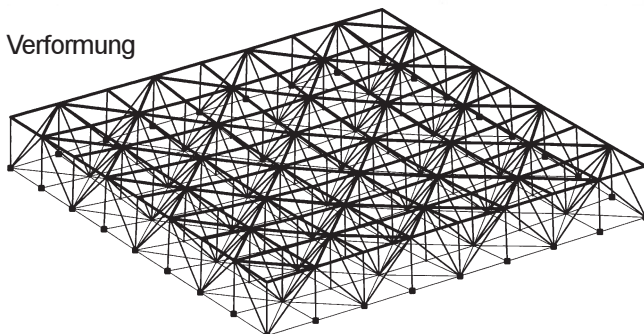
4.2.4 Ebene Knotenstabtragwerke:

RSW 4

Struktur

Normalkräfte
ObergurtNormalkräfte
DiagonalenNormalkräfte
Untergurt

Verformung



Strukturdaten

Raumbaustein	Cubus mit Diagonalenmaximum	
Regelstablängen	2	
Rastermaß a	2,00 m	
Spannweite l	16,00 m	
stat. Höhe h	2,00 m	(142%)
h/l	1/8	
Auflager	32	(100%)
Stäbe	641	(125%)
Knoten	162	(112%)
Material S10	13,80 m ³	(150%)

Statisches Verhalten

RSW 4 ist durch die in sich stabilen Raumbausteine die Steifste der untersuchten Raumfachwerk - Platten. Wie RSW 3 weist auch RSW 4 eine gewisse Drillsteifigkeit auf.

Aufgrund der statischen Höhe von 2,00 m und den zusätzlichen Diagonalstäben in Ober- und Untergurt liegt die Auslastung der Druckstäbe im Obergurt bei nur 49%, die der Zugstäbe im Untergurt bei nur 17%.

Die maximale Auslastung der Vertikalstäbe im Randbereich liegt bei 23%, und auch die Induo - Verbundanker sind im Untergurt nur zu 38% ausgelastet.

Problematisch sind bei RSW 4 die Diagonalstäbe, die bei der für diesen Raumfachwerk - Plattentyp geringen Spannweite bereits zu 73% ausgelastet sind.

Erwartungsgemäß fällt die elastische Anfangsdurchbiegung bei RSW 4 mit l/3200 sehr gering aus.

Auswertung

Mit den vorgegebenen Parametern lässt sich RSW 4 durch Addition von Raumbausteinen bis zu 20 m weit spannen, dann sind die Diagonalstäbe in den Randbereichen ausgelastet.

Werden diese und die Diagonalstäbe des Obergurtes in Feldmitte durch Kreuzbalken 12/12 ersetzt, lässt sich durch Addition von Raumbausteinen die Spannweite bis auf 24 m erhöhen, bevor die Induo - Verbundanker im Untergurt ihre Belastungsgrenze erreichen. Dann liegt h/l bei 1/12.

Durch Vergrößerung des Rastermaßes auf 3,00 m und Verwendung von Kreuzbalken 12/12 (Holzgüte S13 für die hochbelasteten Diagonalstäbe) lässt sich die Spannweite ebenfalls auf 24 m erhöhen, dann stößt man allerdings an die Grenzen der Ankerverbindung.

Problematisch ist der konstruktive Aufwand und der hohe Materialverbrauch dieses RSWs, der nicht wie bei RSW 3 durch eine geringe statische Höhe kompensiert wird.

4.2.5 Ebene Knotenstabtragwerke:

RSW 5

Strukturdaten

Raumbaustein	Cubus mit Diagonalenminimum	
Regelstablängen	2	
Rastermaß a	2,00 m	
Spannweite l	16,00 m	
stat. Höhe h	2,00 m	(142%)
h/l	1/8	
Auflager	32	(100%)
Stäbe	569	(111%)
Knoten	162	(112%)
Material S10	11,90 m ³	(129%)

Statisches Verhalten

RSW 5 entspricht in der Konstruktion RSW 4, allerdings fallen die Diagonalen des Ober- und Untergurtes außer in den Randfeldern weg. Der Materialverbrauch wird dadurch um 14% reduziert.

RSW 5 ist damit im Grunde ein Fachwerkrost, der sich aber durch die Diagonalen in den Randfeldern des Ober- und Untergurtes insgesamt wie eine drillsteife Platte verhält - die Drillwirkung ist sogar deutlich höher als bei RSW 4 - und die Lasten, wie RSW 3 und RSW 4, in vier Richtungen abträgt.

Durch die Reduktion der Diagonallage des Ober- und Untergurtes liegt die Auslastung der Druckstäbe des Obergurtes (57%) sowie die der Zugstäbe des Untergurtes (31%) höher als bei RSW 4.

Auch die Induo - Verbundanker sind mit 51% im Untergurt stärker ausgelastet.

Die Diagonalstäbe sind mit 64% deutlich geringer als bei RSW 4 ausgelastet, was sich aus der günstigeren Kraftverteilung durch die höhere Drillwirkung erklärt.

Die elastische Anfangsdurchbiegung ist mit 1/2000 immer noch sehr gering.

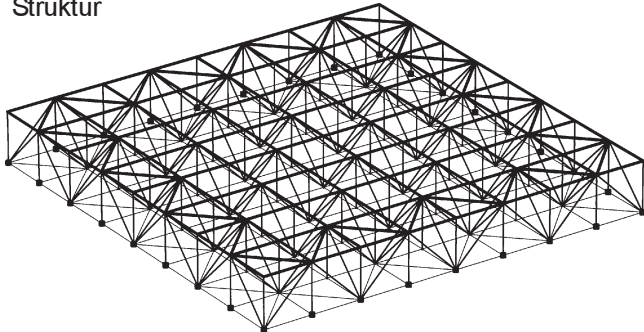
Auswertung

RSW 5 verhält sich insgesamt deutlich günstiger als RSW 4, da die Diagonalstäbe durch die höhere Drillwirkung gleichmäßiger belastet werden und die Tragfähigkeit trotz minimiertem Materialeinsatzes vergleichbar bleibt.

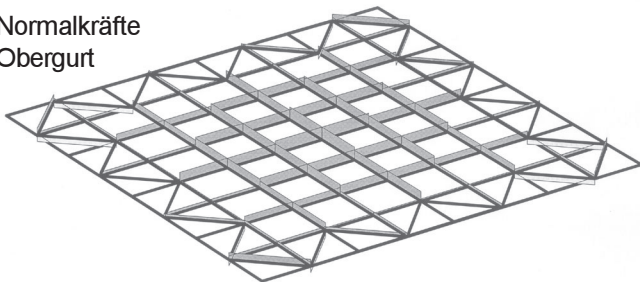
Durch Addition von Raumbausteinen oder durch Vergrößerung des Rastermaßes auf 2,50 m (bei gleichzeitiger Vergrößerung der Stabquerschnitte) läßt sich die Spannweite auf 20 m erhöhen und damit ein h/l - Verhältnis von 1/10 erreichen.

Bei weiterer Verstärkung der hoch belasteten Ober- und Diagonalstäbe (Holzgüte S13) kann die Spannweite bis auf 22 m erhöht werden; dann erreichen die Induo - Verbundanker ihre Belastungsgrenze.

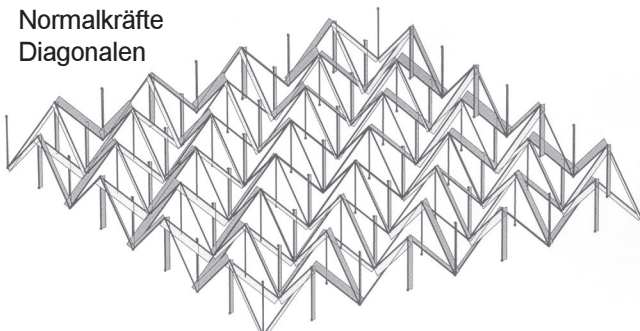
Struktur



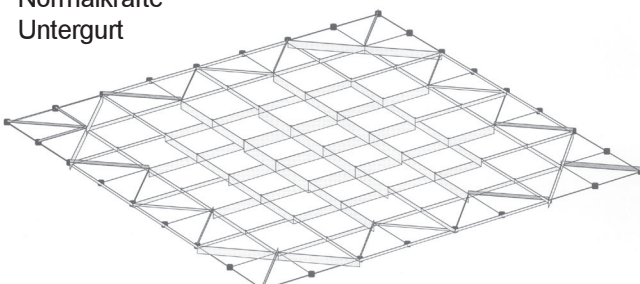
Normalkräfte
Obergurt



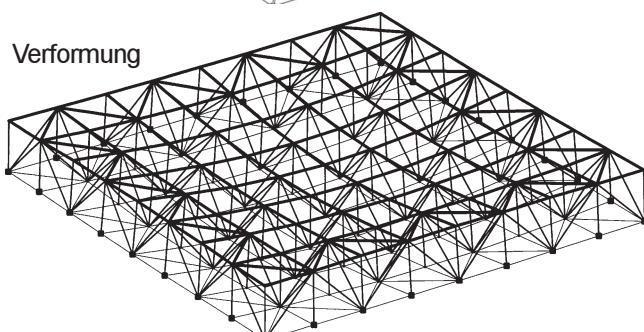
Normalkräfte
Diagonalen



Normalkräfte
Untergurt



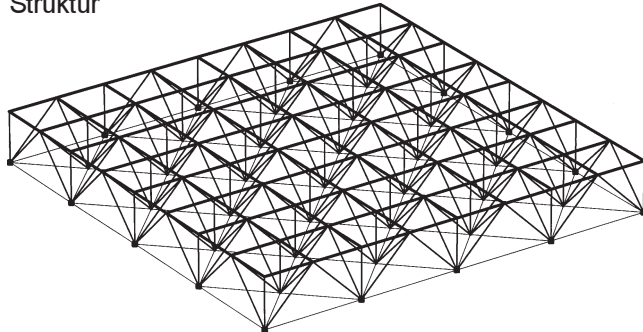
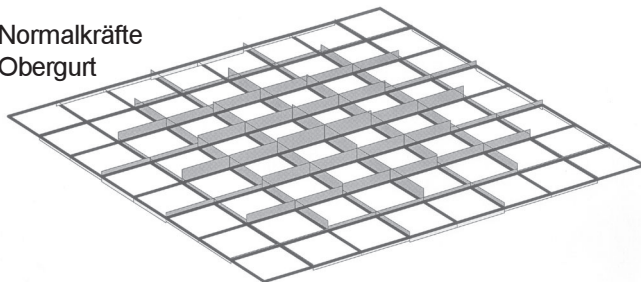
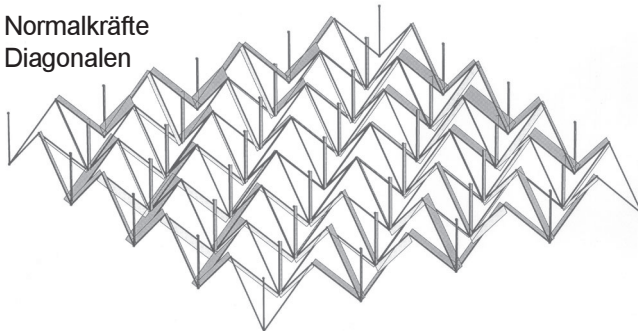
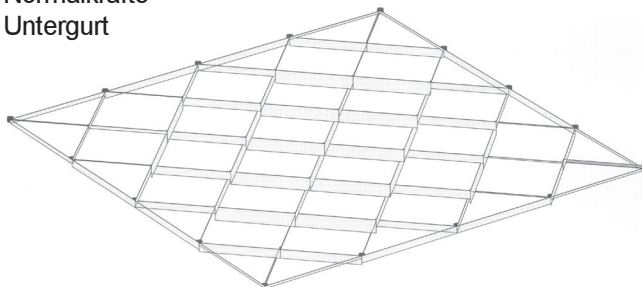
Verformung



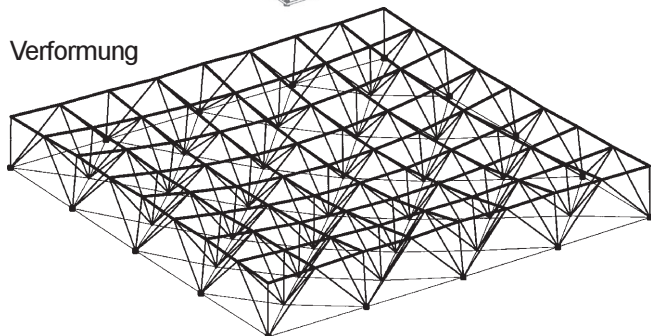
4.2.6 Ebene Knotenstabtragwerke:

RSW 6

Struktur


Normalkräfte
Obergurt

Normalkräfte
Diagonalen

Normalkräfte
Untergurt


Verformung



Strukturdaten

Raumbaustein	Halboktaeder + Antisphenoid
Regelstablängen	2, (3, incl. Randstäbe)
Rastermaß a	2,00 m
Spannweite l	16,00 m
stat. Höhe h	2,00 m (142%)
h/l	1/8
Auflager	16 (50%)
Stäbe	409 (80%)
Knoten	122 (84%)
Material S10	9,40 m ³ (102%)

Statisches Verhalten

Bei RSW 6 ist der Untergurt wie bei RSW 2 gegenüber dem Obergurt um 45 Grad gedreht.

Die Lastabtragung entspricht wie bei RSW 1 und RSW 2 dem Verhalten einer drillweichen Platte, die Lasten werden gleichmäßig zu den vier Längsseiten der Raumbachwerk - Platte abgetragen.

Aus der Geometrie der Raumbausteine Halboktaeder und Antisphenoid ergibt sich eine statische Höhe von 2,00 m. Dementsprechend geringer ist die Auslastung des Tragwerks.

Die Druckstäbe des Obergurtes sind zu maximal 71% ausgelastet, die Zugstäbe des Untergurtes zu 35%, die Auslastung der Vertikalstäbe liegt im Randbereich der Raumbachwerk - Platte bei 14%.

Die mit 64% relativ hohe Auslastung der Diagonalstäbe erklärt sich aus ihrer großen Knicklänge (2,83 m), die zu einer auf 21 kN reduzierten zulässigen Druckbeanspruchung führt.

Die Induo - Verbundanker sind im Untergurt zu 58% ausgelastet.

Die elastische Anfangsdurchbiegung beträgt l/1800.

Auswertung

RSW 6 ist aufgrund der geringen Anzahl von Knoten und Stäben konstruktiv am wenigsten aufwendig.

Die Spannweite lässt sich bei Verstärkung der Obergurtstäbe auf 12/12 und durch Addition von Raumbausteinen bis 20 m erhöhen. Die Auslastung des Induo - Verbundankers liegt dann bei 90%.

Die Vergrößerung des Rastermaßes auf 2,50 m ist wegen der hohen Belastung des Obergurtes ungünstig.

4.3 Statische Auswertung der Räumlichen Knotenstabtragwerke RSW 1 - 6

	RSW 1	RSW 2	RSW 3	RSW 4	RSW 5	RSW 6
Spannweite	16,00m	16,00m	16,00m	16,00m	16,00m	16,00m
Rastermaß	2,00m	2,00m	1,33m	2,00m	2,00m	2,00m
Statische Höhe	1,41m	1,41m	1,33m	2,00m	2,00m	2,00m
h / l	1 / 11	1 / 11	1 / 12	1 / 8	1 / 8	1 / 8
Anzahl Auflager	32	32	28	32	32	16
Anzahl Stäbe	512	405	656	641	569	409
Anzahl Stabtypen	1 (2,00)	2 (2,00; 2,83)	3 (1,33; 1,89; 2,67)	2 (2,00; 2,83)	2 (2,00; 2,83)	3 (2,00; 2,83; 4,00)
Anzahl Knoten	145	127	173	162	162	122
Materialverbrauch Kreuzbalken 10/10 S 10	9,22m ³	7,70m³	11,36m ³	13,80m ³	11,90m ³	9,40m ³
Auslastung Obergurt	90%	92%	58%	49%	57%	71%
Auslastung Diagonalstäbe	41%	54%	48%	73%	64%	57%
Auslastung Untergurt	54%	56%	37%	17%	31%	35%
Auslastung Vertikalstäbe	---	---	21%	23%	22%	14%
Auslastung IN DUO - Verbundanker	90%	94%	63%	38%	51%	58%
Auslastung Schrauben M16 8.8	44%	45%	30%	19%	25%	28%
Elastische Anfangs- durchbiegung	1,6cm	1,7cm	1,0cm	0,5cm	0,8cm	0,9cm

Die Untersuchung der Raumfachwerkplatten RSW 1 bis RSW 6 zeigt im Vergleich

- das Tragverhalten der Einzelelemente
- die Wirtschaftlichkeit der Tragsysteme und
- die Grenzen der Beanspruchbarkeit.

Als wirtschaftliche Systeme ergeben sich die Flächentragroste, bei denen eine hohe Auslastung der Tragfähigkeit möglichst vieler Einzelelemente - Stäbe, Anker und Schrauben - erreicht wird.

Hierbei tritt das RSW 2 als besonders günstiges Tragsystem hervor. Dies verdeutlichen die Angaben zum Materialverbrauch für Kreuzbalken von $7,7 \text{ m}^3$, sowie die geringe Anzahl von Stäben und Knoten. Das günstige Verhältnis der Bauhöhe zur Spannweite von $1/11$ gibt für dieses System die Grenze der Schlankheit an. Der Wert wird zwar von RSW 4 mit $1/12$ übertroffen, aber nur in Verbindung mit einem hohen Materialverbrauch.

RSW 4 bis RSW 6 zeichnen sich durch ihre sehr hohen Lastreserven in den einzelnen Tragelementen aus. Dies kommt auch im ungünstigen Verhältnis von Bauhöhe zur Spannweite von $1/8$ dieser Tragwerke zum Ausdruck. Die Addition weiterer Raumbausteine (siehe folgendes Kap. 4.4.1) führt zur Erhöhung der Schlankheit, sowie zum Ausreizen der Traglastreserven einzelner Tragelemente. Die ungünstige Ausgangslage bezüglich des hohen Materialaufwandes wird durch diese Maßnahme noch unwirtschaftlicher.

4.4 Abwandlung der Parameter

4.4.1 Veränderte Stützweiten

Die räumlichen Fachwerke RSW 1 - 6 wurden zunächst für eine Stützweite von 16 m und weitere feststehende Parameter (Querschnitt 10/10, Holzgüteklasse S 10, etc.) statisch berechnet.

Die Ausführungen zu den einzelnen RSWs, die Übersichtstabelle und die ausführliche Darstellung im Anhang zeigen die Beanspruchung, die sich bei den verschiedenen Systemen ergibt.

Vergrößert sich die Stützweite l , so folgt daraus auch eine Veränderung der Beanspruchung und eine neue Dimensionierung ist eventuell erforderlich. Insbesondere muß dann von den Querschnitten 10/10 oder von der Holzgüteklasse S 10 abgewichen werden.

Zur Größenveränderung der quadratischen räumlichen Fachwerkplatten sollen im folgenden zwei Möglichkeiten aufgezeigt werden:

Addition von Raumbausteinen

Die Übersichtstabelle zeigt, daß die Beanspruchung der RSW 3 - 6 noch nicht an die Grenze der Beanspruchbarkeit gekommen ist.

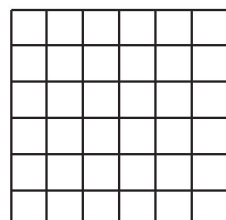
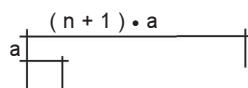
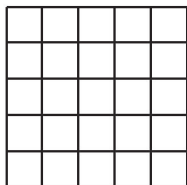
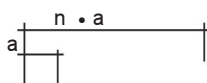
Bei den RSW 1 und 2 wurde jedoch die Grenze der Tragfähigkeit des Induo - Verbundankers erreicht, so daß diese Systeme zunächst nicht über 16 m hinaus angewandt werden können.

Um ein quadratisches räumliches Stabwerk mit größerer Stützweite als 16 m zu bauen, könnten also die Strukturen der RSW 3 - 6 durch die Addition weiterer Felder mit gleichem Rastermaß in beiden Richtungen erweitert werden.

Für den angenommenen Fall der Vergrößerung des Feldes auf 20 x 20 m würden also jeweils zwei Felder mit jeweils zwei Meter Rastermaß addiert. Die Einzugsfeldbreite a , die Knotenlast auf jeden Fachwerkknoten und die statische Höhe h blieben unverändert. Die Unter- und Obergurtkraft errechnet sich aus dem Moment unter Flächenbelastung nach der Formel

$$O=U=\frac{\overline{M} \cdot a}{h} = \frac{q \cdot l^2}{n} \cdot \frac{a}{h}$$

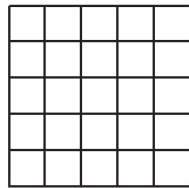
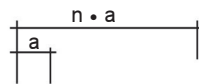
Da sich a und h nicht ändern, wächst die Beanspruchung quadratisch mit l^2 . Im angenommenen Beispiel steigt sie auf das $(20/16)^2 = 1,56$ - fache bzw. um 56%. Diese Erhöhung ist, wie die Übersichtstabelle zeigt, gerade noch durch den Querschnitt 10/10 aufnehmbar.



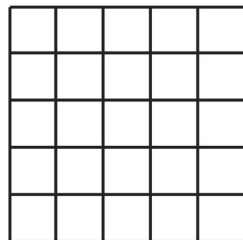
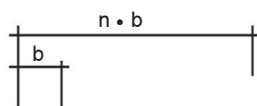
Vergrößerung des Rastermaßes a

Die Vergrößerung der Stützweite des quadratischen Feldes kann man sich auch durch eine Art Zoomvorgang vorstellen.

Hier wird die 16 x 16 m -Struktur der RSW 3 bis RSW 6 (8 x 2,0 m Raster) etwa auf 19,2 x 19,2 m vergrößert (8 x 2,4 m Raster). Dadurch vergrößert sich jedes geometrische Maß um den gleichen Faktor.



Damit wächst auch das Einzugsfeld und die Knotenlast, aber auch die statische Höhe h des Tragwerks. Der Quotient a/h bleibt konstant und die Beanspruchung wächst wieder mit dem Quadrat der Stützweite l^2 .



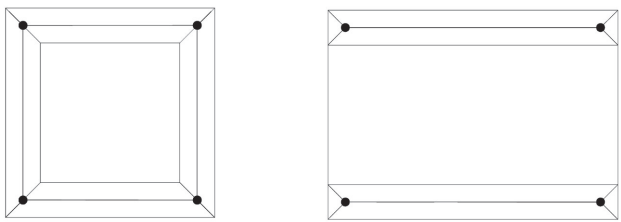
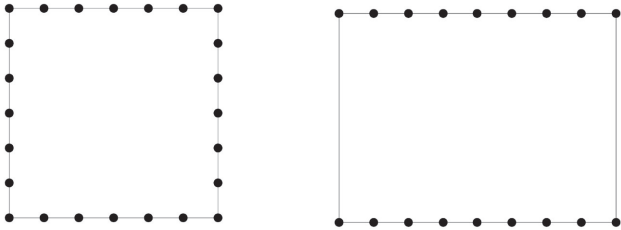
Wenn die Ähnlichkeit bei allen Maßen beibehalten wird, muß folglich auch der Querschnitt von 10/10 auf das 19,2/16-fache = 1,2 - fache vergrößert werden. Da die Querschnittsfläche A auf das 1,2 x 1,2 - fache vergrößert wird, hebt sich die gesteigerte Beanspruchung auf das l^2 - fache (= $1,2^2$ - fache) mit der gesteigerten Beanspruchbarkeit auf.

Der Querschnitt 12/12 ist bei dieser Vergrößerung der Stützweite ausreichend.

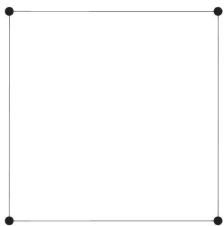
4.4.2 Auflagerprinzipien

Die Ausgeglichenheit der Kräfteverteilung im Tragwerk wächst mit der Zahl der zur Lastabtragung herangezogenen Knotenpunkte.

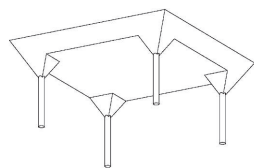
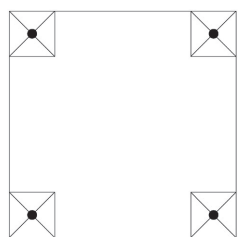
Wirtschaftlich sind Umfangslagerungen für quadratische Grundrisse gefolgt von Parallellagerungen für rechteckige Formate.



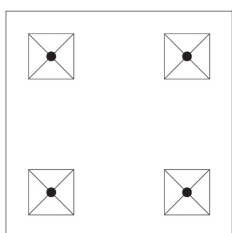
Bei umfang- bzw. parallelgelagerten Systemen werden linienförmig die Randknoten einzeln auf Stützen oder über Wandkonstruktionen abgefangen. Eine Alternative für die linienförmige Lagerung stellt die Ausbildung eines mehrlagigen Randträgers dar.



Eckpunktlagerungen erfordern einen höheren Aufwand innerhalb der Flächentragroste.



Die Wahl der Mehrpunktlagerung über Pyramiden- bzw. Baumstrukturen entschärft die Einzelstabelastung bei der Einzelpunktlagerung im Eckbereich.



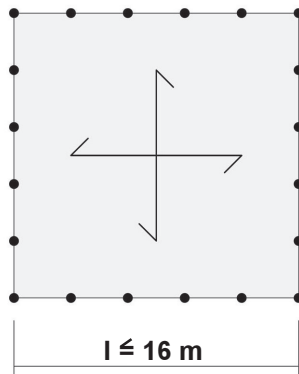
Allgemein führt das Einrücken der Auflager (Kragarmausbildung) zur Entlastung des Innenfeldbereichs und damit zu einer günstigeren Stablastverteilung.

4.4.3 Verhältnis von Spannweite zu Bauhöhe

Die Form der Auflagerung hat entscheidenden Einfluß auf die Leistungsfähigkeit des Flächentragrostes. Dies wird am Beispiel des Flächentragrostes RSW 1 erläutert.

Anzahl der Gurtlagen: 2
 Stabquerschnitt: 10/10
 Festigkeitsklasse: Holz S10
 Gesamtbelastung: $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$

Die rechnerischen Nachweise für die abgebildeten Stützungsalternativen befinden sich im Anhang.



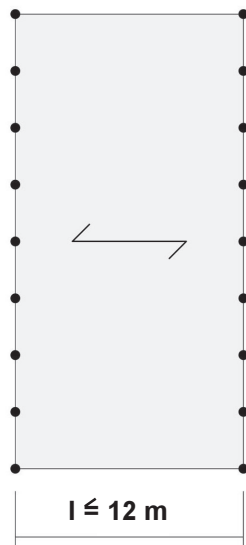
a) Einfeldplatten

Umfanglagerung:

$$\frac{h}{l} = \frac{1}{10} \div \frac{1}{12}$$

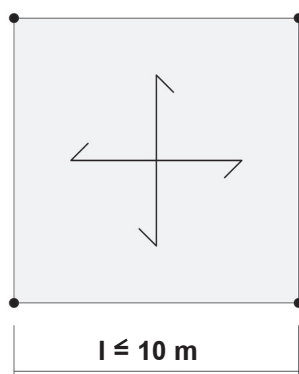
Randlagerung:

$$\frac{h}{l} = \frac{1}{8} \div \frac{1}{10}$$



Ecklagerung:

$$\frac{h}{l} \approx \frac{1}{7}$$

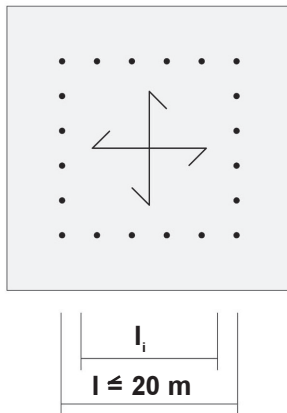


b) Einfeldplatten mit Auskragung

Für Durchlaufplatten gilt allgemein:

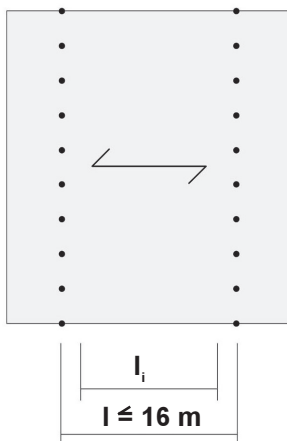
l_i tritt anstelle von l .

Der Abstand zweier gegenüberliegender Momenten-nullpunkte ist die ideale Stützweite l_i .



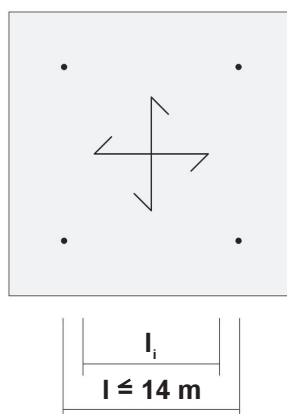
Eingerückte Umfanglagerung:

$$\frac{h}{l_i} = \frac{1}{10} \div \frac{1}{12} \quad l_i \approx 0,9 \div 0,7l$$



Eingerückte Randlagerung:

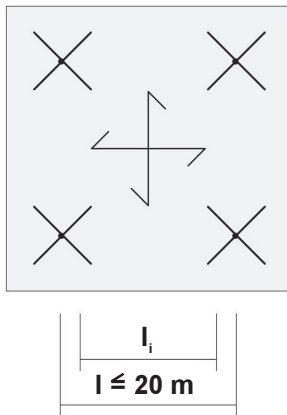
$$\frac{h}{l_i} = \frac{1}{8} \div \frac{1}{10} \quad l_i \approx 0,9 \div 0,7l$$



Eingerückte Ecklagerung:

$$\frac{h}{l_i} \approx \frac{1}{7} \quad l_i \approx 0,9 \div 0,7l$$

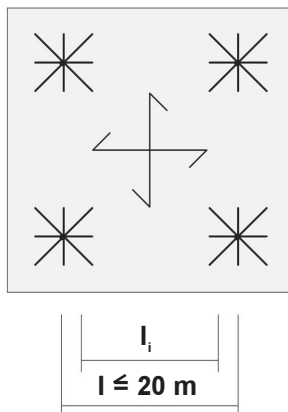
c) Einfeldplatten auf Baumstützen / Pyramidenstützenköpfe



Eingerückte Ecklagerung auf Pyramiden- oder Baumstruktur:

$$\frac{h}{l_i} \approx \frac{1}{8} \quad l_i \approx 0,8 \div 0,6l$$

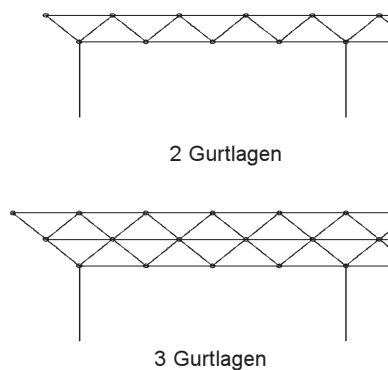
Aufteilung der Auflagerkräfte auf vier Knoten



Eingerückte Ecklagerung auf Pyramiden- oder Baumstruktur:

$$\frac{h}{l_i} \approx \frac{1}{8} \quad l_i \approx 0,7 \div 0,5l$$

Aufteilung der Auflagerkräfte auf neun Knoten



4.4.4 Anzahl der Gurtlagen

Die Leistungsfähigkeit der Tragroste kann durch Addition weiterer Gurtlagen gesteigert werden.

Diese Systeme ermöglichen die Überbrückung großer Spannweiten unter Berücksichtigung der Belastungsgrenzen für die Tragwerkelemente (z.B. Knickgefahr der Druckstäbe).

4.5 Näherungsverfahren zur Ermittlung des Verhältnisses von Spannweite zu Bauhöhe

Die statisch erforderliche Höhe h eines RSW kann überschlägig ermittelt werden unter Berücksichtigung der Ähnlichkeit mit dem Tragverhalten einer massiven Stahlbetonplatte.

Zur Berechnung von 2-, 3- oder 4-seitig gelagerten oder punktgestützten Platten über verschiedenen Grundrißformen wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Berechnungsverfahren entwickelt, die zum Teil auf der genauen Platten- oder Bruchlinientheorie und zum anderen auf diversen Näherungsannahmen (Stiglat / Wippel, Bittner, Czerny, Eisenbiegler, Hahn, Krug, H. Marcus, G. Markus, Pucher, u.a.) basieren.

Aus den Zahlenwerken oder graphischen Darstellungen der Schnittgrößen dieser Veröffentlichungen lassen sich mit genügender Genauigkeit die Momentennullpunkte herausgreifen und damit l_i .

Die Größen l_i in den beiden sich kreuzenden Hauptrichtungen sind ein Indiz für das Tragverhalten der Platte oder des RSW.

Sind die beiden l_i 's in den beiden Richtungen näherungsweise gleich groß, so trägt die Platte wie eine kreuzweise bewehrte Stahlbetonplatte in zwei Achsen mit annähernd gleichen Lastanteilen und gleichem Tragverhalten.

Unterscheiden sich die l_i 's in den beiden Richtungen sehr stark, so trägt die Platte näherungsweise nur noch wie ein einachsig gespanntes System, vergleichbar dem bei Randlagerung.

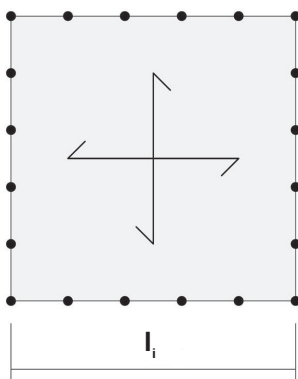
Beim zweiachsigen Tragverhalten, vergleichbar dem Verhalten bei Umfangslagerung, ist die erforderliche Bauhöhe $h = (1/10) \times l_i$ bis $(1/12) \times l_i$, bzw.:

$$\frac{h}{l_i} = \frac{1}{10} \div \frac{1}{12} \quad l_i \approx 0,9 \div 0,7l$$

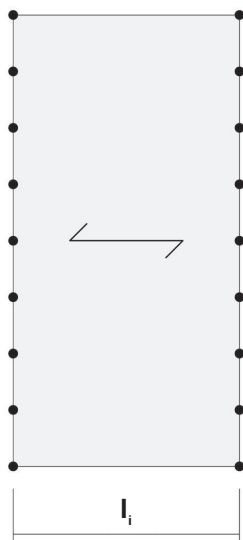
Bei einachsigem Tragverhalten, vergleichbar dem Verhalten bei Randlagerung, ist die erforderliche Bauhöhe $h = (1/8) \times l_i$ bis $(1/10) \times l_i$, bzw.:

$$\frac{h}{l_i} = \frac{1}{8} \div \frac{1}{10} \quad l_i \approx 0,9 \div 0,7l$$

So kann unter Verwendung der einschlägig bekannten Tabellenwerke zur Bemessung von Stahlbetonplatten über die ideelle Stützweite auch die Bauhöhe von räumlichen Stabtragwerken ermittelt werden.



Umfanglagerung



Randlagerung (parallel)

4.6 Hexagonale Systeme

Bisher wurden ausschließlich Knotenstabtragwerk - Typen untersucht, die sich aufgrund der Struktur ihrer Raumbausteine besonders für quadratische Raumfachwerk - Platten eignen.

RSW 1, 2 und 6 tragen ihre Lasten gleichmäßig zu den vier Längsseiten ab (drillweiche Platten), RSW 3, 4 und 5 zusätzlich über die Ecken der Platte (drillsteife Platten).

Darüber hinaus wurde für die quadratischen Raumfachwerk - Platten gezeigt, in welchen Grenzen sich die Stützweite durch Addition von Raumbausteinen, Vergrößerung des Rastermaßes und Änderung der Stützungsart variieren lässt.

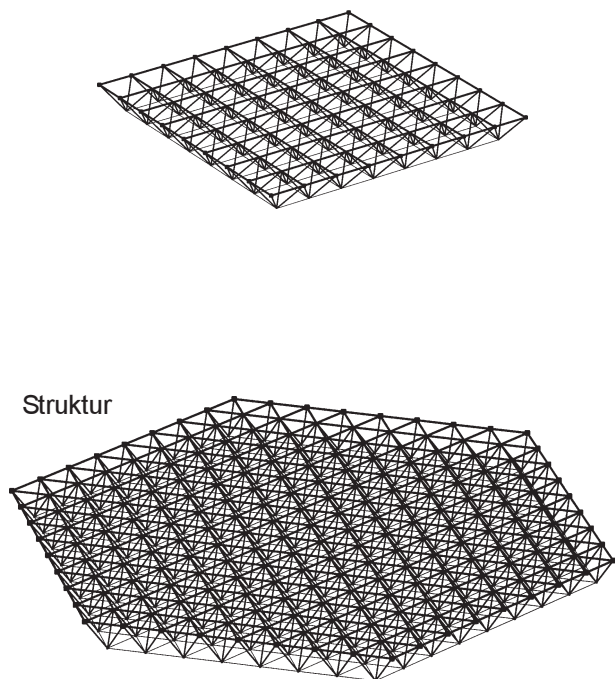
Eine weitere Tragwerksoptimierung ist durch die Änderung der Plattenform möglich.

Beispielhaft werden an einer hexagonalen Platte (RSW 7, Raumbaustein Oktaeder und Tetraeder) Struktur und Tragverhalten erläutert und in Bezug zu RSW 1 als Referenztragwerk gesetzt.

Dazu werden die für die quadratischen Systeme festgelegten Parameter - Belastung, Rastermaß und Material - beibehalten.

Die Strukturdaten von RSW 7 werden prozentual mit denen von RSW 1 verglichen. Dargestellt werden wie bei den quadratischen Raumfachwerk - Platten Struktur, Normalkräfte der Stäbe und elastische Anfangsverformung in 100facher Überhöhung.

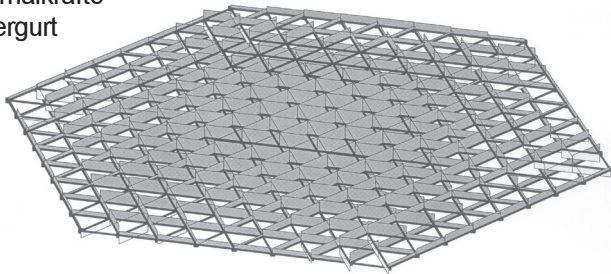
Die genauen Ergebnisse der Berechnung befinden sich im Anhang.



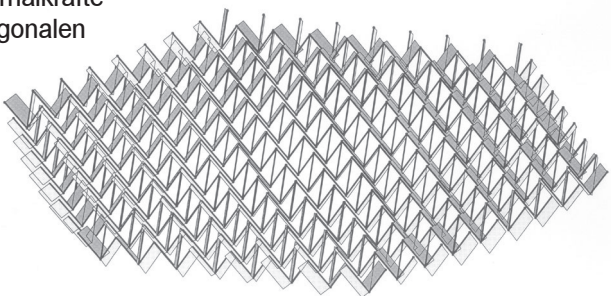
RSW 7 Strukturdaten

	RSW 7	RSW 1
Raumbaustein	Oktaeder + Tetraeder	(100 %)
Regelstablängen	1	
Rastermaß a	2,00 m	
Spannweite l	27,71 m	
überspannte Fläche	665 m ²	
stat. Höhe h	1,41 m (100%)	1,41
h/l	1/20 (55%)	1/11
Auflager	48 (150%)	32
Stäbe	1704 (333%)	512
Knoten	409 (282%)	145
Material S10	30,67m ³ (333%)	9,22

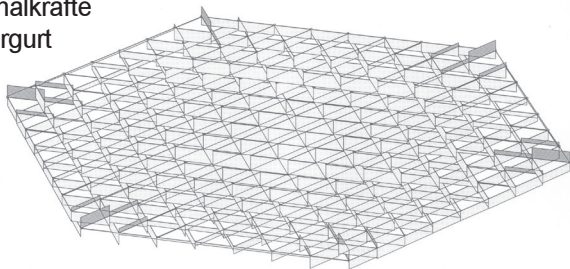
Normalkräfte
Obergurt



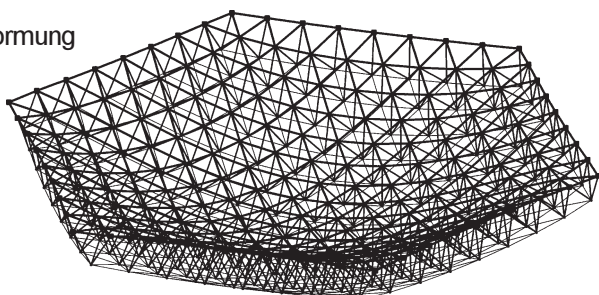
Normalkräfte
Diagonalen



Normalkräfte
Untergurt



Verformung



Statisches Verhalten

Die Lasten aus Eigengewicht und Schnee werden wie bei einer drillsteifen Platte gleichmäßig zu allen sechs Längsseiten und über die Ecken abgetragen (Drillwirkung).

Der Obergurt ist daher in Feldmitte druckbelastet, in den Eckbereichen bilden sich Zugzonen aus.

Die Auslastung der Kreuzbalken in der Mitte der Platte liegt bei 95%.

Dementsprechend ist der Untergurt in Feldmitte zug- und in den Eckbereichen druckbelastet. Hier ist die Belastungsgrenze der Induo - Verbundanker maßgebend, die in der Mitte der Platte zu 98% ausgelastet sind.

Aufgrund ihrer höheren Zugbelastbarkeit sind die Kreuzbalken im Untergurt maximal zu 58% ausgelastet.

Ebenso sind die Diagonalstäbe selbst im Randbereich der Platte, wo die Querkkräfte ihr Maximum erreichen, nur zu maximal 67% ausgelastet.

Über die Belastung aus Eigengewicht und Schnee hinaus können also horizontale Windkräfte aus der Fassade problemlos über die Raumfachwerkplatte übertragen werden.

Die elastische Anfangsverformung beträgt $l/630$, wobei das geringe Schwindverhalten der Kreuzbalken und die Setzung der Induo - Verbundanker noch unberücksichtigt sind.

Auswertung

Spannweiten über 28 m (d.h. Seitenlänge 16 m) sind mit RSW 7 bei den vorgegebenen Parametern nicht möglich.

Werden zusätzliche Raumbausteine addiert, versagen die Kreuzbalken des Obergurtes und die Induo - Verbundanker des Untergurtes, weil die Zugkräfte über 44 kN steigen.

Wird das Rastermaß a vergrößert, um bei gleicher Anzahl von Raumbausteinen eine größere Spannweite und statische Höhe zu erreichen, versagt der Obergurt, weil die zulässige Druckbelastbarkeit der Kreuzbalken aufgrund der größeren Knicklänge sinkt. Im Untergurt wird die Zugbelastbarkeit der Induo - Verbundanker ebenfalls überschritten.

Eine Reduktion des Untergurtes ähnlich wie bei RSW 2 ist zwar ohne wesentliche Änderung der statischen Eigenschaften möglich, setzt aber eine bestimmte Anzahl von Raumbausteinen voraus und führt zu ungleichmäßigen Seitenlängen (vgl. Kapitel 4.1.8).

Durch Variation der Auflagersituation, z.B. durch Einrücken der Stützen, läßt sich die Spannweite weiter erhöhen.

Es gelten hier die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten, die schon für die quadratischen Raumfachwerkplatten erläutert wurden.

5 Analyse und Wertung gekrümmter Knotenstabtragwerke

Räumlich gekrümmte Knotenstabtragwerke bilden auf Grund ihrer statischen Leistungsfähigkeit und ihrer gestalterischen Potentiale eine interessante Ergänzung zu den ebenen Knotenstabtragwerke. Da sie in gewissen Grenzen einlagig ausgebildet werden können, sind sie zudem auch wirtschaftlich eine Alternative.

Gewölbte Überdeckungen von Räumen in der Architektur haben schon wegen ihrer historischen Entwicklung einen spezifischen Charakter, der in jüngerer Zeit eine spannende Weiterentwicklung erfahren hat. Die räumliche und ästhetische Qualität dieser Tragstrukturen ist somit neben ihrer statischen Leistungsfähigkeit ein Hauptargument für ihre Anwendung.

Gekrümmte Stabtragwerke weisen in ihrem Tragverhalten und in ihrer Systematik Parallelen zu den Schalentragwerken auf. Die Erläuterung der grundlegenden Eigenschaften erfolgt daher zum besseren Verständnis zunächst an Hand der Massivschalen, bevor in den folgenden Kapiteln die einzelnen Konstruktionen erläutert werden.

5.1 Grundlagen gekrümmter Knotenstabtragwerke

5.1.1 Geometrie

Das Stabnetz

Für gekrümmte Knotenstabtragwerke ist der günstige Entwurf des Stabnetzes von statischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Die Wahl der Einteilungsmethode hängt von den Gegebenheiten im Einzelfall ab, was die Ausarbeitung eines geometrischen Konzeptes, passend für den jeweiligen Entwurf, erforderlich macht. Wichtig ist, daß Dreiecke gebildet werden, um eine Aussteifung des Systems zu gewährleisten.

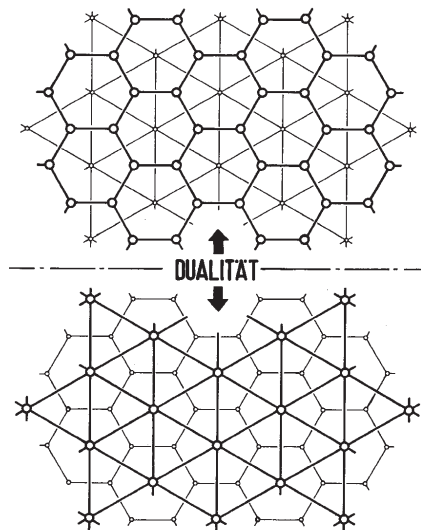
Optimierungsziel ist eine möglichst geringe Anzahl unterschiedlicher Knoten- und Stabtypen, die sich auch positiv auf die Herstellung der Eindeckelemente auswirkt.

Besonders doppelt gekrümmte Flächen erweisen sich hier als komplex.

Sekundärnetze

Sekundärnetze, also die Netze einer möglichen zweiten Stablage, sind meist ausgedünnte, geometrisch aus dem Primärnetz abgeleitete Strukturen.

Dazu nutzt man das geometrische Prinzip der Dualität¹. Zwei zueinander duale Netze gehen durch die Vertauschung der Ecken- und Flächeneigenschaften ineinander über.



Überlagerung der Dualen 3/6 und 6/3 Netze¹

Beispiel:

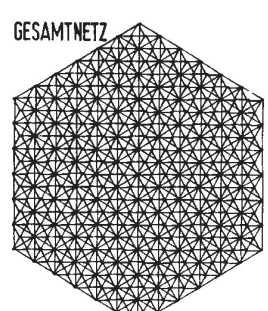
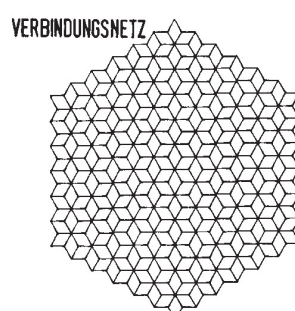
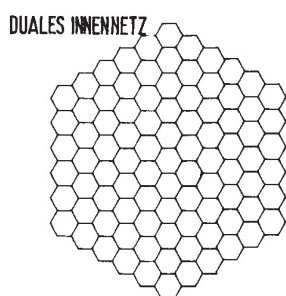
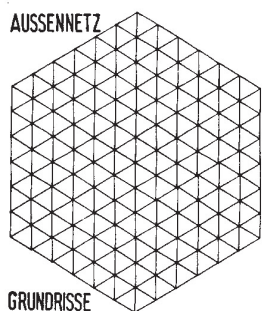
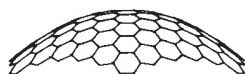
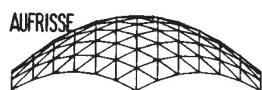
3/6 Sechsecknetz: an jedem Punkt laufen 3 Kanten zusammen,
an jede Fläche schließen 6 Kanten an.

dazu dual ist:

6/3 Dreiecksnetz: an jedem Punkt laufen 6 Kanten zusammen,
an jede Fläche schließen 3 Kanten an.

Bei der Überlagerung der beiden dualen Netze liegen die Punkte des einen Netzes über den Flächenmitten des anderen und umgekehrt.

Besonders wirtschaftlich erweist sich hier eine Ausdünnung des Sekundärnetzes, durch die u.U. die Hälfte der Stäbe und Knoten eines streng dualen Netzes eingespart werden können. Trotzdem weisen diese Konstruktionen meist noch eine ausreichende Steifigkeit auf, um eine Montage ohne große Hilfskonstruktionen durchzuführen.²

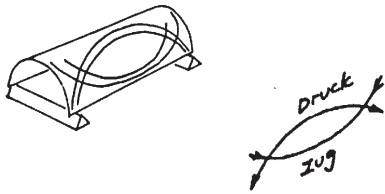


Beispiel eines zweilagigen Stabwerkes aus dualen Netzen²

5.1.2 Tragverhalten

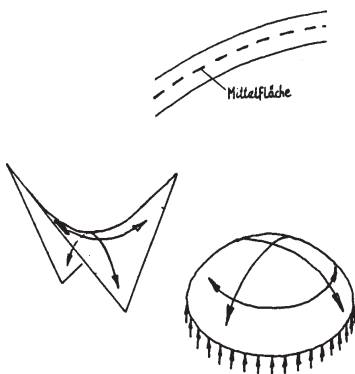
Schalen sind gekrümmte Flächentragwerke aus druck-, zug- und schubfesten Materialien. Man kann diese Konstruktionen nicht in Streifen oder andere Teile zerschneiden, ohne ihr Tragverhalten grundlegend zu verändern und ihre Tragfähigkeit zu verringern, denn die Kräfte verlaufen in verschiedenen, sich kreuzenden Richtungen über die Fläche³.

Beispiel Tonnenschale³



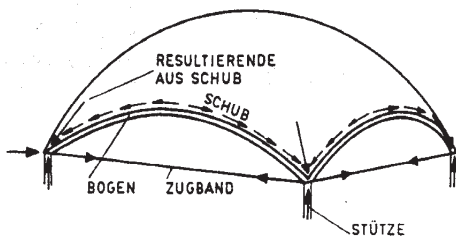
Die Lasten werden in Schalen vorwiegend über Druck-, Zug- und Schubkräfte in der Schalenfläche abgetragen. Wenn nur Druck-, Zug- und Schubkräfte in Richtung der Mittelfläche auftreten – also keine Biegemomente quer zu Mittelfläche – so besteht der sogenannte Membranspannungszustand. Er ist nur in doppelt gekrümmten Schalen möglich. Das Tragverhalten doppelt gekrümmter Schalen ist im allgemeinen günstiger, als das nur einfach gekrümmter⁴.

Beispiel doppelt-gekrümmte Schalen⁴



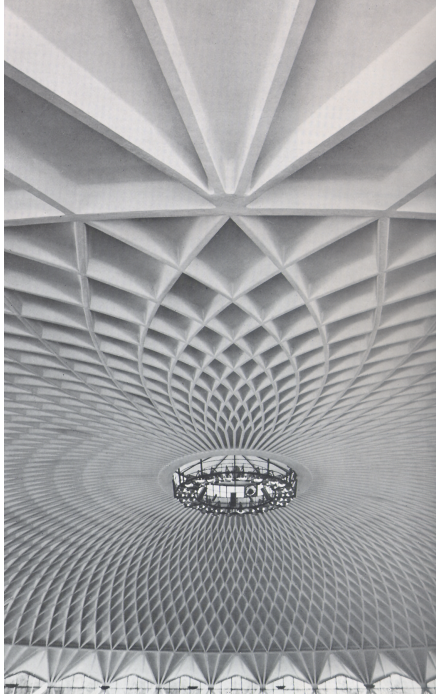
Jede Unterbrechung der Schale führt zu Störungen des Tragverhaltens. Jeder Rand bildet eine solche Unterbrechung. Meist müssen die durch den Rand unterbrochenen Kräfte dort durch eine Verstärkung – das Randglied – aufgenommen werden. Der Auflagerung einer Schale ist also besondere Aufmerksamkeit zu widmen⁶.

Beispiel einer Randausbildung mit den entstehenden Kräften⁵



Schalen sind besonders für die Aufnahme gleichmäßig verteilter Flächenlasten geeignet. Konzentrierte Einzellasten oder unsymmetrische Belastungen können zu Biegebeanspruchung des Schalenquerschnittes und zu seiner Destabilisierung führen⁶. Aus diesem Grund und wegen des geringen Eigengewichtes der Konstruktion, das z.B. bei Stabwerkskuppen nur ca. ein Drittel der für die Bemessung relevanten Stabkräfte ausmachen kann, ist die Festlegung der Lastannahmen für die Bemessung von großer Bedeutung⁷.

Ableitung der Stabwerke aus den Massivschalen

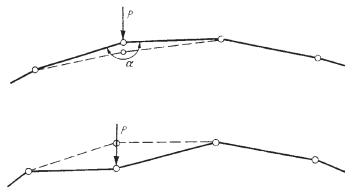


Palazzetto dello Sport, Rom
Stahlbetokuppel mit Rippenstruktur⁶

Die günstigen statischen Eigenschaften massiver Schalen führen bei der Bemessung der tragenden Fläche häufig zu solch geringen Dicken, daß die Stabilität der Fläche gegen unsymmetrische oder konzentrierte Lasten die Tragfähigkeit der Konstruktion begrenzen, und nicht die Festigkeit des verwendeten Materials.

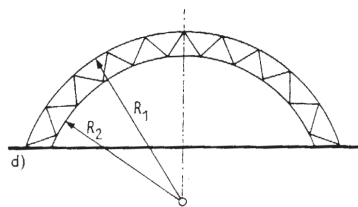
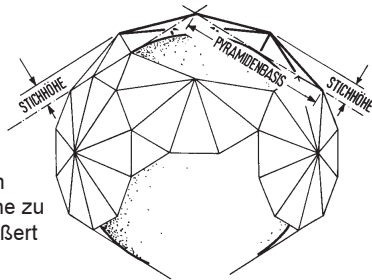
Um diesem Problem entgegenzuwirken kann man Aussteifungen in Form von Rippen einführen, die auch einen Teil der Schalenschnittgrößen übernehmen. Die Fläche zwischen den Rippen kann dafür wieder dünner werden. Die Weiterführung dieses Prozesses ist die Entwicklung eines Rippennetzes, das die Funktion der Schale übernehmen muß⁸. An diesem Punkt greifen die Netzwerkschalen an, bei denen nur noch die einzelnen Stäbe und nicht mehr die Flächenelemente tragen. Ihre Tragwirkung ist den Massivschalen ähnlich, jedoch bei geringerem Materialeinsatz und damit Gewichtsaufwand.

Weitere Vorteil gegenüber der Massivbauschale ist die einfache und schnelle Montage auf der Baustelle, da keine aufwendigen Gerüste oder Schalungen benötigt werden und die Einzelteile im Werk vorgefertigt werden können.

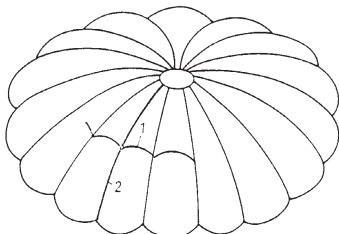


Knotendurchschlag unter konzentrierter Einzellast⁷

Bei besonders kleinem Verhältnis von Stichhöhe zu Pyramidenbasis vergrößert sich die Gefahr des Knotendurchschlags.⁸



Anordnung einer zweiten Stabebene bei gekrümmten Tragwerken.⁹



Das Prinzip der stärker gekrümmten Teilabschnitte eines gebogenen Tragwerkes ist auch auf Tonnen übertragbar (vgl. Kap 2.3.2).¹⁰

Knotendurchschlag

Ein Problem aller Schalen ist, daß sie auf konzentrierte Einzelasten empfindlich reagieren. Bei gekrümmten Stabwerken äußert sich dies in der Gefahr des Knotendurchschlages, wenn die Kontingenzwinkel der Stäbe an den Knoten rechtwinklig zur Netzfläche bei zunehmender Feingliedrigkeit zu klein werden⁹.

Besonders bei unsymmetrischen Belastungen, z. B. durch Wind, ist zudem eine höhere Steifigkeit des Tragwerkes herzustellen. Dazu bieten sich verschiedene Alternativen an¹⁰:

• Versteifung der Knoten:

Durch eine begrenzt biegesteife Knotenausbildung werden die Verformungen vermindert, und die Spannungsverteilung verbessert, da die Steifigkeit der Stäbe für Biegung aus der Netzebene heraus vergrößert ist¹².

• Austeifung durch zweite Stabebene¹³:

Dadurch werden die Knoten auch bei gelenkiger Ausführung gesichert und des Gesamtsystem versteift. Allerdings kann die zweite Lage sehr sparsam ausgeführt werden, da die Struktur kein planmäßigen Biegemoment erhält, denn auch die einlagige Struktur kann die planmäßigen Lasten abtragen¹⁴.

• Stärkere Krümmung:

Das Tragwerk kann aus mehreren stärker gekrümmten Teilen zusammengesetzt werden¹⁵.

Die Netzteilung sollte im Einzelfall aus den o.g. Gründen immer größtmöglich sein, da neben der Abnahme der statischen Stabilität die Zunahme der Konstruktionselemente sich wirtschaftlich negativ bemerkbar macht. Eine Zunahme der Knoten und Stabzahlen bedeutet eine Vermehrung des Fertigungs- und Montageaufwandes und eine Zunahme des Konstruktionsgewichtes, trotz gleichbleibender Größe des Baukörpers¹⁶.

Stabwerke sind im allgemeinen statische unbestimmte Systeme, da man sie aus konstruktiven Gründen und aus Gründen der Gesamtfestigkeit aus weitgehend gleichmäßigen Netzen aufbaut¹⁷. Bedingt durch die statische Unbestimmtheit haben die Stabwerke im allgemeinen eine große Toleranz und Restfestigkeit im Fall des Versagens einzelner Tragglieder (z.B. im Brandfall).

Abschätzung der Knotensteifigkeit

Gekrümmte Stabtragwerke stellen an die Knoten besondere Anforderungen. Soll das Tragsystem einlagig sein, so müssen Momente in begrenztem Umfang an den Knoten übertragen werden können, um die Steifigkeit des Systems zu gewährleisten. Durch die konstruktive Lösung der Stabinnenverschraubung (vgl. Kap. 6.2.3.1) kann die Stirnseite des Kreuzbalkens unter Vorspannung mit der Anschlußfläche des massiven Betonknotens in der Form fixiert werden, daß eine gewisse Biegesteifigkeit über diesen Anschlußpunkt übertragen werden kann.

Einlagige Stabnetzstrukturen sind nur bei gekrümmten Trägerflächen möglich, wenn die Spannweite bestimmte Grenzen nicht überschreitet. Diese Tragstrukturen sind vom Materialaufwand her sehr günstig.

Belastungsgrenzen eines Knoten-Stab-Anschlusses:

(Momentenbelastung für einlagige Systeme) mit Kreuzbalken und Induo - Verbundanker

Gegeben:

Kreuzbalken:	S 10
Querschnittsfläche:	$A = 100 \text{ cm}^2$, $b = h = 10 \text{ cm}$
Widerstandsmoment:	$W = 167 \text{ cm}^3$,
zul Spannung:	$\sigma_z = 0,85 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_B = 1,1 \text{ kN/cm}^2$

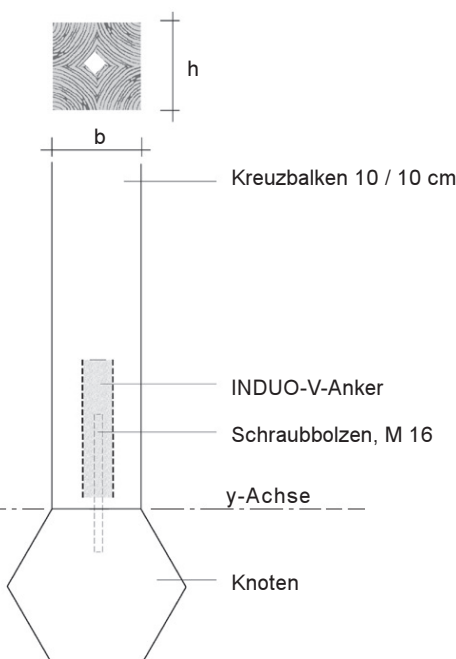
Daraus ergibt sich:

a) zulässiges Biegemoment des Kreuzbalkens

$$\begin{aligned} \text{zul } \sigma_B &= \frac{M}{W} \\ \Rightarrow M &= \sigma_B \times W \\ M &= 1,1 \times 167 = 183 \text{ kNcm} \\ M &= 1,83 \text{ kNm} \end{aligned}$$

b) zulässige Zugkraft des Kreuzbalkens

$$\begin{aligned} \text{zul } Z &= \sigma_z \times A \\ \text{zul } Z &= 0,85 \times 100 \\ \text{zul } Z &= 85 \text{ kN} \end{aligned}$$



Induo – Verbundankerbelastung¹⁸:

maximale Zugbelastung des Ankers: zul Z \approx 40 kN

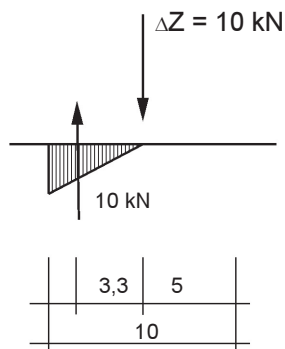
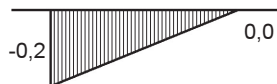
a)
Belastung aus
Vorspannung



b)
Biegebeanspruchung



Summe aus
a) und b)



Abschätzung der maximalen Biegebelastung:
(um y-Achse effektiv aufnehmbares Moment: eff M):

Anschlagskraft (Druck) des Stabes an den Knoten bei
Montage: 40 kN

Annahme:

Effektive Belastung (Zug) des Ankers: 30 kN

Kraftdifferenz (Druck):

$$\Delta Z = -40 + 30 = -10 \text{ kN}$$

Spannung aus ΔZ :

$$\sigma_{\Delta} = \frac{10 \text{ kN}}{100 \text{ cm}^2} = 0,1 \text{ kN/cm}^2$$

Ermittlung der Biegebelastung M_k für nicht klaffende Fuge:
Spannung:

$$\sigma_{\Delta} = z \cdot \sigma_B = 0,1 \text{ kN/cm}^2$$

Daraus folgt:

$$M_k = 0,1 \text{ kN/cm}^2 \times 167 \text{ cm}^3$$

$$M_k = 17 \text{ kNcm} = 0,17 \text{ kNm}$$

Ermittlung der Biegung M_{of} für geöffnete (klaffende) Fuge bis
Stabmitte:

$$M_{of} = 10 \text{ kN} \times 0,033 \text{ m} = 0,33 \text{ kNm}$$

Hieraus folgt (gemittelt) das effektiv aufnehmbare
Moment, M_{ef} , das am Knotenpunkt übertragen werden
kann:

$$M_{ef} = \frac{(M_k + M_{of})}{2}$$

$$M_{ef} = \frac{(0,17 + 0,33)}{2}$$

$$M_{ef} = 0,25 \text{ kNm}$$

Fußnoten zu Kap. 5.1:

- ¹ Emde, 1979, S. 10, 20, 57
- ² Klimke, 1983, S. 260, sowie Stahlbau 9/83, S. 257 - 262
- ³ Krauss, Seminarreader, S. 1
- ⁴ Krauss, Seminarreader, S. 4
- ⁵ Krauss, Seminarreader, S. 4; Heinle / Schlaich, 1996, S. 212 f
- ⁶ Führer / Gerhardt, 2000, S. 53
- ⁷ Klimke, Kemmer, Rennon, Stahlbau 1/89, S. 1
- ⁸ Klöppel / Schardt, Stahlbau 5/62, S. 129
- ⁹ Klöppel / Schardt, Stahlbau 5/62, S. 130
- ^{10, 11} Makowski, 1963, S. 84 f
- ^{12, 13} Klöppel / Schardt, Stahlbau 5/62, S. 130
- ¹⁴ Schmiedel: Klimke, 1995, S. 169
- ¹⁵ Klöppel / Schardt, Stahlbau 5/62, S. 130
- ¹⁶ Emde, 1979, S. 49
- ¹⁷ Rühle, 1970, S. 69
- ¹⁸ Blaß & Eberhart, Gutachten, Karlsruhe, 15.03.2000

Abbildungen zu Kap. 5.1:

- ¹ Emde, 1979, S. 20
- ² Emde, 1979, S. 53
- ³ Krauss, Seminarreader, S. 1
- ⁴ Krauss, Seminarreader, S. 4
- ⁵ Rickenstorf, 1972, Blatt 6.02
- ⁶ Joedicke, 1962, Bd 2, S. 116
- ⁷ Rühle, 1970, Bd. 2, S. 64
- ⁸ Emde, 1979, S. 41
- ⁹ Büttner / Hampe, 1985, S. 247
- ¹⁰ Büttner / Hampe, 1985, S. 255

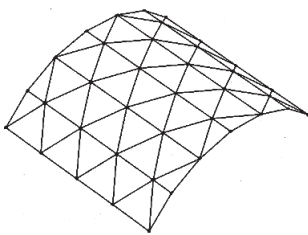
5.2 Stabwerktonnen

5.2.1 Grundlagen

Stabwerktonnen sind einfach gekrümmte Tragwerke, die besonders für weitgespannte Dachkonstruktionen geeignet sind¹.

Im 19. Jahrhundert erhielt die Tonne, die vorher nur in massiven Gewölben zum Einsatz kam, als günstiges Tragwerk für die längsorientierten, weitspannenden Bahnhofs- und Ausstellungshallen eine neue Bedeutung. Die Weiterentwicklung vom hierarchischen Tragsystem zur echten Tonnenschale leiteten W. Bauersfeld, F. Dischinger und U. Finsterwalder in den zwanziger Jahren ein.² In jüngerer Zeit hat eine Entwicklung zu transparenten, aufgelösten Strukturen stattgefunden, die die Schalentragswirkung der Tonne zur Reduzierung des Tragsystems nutzen.

Frühe Untersuchungen zu Stabwerktonnen stellte A. Föppl Ende des 19. Jahrhunderts an³; heute sind Spannweiten über 80 m in Stahl denkbar,⁴ wobei der Einsatz von Holzstrukturen mit Induo – Verbundankern auf bis zu 40 Meter beschränkt bleiben sollte.



Kreissegmenttonne mit Dreiläufigem Stabnetz



Verschiedene Querschnittsformen für Tonnentragwerke

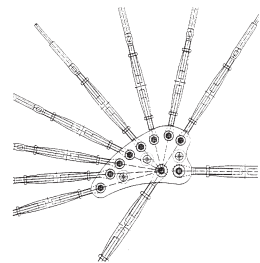
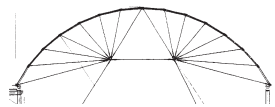
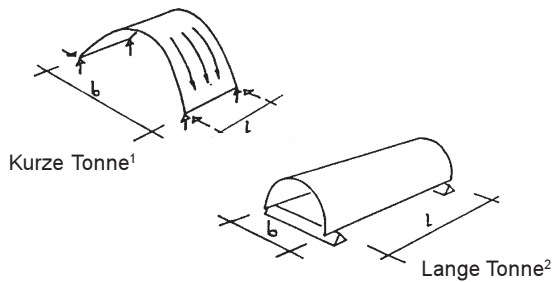
• Geometrie

Durch die Abwickelbarkeit der Tonnen ist die Einteilung ihrer Oberfläche in gleichmäßige Netze unkompliziert.

Einlagige Systeme lassen sich meistens mit einem Stab- und Knotentypen umsetzen, wobei im Randbereich häufig Sonderstablängen erforderlich werden. Am wirtschaftlichsten sind rechteckige Grundrisse, aber auch über ungleichmäßige Grundrissen können Tonnen gelegt werden. Dann treten durch die Verzerrung allerdings, entsprechend der komplizierteren Geometrie, größere Typenzahlen auf.

Aus statischen Gründen haben sich dreiläufige Netzstrukturen bewährt⁶, da diese als Grundmodul aus steifen Dreiecken zusammengesetzt sind; aber auch andere Muster sind denkbar.

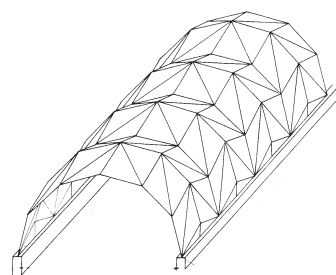
Im Querschnitt kann die Tonne vielfältige Formen annehmen, jedoch haben sich Kreisbögen und Parabelformen aus ästhetischen und statischen Gründen durchgesetzt⁶.



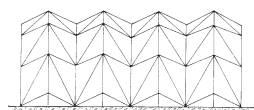
Aussteifung durch Seilspinne³



Aussteifung durch Bogen⁴



Aufgefaltete Stabwerktonne⁵



• Tragverhalten

Zu unterscheiden sind lange und kurze Tonnenschalen. Die kurze Tonne ist mindestens doppelt so breit wie lang. Die Kräfte werden wie in einem Gewölbe entlang der Stützlinie abgetragen.

Lange Tonnenschalen sind mindestens doppelt so lang, wie breit⁷.

Damit eine Massivtonne ihre günstige Schalenwirkung entwickeln kann, und nicht wie ein Gewölbe die Kräfte schwerpunktmäßig entlang der Stützlinie abträgt, muß sie doppelt so lang wie breit sein.

Die Kreiszylinderschale weist einen geringeren Anteil an Wölbkräften, also Kräften tangential zur Krümmung auf, wodurch ihr statisches Verhalten günstiger ist, als beim parabolischen Querschnitt⁸. Bei parabolischen Tonnenquerschnitten werden die Kräfte verstärkt zu den Längsrändern abgetragen, die dann die Lasten in konzentrierter Form zu den Auflagern transportieren müssen. Bei Kreiszylindern ist die Schalenwirkung, also eine Lastabtragung über die Fläche, besser aktiviert.

Auch die Form der Auflagerung bestimmt das Tragverhalten maßgeblich, da je nach Lagerung Kräfte-maximierungen in einzelnen Zonen auftreten. Letztendlich ist jedoch die Form der Tonne entscheidender für die Tragwirkung (vgl. Kap. 5.2.3 Berechnung).

Damit die Tonne kinematisch starr wird, müssen die Stirnseiten der Tonnen geschlossen werden⁹. Dies kann über steife Wandscheiben erfolgen, durch Seilverspannungen in Form von Spinnen, oder das Einsetzen von steifen Bögen¹⁰.

Stabwerktonnen werden aus konstruktiven Gründen und aus Gründen der Gesamtfestigkeit meist statische unbestimmte Systeme sein¹¹. Bei ideal gelenkigen Stabanschlüssen können Fachwerktonnen auch, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind, als statisch bestimmte Systeme berechnet werden¹².

Um der Gefahr des Knotendurchschlags bei einlagigen Strukturen zu begegnen bietet sich bei Stabwerktonnen neben steifen Knoten die Möglichkeit, zwei Fachwerkscheiben zu verweben. Dazu wird jede Rippe um einen Betrag über die Nachbarrippe angehoben. Die so aufgefaltete Tonne ist sehr steif, allerdings ergeben sich dadurch größere Probleme bei der Eindeckung¹³.

5.2.2 Klassifizierung der Stabwerktonnen

Zur Vereinfachung wird die Klassifizierung am abgewickelten Netz vorgenommen, die Querschnittsform der Tonne ist durch ihre einfache Krümmung von untergeordneter Bedeutung für die Geometrie.

• Ausgesteifte Rechtecknetze

Definition:

Die vierseitigen Stabfelder werden durch Diagonalen ausgesteift. A. Föppl führte seine Überlegungen zu den "Tonnenflechtwerkdächern" an diesem System aus¹⁴. Heute ist diese Struktur zu Quadratnetzen weiterentwickelt worden, die durch Verzerrung ihrer Felder fließende Übergänge zu anderen geometrischen Formen zulassen¹⁵.

Geometrie:

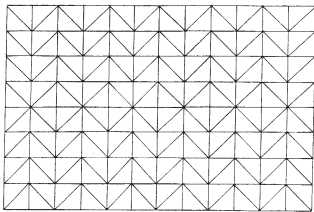
Die Grundform der Felder ist meist quadratisch oder rechteckig und zur Vereinfachung parallel zu den Rändern der Tonne geführt. Um eine statische Festigkeit zu erzielen sind die Felder mit Diagonalen versehen.

Bei quadratischem Grundraster und Seildiagonalen kann dieses System mit nur einer Stablänge umgesetzt werden, auch ohne Sonderstablängen am Rand. Wird die Aussteifung der Felder über durchgehende Seile gewährleistet, die nur festgeklemmt werden müssen, entfällt zudem den Zuschnitt der Diagonalstreben.

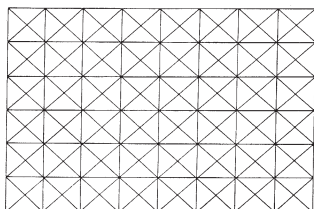
Tragverhalten:

Über kleinen Grundflächen ist dieses System auch mit biegesteifen Stabverbindungen ausführbar¹⁶. Dichte und Richtung der Diagonalstäbe kann an die statischen Erfordernisse angepaßt werden.

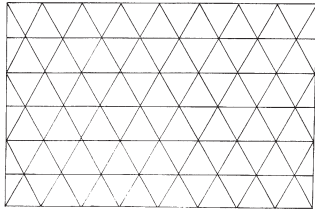
Über das Tragverhalten dieses Tonnentypes, der in leicht abgewandelter Form als Stahlnetze in jüngerer Zeit häufig angewandt wurde, sei auf Untersuchungen aus dem Büro Schlaich, Bergemann und Partner verwiesen¹⁷.



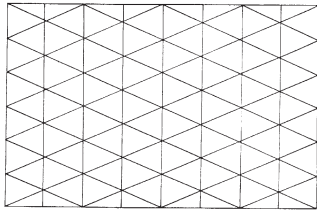
Rechtecknetz mit einer Diagonalen⁶



Rechtecknetz mit zwei Diagonalen⁷



dreiläufiges Netz, Längsausrichtung⁸



dreiläufiges Netz, Querausrichtung⁹

- **Dreiläufige Stabroste**

Definition:

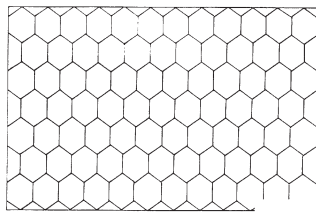
Drei, in verschiedene Richtungen verlaufende Stabscharen bilden ein gleichseitiges Dreiecksnetz.

Geometrie:

Meist wird eine Stabrichtung parallel zu einem der Ränder gelegt, die anderen verlaufen dann im 60° -Winkel dazu. Am Rand treten zwei Sonderstablängen auf, ansonsten sind die Stäbe gleich lang.

Tragverhalten:

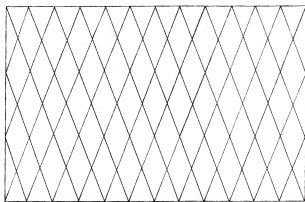
siehe Kap. 5.2.3 Berechnung



Sechsecknetz¹⁰

- **Andere Netze**

Sechsecknetze, rautenförmige Muster u.a. benötigen weitere aussteifende Elemente. Dies übernehmen entweder die Eindeckung oder weitere Netzebenen.



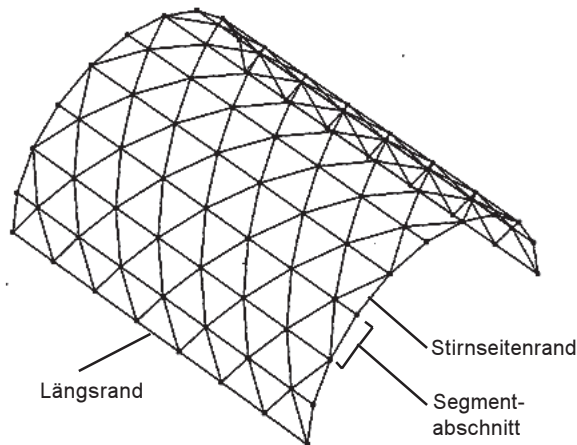
Netz mit rautenförmigen Feldern¹¹

Fußnoten zu Kapitel 5.2.:

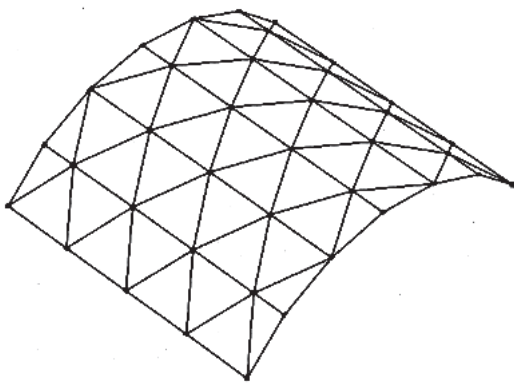
- ¹ Makowski, 1963, S. 82
- ² Knippers, 1998, S. 298
- ³ Föppl, 1892, S. 102
- ⁴ Makowski, 1963, S. 84
- ⁵ Makowski, 1963, S. 88
- ⁶ Rühle, Bd. 2, 1970, S. 69, Krauss, Seminarreader, S. 27
- ⁷ Krauss, Seminarreader, S. 26
- ⁸ Krauss, Seminarreader, S. 27
- ⁹ Rühle, Bd. 2, 1970, S. 69
- ¹⁰ Makowski, S. 84,
- ¹¹ Rühle, 1970, S. 69
- ¹² Makowski, 1963, S. 84 f.; Föppl, 1892, S. 101
- ¹³ Rühle, 1970, S. 70
- ¹⁴ Föppl, 1892, S. 100 f
- ¹⁵ Schlaich, Bergermann und Partner: Museum für Hamburgische Geschichte, db, Heft 7/90
- ¹⁶ Makowski, 1963, S. 84
- ¹⁷ Knippers, 1997 und 1998; Schober, 1994; Schlaich, 1992

Abbildungen zu Kapitel 5.2:

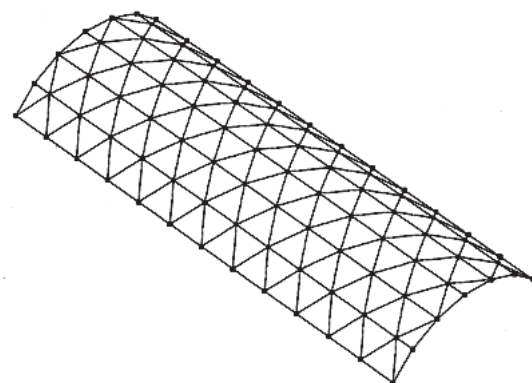
- ¹ Krauss, Seminarreader, S. 28
- ² Krauss, Seminarreader, S. 26
- ³ Hochbauamt Augsburg (Arch.), 2000, S. 22
- ⁴ Knippers, 1998
- ⁵ Makowski, 1963, S. 103
- ^{6 - 11} Makowski, 1963, S. 102



Halbkreistonne



Kurze Segmenttonne



Lange Segmenttonne

5.2.3 Berechnung von Stabwerktonnen

Grundlagen der Berechnungen

Tonnentragwerke finden als Konstruktionstypus in vielen Bereichen der Architektur und des Bauwesens Anwendung. In der Regel wird beabsichtigt, die statischen Vorzüge der Schalenwirkung oder des Stützlinienprinzips bei bogenförmigen Tragwerken für möglichst große Spannweiten zu nutzen. Die Stabwerktonne hat im Gegensatz zu tonnenförmigen Massivschalen den Vorteil der Materialminimierung und damit ökonomische sowie auch statische Vorzüge.

Anhand mehrerer Berechnungsmodelle wird die Anwendbarkeit der INDUO-Verbundankertechnik in Bezug auf Stabwerktonnen untersucht. Graphische Ergebnisse sind auf der linken Seite auszugsweise dargestellt, genauere Daten sind im Anhang, Kapitel „Stabwerktonne“ grafisch zusammengestellt. Die Maximalwerte der einzelnen Berechnungsvarianten sind der Tabelle auf Seite 94 zu entnehmen.

Die Halbkreistonne sowie die Kreissegmenttonne dienen als geometrische Vorgabe. Grundsätzliche Ergebnisse bezüglich Tragverhalten und Verformungen lassen sich ansatzweise auf komplexere Tonnengeometrien übertragen.

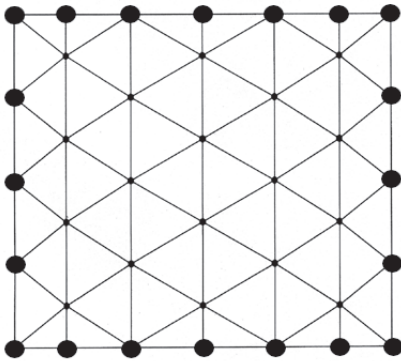
Als Netztyp wird ein dreiläufiges Stabrost mit horizontal durchlaufenden Segmentabschnitten gewählt, um die Anzahl der zu verwendenden Stabtypen zu minimieren. Die Ausbildung der Stirnseitenränder erfordert zwei unterschiedliche Stablängen, die komplette innenliegende Netzstruktur ist dagegen nur aus einem Stabtypus zusammengesetzt. Jeweils drei Stäbe bilden ein gleichseitiges Dreieck. Die knotenförmigen Anschlußpunkte zwischen den Stäben lassen sich einheitlich ausbilden.

Die Stabwerktonnen sind in den Berechnungen jeweils umlaufend, linienförmig oder an der Eckpunkten aufgelagert. Als Standardlastfall wird die Kombination Eigenlast und Schnee mit $1,5 \text{ kN/m}^2$ pauschal angesetzt. Die Lastenleitung erfolgt punktuell in den Knoten. Der Stabquerschnitt liegt bei allen Modellen mit einer Ausnahme bei zweilagigen Systeme bei $10/10 \text{ cm}$.

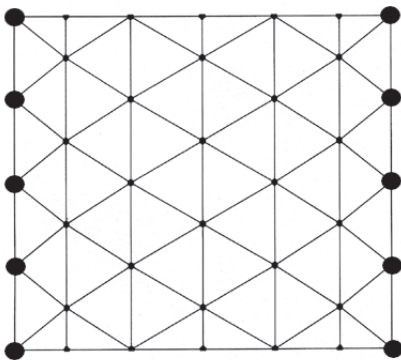
Parameter für die Berechnungen

Die untersuchten Modellvarianten ergeben sich aus der Kombination folgender Parameter:

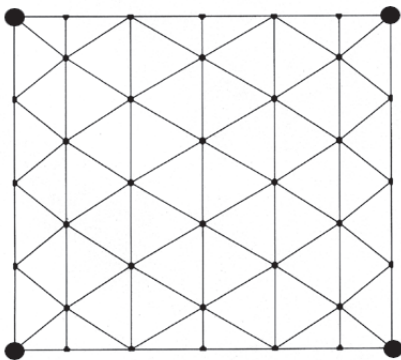
1. Trägerlagen: einlagig, zweilagig
2. Querschnittsform: Halbkreistonne, Segmenttonne
3. Grundrißgeometrie: quadratische Tonne, lange Tonne, (Länge > 2 x Breite)
4. Auflagerungsarten: Umfangslagerung
Parallellagerung
Eckpunktlagerung
5. Lastannahmen: Eigenlast und Schnee, Wind



Umfangslagerung



Parallellagerung



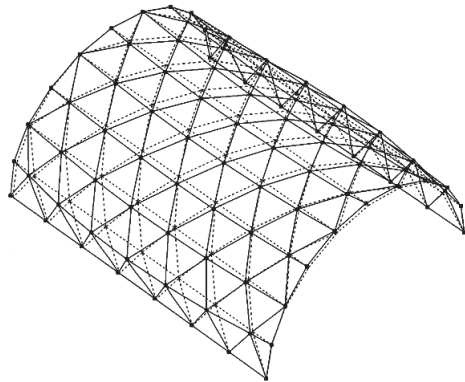
Eckpunktlagerung

Der Lastfall Wind wird entsprechend der DIN 1055 T4 exemplarisch an einer Segmenttonne untersucht. Dabei erfährt die gesamte Tonnenfläche Sogwirkung. Die Überlagerung mit dem Lastfall Eigenlast hat gezeigt, daß die Beanspruchung der Tragelemente positiv beeinflusst wird. Die Werte der zu erwartenden Normalkräfte und Biegemomente nehmen ab. Die Abnahme führt aber nicht zu einer grundlegenden qualitativen Änderung der Beanspruchung der einzelnen Tragelemente. Aus diesem Grund ist als ungünstigster Lastfall für die folgenden Berechnungen ausschließlich der Lastfall Eigenlast und Schnee angesetzt.

Die Einflüsse der einzelnen Parameter liefern in Verbindung mit den spezifischen Eigenschaften des Knoten-Stab-Gefüges, Betonmassivknotenanschluß mit rückwärtiger Verschraubung (vgl. Kap. 6.2), verschiedene Ergebnisse. Diese geben Aufschluß über die Haltbarkeit bzw. die Tragfähigkeit und die Brauchbarkeit bzw. Verformung des Gesamttragwerkes sowie über einzelne Bauteilbeanspruchungen.

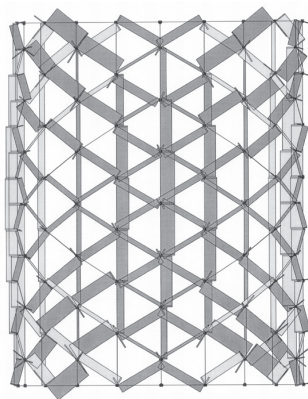
Überschlägige Aussagen zu möglichen Spannweiten und Träger- bzw. Stichhöhen lassen sich aus den Berechnungsmodellen ableiten.

5.2.3.1 Einlagige Systeme - Ergebnisse aus den Berechnungen



Halbkreistonne mit Umfangslagerung - Verformung

Bei gekrümmten Tragwerken mit einer Trägerlage stellen die Knotenpunkte die eigentliche Schwachstelle dar. Am Knoten-Stab-Anschluß muß neben der zu erwartenden Längskraft die Änderung der Krafrichtung, die sich aus der Verkippung der Segmentflächen ergibt, durch Biegung, also durch Momentenbeanspruchung übertragen werden. Diese Beanspruchungsform erfordert eine entsprechende, möglichst biegesteife Ausbildung des Anschlußpunktes. Das Maß der durch die Knotenpunkte zu erbringenden Biegesteifigkeit wird in den Berechnungen abgemindert, um einen realistischen Bezug zur statischen Komplexität des Knoten-Stab-Gefüges zu erreichen (Knotenanschluß für einlagige Systeme siehe auch Kapitel 6.2.3.1). Es ergibt sich für die Biegebeanspruchung am Knoten ein maximal aufnehmbares Moment ein Wert von 0,25 kNm (Erläuterung siehe Kapitel 5.1.2).

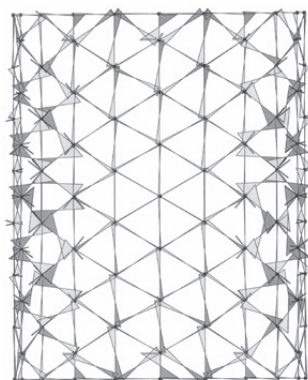


Halbkreistonne mit Umfangslagerung - Normalkräfte

• Halbkreisförmige Tonne

Grundriß annähernd quadratisch

Spannweite:	12,73 m
Stichhöhe:	6,36 m
Stablängen:	(2,30 m; 1,98 m; 1,15 m)
Anzahl der Segmentflächen:	10 (achsensymmetrisch)
Länge:	16,10 m
Anzahl der Stäbe:	139 (119; 20; 10)
Anzahl der Knoten:	60



Halbkreistonne mit Umfangslagerung - Momente

Umfangslagerung

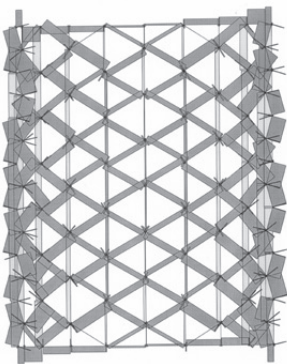
Die Umfangslagerung führt zu einem ähnlichen Tragverhalten wie bei einem Biegebalken. Die Stirnseiten werden als Hauptauflagerungspunkte herangezogen. Die Kräfte aus den Lasten folgen sozusagen dem kürzesten Weg, der zu den Stirnseiten führt. Im oberen Bereich der Tonne bildet sich eine Druckzone aus, während die Randbereiche an den Längsseiten Zug aufnehmen. Die Druckstäbe in der oberen Mittellage werden mit annähernd 100% ausgelastet. Es stellt sich die klassische Spannungsverteilung eines auf Biegung beanspruchten Trägers ein. Nur wenig Last wird über Wölbkräfte abgetragen. Die Umfangslagerung bedingt eine hohe Momentenbeanspruchung in den Randbereichen der Tonne. Der Knoten-Stab-Anschluß wird bis zu 95% ausgelastet.

Parallellagerung

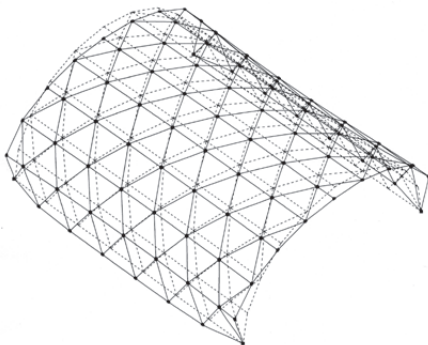
Die Parallellagerung erzeugt größere Horizontalschübe an den Auflagern. Durch das Wegfallen der Auflager in den Stirnseitenbereichen stellt sich ein überwiegend stützlinien-nahes Tragverhalten ein. Die Normalkraftbeanspruchung ist in den von einer Seite zur anderen Seite schraubenförmigen, vollständig durchlaufenden Bogenabschnitten sehr homogen. Die Maximalwerte liegen bei ca 50% der Druckbelastbarkeit. An den Stellen, wo die schraubenförmigen Bogenabschnitte in die Stirnseitenränder laufen, ergeben sich hohe Momentenbeanspruchungen, da dort die Kraft in den freien Stirnseitenrand umgelenkt werden muß. Die Maximalwerte sind um das 8-10 fache höher als bei der umlaufend gelagerten Halbkreistonne und liegen weit über den Beanspruchungsgrenzen. Bei der Parallellagerung erhöht sich die Gefahr des Beulens in den randnahen Bereichen. Die Längsstäbe werden hier auf Zug beansprucht, um der Querverformung entgegenzuwirken. Hier ergeben sich durch Zwängungen ähnlich hohe Momente wie an den Stirnseitenrändern.



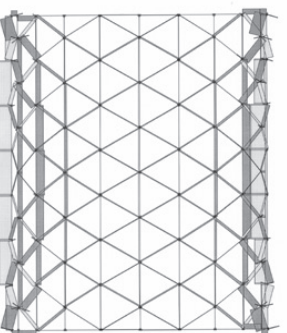
Halbkreistonne mit Parallellagerung - Verformung



Halbkreistonne mit Parallellagerung - Normalkräfte



Halbkreistonne mit Eckpunktlagerung - Verformung



Halbkreistonne mit Eckpunktlagerung - Normalkräfte

Eckpunktlagerung

Die Auflagerung in den Eckpunkten erhöht die Beanspruchung der einzelnen Tragelemente deutlich. Das homogene Zusammenspiel von Wölb- und Tangentialkräften entsprechend der Schalenwirkung wird ansatzweise im oberen Bereich der Tonne sichtbar. Hier sind die Längskräfte homogen und durch die Stäbe aufnehmbar. Die längsrandnahen Stäbe hingegen wirken zusammen als parallelgurtiger Fachwerkträger. In dessen Druckzone sind die Normalkräfte mit etwa 80 kN sehr hoch und weit über den Grenzen der Beanspruchbarkeit. Die ebenfalls sehr hohen Zugbeanspruchungen im unmittelbaren Randbereich bestätigen die Neigung des Beulens. Dies wird auch im Verformungsbild deutlich.

Ergebnis

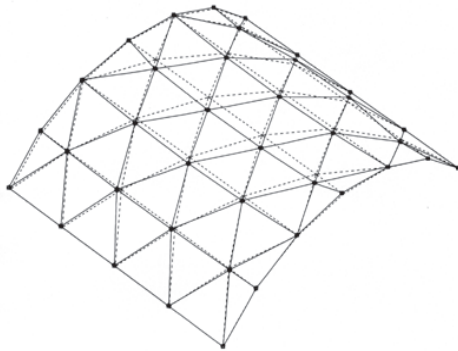
Die Halbkreistonne ist durch ihr ungünstiges Verformungsverhalten im Längsrandbereich gekennzeichnet. Die Gefahr des Ausbeulens kann durch die Aktivierung der Schalenwirkung nicht gemindert werden, da die Stabwerktonne die Aktivierung der „Fläche“ zur Lastabtragung nur ansatzweise zuläßt. Es bilden sich vor allem biegebalkenähnliche Zonen, durch die beschränkte Länge kaum Zonen einer stützliniennahen Tragwirkung aus. Bei einer langen, an den Längsseiten gelagerte Tonne würden die stützliniennahe Lastabtragung durch viele schraubenförmigen, durchlaufenden Bogenabschnitte erhöht, problematisch bleibt die Funktion der Stirnseiten, wenn sie nicht gehalten werden.

Die Momentenbeanspruchung ist an diesen Stellen hoch, da die Normalkräfte der im Stirnseitenrand endenden Bogenabschnitte aufgenommen werden müssen. Die Konstruktion eines entsprechenden Knoten-Stab-Anschlusses würde zu einer starken Querschnittsvergrößerung der Stäbe führen, um einen ausreichenden biegesteifen Anschluß zu erreichen.

- **Segmentförmige Tonne -**
Grundriß annähernd quadratisch

Das Tonnensegment ist aus der Geometrie der Halbkreistonne abgeleitet. Dabei wird die Halbkreistonne an den beiden Längsrändern jeweils um 2 Segmentflächen reduziert. Entsprechend gering ist die Verkürzung der Spannweite, die Stichhöhe reduziert sich auf zirka 40%. Durch die Verringerung entstehen größere Horizontalbeanspruchungen an den Auflagerpunkten.

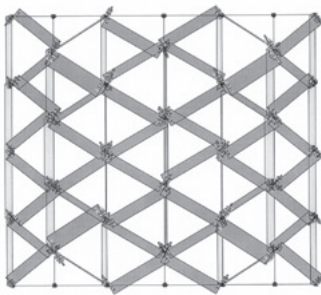
Spannweite:	10,27 m
Stichhöhe:	2,75 m
Stablängen:	2,30 m (1,98 m / 1,15 m)
Anzahl der Segmentflächen:	6 (achsensymmetrisch)
Länge:	9,20 m
Anzahl der Stäbe:	91 (73/12/6)
Anzahl der Knoten:	38



Segmenttonne mit Umfangslagerung - Verformung

Umfangslagerung

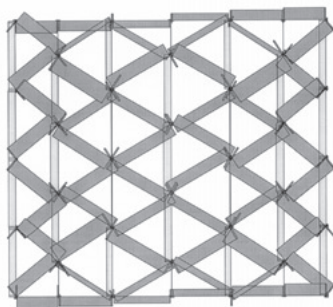
Die Abtragung der Lasten erfolgt stützliniennaher als bei der Halbkreistonne. Der Anteil der Wölbkräfte ist hoch. Die Druckstäbe werden sehr gleichmäßig belastet, die Auslastung liegt bei zirka 50%. Die Tragwirkung in Längsrichtung ist im Verhältnis sehr klein, wenn von der Zugzone im unteren Randbereich abgesehen wird. Die Biegemomente an den Knotenpunkten sind gleichmäßig und führen zu einer Knotenauslastung von zirka 80%. Die Gefahr des seitlichen Beulens ist wesentlich geringer als bei der Halbkreistonne.



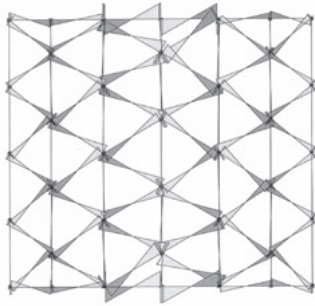
Segmenttonne mit Umfangslagerung - Normalkräfte

Parallellagerung

Der freie Stirnseitenrand erzeugt Zugkräfte in Längsrichtung, um den Druck aus den dort endenden Bogenabschnitten aufzunehmen. Zur Herstellung des Kräftegleichgewichts bildet sich dieser als Stützbogen aus. Die Momente sind in den Anschlußpunkten des Stirnseitenrandes, ähnlich der Halbkreistonne, wesentlich höher als an den innenliegenden Knoten, deren Auslastung bei etwa 100% liegt. Die Werte am Rand dagegen sind etwa doppelt so groß wie zulässig. Aufgrund der starken Streuung am Stirnseitenrand sind diese Werte wenig



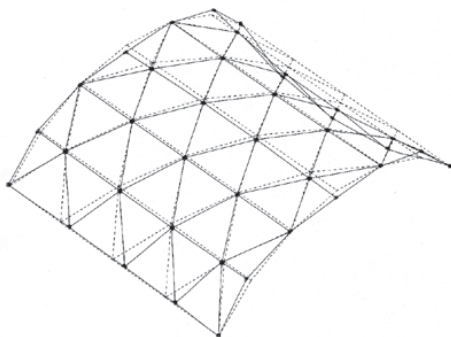
Segmenttonne mit Parallellagerung - Normalkräfte



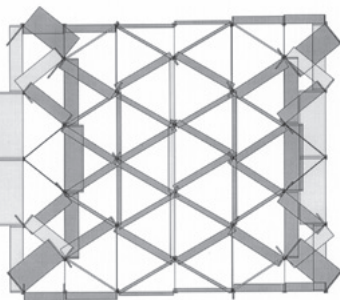
Segmenttonne mit Parallellagerung - Momente

repräsentativ. Eine Verstärkung des Randbereiches könnte dafür sorgen, ein Versagen der Knoten-Stab-Anschlüsse in dieser Zone zu verhindern.

Die im Innenbereich überwiegend auf Druck beanspruchten Stäbe erreichen maximal 45% Auslastung. Die Lastabtragung folgt hier primär nach dem Stützlinienprinzip. Die Zugzonen im Längsrandbereich verhindern eine starke Verformung durch Ausbeulen.



Segmenttonne mit Eckpunktlagerung - Verformung

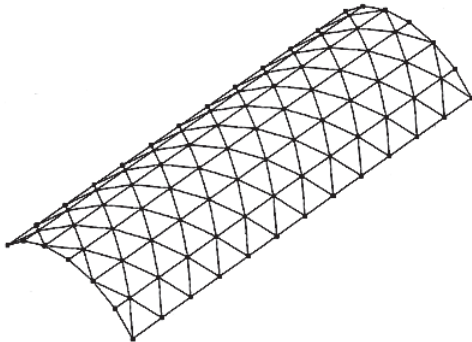


Segmenttonne mit Eckpunktlagerung - Normalkräfte

Eckpunktlagerung

Ein schalenähnliches Tragverhalten lässt sich im oberen Bereich der Tonne erkennen. Auffällig erscheint analog zur Halbkreistonne die Ausbildung einer fachwerkähnlichen Zone im Längsrandbereich. Die Druckstäbe versagen bei 125% Auslastung. In diesen Bereichen verläuft die Haupttragrichtung in Längsrichtung. Es bilden sich charakteristische Biegedruck- und -zugzonen aus. Die starke Verformung führt zu großen Momentenwerten im Längsrandbereich, die die Belastungsgrenze um das Zweifache übersteigt.

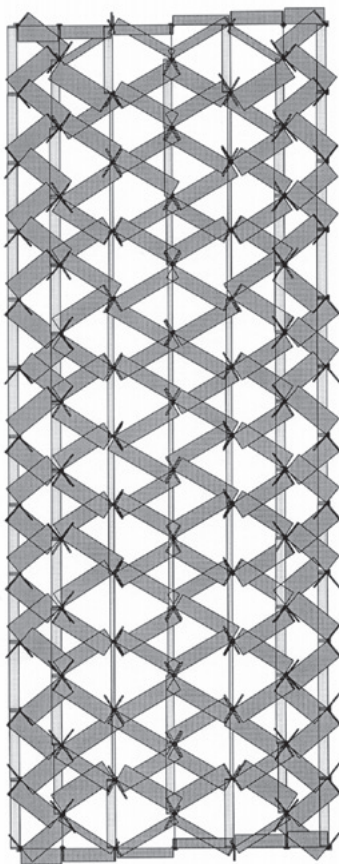
- **Segmentförmige Tonne -
langgestreckt (Länge > 2 x Breite)**



Spannweite:	10,27 m
Stichhöhe:	2,75 m
Stablängen:	2,30 m (1,98m / 1,15m)
Länge:	27,60 m
Anzahl der Stäbe:	243 (225/12/6)
Anzahl der Knoten:	94

Umfangslagerung

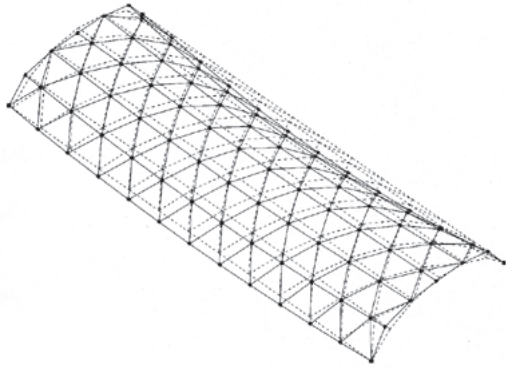
Das Tragverhalten ähnelt sehr dem der kurzen Tonne. Die sich kreuzenden Druckbögen dominieren das Tragverhalten gegenüber der Längsrichtung. Die Werte der Normalkräfte ändern sich gegenüber der kurzen Tonne nicht wesentlich. Dagegen kann die Zugzone im Längsrandbereich der Querverformung aufgrund der Tonnenlänge nicht so effektiv entgegenwirken wie bei der kurzen Tonne. Die Folge sind größere Momentenbeanspruchungen im zentralen Tonnenbereich, deren Werte ungefähr doppelt so groß wie die Grenzbeanspruchung sind.



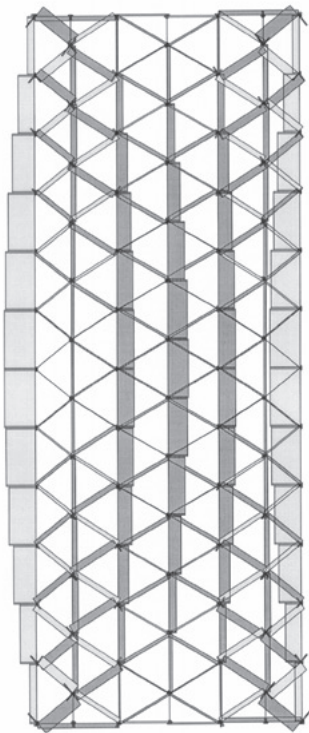
Parallellagerung

Das stützliniennahe Tragverhalten stellt sich auf der ganzen Länge sehr homogen ein. Die Normalkräfte erhöhen sich nur leicht, die Druckstäbe sind zu zirka 50% ausgelastet. Im Vergleich zur kurzen Tonne ist eine Erhöhung der Biegebeanspruchung im jeweils zweiten Segmentabschnitt festzustellen. Die Momente liegen bei etwa 150% der Beanspruchungsgrenze.

Lange Segmenttonne mit Parallellagerung -
Normalkräfte



Lange Segmenttonne mit Eckpunktlagerung -
Verformung



Lange Segmenttonne mit Eckpunktlagerung -
Normalkräfte

Eckpunktlagerung

Im Verformungsbild läßt sich gut das balkenähnliche Tragverhalten einer langen Tonne erkennen. Entsprechend dominant ist die Tragwirkung in Längsrichtung. Der Wölbkraftanteil ist bis auf die unmittelbaren Randbereiche vernachlässigbar gering. Ein ansatzweise schalenähnliches Tragverhalten wie bei den meisten anderen Varianten ist nicht zu erkennen. Es bilden sich ausgeprägte Zugzonen im Längsrandbereich, Druckzonen im oberen Bereich der Tonne aus. Die maximalen Druckkräfte in Tonnenmitte sind etwa 15 mal so groß wie bei den beiden vorangegangenen Berechnungsmodellen. Entsprechend vergrößern sich die Biegemomente in den Knoten-Stab-Anschlüssen. Bezogen auf das Gesamtragwerk bilden sich fachwerkanaloge Druck- und Zugbereiche aus. Die Vorteile und Stärken eines Tonnentragwerkes werden hier nicht genutzt.

Ergebnis

Der Vorteil einer Segmenttonne liegt in der Annäherung an die Stützlinie. Die Gefahr des Ausbeulens nimmt deutlich ab, es stellt sich ansatzweise schalenähnliches Tragverhalten ein, was gleichmäßige Kräfte und geringe Momente zur Folge hat. Problematisch ist, vor allem bei den langen Tonnen die Verformung im Längsrandbereich. Segmenttonnen haben gegenüber Halbkreistonnen den entscheidenden Vorteil, daß durch eine geringe Reduzierung der Spannweite ein wesentlich günstigeres Tragverhalten erreicht wird. Vor allem für Überdachungen erscheinen Segmenttonnen daher wesentlich effektiver. Besonders zu beachten sind im Auflagerbereich die horizontalen Kraftkomponenten.

Statische Auswertung der einlagigen Stabwerktonnen

	Halbkreistonne			Kurze Segmenttonne			Lange Segmenttonne		
Auflagerungsart →	um- laufend	linien- förmig	punkt- uell	um- laufend	linien- förmig	punkt- uell	um- laufend	linien- förmig	punkt- uell
Spannweite	12,73 m			10,27 m			10,27 m		
Länge	16,10 m			9,20 m			27,60 m		
Stichhöhe	6,86 m			2,75 m			2,75 m		
Stichhöhe / Spannweite	0,54			0,27			0,27		
Anzahl Stäbe	139			91			243		
Anzahl Stabtypen	3 (2,30 m; 1,98 m; 1,15 m)			3 (2,30 m; 1,98 m; 1,15 m)			3 (2,30 m; 1,98 m; 1,15 m)		
Anzahl Knoten	60			38			94		
Materialverbrauch Kreuzbalken 10/10, S 10	2,93 m³			1,79 m³			4,93 m³		
Anzahl Auflager	34	16	4	20	10	4	36	26	4
Auslastung Druck	108%	56%	266%	51%	44%	140%	48%	43%	637%
Auslastung Zug	38%	13%	168%	13%	9%	62%	12%	8%	412%
Auslastung Biegung My	128%	1676%	3664%	100%	256%*	444%	228%*	264%*	1824%
Auslastung Biegung Mz	220%	1212%	2316%	20%	56%	348%	80%	76%	580%
Elastische Anfangsdurchbiegung	1,7 cm	12,5 cm	18,6 cm	0,5 cm	1,6 cm	4,6 cm	1,7 cm	1,7 cm	33 cm

Kritische Werte in Fettdruck

*Vereinzelte Werte am Stirnseitenrand < 0,30 kNm machen eine entsprechende Verstärkung des Randes notwendig. Die Biegebeanspruchungen der Knoten in der Tonnenfläche liegen innerhalb der Beanspruchbarkeit.

Graphische Erläuterungen zu den Ergebnissen siehe Anhang, Kapitel Stabwerktonne

Fazit

Das Maß der Auslastung hängt vor allem von den auftretenden Biegemomenten ab. Die Normalkraftbeanspruchung liegt bei den meisten Fällen im sicheren Bereich, zum Teil sind die Stäbe nur zu 50% ausgelastet. Folglich ist die statische Leistungsfähigkeit als Biegesteifigkeit im Gefüge von Knoten und Stab entscheidend für die einlagige Ausführung als Stabwerktonne.

Ein wichtiger Parameter für den Entwurf eines Tonnentragwerks ist die Auflagerungsart. Wie die Untersuchungen zeigen, lassen sich alle drei untersuchten Tonnengeometrien durch vollständige, umlaufende Auflagerung problemlos ausführen.

Im Gegensatz zur Halbkreistonne läßt sich eine Segmenttonne auch linienförmig gelagert ausführen, wenn die Stirnseitenränder hinreichend verstärkt werden, um auf die starken Biegebeanspruchungen in diesen Bereichen zu reagieren. Die Segmenttonne läßt sich für Überdachungen sehr vielseitig einsetzen und überzeugt durch ihr insgesamt sehr gleichförmiges Tragverhalten.

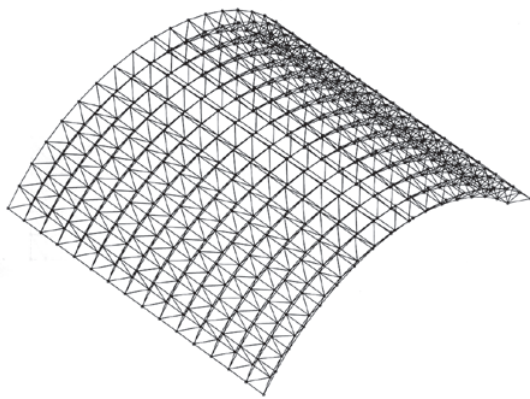
Tonnentragwerke, die nur an den Eckpunkten gelagert sind, scheiden als Alternative weitgehend aus. Die sich in einer Massivschale einstellende, sehr günstige Schalenwirkung kann sich durch die Auflösung in ein Stabtragwerk nur ansatzweise einstellen und verursacht eine starke, biegebalkenähnliche Beanspruchung des Gesamttragwerks in Längsrichtung. Dies führt zu Schnittgrößen, deren Werte sehr weit über den Grenzwerten der Beanspruchbarkeit liegen.

Auf der Basis der vorgestellten Ergebnisse sind folgende Spannweiten möglich:

Segmenttonne, einlagig:	10 - 15 Meter
Halbkreistonne, einlagig:	9 - 12 Meter

5.2.3.2 Zweilagige Systeme - Ergebnisse aus den Berechnungen

Bei einlagigen Stabwerktonnen liegen die zentralen Schwächen in der Beanspruchbarkeit der Knoten-Stab-Anschlüsse auf Biegung. Die Spannweiten sind entsprechend begrenzt. Um größere Spannweiten zu erzielen, empfiehlt sich die zweilagige Anwendung. Dieser Stabwerktonnetyt besteht aus einer Ober- und Untergurtlage, die durch Diagonalstäbe verbunden sind. Dadurch fallen die Biegebeanspruchungen gänzlich weg, die Tragelemente werden nur auf Druck und Zug beansprucht. Vom Wirkungsprinzip her entspricht die zweilagige Anwendung vor allem strukturell den Raumfachwerkplatten (siehe Kapitel 4.3), durch die Ausnutzung der Krümmung in Querrichtung lassen sich aber wesentlich höhere Spannweiten erzielen. Bei der Untersuchung zweilagiger Stabwerktonnen werden folgende Parameter zugrunde gelegt:



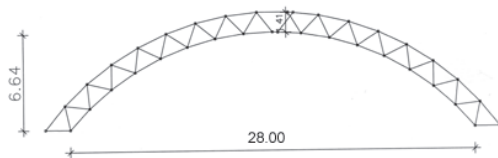
Zweilagige Segmenttonne - Isometrie

- Die Geometrie entspricht den Proportionen der kurzen Segmenttonne
- Die Tonne wird linienförmig, parallel aufgelagert
- Anwendung des ½O+T-Prinzips der Raumfachwerkplatte

Es ergeben sich dadurch 2 Stablängen, wobei Untergurt- und Diagonalstäbe sowie die in Längsrichtung laufenden Obergurtstäbe gleich lang sind. Die in Querrichtung laufenden Obergurtstäbe sind etwas länger, um die Kreisbogenform zu erzeugen. Die Lasten werden punktförmig in die Knoten der Obergurtlage eingeleitet.

Allgemeine Strukturdaten der Berechnungsmodelle:

Ordnungsprinzip: ½ Oktaeder + Tetraeder
 $h = 1/2 a \sqrt{2}$



Zweilagige Segmenttonne - Querschnitt

Spannweite:	28 m
Länge:	28 m
Stich:	6,64 m
Statische Höhe:	1,41 m
Gesamthöhe:	8,05 m
Stablängen:	2,00 m ; 2,15 m
Anzahl der Stäbe:	2040 (1768 á 2 m, 272 á 2,15 m)
Anzahl der Knoten:	543

Berechnungsmodell 1

Stabquerschnitt: 12/12

Auflagerung: Parallellagerung, einfach

Das Verformungsbild zeigt sehr deutlich, daß die Gefahr des „Beulens“ durch die erhöhte Steifigkeit des Systems aufgrund der Zweilagigkeit minimiert ist. Die Verformungen im Längsrandbereich sind im Verhältnis zur Verformung in Tonnenmitte minimal. Das optimale Zusammenwirken von Obergurt-, Untergurt- und Diagonalstäben läßt sich in der Schnittansicht der Normalkräfte sehr gut erkennen. Die Druckzone geht aus der Obergurtlage der Tonnenmitte kontinuierlich in die Untergurtlage über. Die Untergurtstäbe im Auflagerbereich werden am stärksten auf Druck beansprucht, da sie fast gänzlich zur Lastabtragung herangezogen werden. Mit dem gewählten Stabquerschnitt von 12/12 ergibt sich eine sehr effektive Auslastung von zirka 90%.



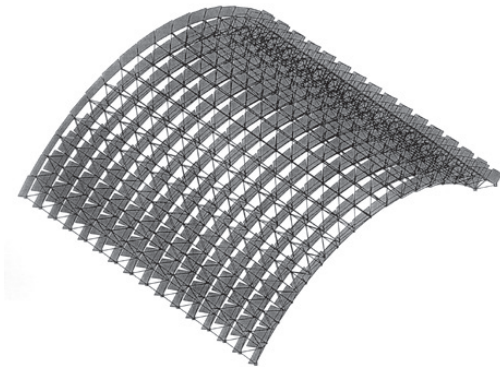
Zweilagige Segmenttonne - einfache Auflagerung
Verformung



Zweilagige Segmenttonne - einfache Auflagerung
Normalkräfte



Zweilagige Segmenttonne - zweifache Auflagerung
Normalkräfte



Zweilagige Segmenttonne - zweifache Auflagerung
Normalkräfte

Berechnungsmodell 2

Stabquerschnitt: 10/10

Auflagerung: Parallellagerung, zweifach

Die zweifache Auflagerung in Längsrichtung führt zu einer Veränderung des Tragverhaltens, da diese Auflagerung einer Einspannung des Tonnenrandes entspricht. Durch das Heranziehen des Obergurtes als zusätzliches Auflager werden die Kräfte aus dem Obergurt nicht mehr vollständig an den Untergurt übergeben. Die Lastübergabe vom Untergurt an das Auflager ist wesentlich geringer als bei Modell 1 und ermöglicht eine Stabquerschnittsreduzierung auf 10/10 cm. Der Großteil der Druckkräfte wird auf direktem Wege jeweils separat in die vorhandenen Auflager eingeleitet. Dies führt zu einer homogenen Beanspruchung des Gesamttragwerkes und seiner einzelnen Tragelemente. Die maximale Druckkraft ist entsprechend kleiner, und bedingt eine nahezu optimale Auslastung des Stabes von 100%. Mit Tragreserven des Stabes läßt sich eine sehr effektive Gesamtauslastung erzielen.

Fazit

Die zweilagige Ausführung der Stabwerktonne läßt durch ihr günstiges Tragverhalten wesentlich größere Spannweiten zu als die einlagige Ausführung. Alle Tragelemente sind normalkraftbeansprucht und erfordern nicht den Aufwand eines biegesteifen Knotenstabanschlusses, der für einlagige Stabwerktonnen notwendig ist. Das gewählte Anordnungsprinzip $\frac{1}{2}$ Oktaeder + Tetraeder zeichnet sich durch seine klare Geometrie und durch die Reduzierung auf zwei Stabtypen aus.

Die zweifache Auflagerung führt gegenüber der einfachen zu einer Optimierung des Tragverhaltens mit ausgeglichener Stablastverteilung. Dieser positive Effekt ist mit einem höheren Aufwand der Auflagerung verbunden.

Die untersuchten Berechnungsmodelle zeigen die Möglichkeit für eine effektive Ausnutzung der Tragelemente. Unter Berücksichtigung der Tragreserven und der Verwendung größerer Stabquerschnitte sind Spannweiten bis 40 Metern ausführbar.

5.3 Stabwerkkuppeln

5.3.1 Grundlagen

Stabwerkkuppeln sind doppelt gleichsinnig gekrümmte Überwölbungen von Räumen, meist Kugelabschnitte, die sehr leistungsfähige Tragkonstruktionen bilden können¹.

Weitgespannte Stabwerkkuppeln eignen sich durch ihr Leichtbauprinzip für Großraumbauten mit stützenfreien Innenräumen über Kreisgrundrissen oder in verzerrter Form über anderen Grundflächen. Spannweiten von weit über 100 m sind auch in Holz realisierbar², wobei das System mit Induo-Verbundankertechnik zunächst für Spannweiten bis zu 50 Metern wirtschaftlich einsetzbar ist.

Kuppelbauten wurden in der Baugeschichte meist als Herrschaftssymbole bei bedeutenden Gebäuden eingesetzt, und auch heute fasziniert ihre spezifische Raumwirkung. Mit Einführung der Eisenkonstruktionsbauten fanden Kuppeln als Stabwerkkuppeln Eingang in profanere Anwendungsgebiete wie Gasbehälter, Eisenbahndepots und Gewächshäuser. Als Vorreiter sind hier J. W. Schwedler und A. Föppl zu nennen, die schon Ende des 19. Jahrhunderts erste Theorien zum Tragverhalten dieser Systeme aufstellten.

Das geometrischen Problemen, eine wirtschaftlichere Herstellung durch Minimierung der Stab- und Knotentypen zu erzielen, löste Walter Bauersfeld 1922 beim Bau des Zeiss-Planetariums in Jena³. R. Buckminster Fuller entwickelte dieses Prinzip zur geodätischen Kuppel weiter und meldete es 1954 zum Patent an.

Heute werden Kuppelstrukturen in einer Vielzahl von Variationen gebaut, von denen die beeindruckendsten sicher die riesigen Sportarenen sind, mit Spannweiten von mehr als 150 Metern.

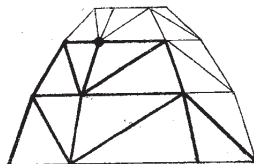


Abb. 9.

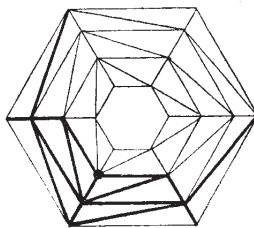


Abb. 9b.

Schwedler'sche Kuppel¹

Die Kuppel von W. Bauersfeld über dem Zeiss-Planetarium in Jena. Die Stabstruktur ist die Bewehrung der Stahlbetonkuppel²

• Geometrie

Die Unterteilung der Kugeloberfläche in möglichst viele, gleiche Stablängen stellt, da sie nicht abwickelbar ist, ein geometrisches Problem dar.

Besonders bei Stabwerkskuppeln kommt der Wahl der Einteilungsmethode auf Grund ihrer komplexen Geometrie im Einzelfall eine besondere Bedeutung zu. Zu berücksichtigen sind u.a. Stab- und Knotentypenzahlen, die Höhe der Kuppel, die Form ihrer unteren Begrenzung, sowie gestalterische Aspekte.

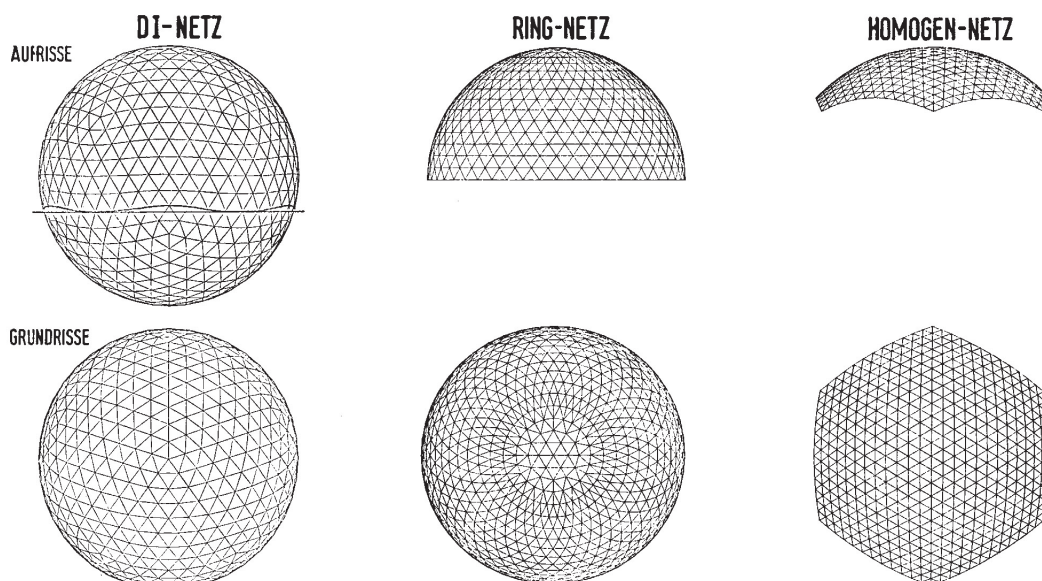
Hier bieten sich verschiedene Systematiken an, die entweder einem radial-konzentrischen Prinzip folgen, oder geodätische und homogene Netze bilden.

Jede dieser Einteilungsmethoden hat ihre spezifischen Eigenschaften:

- Ringnetze sind horizontal in beliebiger Höhe zu begrenzen.
- Geodätische Netze weisen nur am Äquator eine horizontale Begrenzungslinie auf und sind auch für Kuppeln, die über die Halbkugel hinausgehen geeignet.
- Homogen – Netze – Kuppeln sind nur bei flache Kalotten sinnvoll einzusetzen.

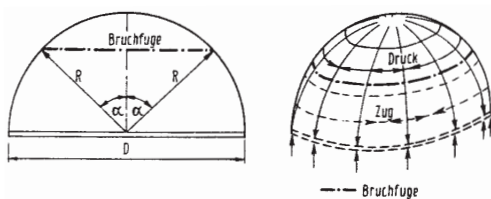
Die geringsten Typenzahlen erreicht man bei gleicher Spannweite mit geodätischen Systemen, gefolgt von radial - konzentrischen Strukturen. Homogene Netze weisen die geringste Symmetrie auf und daher die meisten, unterschiedlichen Stablängen.

Beispiele verschiedener Stabnetze³



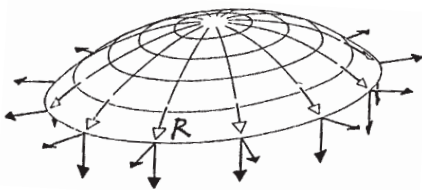
• Tragverhalten

Massive Kuppeln entwickeln durch ihre doppelte Krümmung ein sehr günstiges Tragverhalten nach dem Schalenprinzip. Sie reagieren auf gleichmäßig verteilte Belastungen allein mit Axialkräften⁴.



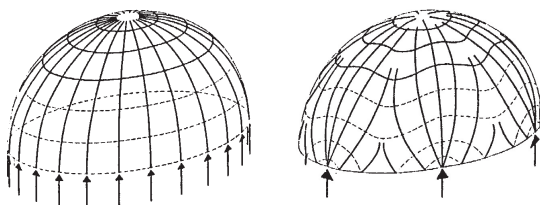
Bruchfuge bei Massivkuppeln⁴

In Meridianrichtung treten nur Druckkräfte auf; in Ringrichtung treten im oberen Bereich der Kuppel Druckkräfte auf, unterhalb dieses Bereiches Zugkräfte⁵. Der Übergang zwischen diesen beiden Zonen, die Bruchfuge, liegt bei Kugelabschnitten mit gleichmäßiger Belastung bei einem Öffnungswinkel von 46 bis 50 Grad⁶. Flache Kalotten, die oberhalb der Bruchfuge gelagert sind, sind somit rein druckbelastet⁷.



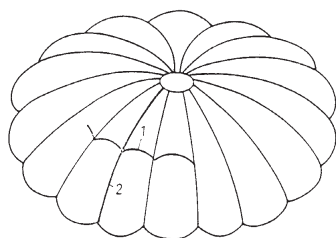
Bei Flachen Kuppeln treten schon unter gleichmäßiger Last relativ große Horizontalkräfte auf.⁵

Jede Kuppel, die flacher als eine Halbkugel ist, benötigt eine spezielle Randlagerung, die die schräg gerichteten Meridiankräfte aufnehmen kann. Dies kann z.B. ein Zugband leisten, das jedoch, um die Randstörung in der Kuppel, bedingt durch seine Verformung unter Last, möglichst gering zu halten, vorgespannt sein muß⁸.



Der Kräfteverlauf innerhalb der Kuppel hängt auch von der Lagerung ab⁶

Nur bei kontinuierlicher Lagerung ist die Schalenwirkung weitgehend ungestört zu erreichen, jede Unterbrechung der Lagerung erzeugt ungleichmäßigen Kräfteverlauf⁹.



Sowohl durch die stärkere Krümmung, als auch durch die Kehlen ergibt sich eine versteifende Wirkung⁷

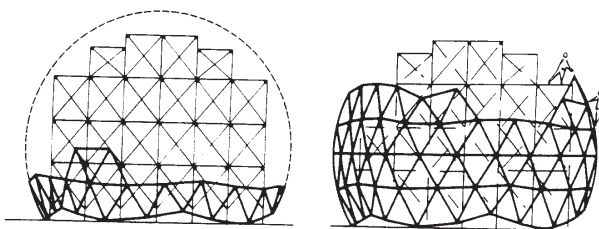
Um die Stabwerkskuppel zusätzlich zu versteifen gibt es neben der biegesteifen Knotenausbildung und der Einführung weiterer Stabebenen die Möglichkeit, die Kuppel aus mehreren stärker gekrümmten Teilen zusammen zu setzen. Dabei fallen nicht mehr Stablängen an, als bei gleichwertiger Unterteilung, nur die Stablängenverhältnisse ändern sich¹⁰. Das Prinzip ist nur für radial-konzentrische Teilungen geeignet.

• Montage

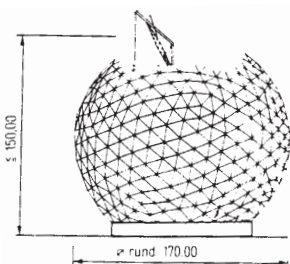
Durch die hohe Steifigkeit der Kuppelkonstruktionen kann der Aufbau meist im freien Vorbau geschehen, wobei je nach statischer Situation einige Montagestützen erforderlich werden. Der hohe Vorfertigungsgrad ermöglicht einen schnellen und reibungslosen Montageablauf. Dabei können je nach den Gegebenheiten der Baustelle auch größere vormontierte Einheiten eingebaut werden, schweres Hebegerät ist nicht erforderlich. Für den Ablauf des Aufbaus gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

Montage von unten nach oben

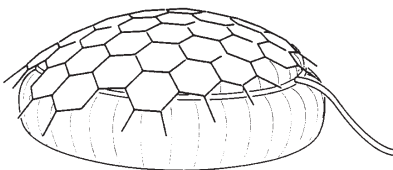
Die Einzelteile werden über einander gesetzt, sie tragen sich selbst. Es sind Montagegerüste und meist auch Hebezeuge erforderlich, wobei die Gerüste entweder frei innerhalb der Kuppel stehen können, oder am Stabgerüst befestigt werden können.



Montage mit innerem Hilfsgerüst⁸



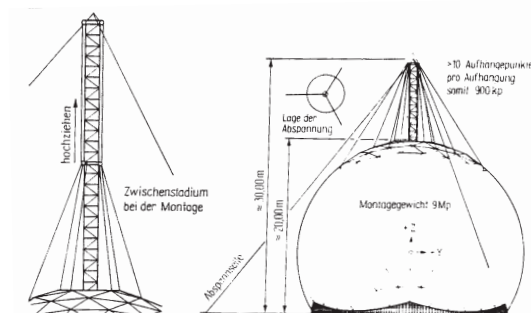
Montage mit Kran, Gerüst an Stabwerk befestigt.⁹



Pneukissen als Montagegerüst¹⁰

Montage von oben nach unten

Die Konstruktion wird durch Pneukissen oder entlang von Masten kontinuierlich nach oben gehoben, die Montage der Elemente erfolgt dann vom Boden aus; es sind außer der Hubkonstruktion keine größeren Gerüste und Hebezeuge erforderlich¹¹.



Stufenweises Anheben des Stabwerkes entlang eines Mastes.¹¹



Ausführungsbeispiel:
Mastmontage Musikpavillon Stolberg/Rhld.¹²

Ein Problem elementierter Stabwerkkuppeln ist die Einhaltung der geometrischen Sollform. Auch wenn die Einhaltung der Geometrie nicht das primäre Ziel ist, so ist es doch gleichbedeutend mit der Problematik des zwängungsarmen Schließens bei ringweiser Montage, das sich nur durch Einhaltung enger Toleranzen bei der Fertigung gewährleisten lässt¹². Enge Toleranzen erleichtern auch das Einsetzen der Eindeckung.

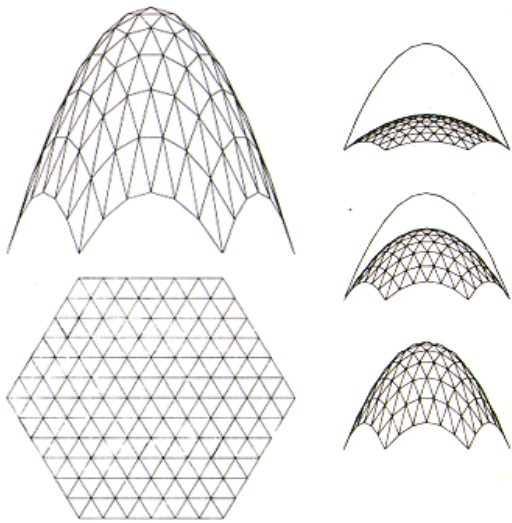
• Eindeckung

Die komplexen geometrischen und statischen Aufgabenstellungen beim Entwurf einer Stabwerkkuppel sind heute Dank moderner Computertechnik weitgehend beherrschbar. Für den Entwurf reichen meist Näherungslösungen aus.

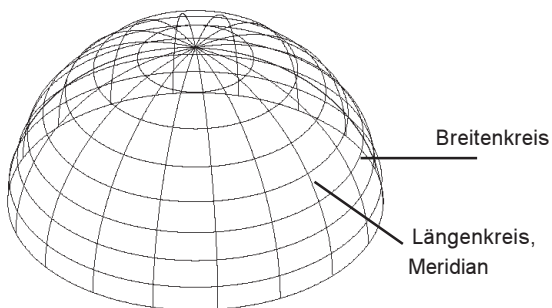
Das eigentliche konstruktive Problem stellt vielmehr die Wahl des wirtschaftlichen, den statischen und bauphysikalischen Anforderungen entsprechenden Eindeckungsverfahrens dar.

Dafür kommen heute vor allem folgende Materialien in Betracht: Holz, Folien, textile Membranen, Bleche in oder ohne Verbund mit Isoliermaterialien, sowie transluzente Kunststoffe. In allen Fällen bestimmen Herstellungsbreiten und Tragfähigkeiten die Geometrie des Kuppelentwurfes mit.

Zu den bauphysikalischen Anforderungen zählen der Nachweis ausreichender Wärmedämmung und Dichtigkeit. Die Dichtigkeit erfordert eine sorgfältige Fugenausbildung insbesondere an den Knoten¹³.



Hexagonale Kuppelgeometrie, Verzerrungen¹³



5.3.2 Klassifizierung der Fachwerkkuppeln

Zur Vereinfachung werden im Folgenden nur Kuppeln in Kugelform behandelt, für andere Grundformen, z.B. auf elliptischer Basis, gelten ähnliche Regeln. Dabei entstehen jedoch Verzerrungen, die durch die begrenzte Symmetrie dieser Systeme zu größeren Typenzahlen für Stäbe und Knoten führen.

5.3.2.1 Radialkonzentrische Kuppeln¹⁴

Definition:

Die Oberfläche der Kugel ist in ein Netz aus Längen und Breitenkreisen unterteilt. Die sich von Pol zu Pol erstreckenden Meridiane sind Großkreise, die sich in den beiden Polen schneiden. Von den Breitenkreisen ist nur der Äquator ein Großkreis, während die parallelverlaufenden Breitenkreise polwärts immer kleiner werden.

Das gleiche Prinzip entspricht dem der Einteilung der Erdoberfläche in Längen- und Breitengrade.

1. Rippenkuppel¹⁵

Definition:

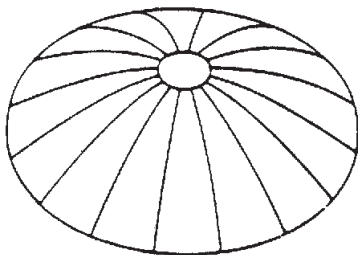
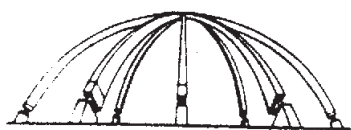
Radiale, gekrümmte Rippen bilden die Tragstruktur, die über Flächenelemente ausgesteift wird.

Geometrie:

Die konzentrischen Rippen in Meridianrichtung treffen sich im Pol. Sie sind untereinander alle gleich. Im Scheitelpunkt der Kuppel ergibt sich durch die kompakte Anordnung eine aufwendige Anschlußgestaltung.

Tragverhalten:

Die Rippenkuppel besitzt eine klare hierarchische Struktur, in der die Rippen als Hauptträger wie Bogensegmente die Lasten aufnehmen.



Rippenkuppel mit Druckring im Zenit¹⁴

2. Rahmenkuppeln¹⁶

Definition:

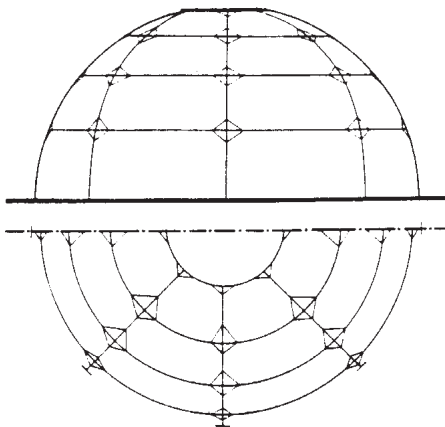
Die Kreuzungspunkte zwischen den radial verlaufenden Stäben und denen entlang der Breitenkreise sind biegesteif ausgeführt.

Geometrie:

In den horizontalen Ringen sind die Stablängen jeweils gleich. Am Zenit kommt es zu einer problematischen Stabverdichtung.

Tragverhalten:

Die durchlaufenden meridianden Rippen werden durch horizontale Stäbe ausgesteift. An den biegesteifen Knoten werden relativ große Momente übertragen, die eine entsprechend starke Dimensionierung von Stäben und Knoten erforderlich machen. Daher ist das Tragwerk nur für kleine Spannweiten geeignet und montage- und materialaufwendig.



Rahmenkuppel, auch hier ist der oberste Ring ausgespart¹⁵

3. Schwedlerkuppel¹⁷

Definition:

Die Flächen zwischen den radial verlaufenden Stäben und den Horizontalringen werden durch Diagonalen ausgesteift. Die durch die Diagonalen gebildeten Dreiecke eines Gefaches liegen in einer Ebene.

Das Tragwerk wurde erstmals von J.W. Schwedler angewandt (um 1874)¹⁸, und markiert den Übergang zu den eigentlichen Netzwerkkuppeln.

Geometrie:

In den horizontalen Ringen sind die Stablängen jeweils gleich. Am Zenit kommt es zu einer problematischen Stabverdichtung. Werden die Diagonalstreben kreuzweise geführt, können sie auch durch Seile ersetzt werden, die über mehrere Felder geführt werden und jeweils an deren Eckpunkten fixiert sind. Diese Ausführung erspart das Ablängen der Diagonalstäbe.

Tragverhalten:

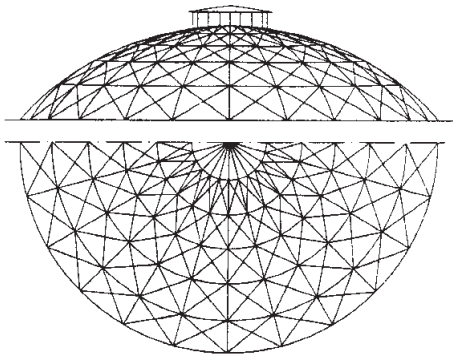
Ist die Konstruktion im Scheitelpunkt nicht geschlossen und endet in einem zentralen Druckring, kann das System als statisch bestimmtes Fachwerk berechnet werden¹⁹.

Abwandlung:

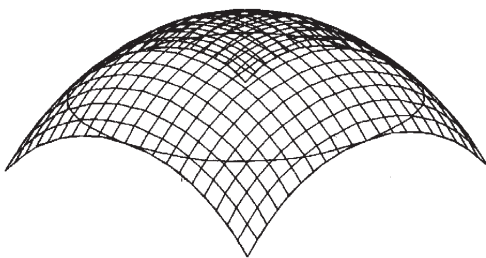
Dieses System ist bei quadratischem Grundraster und Seildiagonalen mit nur einer Stablänge umsetzbar, wobei je nach Begrenzung Sonderstablängen am Rand auftreten. Zwischen den Knotenpunkten sind die Felder rautenförmig verzerrt. Die Aussteifung der Felder übernehmen durchgehende Seile, die an den Knoten nur festgeklemmt sind. Zwar reicht bei diesem Prinzip eine Stablänge aus, jedoch entstehen eine Vielzahl unterschiedlicher Rautenformen.

Als Stahlnetz wurde dieses System in jüngerer Zeit häufig angewandt; für die weitere Auseinandersetzung sei auf Untersuchungen aus dem Büro Schlaich, Bergmann und Partner verwiesen²⁰.

Bei gleichmäßiger Belastung tragen in den obengenannten Systemen nur die in Meridanrichtung verlaufenden Stäbe²¹. Wegen ihren balkenartigen Trägern werden diese Tragwerke nicht zu den Stabnetzwerk-Kuppeln gerechnet²², und daher im folgenden in Bezug auf die Verbindungstechnik mit dem Induo-Verbundanker nicht weiter behandelt.



Schwedlerkuppel mit Seildiagonalen und Laternenabschluss¹⁶



Kuppel mit Quadratnetz und verzerrten Maschen¹⁷

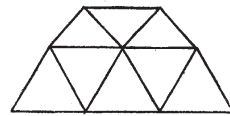


Abb. 19.

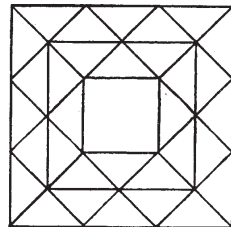
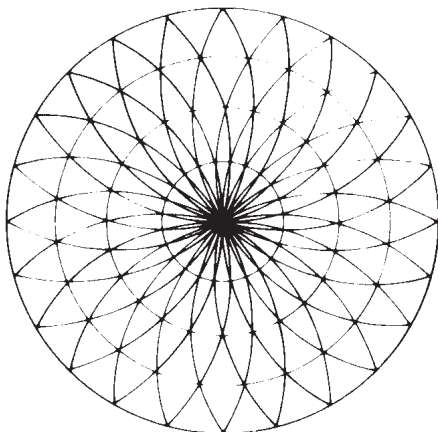


Abb. 19 b.

Das obere Stockwerk der Leipziger Kuppel ¹⁸



Gut zu erkennen ist die Stabverdichtung im Zenitbereich ¹⁹

4. Dreiläufige Ringnetzkuppeln ²³

Definition:

Die horizontalen Breitenringe werden durch zwei weitere, diagonal verlaufende Stabscharen so verbunden, daß gleichschenklige Dreiecke entstehen.

Schon A. Föppl stellte zu diesen Typen Untersuchungen an, und brachte sie zur Ausführung (Leipziger Markthalle, 1891) ²⁴.

Geometrie:

Ein drehsymmetrisches Netz bildet gleichschenklige Dreiecke, die in den horizontalen Ringen jeweils identisch sind. Auch hier verdichten sich die Stäbe zum Zenit hin ungünstig.

Tragverhalten:

Durch das dreieckige Grundmodul ergibt sich eine hohe Steifigkeit, die zu ökonomischen und montagetechnologisch günstigen Systemen führt ²⁵.

Alle bisher genannten Kuppeln radial - konzentrischer Teilung weisen eine Verdichtung der Stäbe zum Zenit hin auf, was zu technischen, geometrischen und ästhetischen Schwierigkeiten führt, und zudem statisch wenig sinnvoll ist. Hier bieten sich in der Gruppe der Radialnetze drei Lösungsmöglichkeiten an: Ringnetzkuppeln mit Auge, Zonennetz- und Sektornetzkuppeln.

• Ringnetzku­p­pel mit Auge (Opaeum)²⁶

Definition:

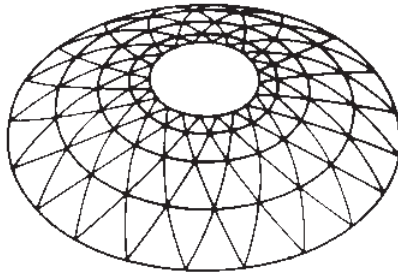
Einer oder mehrere Ringe im Zenit werden ausgespart, so daß eine Öffnung, das sogenannte Auge, entsteht.

Geometrie:

Diese Lösung bietet sich für alle bisher beschriebenen Teilungsprinzipien an.

Tragverhalten:

Den oberen Abschluß bildet ein Druckring, auf den z.B. eine Laterne aufgesetzt werden kann. Eine solche Aussparung kann auch der Entlastung der Kuppel dienen, da das Eigengewicht in diesem Bereich entfällt.



Ausgesparter Zenitring²⁰

• Zonennetz - Kuppel²⁷

Definition:

In Abwandlung der dreiläufigen Ringnetzku­p­pel wird im Zenitbereich eine Übergangszone eingeführt, in der die überzähligen Stäbe durch fortschreitende Halbierung der Teilungszahl entfallen.

Geometrie:

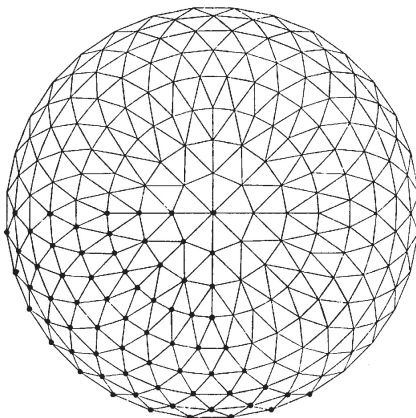
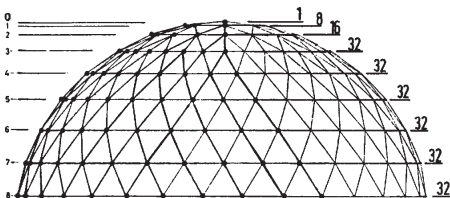
Das Ringnetz besitzt zwei Netzteile:

- Die Polzone zur Schließung des "Auges"
- Die Breitenzone mit horizontalen Ringen und zwei Scharen spiralförmig verlaufender Diagonalen.

In den ersten Ringen um den Pol (Polzone) entwickeln sich die Teilungszahlen durch Verdoppelung der Ausgangsteilungszahl (meist 6 oder 8) im ersten Knotenring.

In der sich anschließenden Breitenzone besitzen alle Ringe die gleiche Teilungszahl, die im äußersten Knotenring der Polzone erreicht wurde. Diese wird bis zum Basisring beibehalten²⁸.

Die Stäbe sind in den horizontalen Ringen jeweils gleich lang.



Charakteristisch für die Zonennetzku­p­pel ist der gut zu erkennende Übergang von Pol- zu Breitenzone²¹

Tragverhalten:

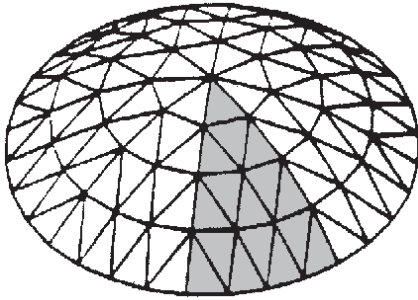
Entsprechend der dreiläufigen Ringnetzku­p­pel.

- **Sektornetz - Kuppel**²⁹

Definition:

Die Kuppel wird in Sektoren geteilt. Scharen von parallel zu ihren Begrenzungslinien verlaufenden Stäben unterteilen diese Sektoren.

Die Sektornetzkuppel, auch Lamellenkuppel genannt, ist eine Weiterentwicklung der dreiläufige Ringnetz-kuppel; ihre Entwicklung geht auf den Amerikaner Kiewitt³⁰ zurück (1925).



Die Begrenzungslinien der Sektoren reichen als einzige bis in den Zenit²²

Geometrie:

Die diagonalen Stabscharen werden parallel zu den Seiten der Sektoren, in Richtung der den Sektor begrenzenden Rippen, geführt. Dadurch wird die Übergangszone der Zonennetzkuppel vermieden.

Die Stäbe sind in den horizontalen Ringen jeweils gleich lang.

Tragverhalten:

Entsprechend der dreiläufigen Ringnetz-kuppel.

Bei radial – konzentrischen Stabwerkkuppeln treten geometrisch bedingt nur in jedem horizontalen Ring identische Stab- und Knotentypen auf. Die Strukturen sind drehsymmetrisch. Auf die horizontalen Stäbe kann verzichtet werden, wenn die Aussteifung der dann rautenförmigen Felder, z.B. über die Eindeckelemente, gewährleistet ist.

Wird das Problem der Stabverdichtung im Zenit gelöst, ergeben sich wirtschaftliche, statisch günstige und geometrisch einfache Tragwerke, deren Hauptvorteil in der Möglichkeit der horizontalen Begrenzung in beliebiger Höhe liegt. Allerdings erhält man vergleichsweise viele unterschiedliche Stäbe mit relativ großen Differenzen der Stablänge.

5.3.2.2 Homogennetz - Kuppeln

Definition:

Homogene Netze sind solche, die für alle Elemente gleicher Elementart gleiche Anschlußzahlen besitzen, d. h. das bei einer Homogennetz – Kuppel an jeden Knoten die gleiche Anzahl von Stäben anschließt³¹.

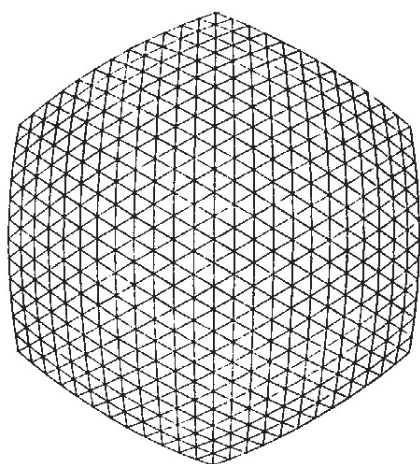
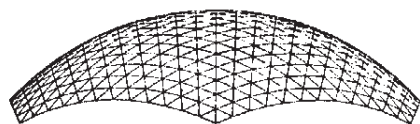
Geometrie:

“Ein in der Äquatorebene einer Kugel lokalisiertes, regelmäßiges Dreiecksnetz wird vom Nadirpunkt (Gegenpol der Kugel) auf den Polbereich der Kugeloberfläche projiziert. Dabei bilden sich die drei Gradenscharen des ebenen Netzes auf drei Kleinkreisscharen des sphärischen Netzes ab. Das durch diese spezielle Projektion erzeugte Netz hat als ganzes eine optimale Gleichförmigkeit. Da dieser harmonische Eindruck jedoch ohne die Ausnutzung von Symmetrien erreicht wurde (mit Ausnahme der Polachse als 6zählige Drehachse) tritt jeder Knotentyp nur 6-fach im Gesamtnetz auf. Dies hat zur Folge, daß für Knoten, Stäbe und Platten größere Anzahlen unterschiedlicher Typen erforderlich werden.”³²

Tragverhalten:

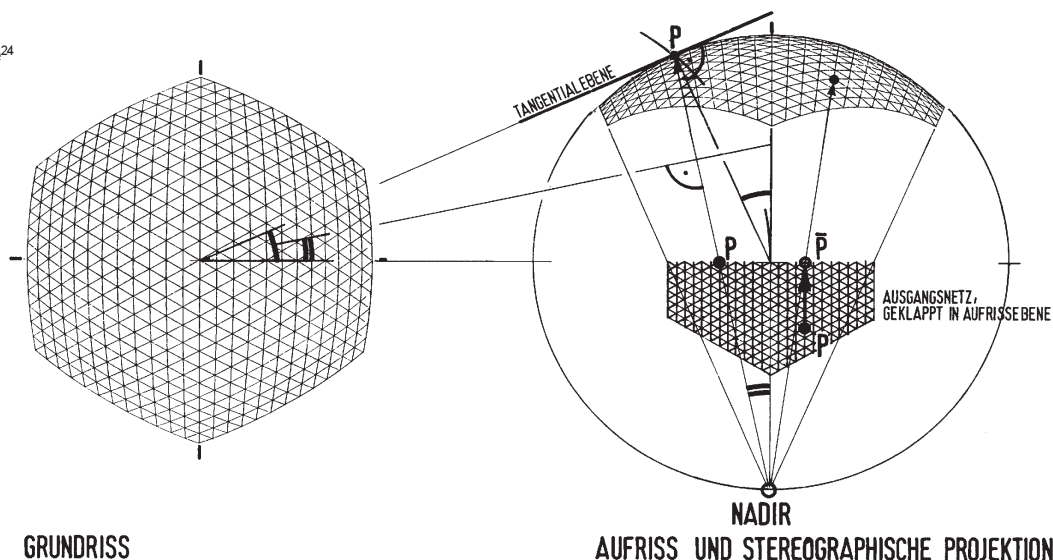
Bei steileren Kugelkalotten tritt zum Rand hin eine starke Verzerrung des Netzes auf, die ungünstig große Stablängen erzeugt. Das System der Homogennetzkuppel ist also nur für flache Kalotten geeignet.

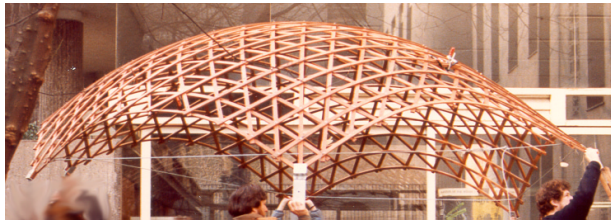
Für einlagige Kuppeltragwerke kommen nur Dreiecksnetze für die Projektion in Frage, Sechseck und Quadratnetze finden nur bei Netzkombinationen für mehrlagige Systeme Anwendung³³.



Typisch ist das gleichmäßige Erscheinungsbild der Homogennetz Kuppel²³

Projektionsmethode²⁴





Gartenpavillon²⁵

Ausführungsbeispiele:

Experimentelles Bauen im Rahmen der Architekturausbildung an der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre) unter anderem mit den Projekten:

Gitterkuppel - Gartenpavillon, Krefeld
(Durchmesser 4,60 m)



Freilichtbühne²⁶

Gitterkuppel - Freilichtbühne; Stolberg, Aachen - Brand
(Durchmesser 12,00 m)

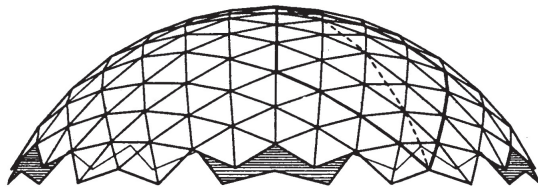
Die Tragstrukturen bestehen aus biegeeweiche Holzlatten, die als Meridiane auf der Kugeloberfläche ausschließlich Krümmung um ihre schwache Achse erhalten. In „Knotenpunkt“ sind die durchlaufenden Holzlatten der drei Stabscharen durch einfache Schraubbolzen untereinander verbunden.

5.3.2.3 Ensphere - Kuppeln

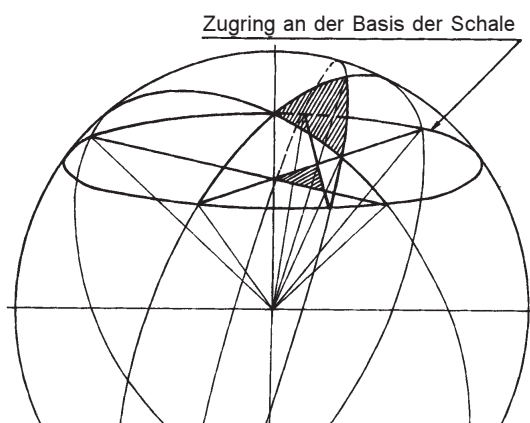
Definition:

Zu Beginn der 80 - iger Jahre entwickelte der amerikanische Tragwerkplaner Wendell Rossman das Ensphere - Konzept für weitgespannte Holznetzkipeln. Beispiele sind die Großhallen: Tacoma - Dome (D = 160 m), Washington, USA und Skydome (D = 150 m) in Flagstaff, Arizona, USA sowie die Oulu Sporthalle (D = 115 m) in Finnland.

Dem Ensphere - Konzept liegt das seit 30 Jahren bekannte Tragsystem der dreiläufigen Rostkipeln zugrunde³⁴.



Netzgeometrie²⁷



Projektionsmethode²⁸

Geometrie:

Das Ensphere - Konzept wird gebildet durch drei sich durchdringende Bogensysteme, die elementweise Kugelgroßkreisen folgen. Die optische Geradlinigkeit ergibt die wirkungsvolle und statisch günstige Geometrie³⁵.

Tragverhalten:

Entsprechend der Homogennetzkipel.

5.3.2.4 Geodätische Kuppeln

Definition:

Die Oberfläche der Kugel wird durch die Unterteilung eines sphärischen Ikosaeders in weitere, kleinere Dreiecke gegliedert.

R. B. Fuller meldete die geodätischen Kuppeln 1954 zum Patent an; in der Folge entstand ein regelrechter Industriezweig zur Herstellung dieser Kuppelsysteme³⁶.

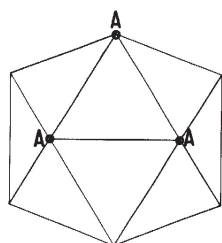
Geometrie:

Der Ikosaeder mit seinen zwanzig gleichseitigen Dreiecksflächen ist der platonische Körper, der der Kugelform am nächsten ist³⁷. Es ist nicht möglich, die Kugel mit mehr als 30 gleichlangen Stäben und 20 identischen, gleichseitigen Dreiecken zu umschließen³⁸.

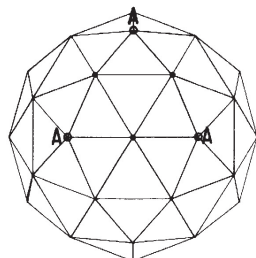
Der Ikosaeder bietet sich jedoch an, durch eine Verfeinerung seines Netzes ein Stabwerk zu bilden, das mit einem Minimum an unterschiedlichen Stäben und Knoten eine Kugel bildet, ohne statisch günstige Stablängen zu überschreiten. Dieses Prinzip ist auch auf andere platonische Körper anwendbar, wie z.B. den Dodekaeder oder sämtliche aus Dodekaeder und Ikosaeder abgeleiteten Körper (z.B. Anwendung bei DI-Netzkuppeln).

Grundgedanke ist die Unterteilung der Seiten eines sphärischen, also auf die Kugeloberfläche projizierten, Ikosaeders in eine Anzahl kleinerer Teildreiecke. Heute haben sich dazu zwei Methoden durchgesetzt. Konkurrierende Optimierungsziele sind zum einen, daß die Anzahl der unterschiedlichen Stablängen gleich der Teilungszahl der Ikosaederseiten wird, und zum anderen, daß die Anzahl der unterschiedlichen Stablängen möglichst klein bleibt. Die Minimierung unterschiedlicher Stablängen führt zur gleichzeitigen Minimierung von Knoten- und Flächentypen³⁹.

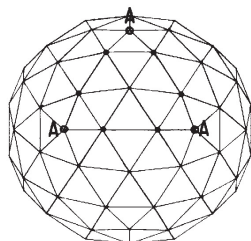
Zuerst wird jede Dreiecksseite des sphärischen Ikosaeders in gleich viele Abschnitte unterteilt. Anschließend werden die Unterteilungspunkte verbunden und so neue Dreiecke gebildet. Die Anzahl der neuen Teilstrecken wird als Frequenz bezeichnet.



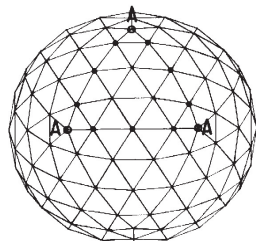
I-AUSGANGSNETZ



1 TEILUNGSPUNKT:
2-FACH-TEILUNG DER I-KANTE
4-FACH-TEILUNG DER I-FLÄCHE

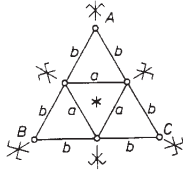
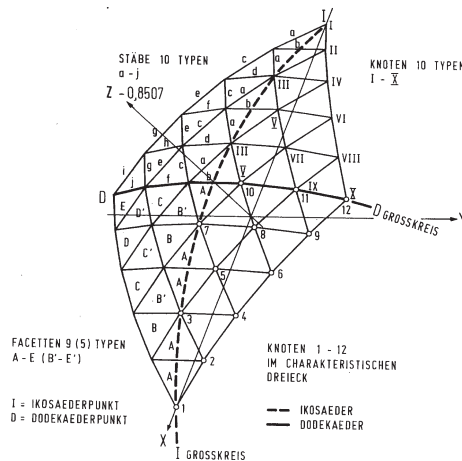
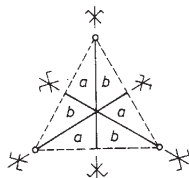
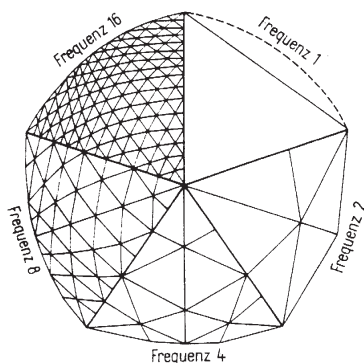


2 TEILUNGSPUNKTE:
3-FACH-TEILUNG DER I-KANTE
9-FACH-TEILUNG DER I-FLÄCHE



3 TEILUNGSPUNKTE:
4-FACH-TEILUNG DER I-KANTE
16-FACH-TEILUNG DER I-FLÄCHE

Beispiele verschiedener Einteilungsfrequenzen²⁹

Schema der alternate Methode für Frequenz 2³⁰Beispiel der Typenverteilung bei 5er Frequenz³¹Schema der triacon Methode für Frequenz 2³²Darstellung der gebräuchlichsten Frequenzen bei der „triacon“ Methode³³

- “alternate” Methode:

Jeder Teilungspunkt der Ikosaederseite ist gleichzeitig Eckpunkt eines Dreiecks.

Diese Methode ist besonders für Kugelabschnitte geeignet. Bei einer 8er-Frequenz stellen sich folgende Eigenschaften ein:

Das Stablängenverhältnis (kürzester : längster Stab) beträgt maximal 1:1,172.

Es gibt zehn unterschiedliche Stab- und Knotentypen (mit zwei Spiegelausführungen) und zehn Paneel- bzw. Flächentypen (mit vier Spiegelausführungen)⁴⁰.

Die ursprüngliche Ikosaederseite ist in 64 (=8²) neue Dreiecke unterteilt.

- “triacon” Methode:

Nur jeder zweite Teilungspunkt der Ikosaederseite wird Eckpunkt eines Dreiecks. Die dazwischen liegenden Punkte sind Mittelpunkte einer Dreiecksseite.

Diese Methode ist besonders für Vollkugeln geeignet.

Bei einer 8er-Frequenz stellen sich folgende Eigenschaften ein:

Das Stablängenverhältnis beträgt maximal 1:1,333.

Es entstehen acht unterschiedliche Stab- und Knotentypen, und vier Paneeltypen mit vier Spiegelausführungen⁴¹.

Diese Methode ist nur für gerade Teilungszahlen (Frequenz = 2; 4; 6; usw.) anwendbar.

Tragverhalten:

Geodätische Netze sind auch für Kuppeln, die über die Halbkugel hinausgehen, geeignet.

Fußnoten zu Kap. 5.3:

- ¹ Heinle / Schlaich, 1996, S. 196
- ² Informationsdienst Holz, 1983, S. 9
- ³ Heinle / Schlaich, 1996, S. 155
- ⁴ Heinle / Schlaich, 1996, S. 209
- ⁵ Heinle / Schlaich, 1996, S.209, 211; Führer / Gerhardt, 2000, S.70
- ⁶ Rickenstorf, 1972, S. 164; Heinle / Schlaich, 1996, S. 211
- ⁷ Führer / Gerhardt, 2000, S. 89; Joedicke, 1962, Bd. 2, S. 101
- ⁸ Führer / Gerhardt, 2000, S. 89f.; Heinle / Schlaich, 1996, S. 218
- ⁹ Führer / Gerhardt, 2000, S. 88
- ¹⁰ Klöppel / Schradt, 1962, S. 130
- ¹¹ Büttner / Hampe S. 258
- ¹² Klimke, Kemmer, Rennon, 1989, S. 6
- ¹³ Klimke, 1983, S. 261,
- ¹⁴ Begriff abgeleitet von Heinle / Schlaich, 1996, S. 155
- ^{15, 16} Begriff: Büttner / Hampe, 1985, S. 245
- ¹⁷ Begriff: Büttner / Hampe, 1985, S. 245; vgl. Föppl, 1892, S. 70
- ¹⁸ Büttner / Hampe, 1985, S. 248; Rühle, Bd. 2, 1970, S. 77
- ¹⁹ Föppl, 1892, S. 67
- ²⁰ Knippers, 1997 und 1998; Schober, 1994; Schlaich, 1992
- ²¹ Föppl, 1892, S. 68 ff.
- ²² Büttner / Hampe, 1985, S. 248
- ²³ Begriffe: *dreiläufig*, siehe: Büttner / Hampe, 1985, S. 249; *Ringnetz*, siehe: Klimke, 1983, S. 257
- ²⁴ Föppl, 1892, S. 91 ff.
- ²⁵ Büttner / Hampe, 1985, S. 247
- ²⁶ Opaeum: "Auge, seltener Nabel, kreisrunde Lichtöffnung im Scheitel einer Kuppel", Definition aus: Koepf, 1968, S. 277
- ²⁷ Begriff: Klimke, 1983, S. 257; Emde, 1979, S.45, spricht von Ringnetz
- ²⁸ Emde, 1979, S.50
- ²⁹ Begriff: Klimke, 1983, S. 257; Büttner / Hampe, 1985, S. 245, Definition und Bild, jedoch Name "Lamellenkuppel"
- ³⁰ Meschke, 1989, S.166 -167
- ³¹ Emde, 1979, S.7, 52; Anschlußzahl: Relation eines Elementes zu Elementen anderer Arten
- ^{32, 33} Emde, 1979, S. 52
- ³⁴ Meschke, 1989, S.312
- ³⁵ Häring, 1983, S. 548
- ³⁶ Heinle / Schlaich, 1996, S. 157
- ³⁷ Klimke, 1983, S. 258
- ³⁸ Rühle, Bd. 2, 1970, S. 76
- ^{39 - 41} Klimke, 1983, S. 258,

Abbildungen zu Kap. 5.3:

- ¹ Föppl, 1892, S. 71
- ² Heinle / Schlaich, 1996, S. 174
- ³ Emde, 1979, S. 45
- ⁴ Rickenstorf, 1972, S. 164
- ⁵ Joedicke, 1962, Bd. 2, S.101
- ⁶ Joedicke, 1962, Bd. 2, S.100
- ⁷ Büttner / Hampe, 1985, S. 255
- ^{8, 9} Büttner / Hampe, S. 258
- ¹⁰ Siegel, 1965, S. 194
- ¹¹ Büttner / Hampe, S. 258
- ¹² Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre), RWTH AC
- ¹³ Mengerinhausen, 1975, S. 64
- ¹⁴ Büttner / Hampe, 1985, S. 245
- ^{15, 16} Büttner / Hampe, 1985, S. 248
- ¹⁷ Schober, 1994, S. 158
- ¹⁸ Föppl, 1892, S. 93
- ¹⁹ Büttner / Hampe, 1985, S. 249
- ²⁰ Büttner / Hampe, 1985, S. 245
- ²¹ Emde, 1979, S. 50
- ²² Büttner / Hampe, 1985, S. 245
- ²³ Emde, 1979, S. 45
- ²⁴ Emde, 1979, S. 52
- ²⁵ Heyden / Knaack, 1998, S. 106
- ²⁶ Ruske, 1988, S. 155
- ^{27, 28} Häring, 1983, S. 548 u. 549
- ²⁹ Emde, 1979, S. 49
- ³⁰ Klimke, 1983, S. 258
- ³¹ Schmiedel, Klimke, 1995, S. 177
- ³² Klimke, 1983, S. 258
- ³³ Büttner / Hampe, 1985, S. 252

5.3.3 Berechnung der Stabwerkskuppeln

Grundlagen der Berechnungen

Die Anwendbarkeit der Induo - Verbundankertechnik auf Stabwerkskuppeln wird im folgenden anhand einer einlagigen geodätischen Kuppel sowie einer einlagigen modifizierten Ringnetz-kuppel untersucht.

Die Einlagigkeit erfordert, wie schon bei den Stabwerkstonnen (Kapitel 5.2.3.1) gezeigt, biegesteife Knotenpunkte, um die auftretenden Biegemomente aufzunehmen.

Danach ergibt sich entsprechend Kapitel 5.1.2 ein maximal aufnehmbares Moment von 0,25 - 0,30 kNm. Ein Vorschlag für eine entsprechende Knotenausbildung wird als Massivknoten mit Stabinnenverschraubung im Kapitel 6.2.3.1 angeführt.

Parameter für die Berechnungen

Als Standardlastfall wird die Kombination Eigengewicht und Schnee mit $1,5 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Die Lastenleitung erfolgt punktuell in die Knoten. Der Stabquerschnitt beträgt bei beiden Konstruktionstypen 10/10 cm.

Die genauen Berechnungsergebnisse finden sich im Anhang. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden für geodätische und Ringnetz-kuppel jeweils Struktur, Normalkräfte, Momente M_y und elastisch Verformung dargestellt.

Die Werte der Ringnetz-kuppel sind aufgrund ihrer geringen Größe in doppeltem Maßstab wiedergegeben.

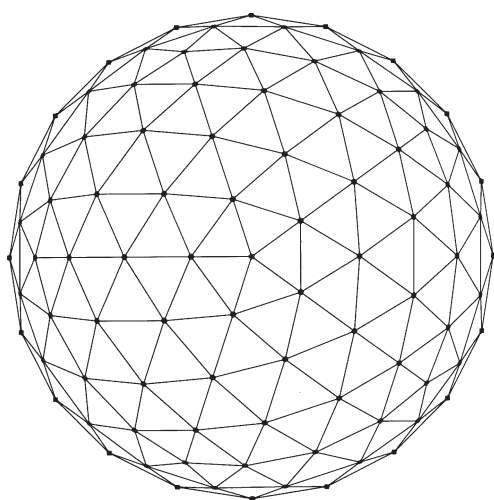
5.3.3.1 Geodätische Kuppel - Ergebnisse aus den Berechnungen

Bei dem Berechnungsmodell handelt es sich um eine Halbkugelkalotte, die umlaufend an den Knotenpunkten gelenkig gelagert ist.

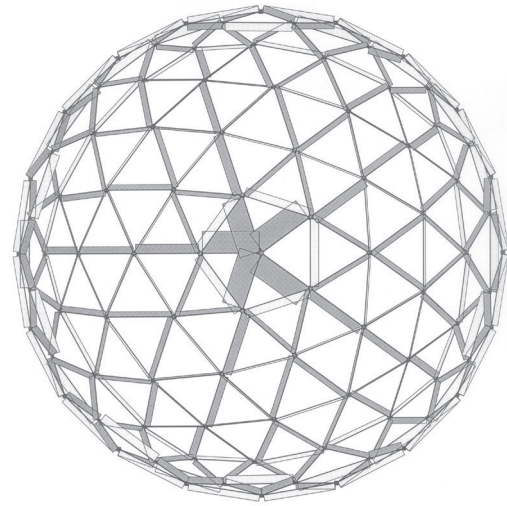
Die Teilungszahl der Ikosaederkante beträgt 4, daraus ergeben sich sechs verschiedene Stabtypen. Die Entwicklung der Netzstruktur entspricht der in Kapitel 5.3.2.3 erwähnten „alternate“-Methode.

Geodätische Kuppel: Strukturdaten

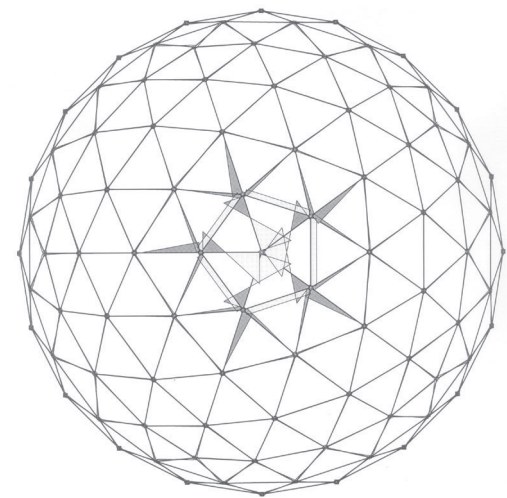
Auflager	20
Durchmesser	16,00m
Höhe	8,00m
Stabtypen	6
Stablängen	2,03 - 2,60m
Stäbe	250
Stabquerschnitt	10/10
Knoten	91



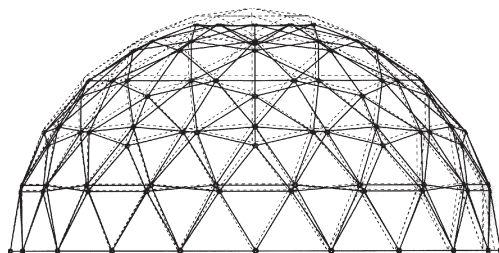
Geodätische Kuppel - Grundriß



Geodätische Kuppel - Normalkräfte



Geodätische Kuppel - Momente



Geodätische Kuppel - Verformung

Die Berechnungsergebnisse zeigen ein sehr günstiges Tragverhalten nach dem Schalenprinzip.

Im oberen Kuppelbereich überwiegen die Druckkräfte, deren Werte sehr homogen sind und die Stäbe nur zu zirka 20-40% auslasten.

Die großen Werte im Polbereich entstehen durch die Zusammenführung der meridian verlaufenden Stäbe, die die Ausbildung eines Druckringes verhindern. Diese Stäbe erfahren eine Auslastung von 90%, bilden mit ihren Werten aber die Ausnahme.

Der Übergang der oberen Zone in die untere Zone ist durch die typische Aktivierung der eher in horizontaler Richtung verlaufenden Zugstäbe gekennzeichnet.

Die sogenannte „Bruchfuge“ liegt auch hier ungefähr bei einem Öffnungswinkel von 46 bis 50 Grad.

Die Zugbeanspruchungen sind sehr gering und liegen weit unter der Grenze der Beanspruchbarkeit.

Die Momentenbeanspruchung der Knoten ist mit maximal 95% relativ hoch, was zum Teil an der vereinfachten Lastannahme liegt. Diese Werte treten aber ausschließlich im Polbereich auf, sonst lässt die Momentenfreiheit der Knoten und Stäbe auf eine sehr effektive Aktivierung der Schalenwirkung schließen.

Die Stäbe des untersten Ringes nehmen die Horizontalkomponenten durch Zugbeanspruchung auf. Dadurch ergeben sich rein vertikale Auflagerreaktionen in den Auflagerpunkten.

5.3.3.2 Modifizierte Ringnetzkipel - Ergebnisse aus den Berechnungen

Die Geometrie der halbkugelförmigen Ringnetzkipel wurde im Bereich des Auges (Opaeum) abgewandelt, um eine übermäßige Stabverdichtung zu vermeiden.

Aus der Teilungszahl 20 ergeben sich eigentlich acht Ringe. Ring 7 und 8 wurden zusammengefaßt und Ring 5 leicht verschoben, so daß die gleichmäßige Teilung erhalten bleibt. Die Ringnetzkipel ist wie die geodätische Kipel umlaufend an den Knotenpunkten gelenkig gelagert. Der Durchmesser des Opaeums beträgt 2,45m.

Modifizierte Ringnetzkipel: Strukturdaten

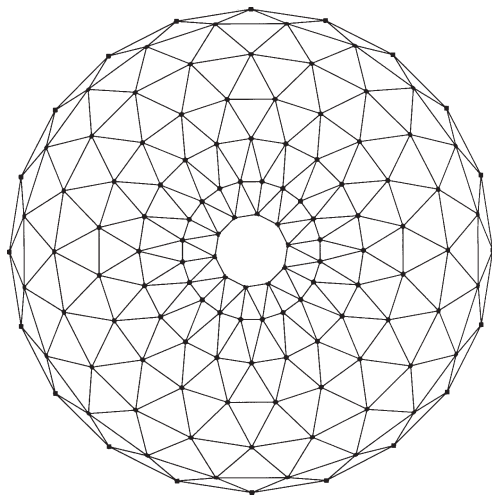
Auflager	20
Durchmesser	16,00m
Höhe	8,00m
Stabtypen	13
Stablängen	0,72 - 2,80m
Stäbe	360
Stabquerschnitt	10/10
Knoten	130

Wie die geodätische Kipel trägt auch die Ringnetzkipel die Lasten nach dem Schalenprinzip ab. Der Bereich oberhalb der Bruchfuge (Ringe 5 - 7) ist ausschließlich druckbelastet, unterhalb bilden sich Zugringe aus.

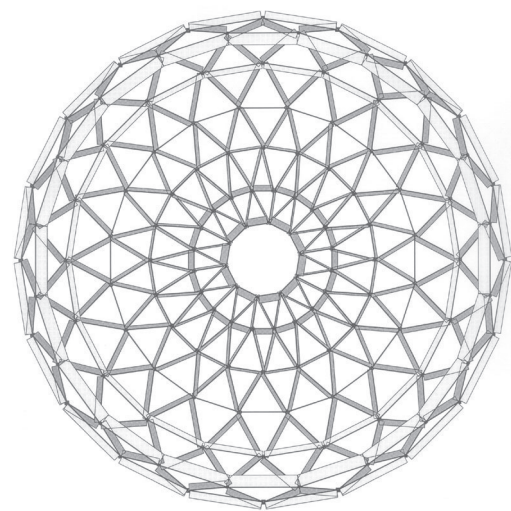
Die Diagonalen sind ausschließlich druckbelastet.

Die Gesamtauslastung der Kipel ist bei einem Durchmesser von 16 m gering: die Druckstäbe sind zu maximal 21% ausgelastet, die Zugstäbe zu 13% und die Induo - Verbundanker zu 22%.

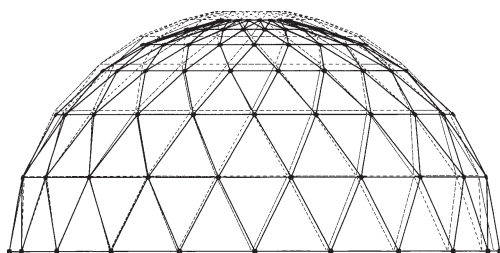
Aufgrund der im Vergleich zur geodätischen Kipel optimierten Lastannahme (vgl. Anhang) und der Entlastung des Pols durch das Opaeum bleibt die Kipel unter Gleichlast nahezu momentenfrei.



Modifizierte Ringnetzkipel - Grundriß



Modifizierte Ringnetzkipel - Normalkräfte



Modifizierte Ringnetzkipel - Verformung

Fazit

Die geringere Gesamtauslastung der Ringnetzku­p­pel im Vergleich zur geodätischen Kuppel erklärt sich zum einen aus der genaueren Lastannahme - die Gesamtlast aus Eigengewicht und Schnee liegt etwa 25% niedriger - zum anderen an der größeren Anzahl von Stäben (360 gegenüber 250).

Auf die Momentenbelastung der Knoten wirkt sich darüber hinaus die Entlastung des Pols durch das Auge (Opaeum) positiv aus. Hier treten bei der geodätischen Kuppel die höchsten Werte auf.

6 Knotenkonstruktionen

Für Tragkonstruktionen als räumliche Knotenstabtragwerke hat der Gelenkpunkt als Fügung von Knoten, Anschlüssen und Stäben hinsichtlich Geometrie, Gestaltung, Material, Festigkeit, Herstellung und Montage große Anforderungen zu erfüllen.

Der geometrische Mittelpunkt des Gelenkes liegt im Schnittpunkt der Wirkungslinien aller angefügten Stabelemente. Unter der Voraussetzung, daß in den zu betrachtenden Tragwerken hauptsächlich Normalkräfte in den Stäben transportiert werden, muß diese geometrische Anordnung eine momentenfreie Kraftführung auch in diesem Anschlußpunkt gewähren.

Eine besondere Kategorie von Knoten- und Anschlußkonstruktionen fordern die einlagigen Knotenstabtragwerke, die durch ihren minimierten Materialeinsatz besonders wirtschaftlich sind. Für die Stabilität der gesamten Tragkonstruktion benötigt dieses statische System im Knotenpunkt einen bedingt biegesteifen Anschluß mit Momentenübertragung.

Im Schnitt- bzw. Kreuzungspunkt der angefügten Stäbe ist die Gestaltung und Proportion der Stäbe untereinander und auf den Knoten selbst, im Detail sowie auf die Ganzheitlichkeit des Baukörpers, abzustimmen.

Bei der Materialwahl sind insbesondere folgende Kriterien zu berücksichtigen wie Festigkeit, Alterungsbetändigkeit, Brandschutz, serielle oder elementierte Herstellung, Maßhaltigkeit und Toleranzen sowie Montagefreundlichkeit.

Die Vorstellung und Analyse historischer und aktueller Systembeispiele ist ein Einblick in die konstruktive und gestalterische Vielfalt der unterschiedlichen Lösungsansätze. Für die spezielle Anwendung von räumlichen Knotenstabtragwerken in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik fließen die Erkenntnisse aus diesen Informationen in die Suche nach

- aktuellen marktgängigen Lösungen
- Abwandlungen vorhandener Techniken und
- neu entwickelten Lösungsmöglichkeiten ein.

6.1 Historische und markt- gängige Beispiele der Tragwerkelemente am Gelenkpunkt

Als Ergebnis der Literatur-, Markt- und Internetrecherche gibt das erste Kapitel einen Überblick zu den wichtigsten Knotenkonstruktionen aus der Entwicklungsgeschichte der Knotenstabtragwerke. Die Benennung der Knoten folgt der Typenbezeichnung seitens der Anbieter, oder bei fehlender offizieller Bezeichnung beinhaltet die frei gewählte Angabe das Hauptmerkmal der konstruktiven Ausbildung.

Neben der Werkstoffangabe zu Stäben und Knoten zeigt die Beschreibung die konstruktive Ausbildung der Knoten-Stabverbindung und ihre Hauptanwendung für bestimmte Tragstrukturtypen auf.

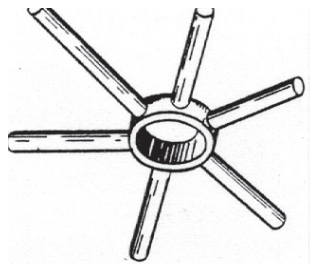
Ausgeführte Hochbauprojekte geben beispielhaft einen Einblick in die bauliche Umsetzung verschiedener Knotenkonstruktionen.

Die Gliederung der Tragwerkselemente, Knoten, Anschluß und Stabende, erfolgt nach ihrem Einsatz in ein-, zwei- und mehrlagigen Tragsystemen.

6.1.1 Einlagige Systeme

1. Ring, geschweißt

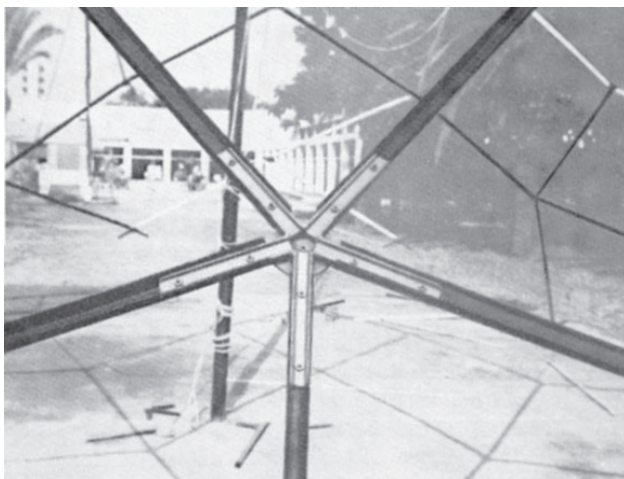
Stahlrohre oder Stahlprofile sind an einem Ring angeschweißt, die Kraftübertragung erfolgt durch Ringkräfte und Momente.



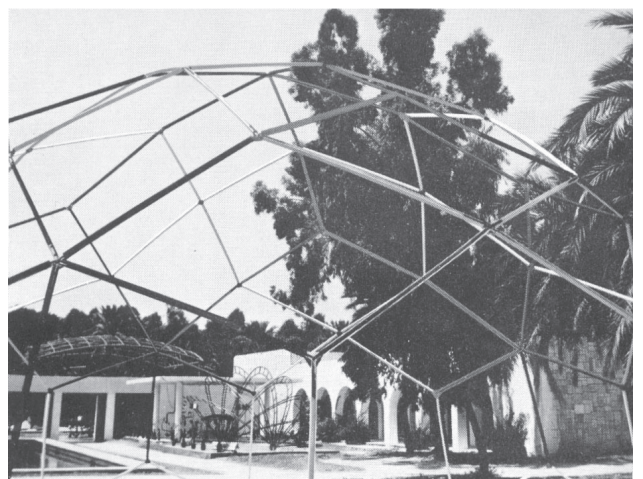
Rohre an Ring geschweißt¹

2. Gepreßter Blechteller

Stahlprofile sind auf Blechteller verschraubt oder angeschweißt.

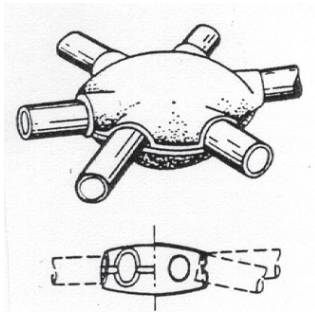


Ausschnitt aus Versuchskuppel²



Versuchskuppel, Universität Neapel³

Entwurf: Prof. Carputi



Stahlrohre zwischen Stahlgußschalen⁴

3. SDC-System (Stephan du Chateau, F)

Stahlrohre sind zwischen zwei Stahlgußschalen gesteckt und nach ihrer Ausrichtung verschweißt. Vor der Verschweißung können im Rahmen eines bestimmten Winkelspielraumes Feineinstellungen von Länge und Neigung vorgenommen werden. Für Kugelkalotten, Kuppeln und Tonnen anwendbar.



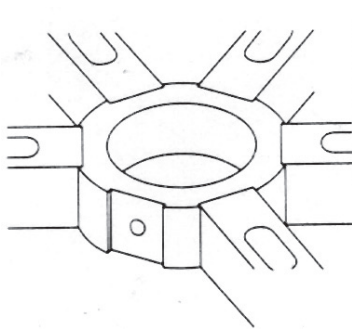
Kirchenkuppel, Chartres-Rechéores⁵ Konstruktion: S.du Chateau



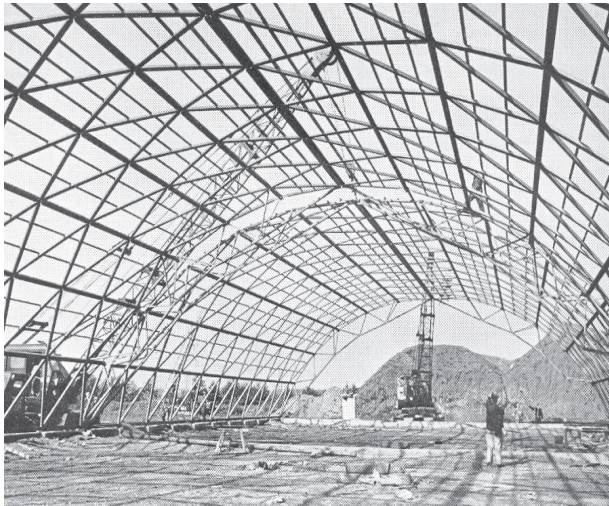
SNCF-Tennishalle, Paris-Vaugirard⁶ Konstruktion: S.du Chateau

1.4 Tellerknoten (MERO, u.a.)

Stahlrechteckhohlprofile werden über einen Bolzen oberflächenbündig an einen Stahlteller angeschlossen. Abdeckplatten schließen den Teller. Ein Anschluß offener Profile ist möglich. Für gekrümmte, einlagige Strukturen geeignet.



Rechteckhohlprofile an Stahlteller⁷

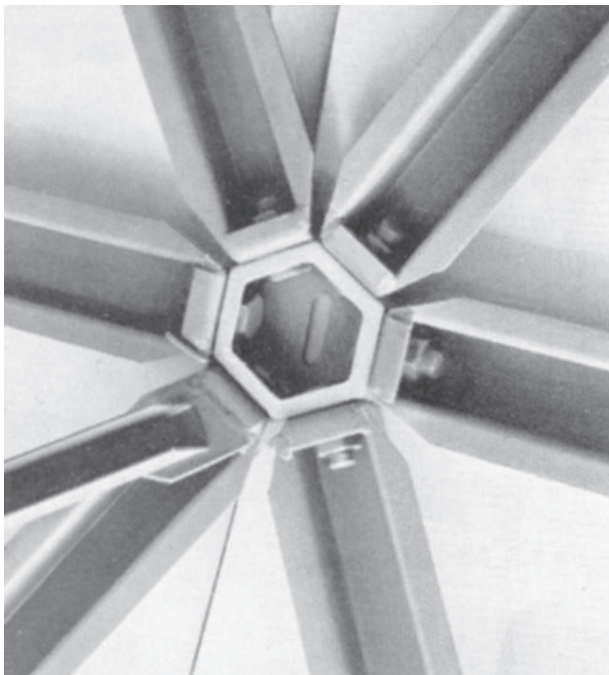


Wuppermann-Bogenhalle⁸ Konstruktion: Wuppermann GmbH

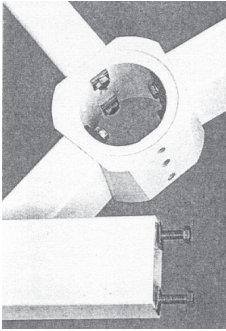


Herzkloliklinik, Bad Neustadt¹⁰

Architekt: Wilhelm



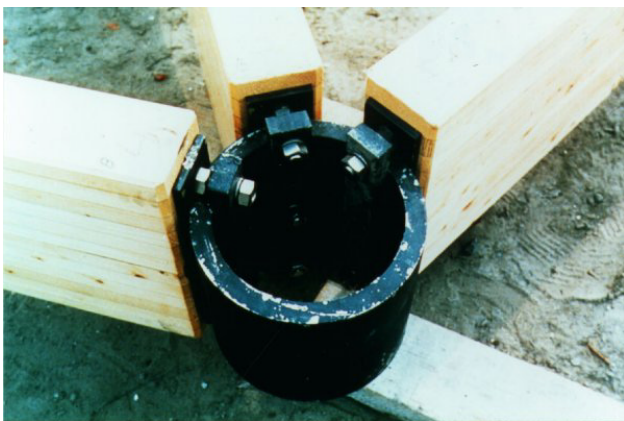
Knotendetail einer Wuppermann-Bogenhalle⁹



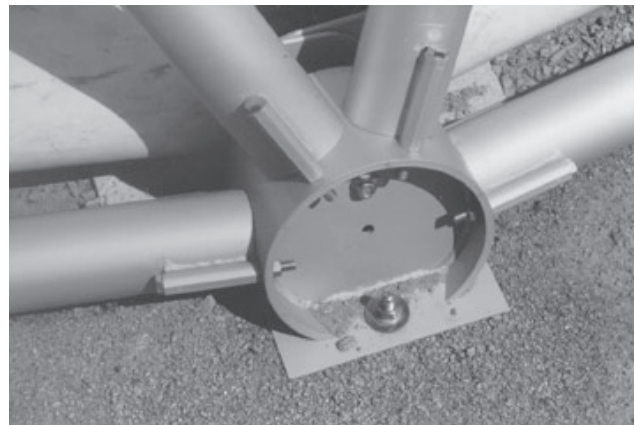
Rechteckprofile an Zylinderknoten¹¹

5. Zylinderknoten (MERO, u.a.)

Mehrere übereinanderliegende Bolzen gewährleisten einen biegesteifen Anschluß der Rechteckprofile an den Zylinderknoten. Kraftübertragung erfolgt über Biegung und Längskraft. Einlagige Dachkonstruktionen mit elementierter Eindeckung liegen direkt auf den Profilen. Für Kuppeln und Tonnen anwendbar.



„Dolfinarium“, Brügge¹²
Architekten: Studiebureau Jonckheere; Konstruktion: van Wetter

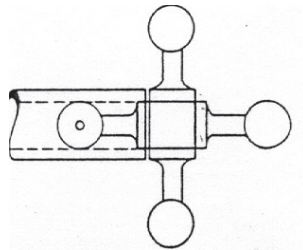


Kuppelbau, Vitra-Museum, Weil am Rhein¹³
Entwurf/Konstruktion: B. Fuller

6. Abstracta-System

(Abstracta Construction Ltd., GB)

Die Biegesteifigkeit der kreuzförmigen Knotenpunkte erfolgt durch den Kontaktschluß mit dem Kuglement, daher sind Diagonalstäbe zur Aussteifung nicht erforderlich. Verwendetes Material: Aluminium.

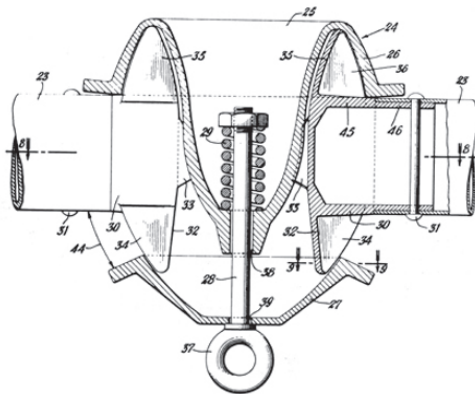


Rohrprofile an Kreuzknoten¹⁴

7. „Three-Grid“-Knoten

(Buckminster Fuller)

Auf das Ende eines Stahlrohres wird eine kugelsegmentförmige Platte geschweißt, die als Widerlager dient. Die Lagesicherung erfolgt über einen Bolzen, der senkrecht zur Tragebene die beiden Formteile verbindet und den Formschluß mit den Stabenden herstellt. Durch die runde Form der aufgeschweißten Kopfplatten ist vor der endgültigen Verschraubung eine Feinjustierung des Gelenkpunktes möglich. Für Kuppeln anwendbar z.B. vielfältiger Einsatz des Knotens in Buckminster Fullers „Geodesic Structures“



Rohrprofile zwischen zweiteiligen Knoten¹⁵



USA-Pavillon, Weltausstellung 1967, Montreal¹⁶ Entwurf / Konstruktion: Fuller & Sadao, Inc.

6.1.2 Zweilagige Systeme

1. Knoten aus Stahlprofilen

Verschiedene Systeme, z.B.

Variatec, Frankreich

Pyramitec, Frankreich

Tridimatec (S. du Chateau), Frankreich

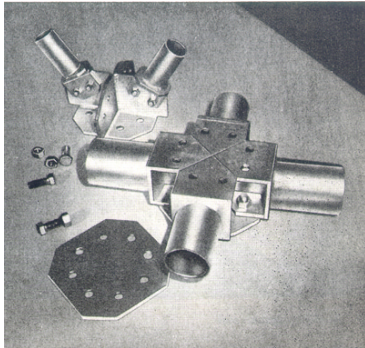
Tesep-System, Frankreich

Space-Deck-System, GB

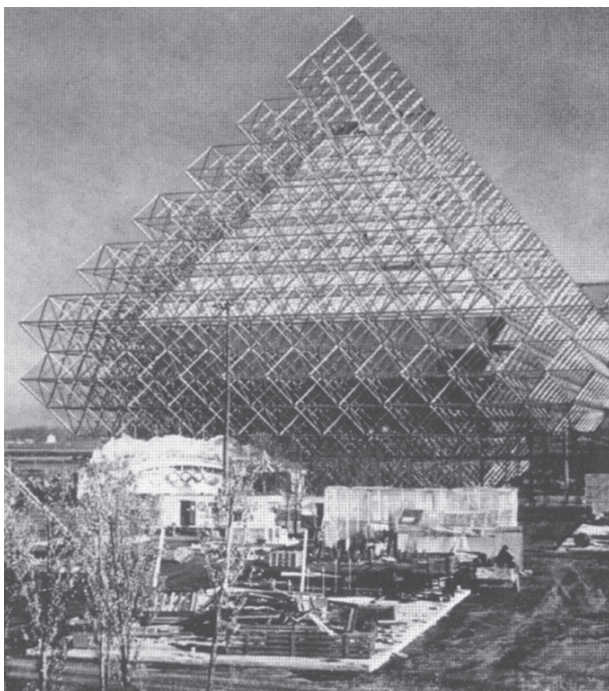
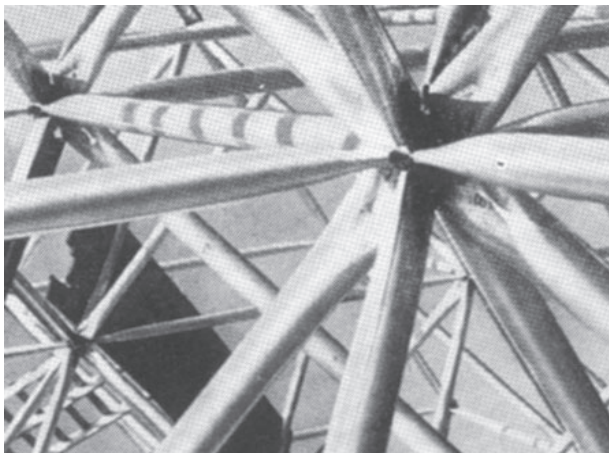
Space-Grid-System, USA

Tubaccord-System, Frankreich,

sind Sonderanfertigungen mit unterschiedlichen Knotenelementen. Die Kraftübertragung erfolgt nach einem gleichen Grundprinzip: Die Stäbe (meist aus offenen Profilen) sind axial an ein Knotenelement angeschlossen. Der Anschluß erfolgt über eine Schweißnaht oder eine ein- oder zweischnittige Verschraubung. Das zentrale Knotenelement ist zum Beispiel eine Stahlplatte mit aufgeschweißten Winkeln, ein Stahlprofil oder ein Blechteller. Für zweilagige Roste, auch für mehrlagige Raumstabwerke, anwendbar.



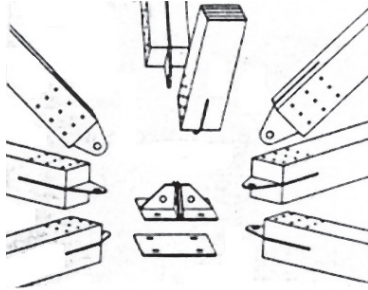
Tridimatec-System¹⁷



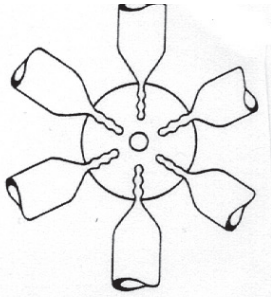
Knotendetail und Gesamtansicht, Gyrotron-Structures, Weltausstellung 1967, Montreal¹⁸
Konstruktion: Auger, Solomon, Alcock; London



Lichthof-Auditorium, Gewerkschaftskongress, London¹⁹



Knoten aus eingeschlitzten Stahlblechen²⁰



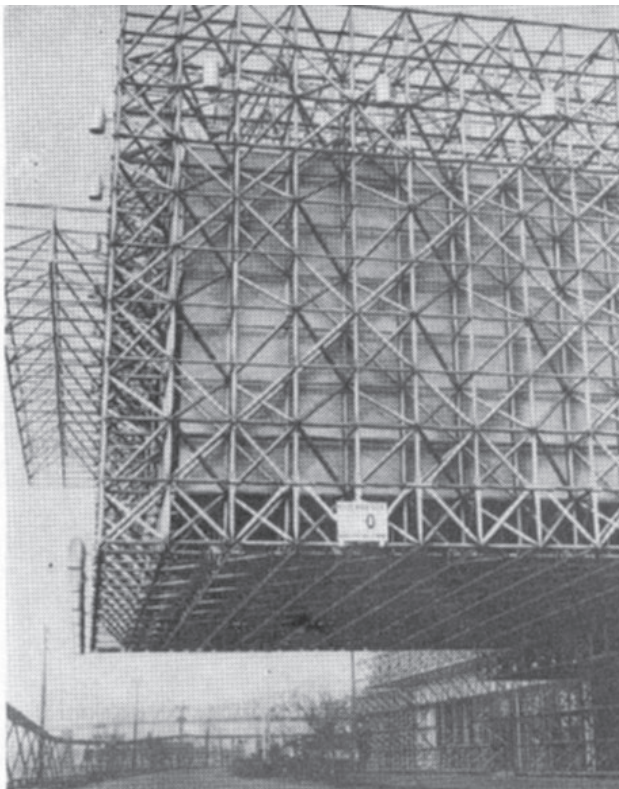
Rohrenden in Nabe eingepreßt²¹

2. Hybrider Knotentyp

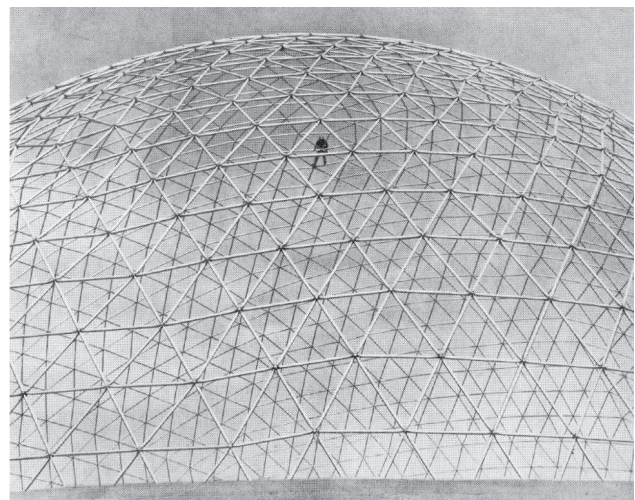
Der Knotentyp zeichnet sich durch verschiedene Konstruktionsprinzipien aus, z.B. axialer Anschluß von Holzstäben an ein Knotenelement (Kopfplatte mit Winkellaschen, zweischichtige Blechteller, etc.). Geeignet für Stahl-Stahl-Konstruktionen sowie Holz-Stahl-Konstruktionen.

3. Triodetic-System (Fentiman a. Sons Ltd., CND)

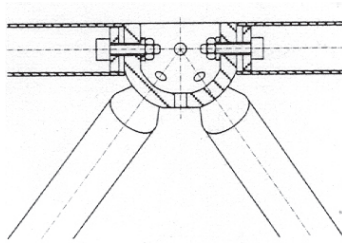
Zusammengedrückte Rohre werden unter dem erforderlichen Winkel abgeschnitten und in die gezahnten Schlitze der Nabe eingepresst. Die Lagesicherung erfolgt über je eine Scheibe auf den ebenen Stirnflächen des Knotens, gesichert durch eine Schraube. Die Stäbe können eine beliebige Querschnittsform besitzen. Die Deformation der Nabe unter Lasteinfluß bewirkt den endgültigen, festen Anschluß. Es sind keine Schraub-, Niet- oder Schweißverbindungen notwendig. Das System ist im Vergleich zu anderen relativ leicht demontierbar.



Niederländischer Pavillon, Weltausstellung 1967, Montreal²²
Entwurf: Boks, Eijkelenboom, Middelhoek; Rotterdam
Konstruktion: C. B. A. Engineering Ltd.; Vancouver



„Cinerama“, Monterrey, Mexico²³
Entwurf u. Konstruktion: Cortez und Castano; Mexico City



Rohrprofile an Halbkugelnknoten²⁴

2.4 Napfknoten (MERO bzw. Schraubverbindung Typ „Weimar“)

Der Anschluß der Obergurtlage erfolgt oberflächenbündig über ein Montageloch vom Stab aus. Die Verbindungselemente sind nicht sichtbar. Bei Anschluß jeweils zweier Schrauben pro Stabende ist ein biegesteifer Anschluß möglich.



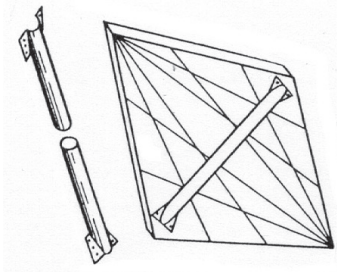
Globe Arena, Stockholm²⁵

Architekt: Berg, Stockholm



Musée des Beaux Arts, Montreal²⁶

Architekt: Safdie, USA



Geknickte Blechelemente mit Stabdiagonale²⁷

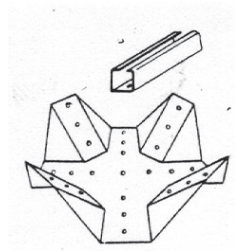
5. Rhombenförmige Blechelemente (Buckminster Fuller)

Die Blechelemente sind in der Längsachse leicht geknickt. Ein rechtwinklig angeordneter Stab in der „Obergurtebene“ sorgt für die erforderliche Steifheit des Elementes. Die Verbindung erfolgt über die punktuelle Verschraubung der rautenförmigen Elemente untereinander. Das komplette Blechelement ist der geometrischen Form eines flachen Tetraeders ähnlich. Das Tragverhalten wird im wesentlichen durch den Scheibencharakter der Aluminiumbleche bestimmt. Anwendung bei Flächentragwerken, Kuppeln, Tonnen.



Kaiser-Dome, Honolulu²⁸

Entwurf/Konstruktion: Fuller, Richter



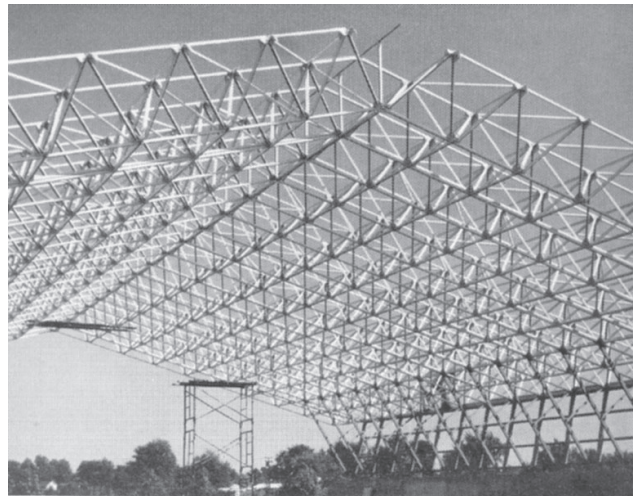
Gekantetes Walzblech für Stäbe und Knoten²⁹

6. Unistrut-System (Unistrut Corp., USA)

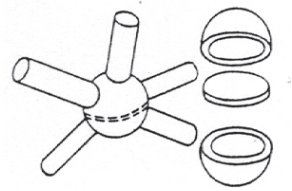
Die Knoten und Stäbe werden aus der gleichen Sorte Walzblech hergestellt. Die Ecken des Blechstückes werden unter 45° aufgebogen und dienen zum Anschluss der Diagonalstäbe. Das System ist durch die gespiegelte Anordnung der Knotenelemente auch für mehrlagige Roste anwendbar. Ein einziger Bolzen reicht nach Produktangaben zum Anschluß aus.



Beleuchtungsgitter; Center Coliseum, Seattle³⁰



Firstdach für die Sporthalle einer Schule, USA³¹
Architekt: Attwood

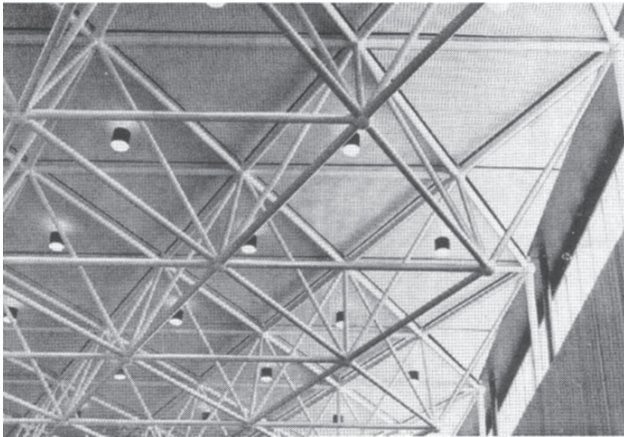


Stahlrohre an Stahlhohlkugel³²

6.1.3 Mehrlagige Systeme

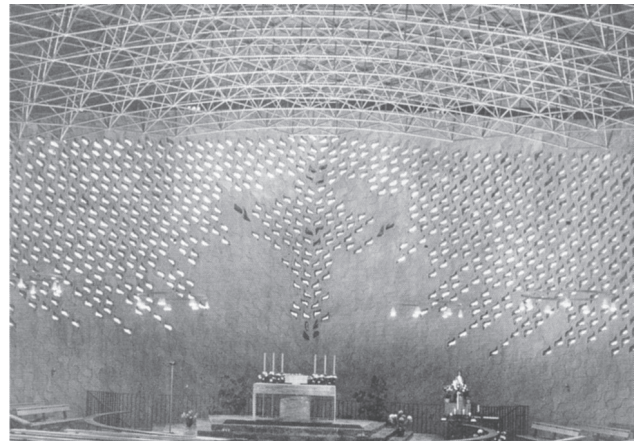
1. Oktaplatte (Mannesmann, u.a.)

Es handelt sich um das erste hergestellte Raumfachwerk in Schweißkonstruktion. Die Stäbe sind mit Stahlhohlkugeln verschweißt und leiten ihre Last über die Kugelwandung flächenförmig ein. Die Anschlußwinkel sind flexibel. Die Steifigkeit des Knotens erfolgt entweder über eine Scheibe, die bei der Vorfertigung der Stahlkugeln zwischen die Kugelhalbschalen gesetzt wird, oder über ein Stahlrohr, das als Ober- oder Untergurtlage durch die Kugel hindurchläuft. Die gewünschte Anzahl der Stabanschlüsse (direkt an der Kugel) erfordert aber einen entsprechend größeren Kugeldurchmesser. Außerdem ist die Ausführung der Montage aufgrund der überwiegend manuell durchzuführenden Schweißarbeiten relativ aufwendig. Das System „Oktaplatte“ läßt sich nach Produktangaben überwiegend vorfertigen.



Ruhrhalle, Bochum³³

Entwurf: Hochbauamt Stadt Bochum

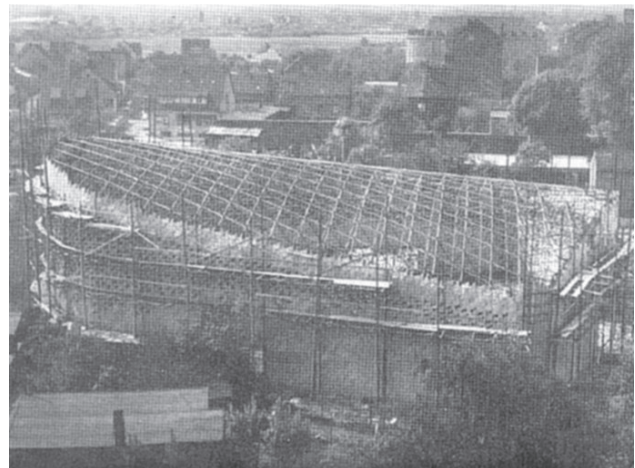


Innenansicht³⁵



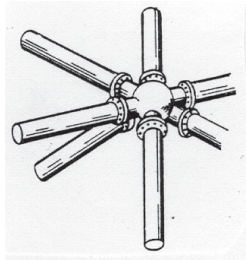
Heilstätte, Engelskirchen³⁴

Architekt: Deilmann

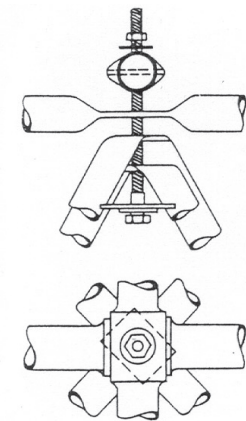


Kirche, Düsseldorf-Rath³⁶

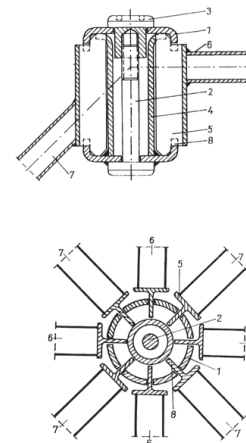
Architekt: Lehmbrock



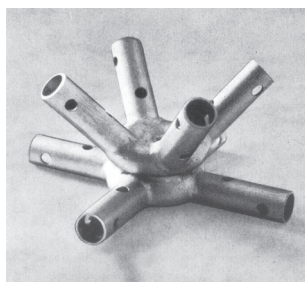
Stahlrohre an Stahlgußflanschverbindungen³⁷



Anschlußflächen über Rohrpressung³⁸



T-Profile in schalenförmige Deckelemente³⁹



Rohrstutzen an Torus-Rohrring⁴⁰

2. Gußknoten mit Flanschanschluß (Stewart & Lloyds, GB)

Der Knoten besteht aus Stahlguß mit Flanschverbindungen. Die Montage gegenüber 3.1 ist einfacher, da die Stäbe über Flanschverbindung angeschlossen werden.

3. Gepresste Rohre (SARTRON, Zeiss-Dywidag, u.a.)

Durch Rohrpressung entstehen gleichartige Anschlußflächen, die miteinander senkrecht zur Trägerebene verschraubt werden. Die räumliche Abstimmung der Anschlußflächen ist aufwendig. Die Presszone muß die Kraft durch Biegung übertragen. Es entstehen Momente.

4. Schalenknoten „Kieffer“ (Kieffer, F; IFL-Knoten, DDR)

Der Schalenknoten Typ „Kieffer“ ist ein achsschnittiger Knoten, in dem die Druckkräfte über ein zentrales, senkrecht zur Trägerebene stehendes Rohr aufgenommen werden. Die Zugkräfte werden als Umlenkkräfte über zwei schalenförmige Deckelemente aufgenommen. Die Stäbe sind in der Regel Stahlrohre, die in einem der Raumgeometrie entsprechenden Winkel abgeschnitten sind. An deren Ende sind T-Profile angeschweißt, die in das Deckelement eingehängt werden. Die Klemmwirkung wird durch abschließende axiale Verschraubung der Deckelemente mit dem zentralen Rohr erreicht. Der „IFL-Knoten“ folgt dem gleichen Grundprinzip, die Kopfstücke der Stäbe unterscheiden sich jedoch vom Typ „Kieffer“.

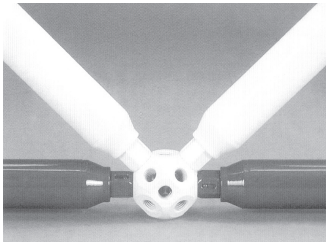
5. Rohrringknoten (Bourquardez, F)

Ein torusförmiger Rohrring dient als Anschlußelement für Rohrstäbe in der Ebene oder unter einem bestimmten Winkel. Es lassen sich bis zu 4 Stäbe anschließen. Mit zwei übereinander verschweißten Rohrringknoten lassen sich Stabwerke mit mehreren Gurtebenen herstellen.

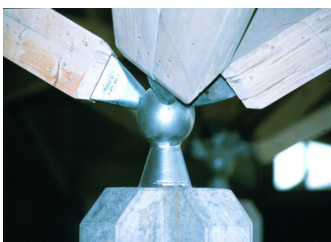
6. Kugelnknoten

(MERO, Hérissou-Knoten, u.a.)

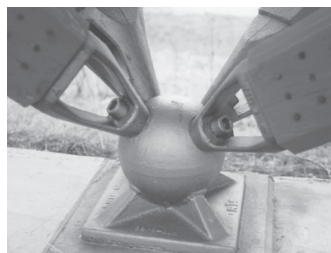
MERO: KK-System⁴¹



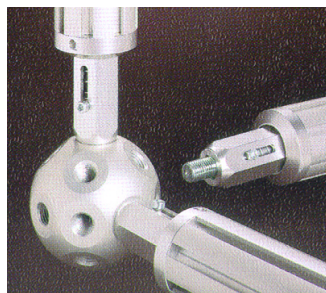
Holzstäbe an Kugel
über zweischnittiges
Gußeisenprofil⁴²



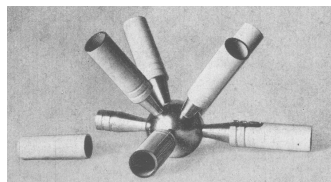
Holzstäbe an Kugel
über offenes Guß-
zwischenelement⁴³



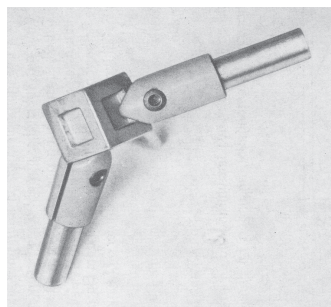
SYMA-Orbitsystem⁴⁴



Hérissou-System⁴⁵



Zangenknoten
(„Würfelprinzip“)⁴⁶



MERO - KK-System, MERO - Holzstäbe, Kugel als Gußteil / geschmiedet, SYMA-Orbitsystem, Hérissou-Kugelnknoten, Zangenknoten („Kugelnprinzip“)

Das Kugelnknotenprinzip suggeriert nicht nur aus statischer, sondern auch aus gestalterischer Sicht das Prinzip der axialen Verbindung. Die Kugelform ermöglicht den Stabanschluß aus allen Richtungen. Der Einsatz ist in verschiedenen Raumgeometrien möglich.

Das Prinzip der axialen Verbindung gewährleistet eine nahezu momentenfreie Kraftübertragung. Ein kraftschlüssiger Anschluß erfolgt in der Regel über einen Gewindestab.

Klassischer MERO-Knoten mit Kerbstift: der Stift überträgt die Druckkräfte über Flächenanschlag, der Gewindestab nimmt die Zugkräfte auf. Der MERO-Knoten ist vor allem für Raumfachwerke aus Stahl ausgelegt, Holztragwerke sind möglich, aber nicht die Regel. Die leichte (De-)Montierbarkeit ermöglicht einen vielfältigen Einsatz auch im Messebau und Innenausbau.

In Frankreich und der DDR wurden nach Verbindungstechniken ohne Schweißen und Verschrauben gesucht. Bei der Knotenpunktverbindung „Hérissou“ von Beque und Kieffer wird der Anschluß des Stabes an den Kugelnknoten über hydraulische Verpressung erzeugt. Die Rohrwandung des Stabes wird über an die Kugel geschweißte Knotenanschlußstützen gestülpt, die an ihren Enden gerillt sind. Diese Kontaktfläche wird durch hydraulische Stempel verpresst. Nachteil ist, daß dieser Vorgang für jeden Stabanschluß separat durchgeführt werden muß.

Das Verbindungsprinzip von M.G. Chamayou greift auf das Prinzip der zangenartigen Klemmwirkung zurück. Zwei Halbschalen, die durch Verschweißung oder Verklebung den Kopf des anzuschließenden Stabes darstellen, greifen zangenartig in Kantenstege eines würfelförmigen Gußteils ein.

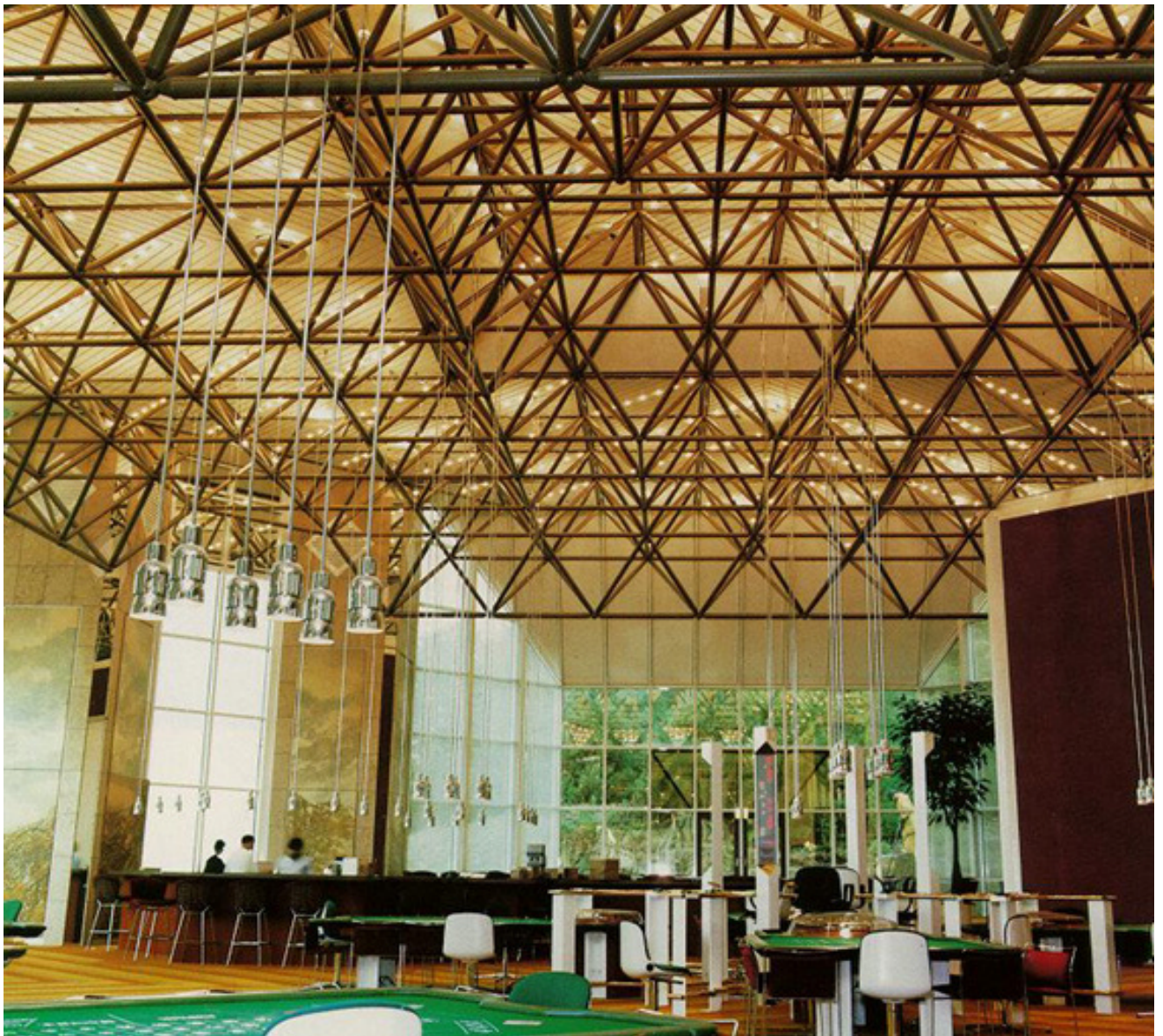
MERO-KK-System (Stahlstäbe): Spielbank Hohensyburg, Neue Messe Düsseldorf, Deutscher EXPO-Pavillon Osaka, 1970 Messe Rom.

Kugelnknoten (Holzstäbe): Aussegnungshalle Reutlingen, Kantinegebäude Kitzingen.

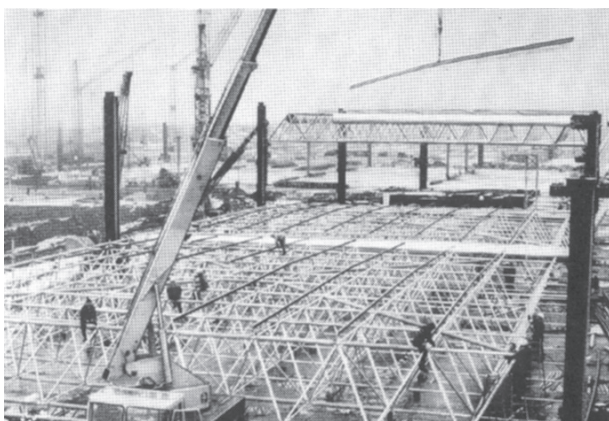
Kugel als Gußteil/geschmiedet: Holzbrücke München-Thalkirchen, Seeparksaal Arbon, CH, Kath. Pfarrzentrum Fällanden, CH.

Kugelnknoten (Messebau): SYMA-Orbit-System, MEROFORM.

MERO-Knoten (Fassadenbau): „MERO-Tensile“ Musée des Beaux Arts, Montreal Bücherei Glarus, CH



Spielbank, Hohensyburg⁴⁷



Messehallen, Düsseldorf⁴⁸

Architekt: Wilke
Ingenieur: Mengeringhausen



Deutscher EXPO-Pavillon, 1970 Osaka⁴⁹

Architekt: Schulze
Ingenieur: Mengeringhausen



Messe, Rom⁵⁰

Architekt: Technikon, Rom



Aussegnungshalle, Reutlingen⁵¹

Architekt: Riehle



Holzbrücke, München-Thalkirchen⁵³

Architekt: Dietrich



Kantinegebäude, Kitzingen⁵²

Architekten: Gärtner u. Hench



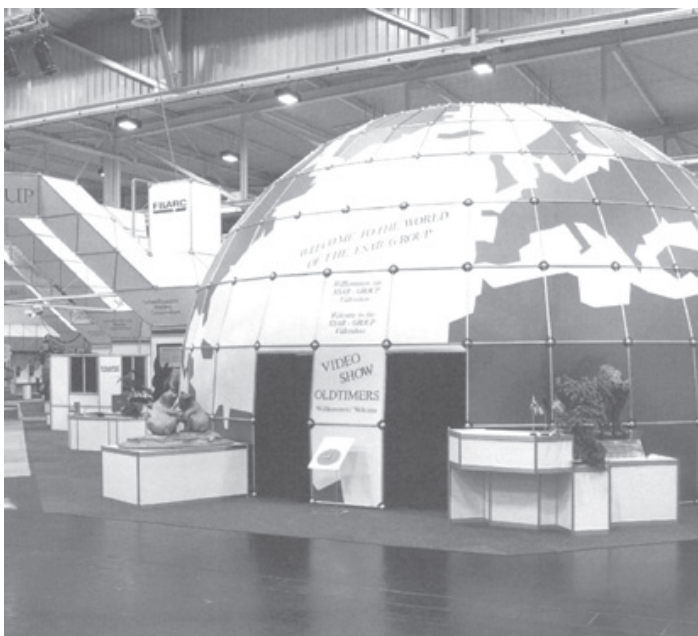
Holzbrücke, München-Thalkirchen⁵⁴



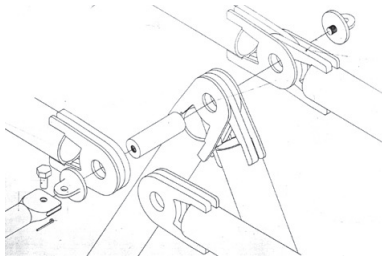
Seeparksaal, Arbon (CH)⁵⁵
Architekt: Haas, Konstruktion: Wälli (CH)



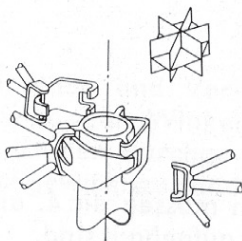
Kath. Pfarrzentrum St. Katharina v. Siena, Fällanden (CH)⁵⁶
Entwurf: Brader, Nüesch; Konstruktion: Desserich



SYMA-Orbitsystem (Messebau)⁵⁷



Knoten aus mehrschnitteigen Flachblechen u. Bolzen⁵⁸

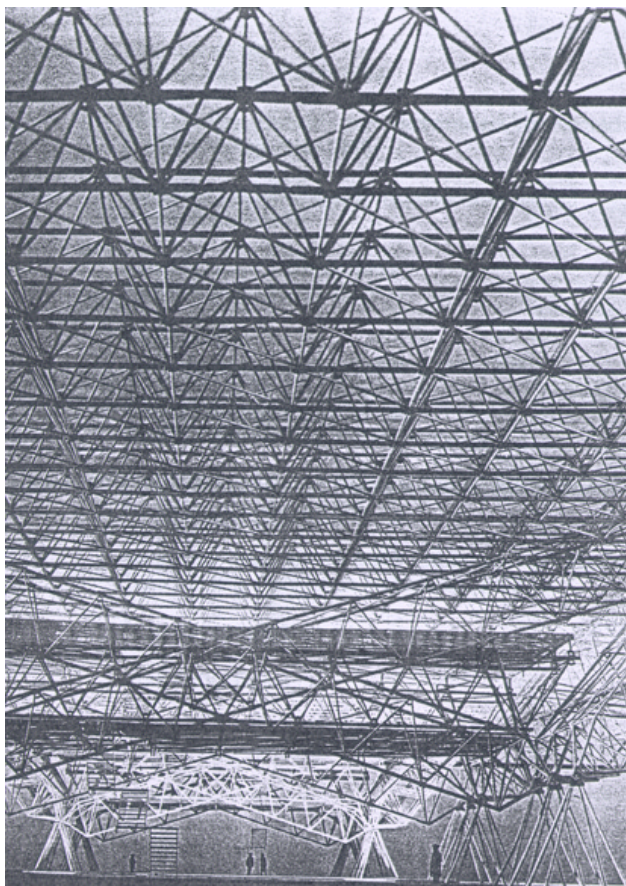


Stäbe über Schanierklammer ringförmig an Rohr angeschlossen⁵⁹

7. „Wachsmann“-Knoten (Konrad Wachsmann)

MOBILAR STRUCTURE

Stab-Verbindungssystem für Raumtragwerke
Konrad Wachsmann 1946



Flugzeughangars in den USA⁶⁰

Entwurf: Wachsmann

Es gibt verschiedene Bausysteme und Knotenpatente für Raumtragwerke, Fertighaussysteme und Trägerroste.

Das System „Möbilar Structure“ ist für zweilagige Trägerrostsyste entwickelt worden. Das System ist leicht montierbar und industriell vorfertigbar. Es handelt sich um lineare Fachwerkträger in einer Ebene, deren Stäbe über Gabeln achsschnittig miteinander verbunden sind. Durch eine variable Rohrwanddicke läßt sich ein einheitlicher Rohrdurchmesser einhalten.

Das System findet seine Anwendung vor allem in zweilagigen Rostkonstruktionen. Die serielle und automatische Vorfertigung sowie die Montagefreundlichkeit sind hervorzuheben.

Montageaufwendige Schraub-, Schweiß- oder Nietverbindungen werden vermieden. Bei dem Knotensystem handelt es sich um ein kompliziertes Anschlußsystem mit Knotenanschlußbügel, an die jeweils eine der Raumgeometrie entsprechende Anzahl Stäbe eingeschweißt ist. Diese schlaufenförmigen Bügel werden an einen gürtelartigen Ring am durchlaufenden Gurtstab angeschlossen. Die kraftschlüssige Verbindung erfolgt über Hakenverschlüsse.

6.2 Knotenausbildung für Knotenstabtragwerke in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo - Verbundankertechnik

Für die Anwendung mit der Induo-Verbundankertechnik können einige marktgängige Knoten, im Kapitel 6.1 erläutert, direkt übernommen oder durch Abwandlung auf das System abgestimmt werden.

Die in dieser Arbeit neu entwickelten Knoten zeigen Lösungsansätze der optimierten Anschlußmöglichkeiten auf. Bei den vorgenommenen Abwandlungen und Eigenentwicklungen stehen wirtschaftlichen Gesichtspunkte im Vordergrund. Dies kommt durch die Verwendung von handelsüblichen Materialien, Fertigprodukten oder Halbzeugen zum Ausdruck.

6.2.1 Übernahme von marktgängigen Knotenausbildungen

1. Kugelknoten

Als Knotenelemente werden geschmiedete oder gegossene Stahlkugeln gewählt, die entsprechend der Anschlußgeometrie Gewindebohrungen erhalten. Die Achsen der Bohrungen schneiden sich im Mittelpunkt der Kugel. Dadurch werden ausschließlich Zug- und Druckkräfte von den anschließenden Stäben aufgenommen und abgesetzt.



Kugelknoten, Fa. MERO⁶¹

Die Knoten- und Verbindungstechnik der Fa. MERO – Raumstruktur, Würzburg, stellt die Lösung für den seriellen Systembau dar, die im Bereich Stahlhochbau eine weit verbreitete Anwendung findet. Speziell als Anschlußsystem für Raumstrukturen wurde in den 50 – iger Jahren die Kugelknoten - Verschraubungstechnik entwickelt und kann sich durch ihren überzeugenden Lösungsansatz bis heute gegenüber Konkurrenzprodukten behaupten.

Unregelmäßige Knoten sind jeweils ganz individuell ausgeführt und für eine einzige Raumlage und Stabkombination bestimmt (z.B. verzerrte Raumfachwerkplatten, gekrümmte Flächenstrukturen, etc.). Wirtschaftlich vorteilhaft ist es, die Gewindeanschlüsse auf die tatsächlich benötigte Anzahl und Größe zu beschränken.

Die regelmäßigen Knoten unterliegen den Gesetzmäßigkeiten der Raumgeometrie platonischer Grundkörper (siehe Kap 3.1.5). Sie finden Anwendung beim Fügen von regelmäßigen Knotenstabtragwerken, deren Bausteine gleichfalls Platonische Grundkörper darstellen. Sie ergeben somit geometrisch einfache und wirtschaftlich günstige Tragkonstruktionen.

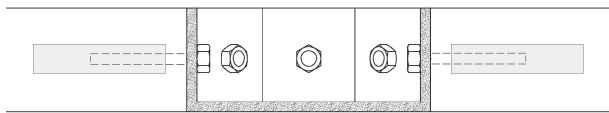
Die Knotengeometrie ist abgeleitet vom flächenzentrischen Cubus als 26-Flach mit 18 Quadraten und 8 gleichseitigen Dreiecken. 9 Achsen liegen durch die Mitten der 18 Quadrate, die Hauptachsen x, y, z zueinander senkrecht und die Nebenachsen unter 45° .

Der Norm-Knoten besitzt in jeder Quadratflächenmitte ein Anschlußgewinde. Als Vorratsknoten z. B. für temporäre Baukonstruktionen ist er universal einsetzbar.

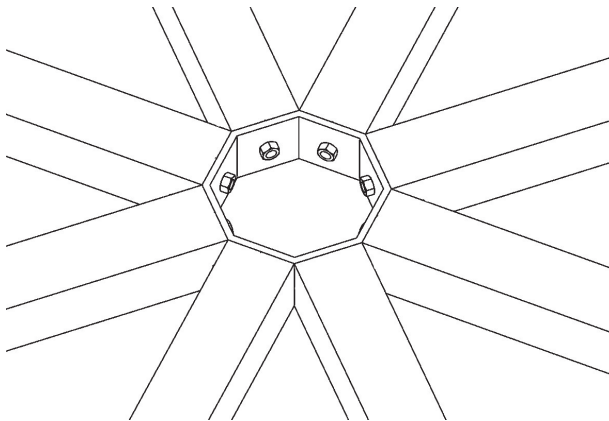
Der Regel-Knoten erzielt eine größere Wirtschaftlichkeit, indem er nur die Anschlußgewinde besitzt, die die jeweilige Raumlage erfordert.

6.2.2 Abwandlung konventioneller Knotenprinzipien

1. Tellerknoten aus Flachstahl



Tellerknoten (Schnitt)



Tellerknoten (Isometrie)

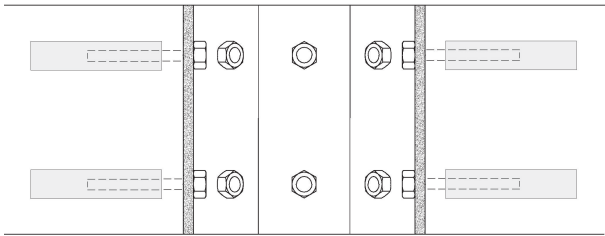
Die Verbindungstechnik berücksichtigt die Induo - Ankerbildung incl. der Innengewinde und übernimmt die Verschraubungstechnik, die zur Fügung der Kreuzbalken an vorgefertigte Stahlprofilknoten Anwendung findet.

Aus Flachstahl mit der Mindestbreite des größten anzuschließenden Stabquerschnitts wird als Tellerrand ein polygonaler Kranz gebildet. Die Anzahl an Einzelflächen richtet sich jeweils nach den anzuschließenden Stäben. Auf die geometrischen Bedingungen des Bauobjektes (z.B. Tonne, Kuppel, ...) sind die Winkellagen der einzelnen Flächen abgestimmt. Der Tellerboden ist ebenfalls aus Flachstahl gebildet und stabilisiert den Polygonkranz.

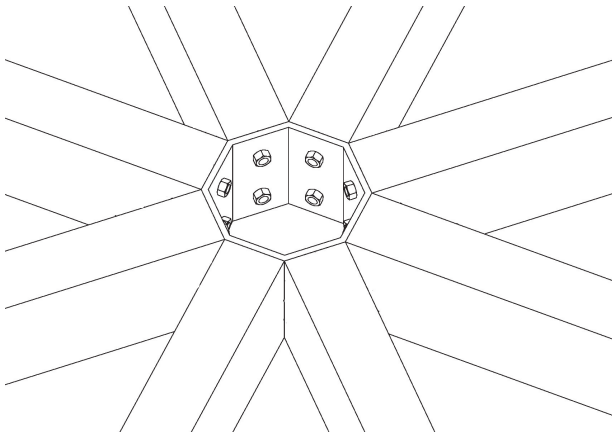
Kantenparallel werden die Kreuzbalkenenden (rechtwinklig zur Stabachse abgebunden) an die Anschlußflächen des äußeren Tellerrandes angesetzt. Durch die zentrischen Bohrungen der Randflächen führen Schrauben von der Tellerinnenseite her in den Induo-Ankerkörper.

Der Knotenanschluß trägt neben Normalkräften auch Querkkräfte und im eingeschränkten Maße auch Momente ab. Mit Flächensitz zwischen Stabenden und Tellerrand wandelt im statischen Sinn die vorgespannte Verschraubung die gelenkige Knotenkonstruktion in ein System mit eingeschränkter Biegesteifigkeit um. Dieser Effekt ermöglicht eine wirtschaftliche Konstruktion von einlagigen Tonnen und Kuppel mit geringen Spannweiten.

2. Zylinderknoten aus Flachstahl



Zylinderknoten (Schnitt)



Zylinderknoten (Isometrie)

Die Verbindungstechnik berücksichtigt gleichfalls die Induo - Ankerausbildung mit der entsprechenden Verschraubungstechnik.

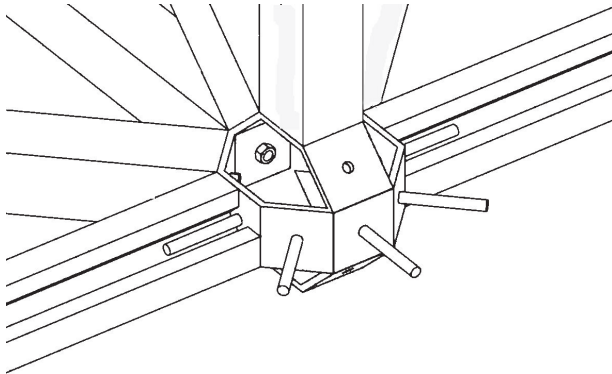
Abgestimmt auf die Anzahl der anzuschließenden Stabelemente bilden Flächenelemente aus Stahlblech als Polygonzug die Mantelfläche des Zylinderknotens. Breite und Länge der Einzelflächen richten sich als Mindestmaß nach dem Querschnitt des anzuschließenden Balkenendes. Die räumliche Neigung der Flächen untereinander richtet sich nach den geometrischen Bedingungen des Knotenpunktes bezüglich der Gesamtform des Bauobjektes (z.B. einsinnig oder zweisinnig gekrümmte Flächen...).

Der Zylinder selbst übernimmt die Stabilität mit ausreichender Mantelwandstärke. Alternativ sind Schotten bzw. Steifen im Zylinderinnenraum gegen das Ausbeulen der Mantelfläche vorzusehen.

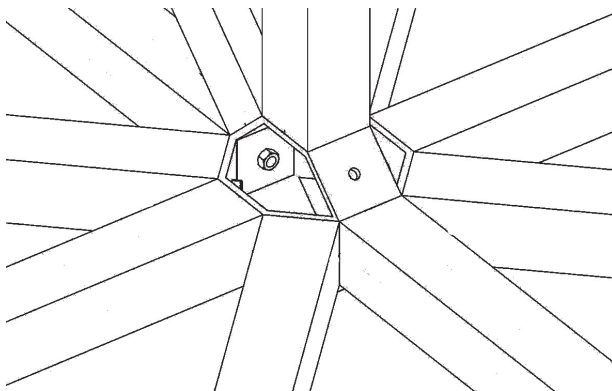
Kantenparallel stoßen die Balkenenden (rechtwinklig zur Stabachse abgebunden) auf die Anschlußflächen des Zylinders. Mindestens zwei Schrauben pro Zylinderfläche werden durch die Bohrung von der Zylinderinnenseite her in die Induo - Ankerkörper des anzuschließenden Balkens eingeführt.

Durch die Längenausbildung des Zylinders ist der Knoten in der Lage, pro Anschlußfläche mindestens zwei Verschraubungen für das anzuschließende Tragelement aufzunehmen. Das Kräftepaar der Schraubenverankerungen ermöglicht den Anschluß von biegebeanspruchten Tragelementen, z.B. Balken in Hochkantlage, mit der Übertragung von Normalkräften, Querkraften und Momenten. Somit sind wirtschaftliche Konstruktionen von einlagigen gekrümmten Flächen mittlerer Spannweite möglich.

3. Zweifacher Achteckkranz aus Flachstahlprofil



Zweifacher Achteckkranz mit Stabanschlüssen, Verschraubung innerhalb des Knotens (Isometrie)



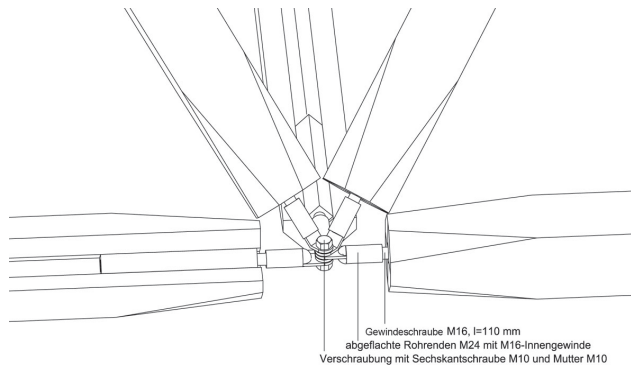
Zweifacher Achteckkranz mit Stabanschlüssen (Isometrie)

Die Verbindungstechnik berücksichtigt die Induo - Anker-ausbildung incl. der Gewindeausbildung und übernimmt die Verschraubungstechnik, die zur Fügung der Kreuzbalken an vorgefertigte Stahlprofilknoten Anwendung findet.

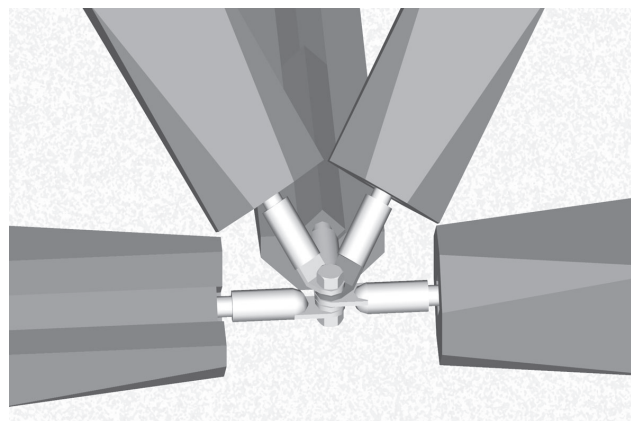
Aus Flachstahlprofilen mit der Mindestbreite des größten anzuschließenden Stabquerschnitts wird ein zweifacher Achteckkranz gebildet. Diese Geometrie entspricht dem 26 - Flach, abgeleitet vom flächenzentrischen Cubus als Regelknoten mit 18 Anschlußflächen für 9 Raumachsen. Bei dieser Knotenkonstruktion stehen 14 Quadrate als Anschlußflächen zur Verfügung. Eine große Anzahl von Packungskonfigurationen zur Bildung von Flächenknotenstabtragwerken mittels der platonischen Elementarkörper sind hiermit möglich.

Kantenparallel werden die Kreuzbalkenenden an die Anschlußflächen des Stahlknotenkranzes angesetzt. Durch die zentrischen Bohrungen der Quadratflächen führen Schrauben von der Knoteninnenseite her in den Induo - Ankerkörper.

4. Verschraubung über abgeflachte Rohrenden



Knotenausbildung durch Verschraubung von abgeflachten Rohrenden (Isometrie)



Knotenausbildung durch Verschraubung von abgeflachten Rohrenden (Visualisierung)

Diese Verbindungstechnik berücksichtigt die Induo – Ankerausstellung incl. der Gewindeausbildung. Eine Gewindestange wird in den Induo – Ankerkörper fest eingeschraubt und auf das freie Gewindestangenende ein Rohrstück mit entsprechendem Innengewinde aufgeschraubt. Das freie Rohrende wiederum ist werkseitig abgeflacht und abgewinkelt, je nach der Richtung, die dem Stabende nach geometrischer Lage zugeordnet ist.

Im abgeflachten Bereich des Rohrendes befindet sich eine Bohrung, über die mittels einer Schraube die übrigen Stabenden zu ihrem gemeinsamen Gelenkpunkt zusammengeführt sind. Die im letzten Schritt aufgeschraubte Mutter sichert das Gesamtpaket.

Die Charakteristik des linearen Fügens bei Montage der einzelnen Stahlenden auf die Gelenk- Schraube birgt das Problem der Exzentrizität als Abweichung der Stabachsen zur idealen Lage der Wirkungslinien, die im Gelenkpunkt nur einen gemeinsamen Schnittpunkt erzeugen sollten. Jedes Abweichen ergibt über die Exzentrizität als Hebelarm mal der angreifenden Normalkraft ein Moment. Bei der Ausbildung des abgeflachten Rohrendes und bei der Montager Reihenfolge ist die entsprechende geometrische räumliche Lage zu berücksichtigen um keine bzw. nur geringe Abweichungen mit kleinen Exzentrizitätsmomenten zu erhalten. Diese können in gewissem Umfang durch die konstruktive Biegesteifigkeit des Gelenkknotens aufgenommen werden.

Eine konstruktive Abwandlung der Konstruktion ist vorstellbar, indem das Rundrohr durch ein Flachstahlprofil ersetzt ist, das über einen Schlitzsitz auf den Gewindebolzen aufgeschweißt ist.

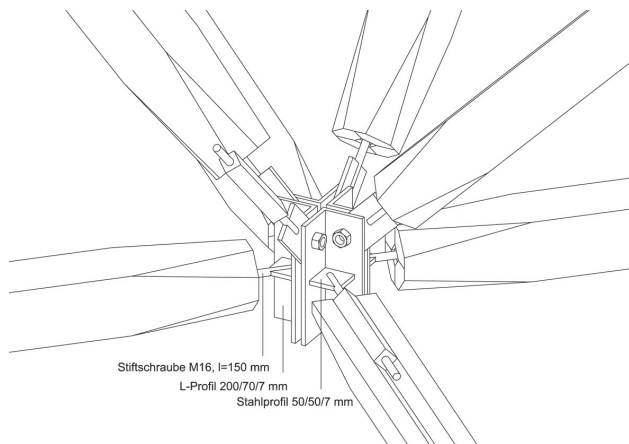
5. Winkelprofilknoten

Die Verbindungstechnik berücksichtigt die Induo - Anker-
ausbildung incl. der Gewindeausbildung.

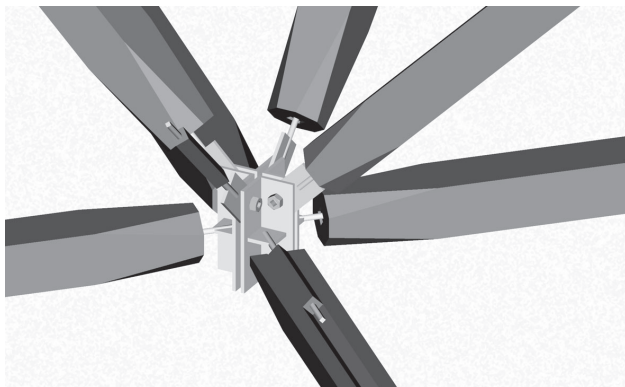
Gewindestangen werden in die Induo - Ankerkörper fest
eingeschraubt und mittels Langschaftmutter gegen den
Ankerkörper gekontert. An dem freien Gewindestangen-
ende ist über einen Schlitzsitz ein Flachstahlprofil auf
den Gewindebolzen aufgeschweißt. In rautenförmiger
Ausbildung wird ein L - Winkelprofil mittig an seinen
Innenflanken angeschweißt in der geometrischen Lage,
daß die Stabachse senkrecht zur L - Winkelprofil -
Längsachse steht. In der L - Profil - Querschnittsauf-
sicht ist dabei das L - Profil pfeilförmig auf den Knoten-
mittelpunkt gerichtet. In einer ebenen Gurtebene (auch
leichte Krümmungen für gekrümmte Knotenstab-
tragwerke sind ausführbar) kommen kreuzförmig vier
Stabenden zusammen.

Bei einlagigen Tragwerken werden die Außenflanken der
L - Winkel über zwei Bohrungen mittels Verschraubung
fixiert und bilden über diese Fügung den gemeinsamen
Knotenpunkt.

Zur Bildung von dreidimensionalen Knotenkonfigurationen
bleiben die Außenflanken der L - Profile auf Lücke, in
die die Flachstahlprofile der Stäbe anderer Winkellagen
eingefügt sind. Diese sind wiederum über einen Schlitz-
sitz auf das freie Gewindestabende dieser Stäbe ange-
schweißt und mit einer Bohrung versehen.



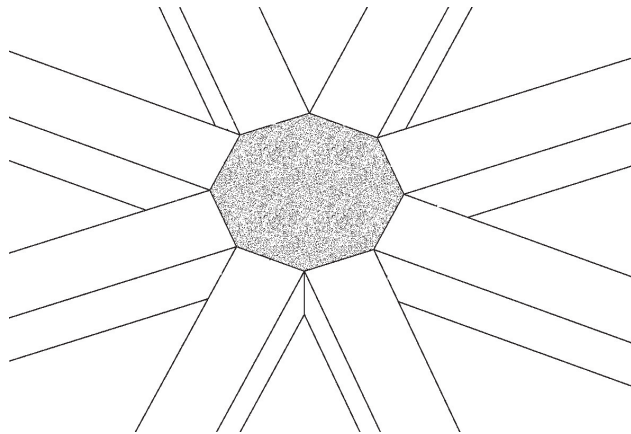
Knotenausbildung durch Verschraubung von Winkelprofilen
(Isometrie)



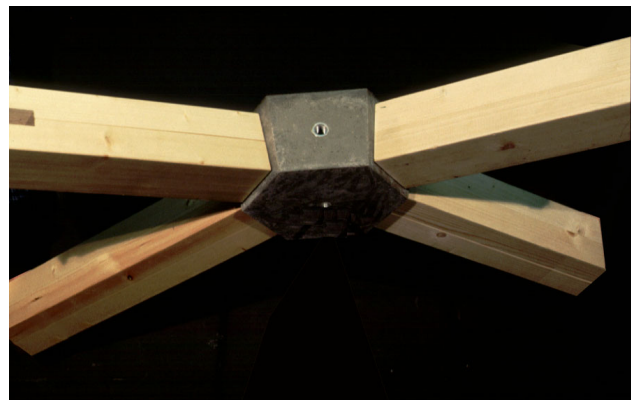
Knotenausbildung durch Verschraubung von Winkelprofilen
(Visualisierung)

6.2.3 Neue Konstruktionsansätze als Massiv - Knotenausbildungen

1. Scheiben- und Zylinderknoten als Stahlbetonfertigteile



Scheibenknoten als Stahlbetonfertigteile, Kreuzbalkenanschluß über Innenschraubung (Isometrie)



Scheibenknoten als Stahlbetonfertigteile, Kreuzbalkenanschluß über Innenschraubung (Foto)

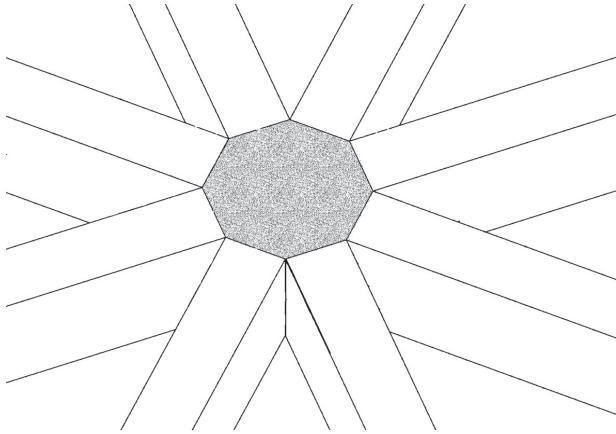
Die Neuentwicklung für die Scheiben- und Zylinderknoten als Stahlbetonfertigteile ergibt sich als Symbiose der Konstruktionsprinzipien für stählerne Teller- bzw. Zylinderknoten (Kap.6.2.2, 1. u. 2.) und der Stabinnenverschraubung (Kap.6.3.3, 2).

Indem das Festziehen des Verschraubungsbolzen im Verbundanker über die Montageöffnung auf der rückwärtigen Seite erfolgt, ermöglicht diese Konstruktionslösung mehrere Kreuzbalken an einem gemeinsamen maßlich begrenzten Knoten anzuschließen.

Als Stahlbetonmassivknoten konzipiert, entspricht die äußere Formgebung der Geometrie für die stählernen Teller- und Zylinderknoten. Die Winkellagen der polygonalen Anschlußflächen sind auch hier auf die geometrischen Bedingungen der Bauobjekte abzustimmen.

Mittig in den Anschlußflächen sind Gewindehülsen mit Anschlußbewehrung eingelassen, die die Kräfte aus der Verbundankerverschraubung in das Stahlbetonfertigteile aufnehmen und absetzen. Die Bewehrung ist neben den statischen auch auf konstruktive Forderungen für den Herstellungsprozeß der Stahlbetonfertigteile in wirtschaftlicher Serienfertigung abzustimmen. Die Sichtbetonoberfläche bedarf keiner Nachbehandlung. Formalgestalterische Gesichtspunkte können mit in die Serienfertigung aufgenommen werden wie z.B. die Farbgebung als Rezeptur für Zuschlagstoffe und Bindemittel des Betons.

Wie beim Tellerknoten (siehe Kap.6.2.2, 1.) wandelt beim massiven Scheibenknoten im statischen Sinn die vorgespannte Verschraubung die gelenkige Knotenkonstruktion in ein System mit geringer Biegesteifigkeit um. Somit ist auch dieser Knoten in der Lage im eingeschränkten Maße Momente abzutragen und ermöglicht wirtschaftliche Konstruktionen von einlagigen Tonnen und Kuppel mit geringen Spannweiten.



Zylinderknoten als Stahlbetonfertigteil, Kreuzbalkenanschluß über Innenverschraubung (Isometrie)

Durch seine große Konstruktionshöhe ist der Zylinderknoten gegenüber dem Scheibenknoten in der Lage statt Stäbe biegebeanspruchte Tragelemente als Balken in Hochkantlage über seine Anschlußgeometrie aufzunehmen. Durch mindestens zwei Schraubenverankerungen pro angeschlossenem Balken entwickelt sich der Knotenpunkt zur biegesteifen Ecke. Die daraus resultierende Momentenbelastbarkeit ermöglicht wirtschaftliche Konstruktionen von einlagigen, gekrümmten Flächen mittlerer Spannweite.

Sowohl Scheiben- als auch Zylinderknoten weisen einen besonderen Vorzug hinsichtlich des Brandschutzes auf. Durch die Ausbildung der Knoten als Stahlbetonfertigteil und die Anschlußtechnik in Form der Innenverschraubung sind alle Stahlteile konsequent vor einer direkten Beflammung im Brandfall geschützt. Ohne zusätzliche Vorkehrungen sind brandschutztechnische Anforderungen erfüllt, die im Rahmen einer Holzkonstruktion eventuell nachzuweisen sind.

2. Polyederknoten als Stahlbetonfertigteile

Als Stahlbetonfertigteile kommt der Polyederknoten zum Einsatz für zwei- und mehrlagige Knotenstabtragwerke. In Gestaltung, Konstruktion und Herstellung entspricht er den aufgezeigten Merkmalen des massiven Scheiben- und Zylinderknotens.

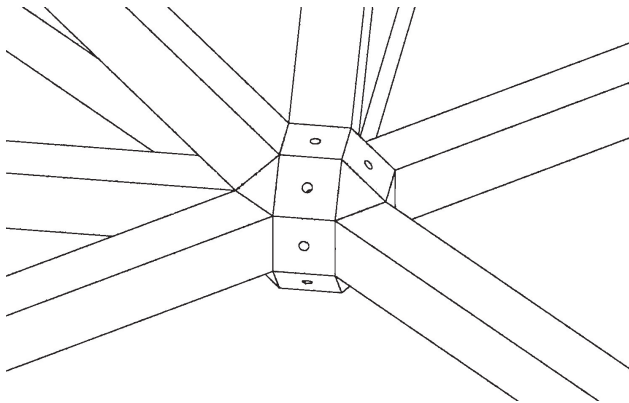
Im Vergleich zu den stählernen Kugelkonstruktionen kommt insbesondere der Vorteil bezüglich des Brand-schutzes zum Tragen. Die gesamten statisch und konstruktiv notwendigen Stahlelemente, die Bewehrung, die Gewindeanschlußhülsen etc., sind mit Beton umhüllt und vor einer direkten Beflammung im Brandfall geschützt.

Kantenparallel werden die Kreuzbalkenenden, rechtwinklig zur Stabachse abgebunden, an die Anschlußflächen des Polyeders angesetzt und durch die rückwärtige Stabinnenverschraubung fixiert.

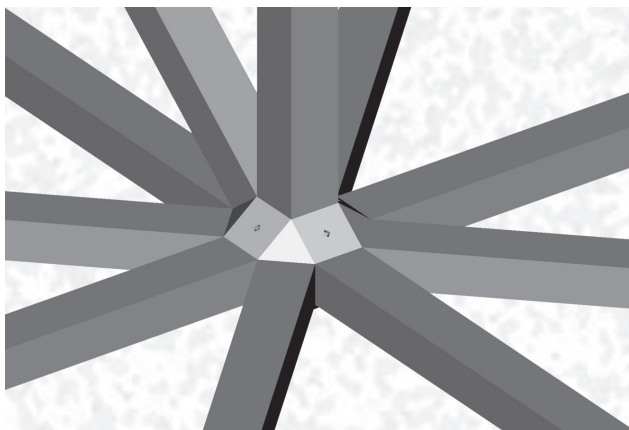
Alle angeschlossene Stabachsen schneiden sich im Mittelpunkt des Polyeders. Damit ist sichergestellt, daß nur konzentrische Zug- und Druckkräfte des zwei- oder mehrlagigen Knotenstabtragwerkes in den Knoten eingeleitet bzw. abgetragen werden. Die Biegesteifigkeit, hervorgerufen durch die vorgespannte Verschraubung, wird lediglich dazu genutzt, Momentenbeanspruchungen aufzunehmen bzw. abzuleiten, die sich als Exzentrizitäten (Abweichen der Kräfte von den idealen Wirkungsklinien) im Rahmen der Bautoleranzen ergeben.

Bei Fügung von regelmäßigen KSTW unterliegen Gesamtstruktur und der Knoten selbst den Gesetzmäßigkeiten platonischer Grundkörper. Wie beim Kugelknoten aus Stahl beschrieben, ist auch diese Knotengeometrie eine Ableitung des flächenzentrischen Cubus als 26-Flach mit 18 Quadraten und 8 gleichseitigen Dreiecken. Die Hauptachsen x , y , z liegen zueinander senkrecht und dazu die Nebenachsen im 45° -Winkel. Diese 9 Achsen liegen als Flächensenkrechte in den Mittelpunkten der 18 Quadrate.

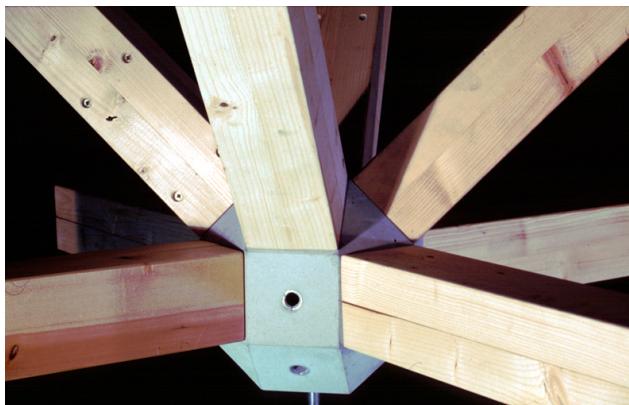
Dieser Norm-Knoten ist abwandelbar zum wirtschaftlich günstigeren Regel-Knoten, indem er nur die Cubussemente und die dazugehörigen Anschlußgewinde besitzt, die die jeweilige Raumlage erfordert. Um die Anzahl der unterschiedlichen Knotentypen für die Gesamtkonstruktion zu minimieren, sind Vereinheitlichungen aus geometrischen Randbedingungen (Symmetrie, Spiegelungen etc.) auszunutzen.



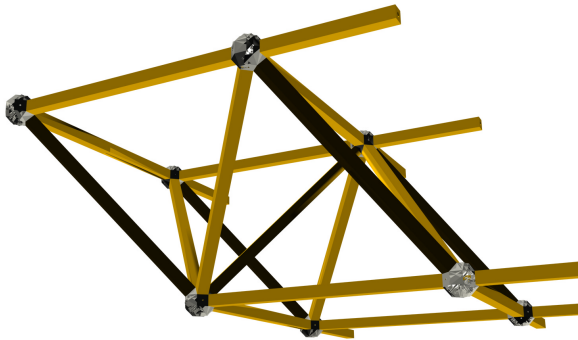
Polyederknoten als Stahlbetonfertigteile, Kreuzbalkenanschluß über Innenschraubung (Isometrie)



Polyederknoten als Stahlbetonfertigteile, Kreuzbalkenanschluß über Innenschraubung (Visualisierung)



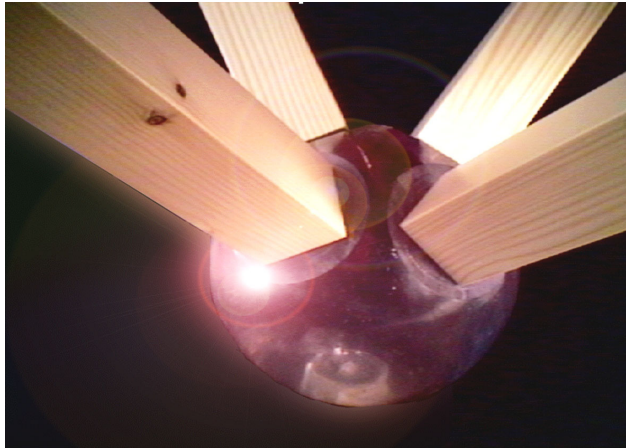
Polyederknoten als Stahlbetonfertigteile, Kreuzbalkenanschluß über Innenschraubung (Foto)



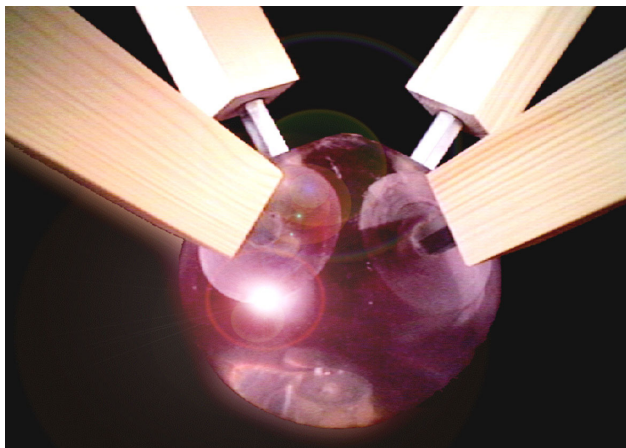
Polyederknoten als Stahlbetonfertigteile, Kreuzbalkenanschluß über Innenverschraubung (Visualisierung)

Für verzerrte Raumfachwerkplatten, gekrümmte Flächenkonstruktionen etc. erhalten unregelmäßige Knoten eine individuelle Ausführung, angepaßt auf die jeweilige Raumlage. Auch hier erzielt die Ausnutzung der geometrischen Randbedingungen im Gesamtkontext eine hohe Wirtschaftlichkeit bei der Reduzierung auf wenige unterschiedliche Knotentypen.

3. Polyederknoten als Massivknoten mit modernen Baustoffen



Polyederknoten als Massivknoten aus Glas bzw. Plexiglas, Stabanschluß über Innenverschraubung (Visualisierung)



Polyederknoten als Massivknoten aus Glas bzw. Plexiglas, Stabanschluß über Schraubbolzen und Schlüsselmuße (Visualisierung)

Durch die Vielzahl der vorgestellten Anschlußtechniken, insbesondere durch die Innenverschraubung der Kreuzbalkenstäbe, sind massive Knotenkonstruktionen mit außergewöhnlichen Baustoffen denkbar.

Zum einen könnten wirtschaftliche Aspekte ausschlaggebend sein, z.B. das Bewehrungsmaterial für die individuelle CNC-gesteuerte Serienfertigung von Sichtbetonfertigteilen zu ändern. Denkbar sind die Abwandlung der Stahlbewehrungstechnologie bis hin zum Ersatz des Stahls durch andere hochfeste moderne Materialien. Die Entwicklung und Forschung zeigt in diesem Bereich bereits neue Wege auf wie z.B. Konstruktionen mit textilbewehrten Beton.

Zum anderen können neben den statischen Anforderung moderne Baustoffe wie Glas, Plexiglas etc. weiterführende Aspekte bezüglich Farbigkeit, Transluzenz und Transparenz ermöglichen. Für Tragwerkplaner und Architekten, in der Zusammenarbeit mit Entwicklern auch außerhalb der Hochbaudisziplinen, zeigen sich Visionen auf, die das Erscheinungsbild des herkömmlichen Knoten von Massigkeit zur *Leichtigkeit* wandelt. Beispielsweise könnte die künstliche oder auch die natürliche Lichtführung den beleuchteten zum selbst leuchtenden Knoten verändern...

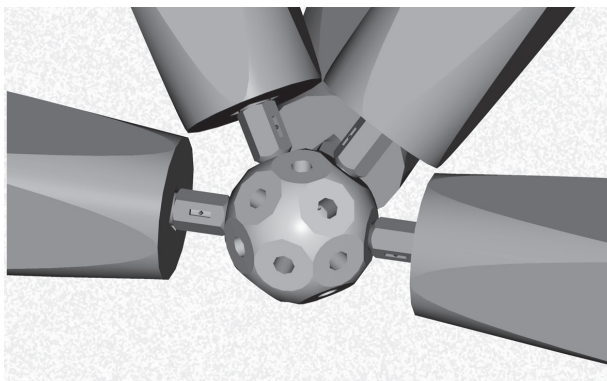
6.3 Anschlußkonstruktionen der Knoten

Dieses Kapitel zeigt zum einen Lösungen auf, die die vorgestellten Konstruktionen aus dem ersten Kapitel in der Anwendungstechnik direkt übernehmen, zum anderen erhalten marktgängige Knotenanschlußsysteme eine Konstruktionsabwandlung, um sie auf das Induo – Verbundankersystem optimal abzustimmen. Hierbei finden möglichst handelsübliche Halbwerkzeuge Anwendung, um die Herstellungskosten wirtschaftlich zu halten.

Abschließend werden neue Konstruktionsansätze für Knotenanschlüsse vorgestellt.

6.3.1 Übernahme von markt-gängigen Knoten-anschlüssen

Schraubbolzenanschluß mit Schlüsselmuffe



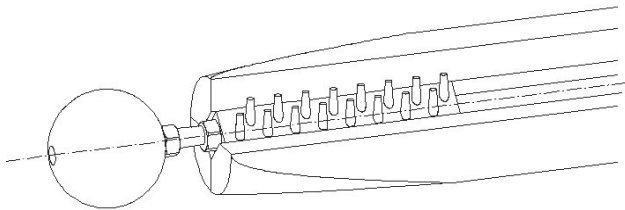
Knotenausbildung mit MERO-Schraubbolzen-Anschluß, (Visualisierung)

Auf die Induo – Verbundankertechnik übertragen, kann der MERO – Schraubbolzen – Anschluß die kraft- und formschlüssige Verbindung vom Anker zur Stahlkugel mit entsprechender Gewindebohrung herstellen.

Die Verschraubung erfolgt durch einen Bolzen mit Kerbstift, der mittels einer Schlüsselmuffe in den Knoten verschraubt wird. Diese Verschraubungslösung stellt sicher, daß keine Längen- oder Positionsänderung bei der Montage zwischen Knoten und Stab auftritt. Zugkräfte nimmt der Bolzen auf, die Druckkräfte überträgt die Schlüsselmuffe.

Bei der Anwendung auf den Induo – Anker erfolgt eine glattschaftige Bohrung in der Längsachse des Gusseisenkerns mit entsprechendem Durchmesser für eine gleitende Lagerung des Schraubbolzens.

6.3.2 Abwandlung konventioneller Knotenanschlußprinzipien



Gewindestangen-Anschluß mit Kontermutter (Isometrie)

1. Gewindestangen - Anschluß mit Kontermutter

Diese Verbindungstechnik kann ohne Modifikation des derzeitigen Induo – Ankerkorpus kurzfristig Anwendung finden. Für räumliche Tragwerke kommen als Verbindungs- bzw. Gelenkpunkt Stahlkugeln mit Gewindebohrungen zur Ausführung.

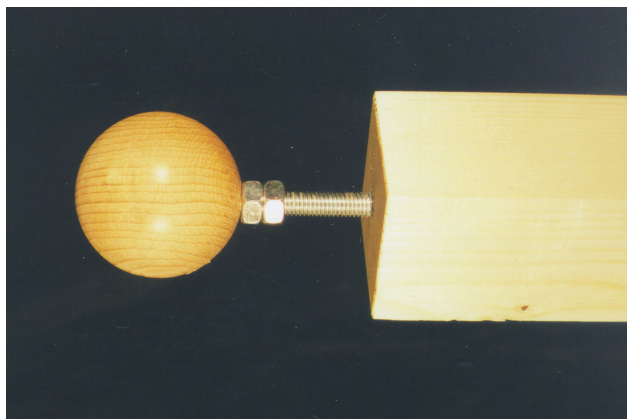
Montageablauf / Funktionsweise:

In den Induo – Anker wird eine Gewindestange (M 16 bzw. M 20) eingeschraubt mit der Tiefe, die für die Zugkraftaufnahme erforderlich ist, plus der erforderlichen Tiefe für den Anschluß am Kugelknoten.

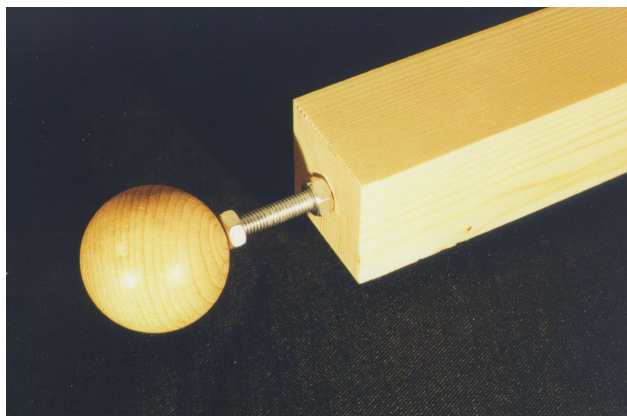
Ein Schraubenschlüssel dreht die Gewindestange über die aufgeschraubte und (eventuell) angeschweißte Mutter. Diese befindet sich am kugelseitigen Ende der Gewindestange und ist soweit aufgeschraubt, daß die entsprechende Verankerungstiefe für die Verschraubung in die Stahlkugel gewährleistet ist. Eine zweite, lose aufgeschraubt, befindet sich unmittelbar neben der festgeschweißten Mutter, auf der Seite, die dem Induo – Anker zugewandt ist.

Bei dem Verschraubungsvorgang von Induo – Anker und Stahlkugel wird nun das freie Gewindestabende in die Gewindebohrung der Stahlkugel eingeschraubt. Gleichzeitig schraubt sich die Gewindestange wieder um die Kugelknotenverankerungstiefe aus dem Induo – Anker heraus. Dadurch wird gewährleistet, daß keine Längen- oder Positionsänderung bei der Montage zwischen Stab und Knoten auftritt.

Abschließend erhält diese Verbindung drehfeste Lagerung durch die Konterverschraubung der Langschaftschraubenmutter gegen den Induo – Ankerkörper.



Gewindestangen-Anschluß mit Kontermutter, Modellfoto vor der Endmontage



Gewindestangen-Anschluß mit Kontermutter, Modellfoto nach der Endmontage

2. Stahlschnabelanschluß

Diese Anschlußlösung übernimmt ohne Modifizierung den Induo-Anker in der Regelausführung mit Bohrung und Gewindeausbildung. Das Kreuzbalkenprofil ist an beiden Enden senkrecht zur Stabachse stumpf abgelängt mit dem Regelabstand von ca. 30 mm zur Vorderkante des Induo-Ankers.

Bei dieser Verbindungslösung stellt das Grundelement ein rautenförmiges Viereck dar, zum Verbindungsknoten konisch zulaufend.

Zusammengefügt aus vier Flachstahlblechen bildet es über die Verschweißung ein biegesteifes Viereck. Entsprechend der Kontaktfläche zum Kreuzbalken ergibt sich eine quadratische Stirnfläche, deren Kantenlänge als Versatz von Holz zum Stahl um 6 bis 10 mm verkleinert ausgeführt ist. Gegenüberliegend richtet sich die Mindestabmessung der quadratischen Stirnfläche nach dem Durchmesser des innenliegenden Imbusschraubenkopfes.

Die maximal größte Abmessung des Quadrats richtet sich hier nach der konstruktiven Ausbildung der Knotengeometrie in Abhängigkeit von der gewählten Raumpackung und dem Knotendurchmesser.

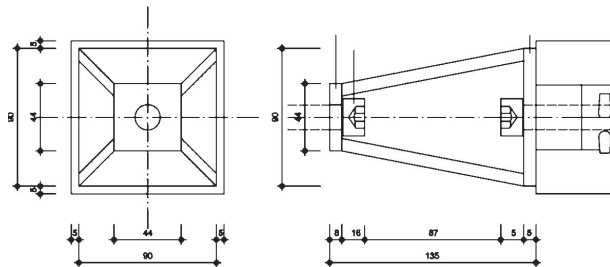
Über den Innenraum des Viereckrahmens gelangen die beiden Schrauben durch die zentrische Bohrung der Quadratflächen einerseits zur Gewindebohrung des Knotenelements und andererseits zur Bohrung des Induo-Verbundankers. Die Schraubenlängen und der Raumbedarf für das Verschraubungswerkzeug geben die Gesamtlänge des Viereckrahmens vor. Damit sind die Kantenlängen der beiden sich gegenüberliegenden trapezförmigen Rahmenelemente durch die Längenausbildung und die Quadratgrößen vorgegeben.

Die Längskraftübertragung erfolgt bei Druck über das biegesteife Stahlrahmenelement und bei Zug über die Schraubenbolzen mit Biegebeanspruchung der beiden Quadratflächen.

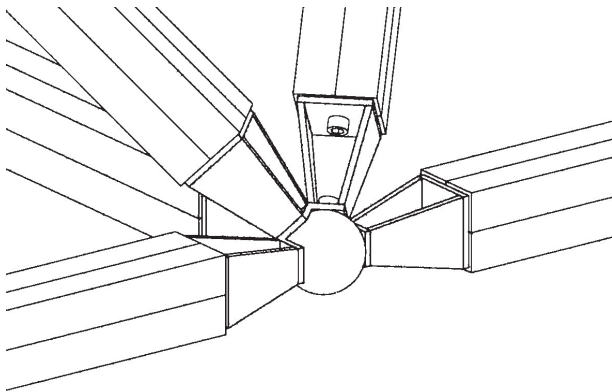
Bei Druck- oder Zugbeanspruchung des Gesamtsystems ergeben sich in den beiden trapezförmigen Rahmenelementen hauptsächlich Längskraftbeanspruchungen.

Zur weiteren Erhöhung der Gesamtsteifigkeit kann eine der beiden offenen Rahmenseiten durch ein drittes trapezförmiges Stahlblech mit allseitiger Kantenverschweißung geschlossen werden.

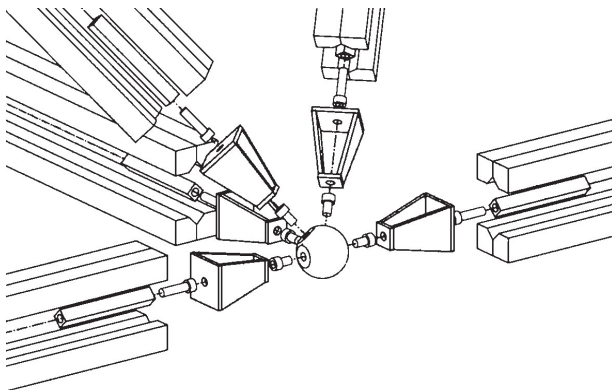
Hiermit ergibt sich ferner eine Möglichkeit die Anforderung an den Brandschutz über die allgemeine Maßnahme des F-30-Anstrichs hinaus zu erhöhen. Nach Abschluß der Knotenmontage kann der verbleibende Innenbereich über die obenliegende Rahmenöffnung mit Mörtel verfüllt werden. Damit sind die Stahlteile nur noch



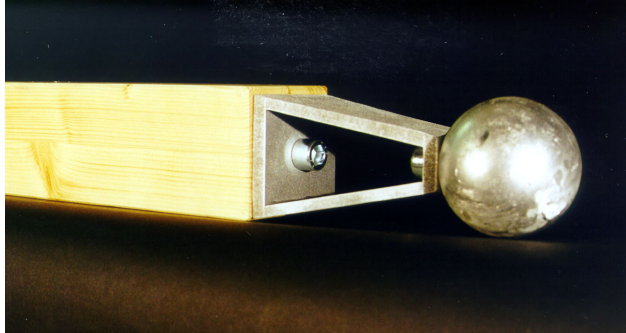
Stahlschnabelanschluß (Kopf- und Seitenansicht)



Stahlschnabelanschluß (Isometrie)



Stahlschnabelanschluß
(Isometrie der einzelnen Knotenelemente)



Stahlschnabelanschluß (Modellfoto)

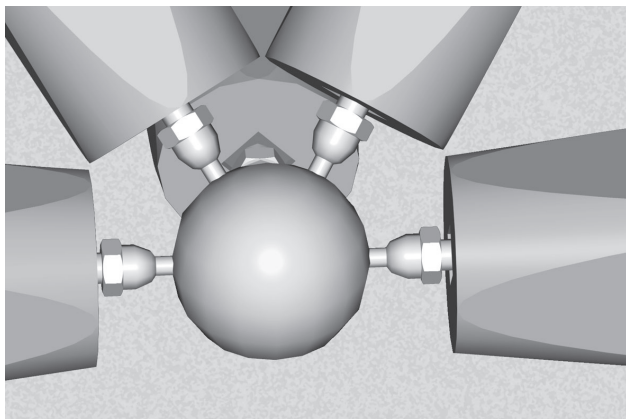
einseitig beflammt bzw. die beiden Quadratflächen der Beflammung insgesamt entzogen.

Für ein Knotenstabtragwerk mit hoher Forderung an die Maßtoleranz kann die geplante Länge eines Systemstabes präzise am Bauwerk umgesetzt werden. Die exakte Länge der biegesteifen Flachstahlrahmen gewährt die Vorfertigung als Stahlbauelement.

Bei der Herstellung des Kreuzbalkens bestimmt als abschließender Arbeitsgang der Längenzuschnitt im Vorholzbereich der beiden Stabenden das exakte Stabmaß. Längen- und Positionsänderungen zwischen Anschlußknoten und Gesamtstab sind durch diese Verschraubungslösung bei der Montage ausgeschlossen.

6.3.3 Neue Konstruktionsansätze für Knotenanschlüsse

1. Imbus- Hutmutterschraubung, Kunz – Knotenanschluß



Imbus-Hutmutterschraubung (Visualisierung)

Ohne Modifikation des derzeitigen Induo – Ankerkorpus kann diese Verbindungstechnik kurzfristig Anwendung finden. Für Stabanschlüsse mit relativ beliebiger räumlicher Konfiguration finden Stahlkugeln mit Gewindebohrungen als Verbindungs- bzw. Gelenkpunkt ihre Anwendung.

Dieser Anschlußtechnik liegt das Konzept zu Grunde, nur Halbzeuge für die Verbindung zu verwenden: Gewindebolzen, Hutmutter und Imbusschraube.

Das Konzept, eine ursprüngliche Entwicklung für den Stahlbau, geht auf Herrn Günter Kunz zurück.

Montageablauf / Funktionsweise:

Der Gewindebolzen (M 16 bzw. M 20) wird in den Induo – Anker fest eingeschraubt (eventuell mit einer zusätzlichen Mutter gegen den Ankerkorpus gekontert - nicht in der Zeichnung dargestellt). Das freie Bolzenende hat einen definierten Überstand zum Kreuzbalkenstabende zur Aufnahme der Hutmutterschraubung beim letzten Montageschritt.

In Gewindeachsrichtung durch den Kopfbereich erhält die Hutmutter werkseitig eine Bohrung entsprechend dem Durchmesser der Imbusschraube. Durch diese Bohrung wird die Imbusschraube von der Hutmutter – Gewindeseite aus eingeführt und anschließend in die Stahlkugel fest eingeschraubt. Der feste Sitz ergibt sich aus der Bohrtiefe incl. Gewinde in der Stahlkugel. Die



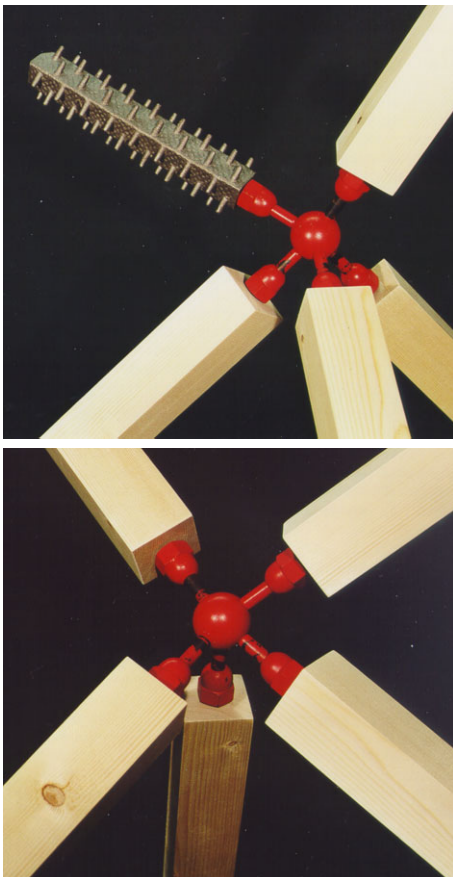
Imbus-Hutmutterverschraubung, Montageablauf

Länge der Imbusschraube ist so gewählt, daß sich die Hutmutter zwischen Stahlkugel und Imbusschraubenkopf frei in Längsachsenrichtung bewegen läßt.

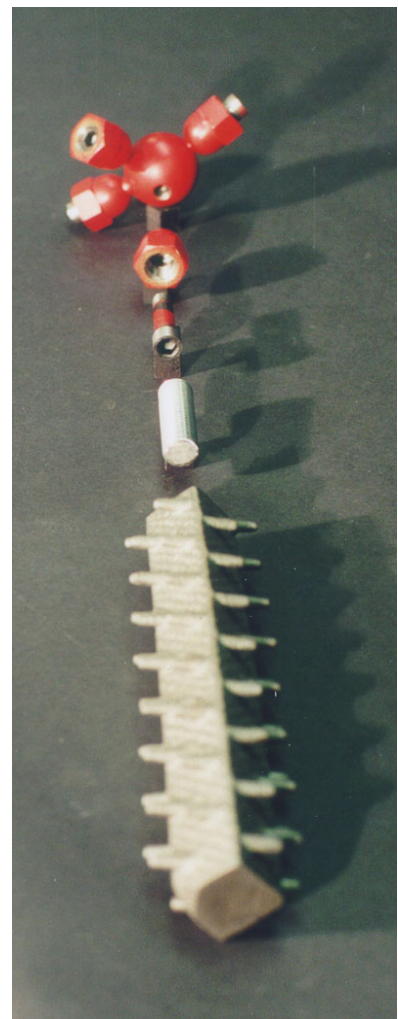
Bei der bauseitigen Montage erfolgt als Verbindung des Stabelements zum Gelenkknoten nur noch ein Verschraubungsvorgang, indem die Hutmutter als „Überwurfmutter“ auf den holzstabseitigen Gewindebolzen aufgeschraubt wird.

Der Gewindebolzen trägt Druckkräfte direkt auf den Kopf der Imbusschraube ab und wird durch diese in die Bohrung der Stahlkugel weitergeleitet. Bei dieser Belastungssituation sorgt die Hutmutter konstruktiv für die Lagefixierung ohne eigene statische Belastung.

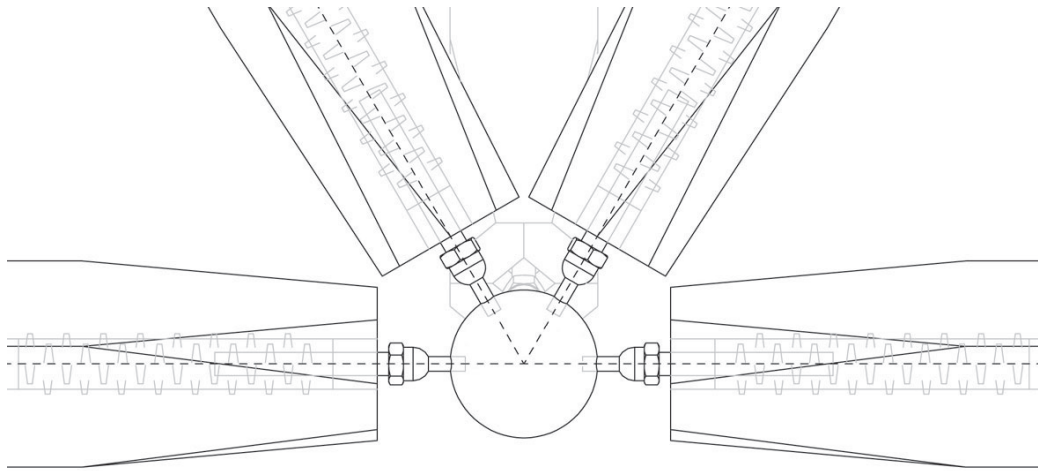
Durch die Zugkräfte sind sowohl alle Gewindegänge der angeführten Stahlelemente als auch der Imbusschraubenhals und die Hutmutterflanke über ihren beidseitigen Formschluß beansprucht.



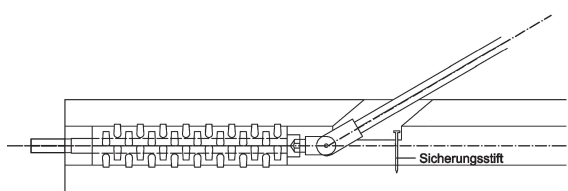
Imbus-Hutmutterverschraubung (Modellfotos)



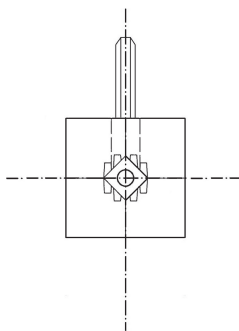
Imbus-Hutmutterverschraubung, Knotenelemente



Imbus Hutmutternverschraubung, Knotenaufsicht



Stabinnenverschraubung (Längsschnitt)

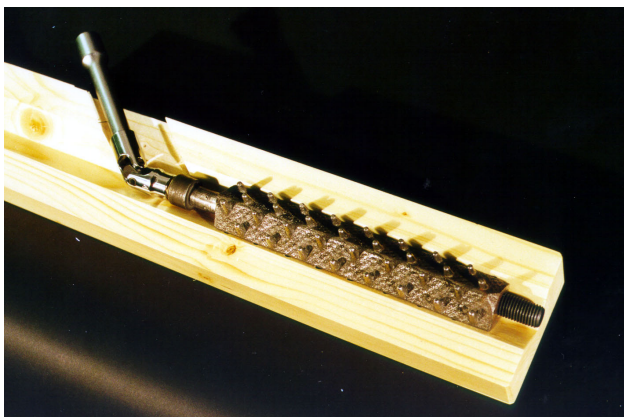


Stabinnenverschraubung (Querschnitt)

2. Stabinnenverschraubung

Diese Verschraubungstechnik nimmt die konstruktive Charakteristik der Kreuzbalkengeometrie auf. Im Kern befindet sich über der Gesamtlänge des Balkens ein Hohlraum in Rautenform mit einer Kantenlänge von 27 mm. Diesen freien Querschnitt nutzt die Induo-Fügetechnik als Chance zum Einlegen der Ankerkörper. Darüber hinaus gab die rautenförmige Röhre, als Bewegungsraum für eine Imbusschraube, den Anstoß zu dieser Stabinnenverschraubung, eine Entwicklung der vorliegenden Arbeit.

Im Regelfall liegen die Verbundanker an beiden Enden des Kreuzbalkens mit einem Abstand von 30 mm zur Stirnfläche. Aus Richtung der Balkenmitte ist in der glattschaftigen Gesamtdurchbohrung des Verbundankers eine Imbusschraube eingefügt. Ihre Größe bestimmt sich aus der Länge des Verbundankers, der gewählten „Vorholzlänge“ (zwischen Verbundankervorderkante und Balken-„Stirnfläche“) und der statisch-konstruktiven Schraubbolzenlänge incl. Gewindelänge, die die Geometrie des anzuschließenden Bauelements erfordert.



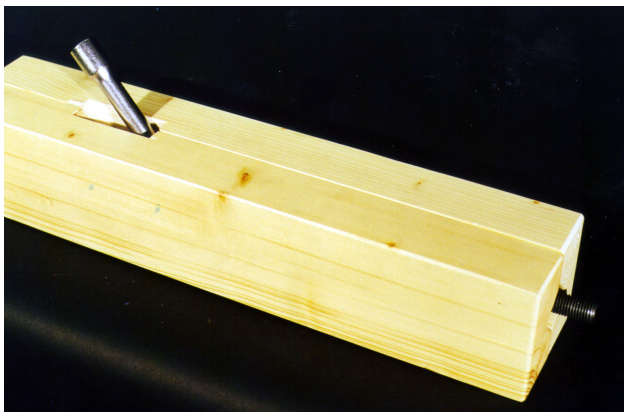
Stabinnenverschraubung, Imbusschraube mit Antriebswerkzeug (Kreuzbalken geöffnet)

Die Auflagefläche des Imbusschraubenkopfs leitet die Längskraft aus der Verschraubung auf die Verbundankerseite ab, die zur Balkenmitte weist.

Beim Verschraubungsvorgang gelangt der Imbussteckschlüssel über eine ca. 75 x 25 mm große Aussparung zum Kernhohlraum des Kreuzbalken, in der sich in zentrischer Lage der Imbusschraubenkopf in „rückseitiger“ Position des Verbundankers befindet. Mit ca. 70 mm Abstand zum rückseitigen Verbundankerende ist die Position der Aussparung so gewählt, daß die innenliegende Imbusschraube über den Imbussteckschlüssel mit Kardangelenk, Verlängerung und entsprechenden Antriebswerkzeug (Ratsche, Drehmomentschlüssel, Schlagschrauber mit vorgewähltem Anzugsmoment etc.) von der Außenseite des Balkens aus angetrieben werden kann.

Der Verschraubungsvorgang findet an einer „freien“ Balkenflanke statt und ermöglicht die Montage des anzuschließenden Balkenkopfes bei geometrisch komplexen Situationen und räumlich beengtesten Lagen.

Bei Knotenstabtragwerken ist es möglich dichteste Packungen aus geometrisch erforderlichen Stablagen auszuführen. Teilweise sind herkömmliche Lösungen mit Verschraubungspositionen im Bereich Balkenkopf für diese Situationen ausgeschlossen, da der notwendige Bewegungsraum für Antriebswerkzeuge nicht einzuhalten ist.

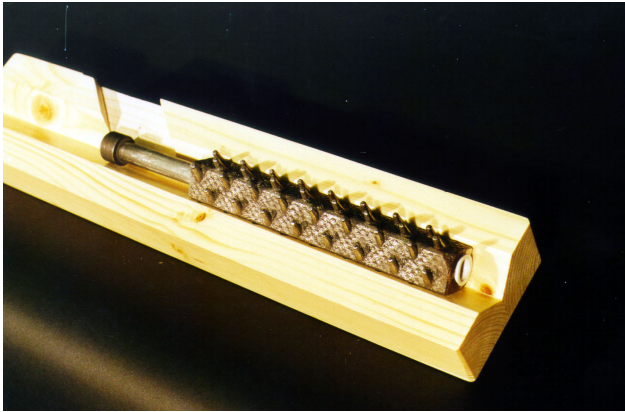


Stabinnenverschraubung, Montageöffnung mit Montagewerkzeug

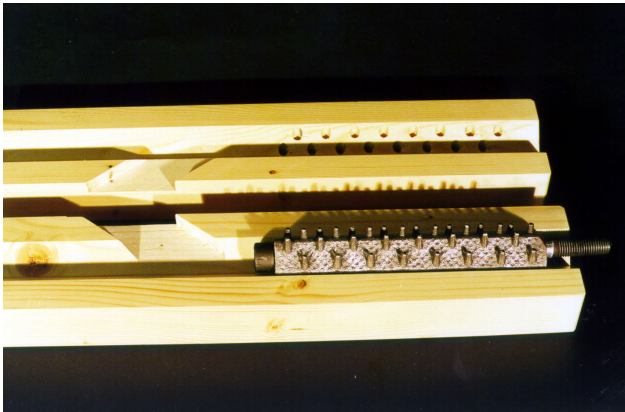
Bei Stahlknotenanschlüssen (siehe Kap. 6.2.2, 1-3) decken die stumpfen Stabenden die Stahlelemente durch die konstruktiv-geometrischen Detailausbildung weitestgehend ab. „Unsichtbar“ treten die konstruktiv notwendigen Elemente in den Hintergrund und geben den Blick frei auf die optisch unverletzten Holzgesamtquerschnitte.

Bezüglich des Brandschutzes erhöht sich dabei die Feuerwiderstandsdauer erheblich, da größtenteils durch die direkte Überdeckung mittels der anschließenden Kreuzbalkenköpfe die Stahlteile einer direkten Beflammung entzogen sind.

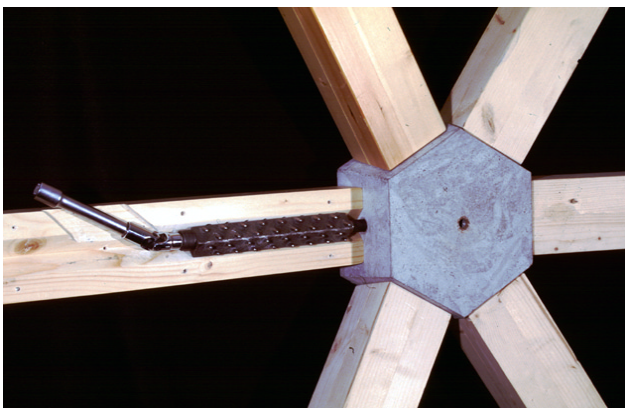
In der Balkenflanke kann die schlitzförmige Öffnung als Zugang für das Imbuswerkzeug nach erfolgter Montage mittels eingeleimten Holzstopfen geschlossen werden. Einschränkungen bezüglich Brandschutz und Oberflächenoptik sind damit behoben.



Stabinnenverschraubung, Induo-Verbundanker mit Imbusschraube und Schutzkappe (Kreuzkalken geöffnet)



Stabinnenverschraubung, zwei Hälften eines Kreuzbalkens (Foto vor Verleimung des Kreuzbalkens)



Stabinnenverschraubung, hier: Stabanschluß an massivem Scheibenknoten aus Stahlbeton

Werkseitig ist der Verbindungsschraubbolzen mit Imbuskopf in der glattschaftigen Durchbohrung des Induo-Verbundankers eingefügt. Auf der zum freien Balkenende zugewandten Seite erhält der Verbundanker den üblichen Kunststoffstopfen um die Bohrung vor Verunreinigungen zu schützen. Rückseitig wird die Imbusschraube eingeführt. Vor dem letzten Verleimungsvorgang wird der Verbundanker mit seinen Verankerungsdornen in das vorgebohrte Lochbild eingesetzt. (Die Montageöffnung für die Verschraubung entsteht parallel zur Fräsung dieses Lochbildes). Damit die Imbusschraube bis zur Montage diese Position im Verbundanker in Richtung Balkenmitte nicht verlassen kann, erhält sie eine Lagesicherung mittels Stahlstift, der ca. 10 mm neben dem Imbuskopf in den rautenförmigen freien Querschnitt des Kreuzbalkenprofils eingetrieben ist.

Auf der Baustelle erhält der Kreuzbalken eventuell seinen letzten Zuschnitt bezüglich der geforderten Gesamtlänge im Bereich des Vorholzes (zwischen Balkenenden und Induo-Verbundankervorderseiten). Daraufhin erfolgt die Entnahme der vorderen Kunststoffkappe und durch die Montageöffnung wird die Imbusschraube vorwärts bewegt, bis der Gewindeschacht am freien Balkenende erscheint.

Der Balkenkopf mit freiliegendem Gewindeschacht wird an die Gewindebohrung des anzuschließenden Punktes geführt, das Imbuswerkzeug fährt durch die Montageöffnung in den Formsitz des Imbusschraubenkopfes ein, und die Verschraubung kann erfolgen.

6.4 Stabendenausbildung- konstruktive und gestalterische Aspekte

Die konstruktive und gestalterische Ausbildung der Stäbe und deren Stabenden stellt einen wichtigen Punkt im Entwurfskontext von Knotenstabtragwerken dar. Im Anschlußbereich zwischen Hozstab und Knoten sind neben den Anforderungen an die Tragfähigkeit auch die konstruktiven Kriterien für die Einbindung zusätzlicher Bauteile zu berücksichtigen wie zum Beispiel die Dach-eindeckung oder der Innenausbau. Gleichzeitig prägt die Ausgestaltung des Anschlußpunktes das architektonische Erscheinungsbild des Tragwerkes, in der Knoten und Stäbe eine gestalterische Einheit zu erfüllen haben.

Der Herstellungsprozeß des Kreuzbalkens führt zu rechteckigen bzw. quadratischen Holzquerschnitten. Für normalkraftbeanspruchte Stäbe ohne Biegung ist der quadratische Holzbalkenquerschnitt sinnvoll, da der Trägheitsradius i , ausschlaggebend für diese Belastung, in x- und y-Richtung gleich ist. Eine gestalterische und konstruktive Herausforderung besteht daher primär in der Suche nach einer adäquaten Lösung für die Stabendenausbildung, die im Einklang mit den statischen Erfordernissen zu bringen ist.

Bei der Ausbildung des Knotenanschlusses ist die räumlich geometrische Enge zu berücksichtigen. Im Knotenbereich behindern sich die Stäbe untereinander durch ihre Querschnittsabmessung oder beeinträchtigen den optimalen Anschluß bzw. die Montage aller anzuschließender Stäbe am gemeinsamen Knotenelement. Zur Lösung bietet sich eine Querschnittsreduzierung der Holzprofile an. Dies sollte sich nur auf die Stabenden beziehen, da sich über die gesamte Stablänge betrachtet ein Verlust der Tragfähigkeit von ca 20% ergibt, vergleicht man den Wert des ursprünglichen Quadratquerschnitts mit dem des eingeschriebenen Kreisquerschnitts.

Beispiele für zulässige Lasten [zul N] einteiliger Holzstützen¹:

Holzstab, Sortierklasse S 10, Knicklänge 2,50 m

Querschnitt quadratisch 10 x 10 cm

⇒ zul N: 34,2 kN

Querschnitt rund D = 10 cm

⇒ zul N: 26,6 kN ⇒ Reduzierung: 22,2%

Querschnitt quadratisch 12 x 12 cm

⇒ zul N: 60,1 kN

Querschnitt rund D = 12 cm

⇒ zul N: 48,4 kN ⇒ Reduzierung: 19,5%

Verschiedene Stabendenausbildungen sind hinsichtlich ihrer geometrischen und gestalterischen Eignung zu überprüfen. Zu diesem Zweck wird die Fügung des Knotens mit unterschiedlichen Endausbildungen der Stäbe anhand von Modellstudien untersucht. Das Verhältnis der Dimensionierung von Knotendurchmesser zu Stabquerschnitt wirkt sich zusätzlich auf die räumliche Geometrie des Fügepunktes aus. Die Gliederung der Untersuchung in zwei Modellreihen berücksichtigt die Proportionskriterien des Gesamtgefüges. Im ersten Teil des Versuches wird ein Verhältnis Knotendurchmesser zu Kantenlänge-Stab von 2:3 gewählt, im zweiten Teil das Verhältnis 1:1.

Als Raumgeometrie wird der Tetraeder mit gleichen Stablängen gewählt. Jeweils paarweise stehen die Stäbe in ihrer gemeinsamen Ebene im Winkel von 60° zueinander.

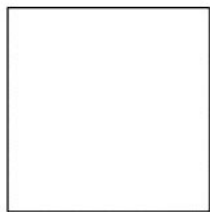
Die konstruktive Ausbildung des zentralen Knotenelementes ist in diesem Kapitel nicht Bestandteil der Modellstudie. Den Anschluß an das Kugelelement übernimmt hier beispielhaft ein Stabelement mit kleiner Querschnittsabmessung.

Darstellung der Bezeichnungen im folgenden:

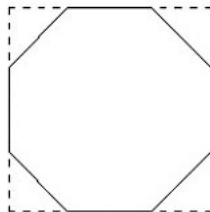
d = Distanz (Knotenmittelpunkt - Stabende)

a = Querschnitt, Stababmessung 100/100 mm

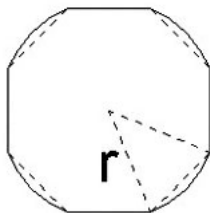
\varnothing = Knotendurchmesser



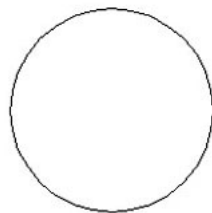
1. Stumpfes Ende



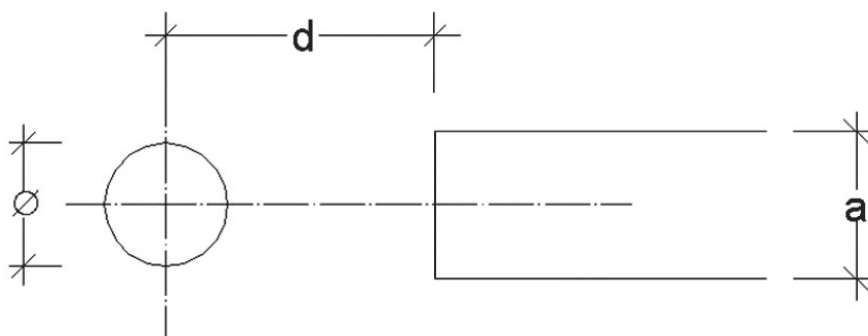
2. Achteck



3. Achteck abgerundet



4. Vollkreis



6.4.1 Versuchsteil A:

Verhältnis Knoten zu Stab = 2/3

1. Stumpfes Stabende

Orthogonal zur Stablängsachse abgelängt endet der Stab stumpf mit seinem vollen Querschnitt. In den Abbildungen 1 a-c liegen die unteren Stäbe ohne Verdrehung zueinander in ihrer gemeinsamen Ebene, der Diagonalstab ist um seine Längsachse um 45° gedreht.

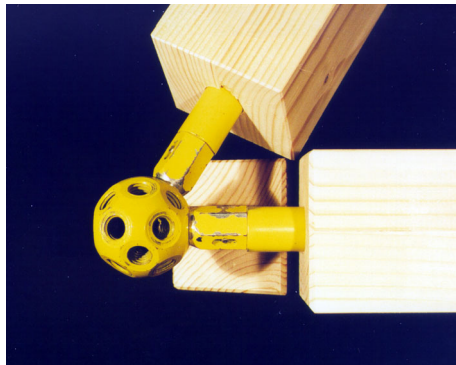


Abb. 1a

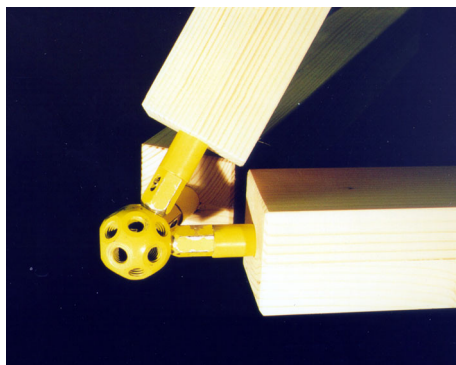


Abb. 1b

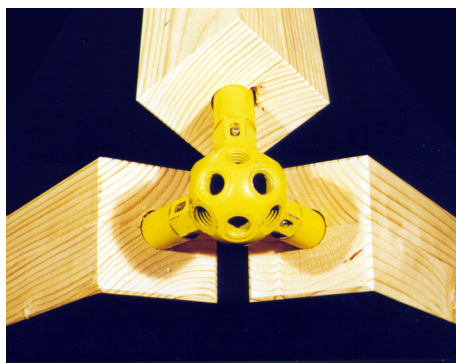


Abb. 1c

Abb. 1a: Seitenansicht.

Der Abstand d beträgt ca 100 mm und entspricht etwa der Kantenlänge des Stabes.

Abb. 1b: Der Winkel zwischen Diagonalstab und vorderem Stab beträgt 60° .

Abb. 1c: Frontansicht des Knotenpunktes. Der Diagonalstab ist um seine Längsachse um 45° gedreht. Es entstehen gleiche Zwischenräume zu den anderen beiden Stäben.

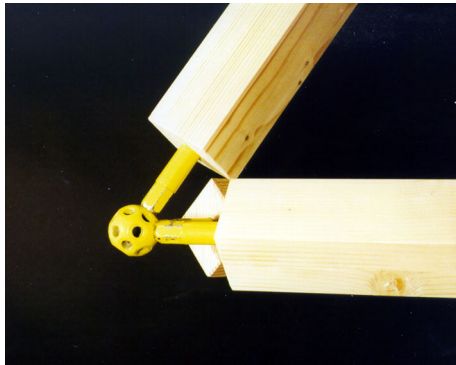


Abb. 1d

Abb. 1d: Alle Stäbe sind um ihre Längsachse um 45° gedreht. Zur Sicherstellung eines ausreichenden Abstandes der Stabkanten in der unteren Lage ist die mindestdistanz $d = 130 \text{ mm}$ einzuhalten.

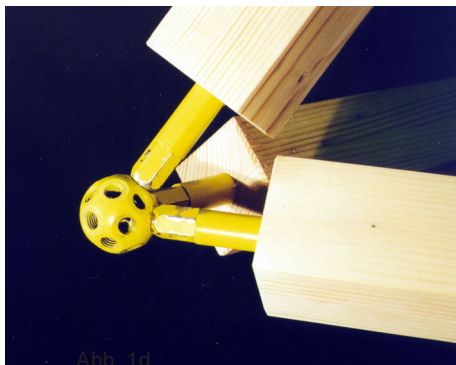


Abb. 1e

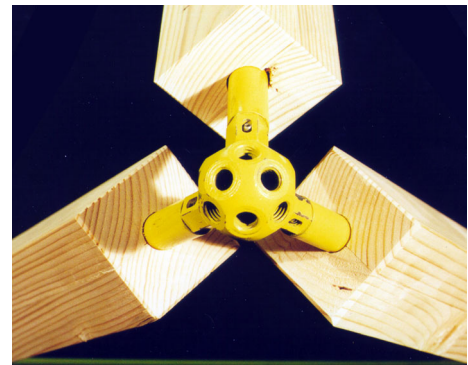


Abb. 1f

Abb. 1e, 1f: Die beiden unteren Stäbe kommen mit ihren Kanten sehr nah aneinander, während zum Diagonalstab ausreichend Zwischenraum vorhanden ist.

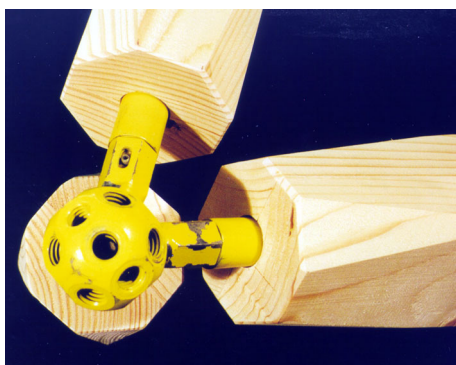


Abb. 2a

2. Angeschnittene Kanten, Achteckquerschnitt

Alle vier Kanten sind am Stabende schräg angeschnitten. Es entsteht ein achteckige Stabquerschnitt mit gleichen Kantenlängen von ca. 41 mm .

Die Verjüngung sorgt neben der gestalterischen Komponente für statische Vorzüge. Durch die Verringerung der Distanz auf $d = 92 \text{ mm}$ nimmt die Knickgefahr für die normalkraftbeanspruchten Anschlußbolzen ab.

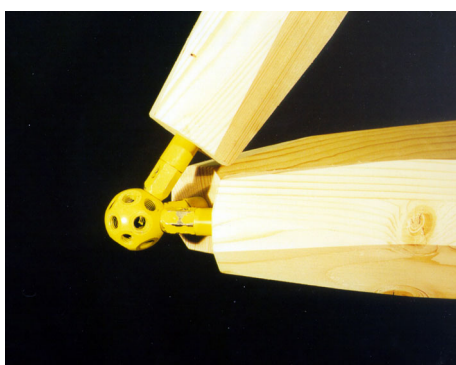


Abb. 2b

Abb. 2a: Seitenansicht

Die Stäbe ergeben in ihrer Lage zueinander ein homogenes Bild.

Abb. 2b: Der Abstand d läßt sich durch die Verjüngung des Stabendes reduzieren.

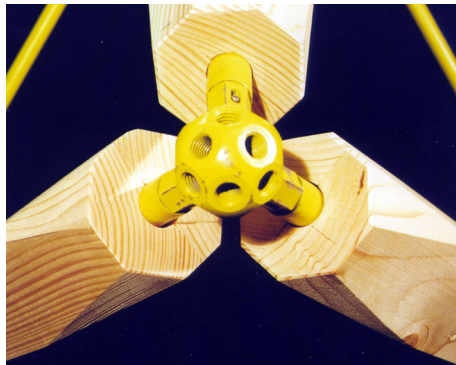


Abb. 2c

Abb. 2c: Frontansicht des Knotenpunktes
Die Zwischenräume sind sehr einheitlich, und die Drehungen der Stäbe um ihre Längsachsen sind nicht relevant.

3. Angeschliffene Kanten, Achteckquerschnitt abgerundet

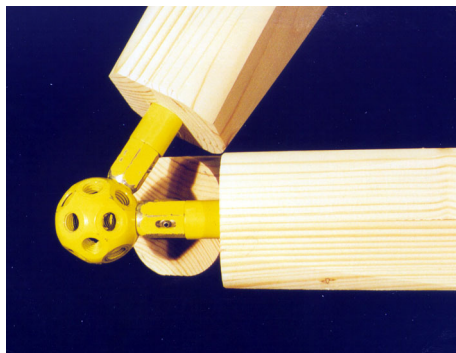


Abb. 3a

Alle Kanten des Stabes sind abgerundet. Das Stabende zeigt ein Achteck mit einer Ausbildung der abgerundeten Kanten als Bogensegmente mit einem Radius $r = 54 \text{ mm}$. Wie bei Abbildung 1 a-c beträgt der Abstand $d = 100 \text{ mm}$.

Abb. 3a, 3b: Seitenansicht

Der Abstand d ist wie bei Abb.2 gegenüber Abb.1 a-c wesentlich reduziert.

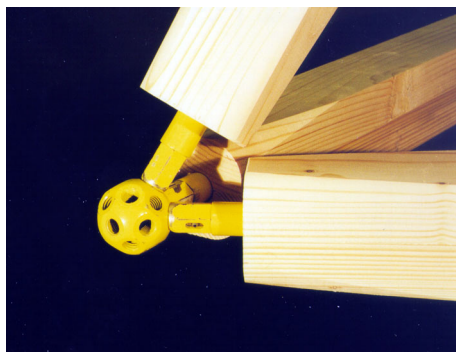


Abb. 3b

Abb. 3c: Frontansicht des Knotenpunktes

Der obere Stab ist wie bei Abb. 1c um seine Längsachse um 45° gedreht. Es entstehen weitgehend homogene Zwischenräume. Die parallele Kantenlage der beiden unteren Stäbe ist maßgebend für das Abstandsgefüge aller anzuschließenden Stäbe.

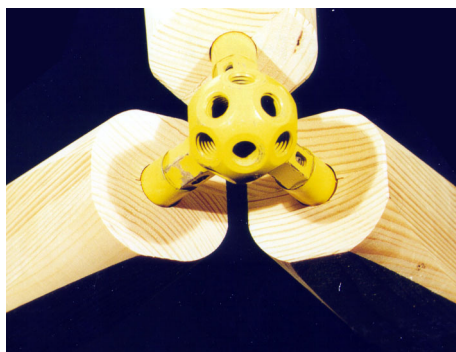


Abb. 3c

Abb. 3d, 3e, 3f: Analog zu Variante 1 d-f sind alle Stäbe um ihre Längsachsen um 45° gedreht. Diese Lage führt ebenfalls zu einer starken Annäherung der unteren Stabenden, die segmentförmige Abrundung der Kanten sorgt aber für sehr homogenere Zwischenräume. Die Distanz beträgt auch hier $d = 100 \text{ mm}$.

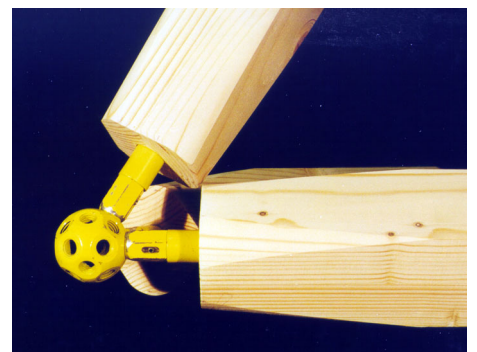


Abb. 3d

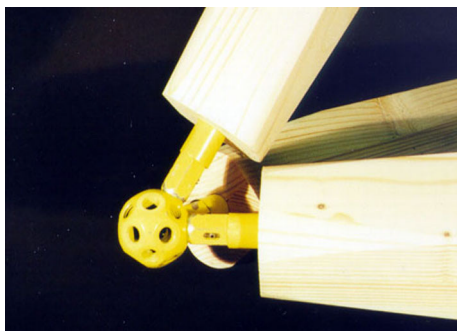


Abb. 3e

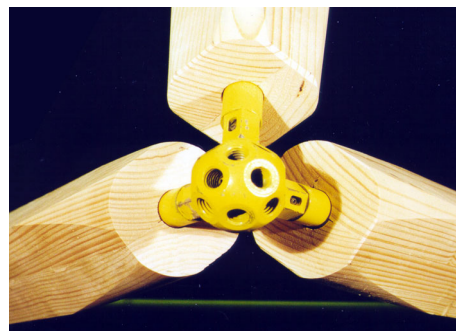


Abb. 3f

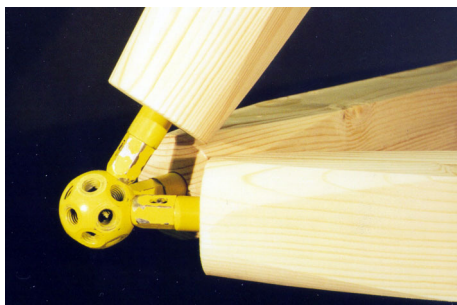


Abb. 4a

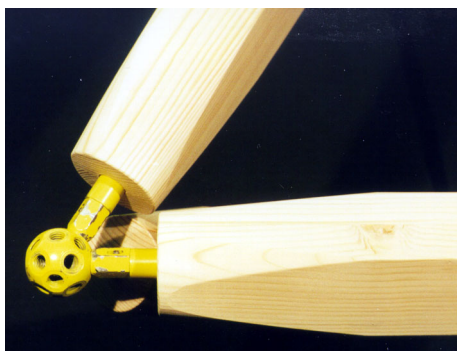


Abb. 4b

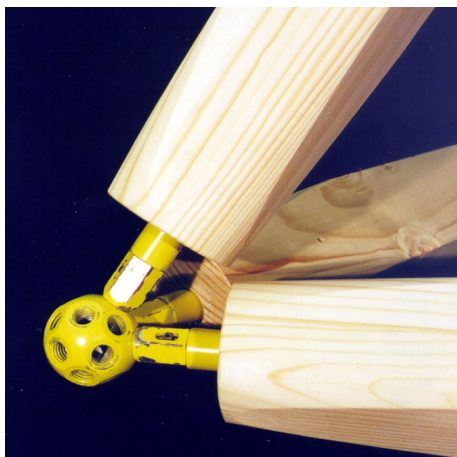


Abb. 4c

4. Kantenanschliff, Kreisquerschnitt

Die Kanten des Ausgangsstabes 100/100 mm werden am Stabende so abgeschliffen, daß als Ansichtsquerschnitt die Form eines Vollkreis mit Radius = Halbe Kantenlänge = 50 mm entsteht. Der Abstand kann nochmals reduziert werden, hier auf $d = 90$ mm.

Abb 4a: Die beiden unteren Stäbe liegen ohne Verdrehung in einer Ebene.

Eine Drehung des einzelnen Stabes um seine Längsachse hat auf das Erscheinungsbild des Knotengefüges keinen wesentlichen Einfluß. Die Zwischenräume sind gleich groß.

Abb. 4b, 4c, 4d: Alle Stäbe sind um ihre Längsachse um 45° gedreht. Das Erscheinungsbild des Anschlußpunktes wird unwesentlich beeinträchtigt. Diese Stabendausbildung läßt unterschiedliche Drehungen der Stäbe um ihre Stablängsachsen zu.

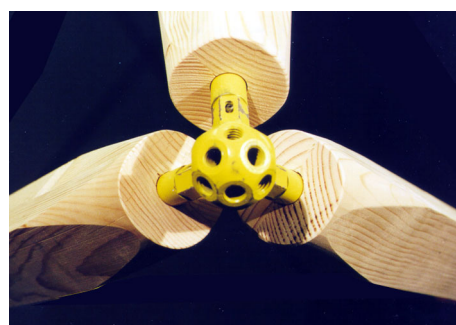


Abb. 4d

6.4.2 Versuchsteil B:

Verhältnis Knoten zu Stab = 1/1

Unter Beibehaltung des Abstandes d und des quadratischen Kreuzbalkenquerschnittes mit der Kantenlänge $a = 100\text{mm}$ bewirkt in diesem Versuchsteil der vergrößerte Knotendurchmesser ein kompakteres Erscheinungsbild des gesamten Knotengefüges.

1. Stumpfes Ende

Der Stab endet stumpf mit seinem quadratischen Querschnitt.

Abb. 5a

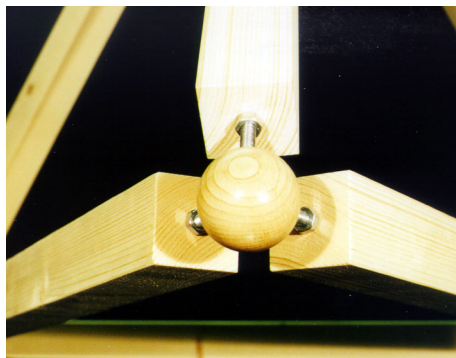


Abb. 5a: Die beiden unteren Stäbe liegen ohne Verdrehung zueinander in ihrer gemeinsamen Stabebene. In der Ansicht der Querschnittkanten liegen alle Ober- und Unterkanten parallel zueinander. Es entstehen annähernd gleich große Zwischenräume.

Abb. 5b



Abb. 5b: Die beiden unteren Stäbe sind so zum oberen Stab gedreht, daß die drei zueinander orientierten Stabkanten ein annähernd gleichseitiges Dreieck bilden. Trotz der starken Annäherung der Kanten entsteht mit dem Knotenelement ein homogenes Erscheinungsbild.

Abb. 5c



Abb. 5c: Im Vergleich zu Abb. 5b ist der obere Stab um seine Längsachse um 45° gedreht. Es entstehen größere Zwischenräume zu den beiden anderen Stäben. Die in Abb. 5b gleichgroße Annäherung der beiden unteren Stabkanten erscheint in dieser Konstellation ungleichgewichtig und daher störend.

2. Angeschnittene Kanten, Achteckquerschnitt



Abb. 6a

Der Abstand d wurde im Vergleich zu Variante in Abb. 5 reduziert. Das Knotengefüge wirkt einheitlich.

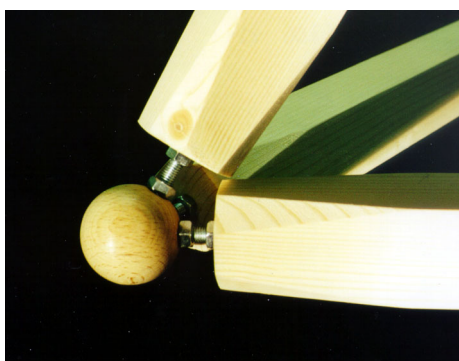


Abb. 6b

Abb. 6a, 6b, 6c: Die Form des Stabendes entspricht Variante Abb. 2. In den Abbildungen liegen die unteren Stäbe ohne Verdrehung in ihrer gemeinsamen Stabebene.

Abb. 6d, 6e, 6f: Die Stäbe sind um ihre Längsachse um 45° gedreht. Die Kompaktheit des Knotens bleibt bestehen.

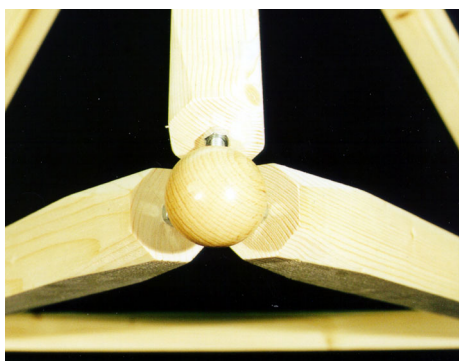


Abb. 6c

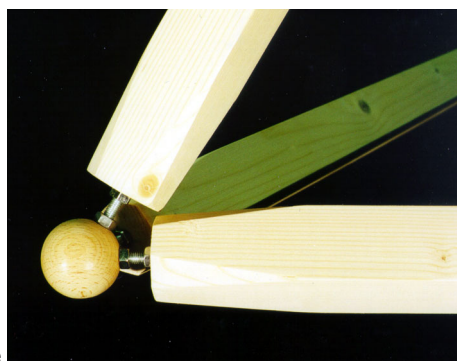


Abb. 6e

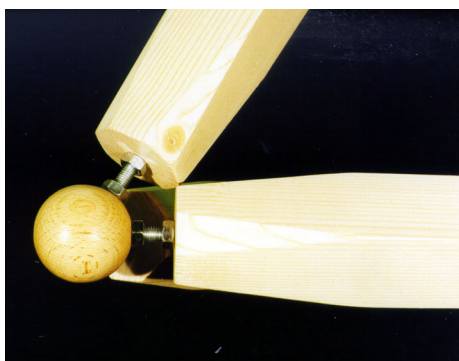


Abb. 6d



Abb. 6f

3. Kantenanschliff (Kreisquerschnitt)

Die Form des Stabendes entspricht der Variante Abb.4. Der Vollkreisquerschnitt wirkt als Projektion des Knotenelementes auf das Stabende und schafft so einen direkten gestalterischen Bezug zum Knotenelement. Das Knotengefüge wirkt sehr einheitlich.

Abb. 7a, 7b: Die beiden unteren Stäbe liegen ohne Verdrehung in ihrer gemeinsamen Stabebene.

Abb. 7c: Die beiden unteren Stäbe sind um 45° gedreht. Das Erscheinungsbild wird wie bei Variante 4 unwesentlich beeinträchtigt.

Abb. 7a

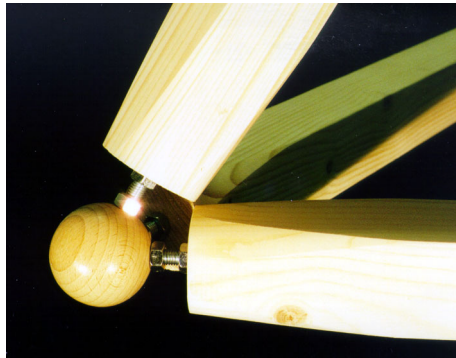


Abb. 7b

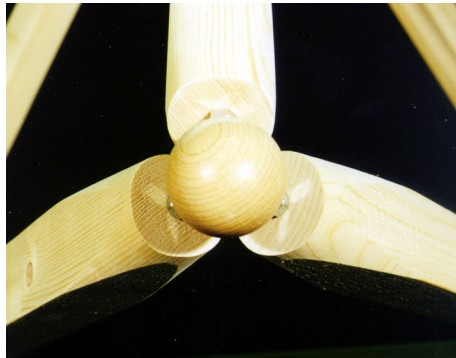


Abb. 7c

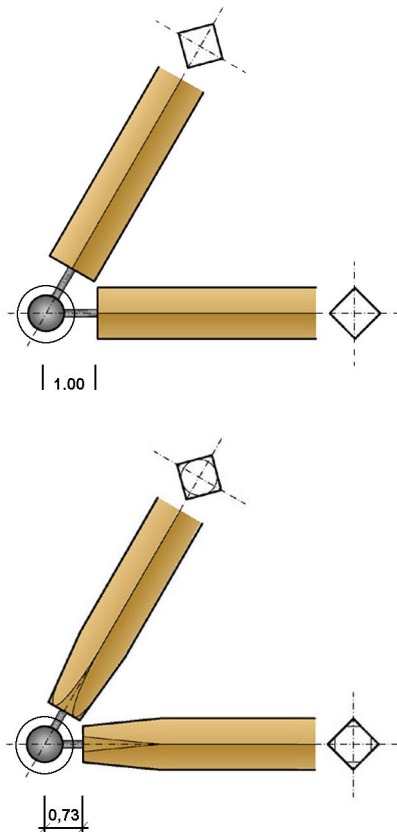


Abb. 8

6.4.3 Zusammenhang zwischen Knotenproportion und Stabendenausbildung:

Abb 8 verdeutlicht im Vergleich den Zusammenhang von Stabendenausbildung mit ihrer Distanz zum Knotenmittelpunkt und den Einfluß des Knotendurchmessers auf den Abstand zwischen Knotenoberfläche und Stabende.

Die Distanz zwischen Knoten und Stabende kann variiert werden durch

- a) die verschiedenen Stabendenausbildungen (stumpfes Stabende, angeschnittene Kanten oder Kantenanschliff) und
- b) Veränderung des Kugeldurchmessers.

Das Problem der räumlichen Enge wird durch entsprechende Gestaltung des Stabendes und / oder der Proportion des Kugeldurchmessers entschärft. Somit verbessert sich auch die Zugänglichkeit für Werkzeuge bei der Montage des Anschlußpunktes.

6.4.4 Fazit:

Das Knotenstabtragwerk ist durch das Erscheinungsbild seiner Einzelglieder geprägt. Die Qualität wird vor allem in der konstruktiven und gestalterischen Einheit von Stabende und Knoten erkennbar. Grundlage dazu bildet die Untersuchung der verschiedenen Möglichkeiten von Stabendenausbildungen unter Berücksichtigung der Proportion von Stabquerschnitt und Knotendurchmesser.

Ein wichtiger Planungsaspekt ist die optimale Lage des Stabes in seiner Längssachse. Durch Drehung kann, wie im Versuch beschrieben, die räumliche Beziehung der Stäbe untereinander verbessert, aber auch verschlechtert werden. Dies ist einerseits eine gestalterische Frage, andererseits ist die Winkellage auch abhängig von der weiteren konstruktiven Einbindung des Stabes in das Gesamtgefüge, wenn beispielsweise die Stabebene als Auflagerebene für eine Dacheindeckung fungiert. Die Abwägung von gestalterischen und statischen Erfordernissen liegt hier im Ermessen des Architekten und Tragwerkplaners.

Ein weiterer Aspekt ist die Distanz d vom Knotenelement zum Stab. Aus statischen Gründen, zur Reduzierung der Knickgefahr unter Druckbelastung, aber auch aus gestalterischen Gesichtspunkten ist eine möglichst kurze Distanz zwischen Knotenelement und Stabende anzustreben. Durch Verjüngung der Stabenden mit ihrer gestalterischen Ausbildung als Achteckquerschnitt mit angeschnittenen bzw. angeschliffenen Kanten oder zum Kreisquerschnitt angeschliffen kann die Distanz d zwischen Stabende und Knotenelement verringert werden.

Bei Vergrößerung des Knotendurchmessers nähert sich die Oberfläche des Knotens dem Stabende bei gleichbleibender Distanz. Die Knicklänge des freiliegenden Anschlußbolzens wird reduziert. Die angegliche Proportion von Kugeldurchmesser zu Stabquerschnitt erzeugt ein kompaktes Erscheinungsbild. Gestalterische Maßnahmen, wie z.B. die formale Angleichung von Kugelnknoten zu kreisförmigen Querschnitt des Stabendes, unterstützen eine homogene Gestaltung.

Die mehrfache Vergrößerung des Knotendurchmessers gegenüber dem Stabquerschnitt entzerrt die räumlich-geometrische Enge. Bei bestimmten Anschlußkonstruktionen, wie z.B. der Anschluß mit Stabinnenverschraubung an Massivknoten (siehe Kap. 6.3.3, 2), kann dieser Abstand ganz entfallen.

6.5 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die Analyse und Weiterentwicklung von Lösungsmodellen für den Gelenkpunkt von Knotenstabtragwerken gibt einen Einblick in die Komplexität dieses Themas. In der Untersuchung zeigt die Vielfalt der Konstruktionen eine Flexibilität auf, die sich in der Übernahme aktueller Lösungen, ihrer Abwandlungen oder der Entwicklung neuartiger Konzeptionen widerspiegelt.

Die Vorgabe, Kreuzbalken als Stäbe von Knotenstabtragwerken unter Verwendung der Induo – Verbundankertechnik an die Gelenkpunkte anzuschließen, führt nicht zu statischen bzw. konstruktiven Einschränkungen, sondern unterstreicht die strukturellen Vorteile als normalkraftbelastbares Verbindungsmittel im Kontext der übrigen Anschluß- und Knotenelemente. Gesamtlösungen zeigen Möglichkeiten auf, unterschiedliche Ansprüche in Bezug auf Gestaltung, Baustoffe, serieller Fertigung, Montagefreundlichkeit, Brandschutz, etc. zu erfüllen. Eine optimierte Kombination der unterschiedlichen Lösungsvorschläge zu Knoten, Knotenanschlüssen und Stabendenausbildung ergibt in vielen Fällen ein synergetisches Ergebnis.

In Ergänzung zur Anwendung von konventionellen Baustoffen weist die Ausführung mit modernsten Werkstoffen wie Leichtbeton, Holzfaserbeton, oder mineralischen bzw. synthetischen Gläsern visionär in die Zukunft.

Am Gelenkpunkt ist für Knotenstabtragwerke der Nachweis erbracht worden, daß der Werkstoff Holz in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik nicht nur gleichwertig zu konventionellen Stahltragwerken angesehen werden kann, sondern als konkurrenzfähige Gesamtlösung statische, konstruktive, gestalterische und wirtschaftliche Vorteile aufweist.

Fußnoten zu Kap. 6:

¹ Krauss, Führer, Jürges; 1996, S. 69

Abbildungen zu Kap. 6:

- ¹ Rühle, Bd 2, 1970, S. 68
- ^{2,3} Makowski, 1963, S. 131
- ⁴ Rühle, Bd 2, 1970, S. 66
- ⁵ Makowski, 1963, S. 122
- ⁶ Makowski, 1963, S. 93
- ⁷ MERO, Produktinformation 2.4.02, 05.1998, S. 2
- ⁸ Makowski, 1963, S. 91
- ⁹ Makowski, 1963, S. 90
- ¹⁰ MERO, Produktinformation 0.0.03, D 792, 01.1986, S. 3
- ¹¹ MERO, Diaserie für Schulungszwecke,
BPV / Waberseck, 12.93
- ¹² Schweizer Holzbau 12/1995
- ¹³ L. Heimann, 2000
- ¹⁴ Rühle, Bd 2, 1970, S. 67
- ¹⁵ Fuller, 1983, S. 133
- ¹⁶ Heinle, Schlaich; 1996, S. 162
- ¹⁷ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 161
- ¹⁸ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 159
- ¹⁹ Makowski, 1963, S. 35
- ²⁰ Holzbauatlas Zwei, 1991, S. 247
- ²¹ Rühle, Bd 2, 1970, S. 66
- ²² Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 103
- ²³ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 102
- ²⁴ MERO, Produktinformation 2.2.02, 01.1994, S. 2
- ²⁵ MERO, Produktinformation D 932, 10.1998, S. 12
- ²⁶ MERO, Produktinformation D 932, 10.1998, S. 7
- ²⁷ Rühle, Bd 2, 1970, S. 67
- ²⁸ Krausse, 1999, S. 383
- ²⁹ Rühle, Bd 2, 1970, S. 66
- ³⁰ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 137
- ³¹ Makowski, 1963, S. 9
- ³² Rühle, Bd 2, 1970, S. 66
- ³³ Makowski, 1963, S. 25
- ³⁴ Makowski, 1963, S. 26
- ³⁵ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 109
- ³⁶ Makowski, 1963, S. 100
- ^{37,38} Rühle, Bd 2, 1970, S. 68
- ³⁹ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 88
- ⁴⁰ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 121
- ⁴¹ MERO, Diaserie für Schulungszwecke,
BPV / Waberseck, 12.93
- ⁴² Schweizer Baublatt 3/87
- ⁴³ F. Mähl, 2000
- ⁴⁴ SYMA, Produktinformation, 2000
- ⁴⁵ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 132
- ⁴⁶ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 133
- ⁴⁷ S. Meis, 1998
- ⁴⁸ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 63
- ⁴⁹ Büttner / Stenker, Bd 1, 1970, S. 65
- ⁵⁰ MERO, Produktinformation D 932, 10.1998, S. 8
- ⁵¹ Holzbauatlas Zwei, 1991, S. 247
- ⁵² MERO, Produktinformation D 882, 08.1989, S. 4
- ^{53,54} F. Mähl, 2000
- ⁵⁵ van Büren, 1985, S. 158
- ⁵⁶ Schweizer Holzbau 12/1995
- ⁵⁷ SYMA, Produktinformation, 2000
- ⁵⁸ Klotz, 1986, S. 248
- ⁵⁹ Rühle, Bd 2, 1970, S. 66
- ⁶⁰ Wachsmann, 1988, S. 59
- ⁶¹ Mengerlinghausen, 1975, S. 65

7 Brandschutz von Knotenstabtragwerken

Knotenstabtragwerke werden fast immer als sichtbare Konstruktionen ausgeführt. Die von ihnen ausgehende architektonische Qualität, die ihnen eigene gestalterische Aussage, die sich Kraft der Stringenz der Geometrie und der Qualität der Details ergeben, lassen keine brandschutztechnische Verkleidung der Konstruktion zu, weder im Ganzen noch am einzelnen Tragwerkselement. Aus dieser Sichtbarkeit ergeben sich gelegentlich Herausforderungen hinsichtlich des Brandschutzes.

7.1 Grundlagen des Brandsicherheitskonzeptes

7.1.1 Anforderungen

Die Anforderungen an den Feuerwiderstand einer Konstruktion werden in den Landesbauordnungen formuliert. Je nach den besonderen Situationen ergeben sich bei Dachkonstruktionen häufig keine Anforderungen (F0) oder 30 Minuten Feuerwiderstandsdauer (F30). Wie kann die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen bei Knotenstabtragwerken nachgewiesen werden?

Die technischen Baubestimmungen, insbesondere DIN 4102 Teil 4¹, geben für die Abhängigkeit der Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils folgende Kriterien an:

- Art der Brandbeanspruchung
- Verwendeter Baustoff und Baustoffklasse
- Bauteilabmessungen
- Statisches System der Gesamtkonstruktion und des einzelnen Tragelements
- Ausnutzungsgrad der Festigkeiten der verwendeten Baustoffe
- bauliche Ausbildung der Konstruktion

Die wichtigsten der genannten Kriterien müssen in ein Konzept für den Nachweis der Brandsicherheit bei Knotenstabtragwerken eingehen.

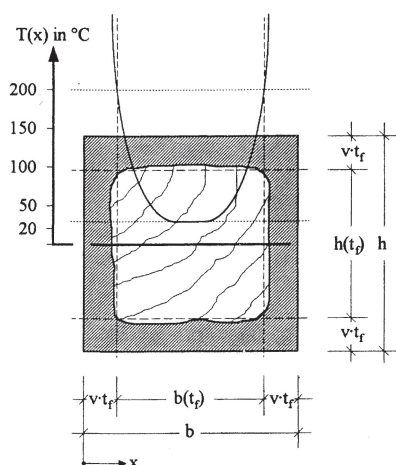
7.1.2 Beanspruchung und Beanspruchbarkeit



4-seitig beflammt Kreuzbalken



3-seitig beflammt Kreuzbalken



Temperaturverlauf in einem 4-seitig brandbeanspruchten Holzquerschnitt ¹

Zweilagige Knotenstabtragwerke unterliegen grundsätzlich einer mehrseitigen Brandbeanspruchung. Die frei liegenden Untergurte und Diagonalen eines Raumfachwerks werden vierseitig beansprucht. Sind Obergurte durch eine Flächenkonstruktion (z.B. Dachschalung) oben abgedeckt, werden sie nur dreiseitig durch Brand beaufschlagt.

Bei einlagigen Knotenstabtragwerken, wie sie bei kleinen Kuppeln vorkommen, werden die Stäbe im allgemeinen dreiseitig durch Brand beaufschlagt, da sie von der Oberseite durch die unmittelbar aufliegende Dacheindeckung einseitig geschützt sind.

Als Baustoffe der hier untersuchten Raumfachwerke kommen ausschließlich Kreuzbalken und hauptsächlich Stahlverbindungsteile in Betracht. Kreuzbalken werden in fast allen ihren Eigenschaften dem Brett-schichtholz gleich gesetzt, so daß sie auch hinsichtlich des Brandschutzes mit dem Brett-schichtholz (BSH) gleich bedeutend eingestuft werden können. Sie gehören damit unter die normalentflammbaren Baustoffe (B2). Die Abbrandgeschwindigkeit von BSH aus Nadelholz beträgt für die brandschutztechnische Bemessung ² von Holztragwerken 0,7 mm/min. Nach 30 Minuten Branddauer (F30) erfährt jede brandbeaufschlagte Fläche eines Tragwerkelements einen Abbrand von 30 Minuten \times 0,7 mm/min = 21 mm.

Kreuzbalken können auf Grundlage besonderer Bestimmungen per Prüfbescheid auch in die Baustoffklasse der schwerentflammbaren Baustoffe (B1) eingestuft werden. Dazu ist eine besondere Imprägnierung mit Feuerschutzmitteln (FSM) erforderlich. Als solche kommen salzhaltige Feuerschutzmittel oder dämmschicht-bildende Feuerschutzmittel in Frage.

Die frei liegenden Stahlteile für den Anschluß und die Knoten sind in jedem Fall durch einen F30-Anstrich zu sichern.

Eine höhere brandschutztechnische Sicherheit bieten die Massivknoten aus Sichtbeton (Kap. 6.2.3) mit Stabinnenverschraubung (Kap. 6.3.3, 2). Durch statisch konstruktive Detailausbildung sind Bewehrung und Stahlanschlußmittel entweder mit Beton umhüllt bzw. im Kernbereich des Kreuzbalkens integriert. Im Brandfall sind dadurch die tragenden Knoten- und Anschlußelemente vor der Einwirkung der direkten Beflammung geschützt.

7.1.3 Parameter für die Brandberechnung

Die Abmessungen der Bauteile sind von besonderer Bedeutung beim Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit. Dabei ist der Nachweis im „kalten“ Belastungszustand zu unterscheiden von dem „warmen“ Nachweis im Brandfall. Im ersten Fall gelten neben Stützweiten und Knicklängen alle Querschnittsabmessungen (b = Breite, a = Höhe, etc.) und Querschnittskennwerte (A = Fläche, W = Widerstandsmoment, I = Trägheitsmoment, i = Trägheitsradius, etc.) für den Ausgangsquerschnitt. Im zweiten Fall gelten nur noch die Querschnittskennwerte der durch den Abbrand verbliebenen Restquerschnitte und die sich damit ergebenden Schlankheiten und Gefährdungen.

Das Nachweisverfahren nach DIN 4102 liefert Mindestquerschnittsabmessungen. Sie sind von den oben aufgeführten Parametern, aber auch vom Ausnutzungsgrad der zulässigen Beanspruchung bei der „kalten Bemessung“ für Druck, Zug und Biegung abhängig. Je höher die Ausnutzung des Querschnitts im kalten Zustand, um so größer werden die Mindestabmessungen zum Nachweis der Feuer sicherheit.

Durch die Begrenzung der Induo - Verbundankerkraft auf ca. 40 kN sind die Kreuzbalken spannungsmäßig noch nicht ausgenutzt. Das wirkt sich positiv auf die Mindestabmessungen im Brandfall aus.

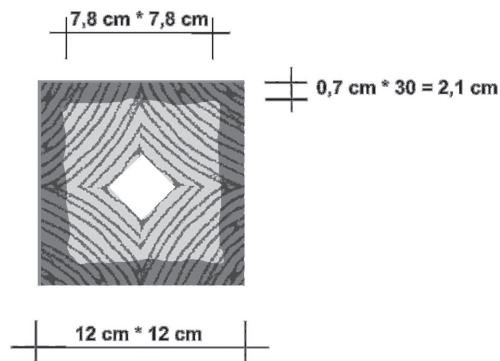
Auch das statische System geht als Parameter in die Brandberechnung ein. Die einzelnen Stäbe des Knotenstabtragwerkes sind statisch bestimmte Einfeldträger oder Pendelstäbe. Einspannungen am Knoten und daraus folgende Umlagerungsmöglichkeiten sind beim einzelnen Stab vernachlässigbar klein.

Das gesamte System des Knotenstabtragwerkes ist jedoch hochgradig statisch unbestimmt. Wenn es zum Ausfall eines einzelnen Stabes durch Brand kommt, so stellen sich zwar größere Verformungen ein, aber die Kraftumlagerungen auf die benachbarten Stäbe verhindern ein Versagen des ganzen Tragwerkes. Diese Tatsache wird in Simulationsberechnungen für den Brandfall (Kap. 7.2) an ausgewählten Systemen durch Weglassen einzelner Stäbe nachgewiesen.

7.1.4 Brandsicherheitskonzept

Unter Verwendung der vorgenannten Parameter wurden für Standardfälle mit Hilfe der Tabellen aus DIN 4102 Teil 4 eine Serie von Mindestquerschnitten ermittelt, z.B. 12/12 cm.

Der Restquerschnitt beträgt im Brandfall dann nur noch $12,0 \text{ cm} - 2 \times 2,1 \text{ cm} = 7,8 \text{ cm} / 7,8 \text{ cm}$.



Brandverhalten von Kreuzbalken

Druckbeanspruchte Diagonalen erfordern danach bei $N = 40 \text{ kN}$:

- bei einer Knicklänge s_k von 2,0 bis 2,5 m einen Querschnitt 12/12 cm
- bei einer Knicklänge s_k von 3,0 bis 3,5 m einen Querschnitt 14/14 cm.

Der Restquerschnitt ist dann noch gerade in der Lage, bei erhöhter zulässiger Spannung und erhöhter Knickgefahr die Normalkraft zu übertragen.

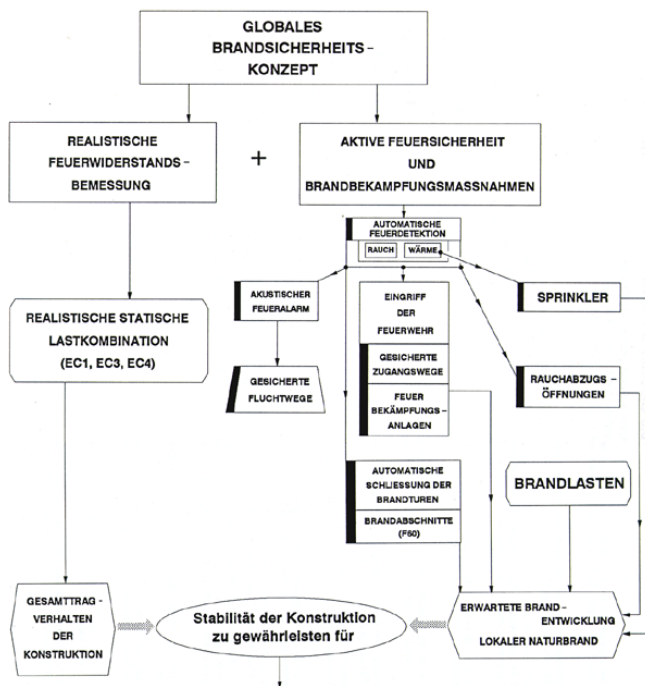
Zugdiagonalen und Untergurte erfordern bei einer Zugbelastung von $N = 40 \text{ kN}$ eigentlich nur Mindestquerschnitte von 10/10. Im Hinblick auf den sehr kleinen zugehörigen Restquerschnitt im Brandfall von ca. 6/6 cm und die unsichere Verankerung des Induo-Verbundankers in diesem Restquerschnitt, ist der Mindestquerschnitt von 12/12 nicht unterschreitbar.



3-seitig beflammteter Kreuzbalken,
Mindestquerschnitt: 10/14 cm bzw. 12/16 cm

Obergurte sind im allgemeinen druckbeansprucht, 3-seitig brandbeaufschlagt und oft zusätzlich biegebeansprucht durch die direkte Lasteinleitung der Dachhaut. Die Obergurte sollten schon bei der „kalten“ Bemessung als Rechteckquerschnitte ca. 4 cm höher als breit gewählt werden z.B. 10/14 oder 12/16.

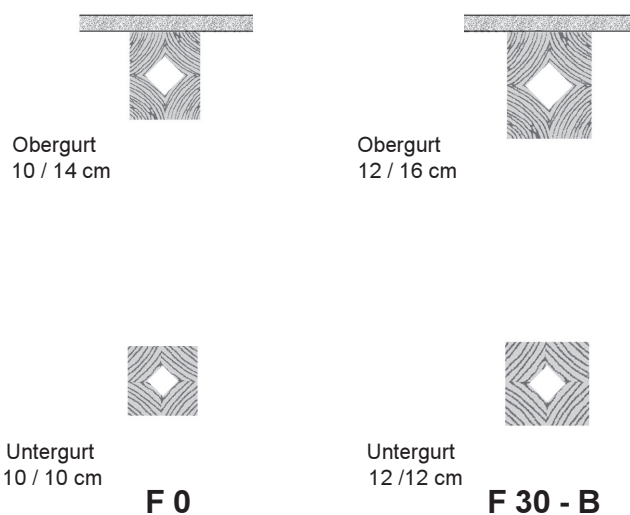
Die erforderlichen Mindestquerschnitte betragen beim „warmen“ Nachweis 10/16 oder 12/14 bzw. 12/16 cm.



Vorschlag für ein Globales Brandsicherheitskonzept ²

In einem weitergehenden ganzheitlichen Brandsicherheitskonzept können noch weitere Gesichtspunkte in den Nachweis eingebracht werden. Zu dieser realistischen Brandschutzbemessung tragen bei:

- Berücksichtigung der tatsächlichen Brandlast
- Tatsächliche Hitzeentwicklung am Knotenstabtragwerk bei Naturbrand statt Normbrand
- Probabilistisches Sicherheitskonzept z.B ist die Ereigniswahrscheinlichkeit, daß Jahrhundert schnee und Brandfall zusammentreffen, äußerst gering
- Lastreduzierung durch genauere Erfassung der Bemessungseinwirkung mit Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsfaktoren
- Nutzung der Umlagerungsmöglichkeiten des hochgradig statisch unbestimmten Tragwerks
- Berücksichtigung des Einsatzes von Sprinkleranlagen, Rauch- und Feuermelder



Vorschlag für den Tragwerkentwurf

7.1.5 Vorschlag für den Tragwerkentwurf

Die Querschnitte des Untergurtes, der Diagonalen und des Obergurtes werden aufgrund der „kalten“ Bemessung ermittelt, hier z.B. 10/10 cm für die Diagonalen und Untergurte bzw. 10/14 cm für die Obergurte. Zur Berücksichtigung einer möglichen (F 30 - B) Anforderung werden die Querschnitte in beide Richtungen um 2 cm vergrößert (hier im Beispiel: 12/12 cm bzw. 12/16 cm). Für den Restquerschnitt im Brandfall von 7,8/7,8 cm bzw. 7,8/13,9 cm lassen sich mit DIN 4102 oder mit einem anderen Brandsicherheitskonzept ausreichende Sicherheiten nachweisen.

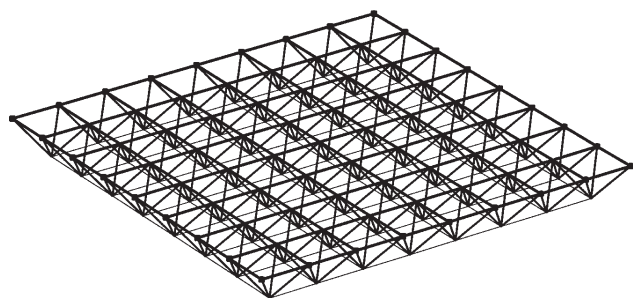
7.2 Simulationsberechnung für den Brandfall

7.2.1 Grundlagen für die Berechnung

Nachdem das Brandverhalten von Knotenstabtragwerken allgemein erläutert wurde, wird anhand einer Beispielrechnung gezeigt, wie sich Raumfachwerk-Platten bei Verlust einzelner Stäbe durch Brandeinwirkung verhalten.

Es wird ein fortschreitender Abbrand in Feldmitte simuliert, wo die Belastung des Tragwerks maximal ist.

Anhand des Kräfteverlaufs im Untergurt wird in fünf Phasen gezeigt, wie die Kräfte innerhalb der Platte so umgelagert werden, daß das Gesamtsystem auch bei starker Brandeinwirkung nicht kollabiert.



7.2.2 Parameter für die Berechnung

Für die Simulation wird das Knotenstabtragwerk RSW1 (siehe Kap. 4.2.1) verwendet, die Parameter allseitige Randlagerung, Spannweite 16 m, Rastermaß 2,00 m und Belastung 1,5 kN/m² werden dabei übernommen. Die zulässigen Beanspruchungen liegen allerdings im Katastrophenfall höher.

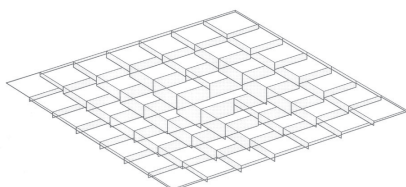
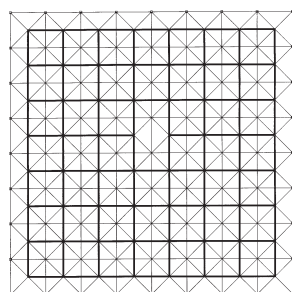
Die detaillierten Ergebnisse der Berechnung finden sich im Anhang.

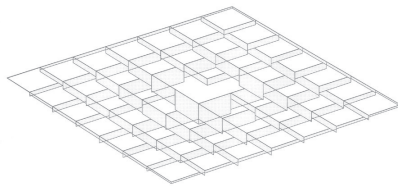
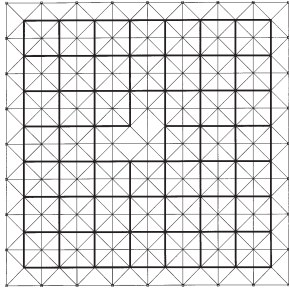
7.2.3 Brandsimulation

Phase 1

Ein Untergurtstab in Feldmitte versagt durch Abbrand. Anhand des Kräfteverlaufs im Untergurt wird deutlich, wie die unterbrochene Stablage durch die beiden längs liegenden benachbarten Stablagen entlastet wird. Dort steigen die Zugkräfte bis auf 52 kN, was allerdings durch die im Katastrophenfall anzusetzenden verminderten Sicherheitsbeiwerte abgedeckt ist.

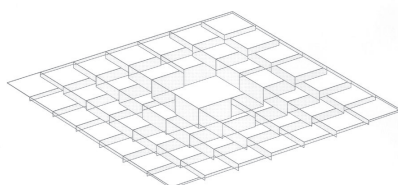
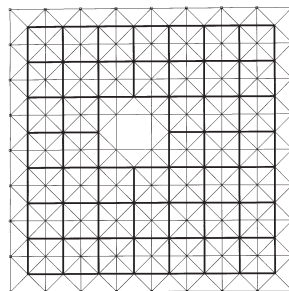
Die Normalkräfte im Obergurt steigen bis auf 58 kN an, was ebenfalls als unkritisch angesehen werden kann. Die Normalkräfte der Diagonalstäbe bleiben mit maximal 18 kN niedrig.





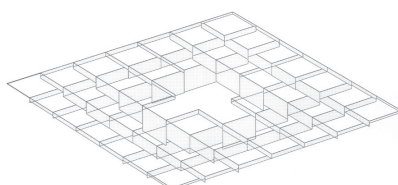
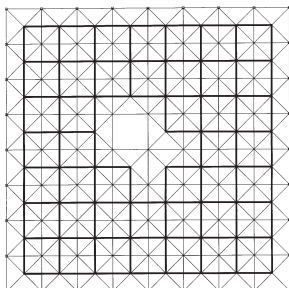
Phase 2

Fällt ein weiterer Untergurtstab aus, werden die Kräfte relativ gleichmäßig in die drei umliegenden Stablagen umgelagert. Dort steigt die Zugbelastung im Untergurt auf 57 kN, während die Druckkräfte im Obergurt aufgrund der effizienteren Umlagerung wieder leicht gesunken sind (maximal 54 kN).



Phase 3

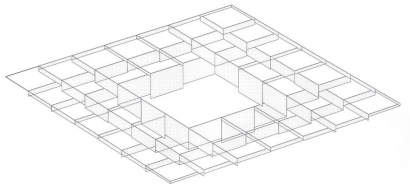
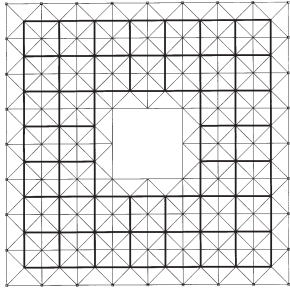
Fallen zwei weitere Untergurtstäbe aus, stabilisiert sich die Situation wieder, da nun die Kräfte gleichmäßig in die vier umliegenden Stablagen umgeleitet werden. Die maximalen Zugkräfte sinken im Untergurt auf 55 kN, im Obergurt auf 47 kN. Die Druckkräfte in den Diagonalstäben sind mit 24 kN im Bereich des Brandherdes nach wie vor unkritisch.



Phase 4

Mit dem asymmetrischen Abbrand weiterer Untergurt- und Diagonalstäbe steigen die Zugkräfte im Untergurt auf 70 kN an, da sich die Kräfte von zwei unterbrochenen Stablagen nun hauptsächlich auf die drei benachbarten Lagen verteilen.

Im Gegensatz zu den Druckkräften im Obergurt (maximal 51 kN) erreichen die Werte im Untergurt langsam einen kritischen Bereich, da sich die Kräfte dort auf wesentlich weniger Stäbe verteilen.



Phase 5

Erst wenn weitere Stäbe ausfallen (insgesamt 12 Untergurt- und 16 Diagonalstäbe), gibt der Obergurt in Feldmitte nach - aufgrund fehlender Abstützung durch Diagonalstäbe bricht das mittlere Feld ein.

Insgesamt bleibt das Tragwerk aber stabil.

Aufgrund der gleichmäßigeren Kraftumlagerung (vgl. Phase 3) und der verminderten Gesamtlast bleiben die Zugkräfte im Untergurt konstant bei 70 kN und steigen im Obergurt auf 56 kN leicht an. Nach wie vor liegen die Druckkräfte in den Diagonalstäben mit 33 kN im unkritischen Bereich.

Zusammenfassung

Trotz der hohen Auslastung des Knotenstabtragwerks RSW 1 (vgl. Kap. 4.3, Statische Auswertung) verhält es sich über die in Kap. 7.1 dargestellten allgemein günstigen Materialeigenschaften auch bei extremer Brandeinwirkung unkritisch. Ein Kollabieren des Gesamtsystems läßt sich weitgehend ausschließen.

Dies läßt sich auf die Knotenstabtragwerke als Raumfachwerk - Platten RSW 2 - 7 sowie auf die tonnen- und kuppelförmigen Systeme im Prinzip übertragen.

Fußnoten zu Kap. 7:

¹ DIN 4102 Teil 1- 4, 1994

² Eurocode 5 - Holztragwerke;

Teil 1-2 - Brandschutztech. Bemessung von Holztragwerken

Abbildungen zu Kap. 7:

¹ Kircher, 2000, Bd 2, Teil 4, Holz u. Holzwerkstoffe, Teil 4/3 S. 10

² Schmiedel, Schleich, 1995, S. 302 - 303 sowie
Schleich, 1998, S. 83

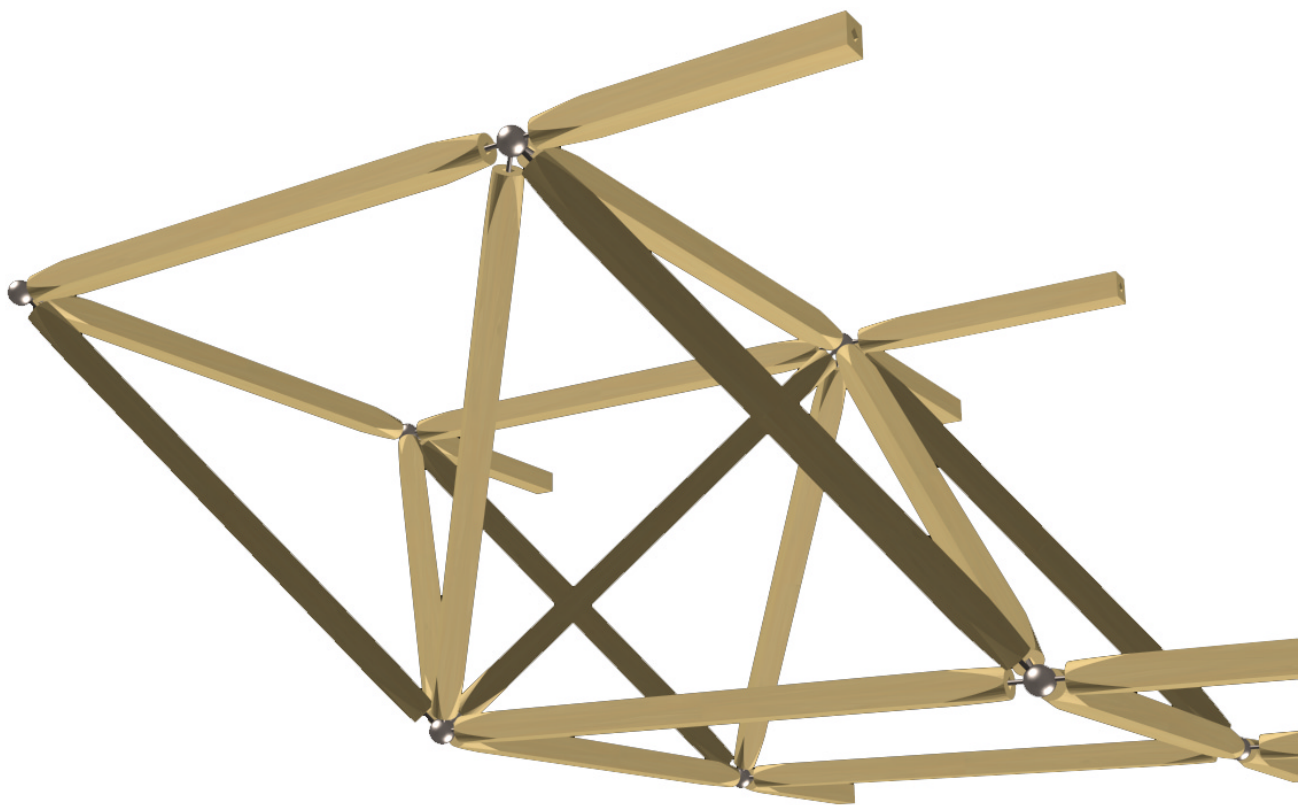
8 Gestaltungsbeispiele für räumliche Knotenstabtragwerke mit Kreuzbalken und Induo-Verbundanker

8.1 Tank- und Service Station

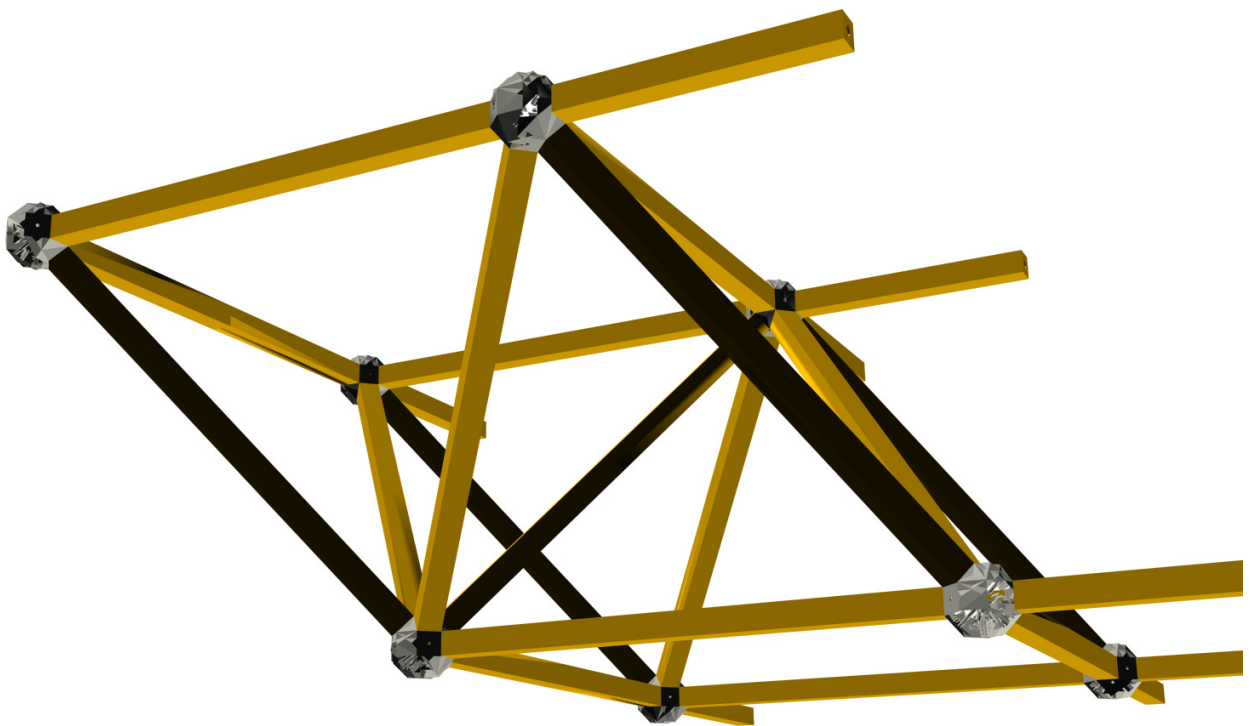
Der Entwurf sieht eine freie und offene Dachkonstruktion als Raumfachwerkplatte mit Punktlagerung in den Eck- und Randbereichen in Form von Pyramidenstrukturen (auf eingespannten Stützen) vor.



Tank- und Service Station, Perspektive



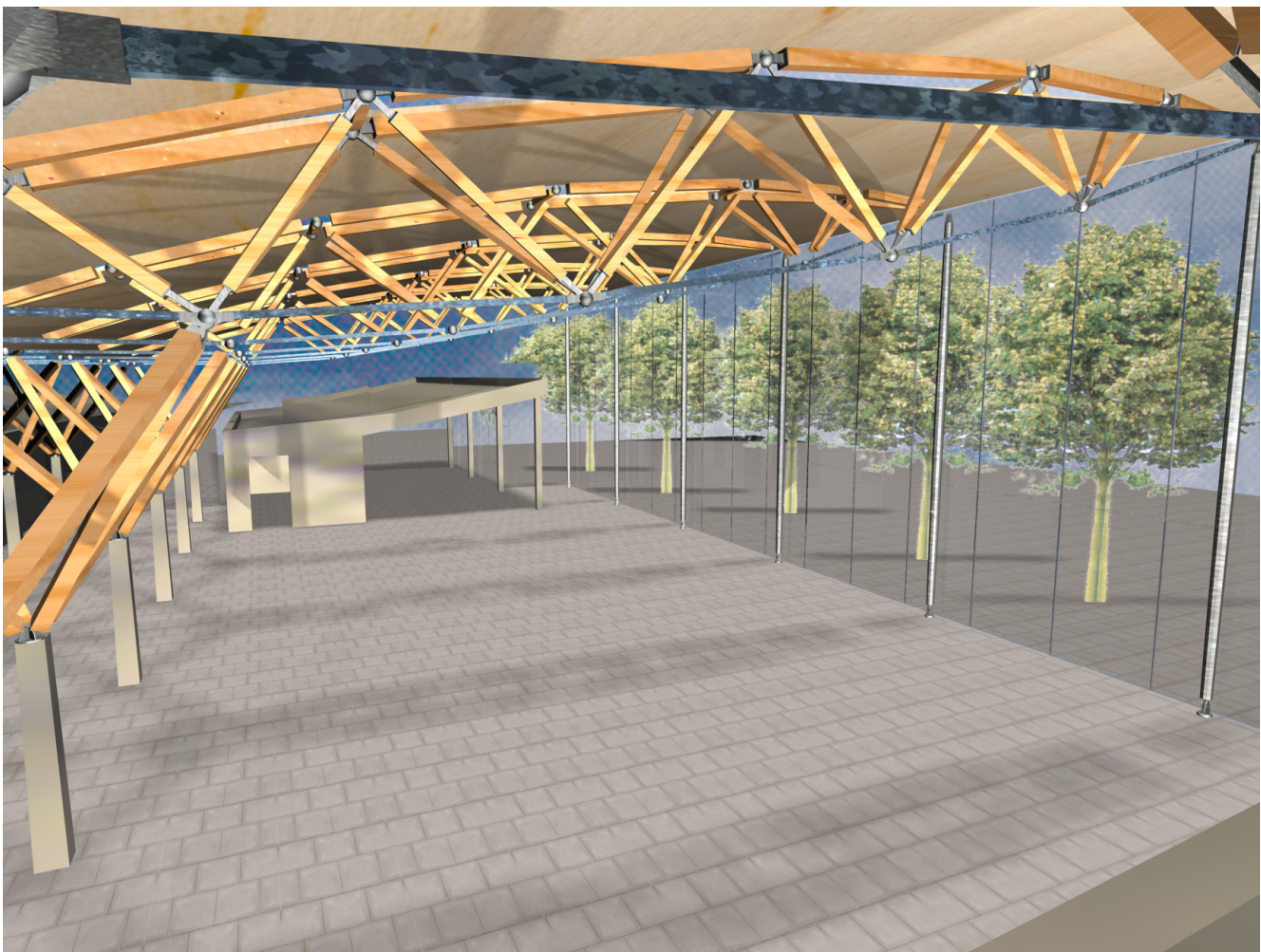
Eckdetail des Dachtragwerks
Detail der Grundstruktur - Flächentragplatte RSW 1, Detailausführung mit Kugelnknoten (Kap 6.2.1.1)



Eckdetail des Dachtragwerks
Detail der Grundstruktur - Flächentragplatte RSW 1, Detailausführung mit Polyederknoten (Kap 6.2.3.2)

8.2 Ausstellungspavillon

Das Tragwerk besteht aus linienförmigen Dreigurtbindern mit zwei Obergurten und Diagonalen. Als zugbeanspruchtes Tragelement ist der Untergurt als Stahlseil ausgebildet.

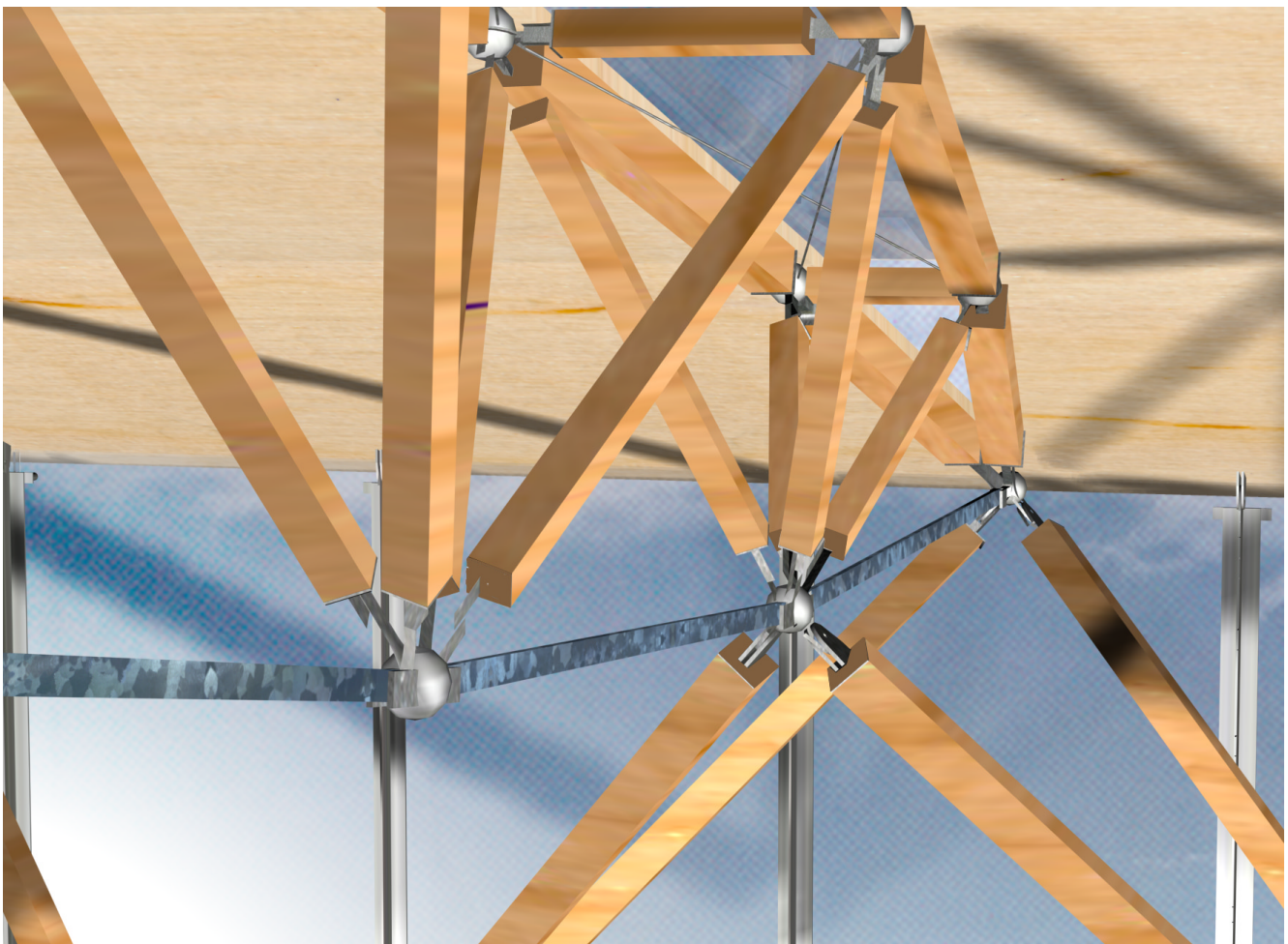


Ausstellungspavillon, Innenraumperspektive

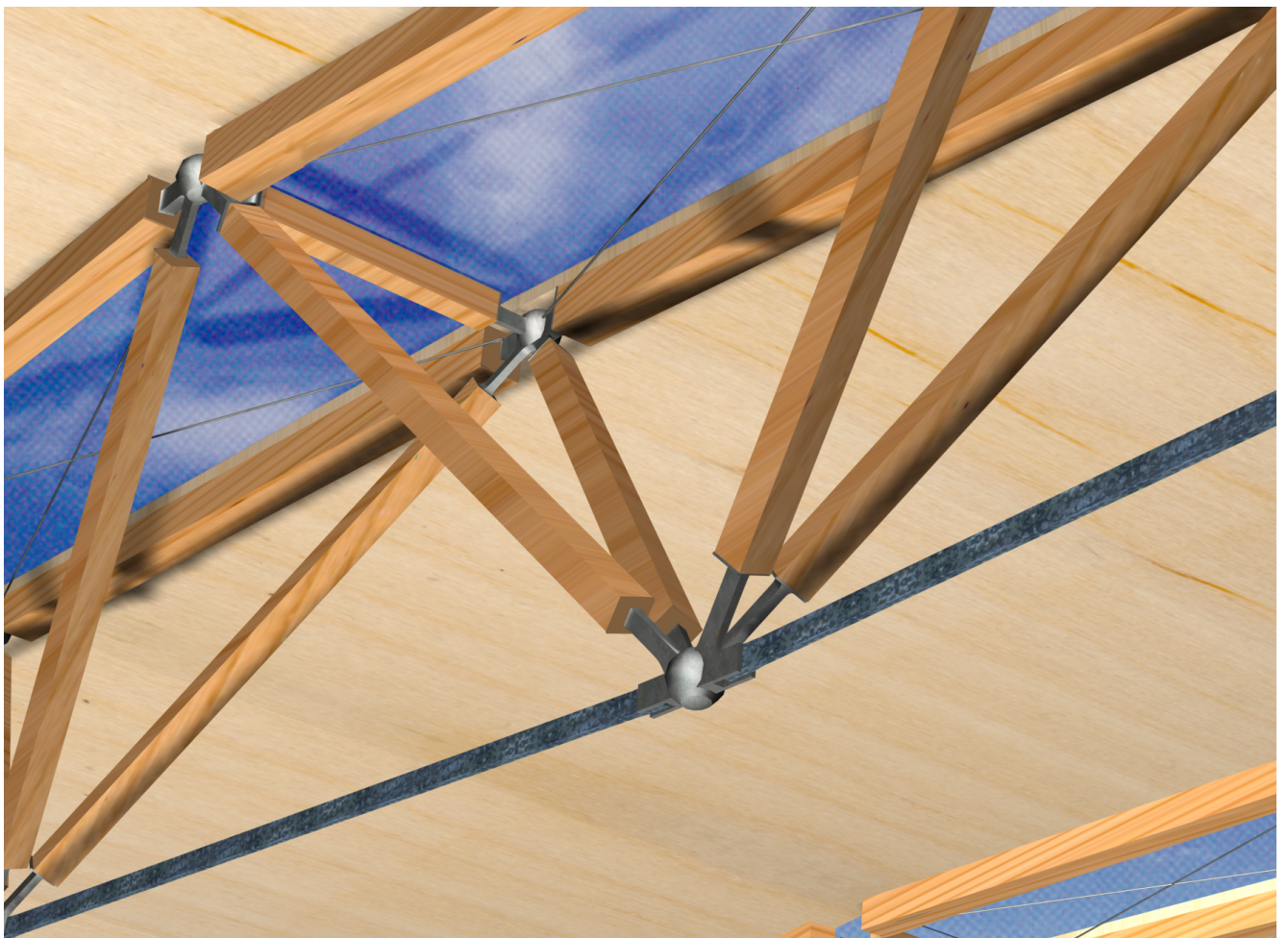
Studienarbeit; Entwurfsverfasser: Nicola Bogatzki und Ralf Herkrath
Baukonstruktion I (Tragwerklehre), RWTH Aachen 1999



Ausstellungspavillon, Ausschnitt Deckenuntersicht mit baumstützenförmiger Auflagerung



Ausstellungspavillon, Perspektive Dreigurtbinder



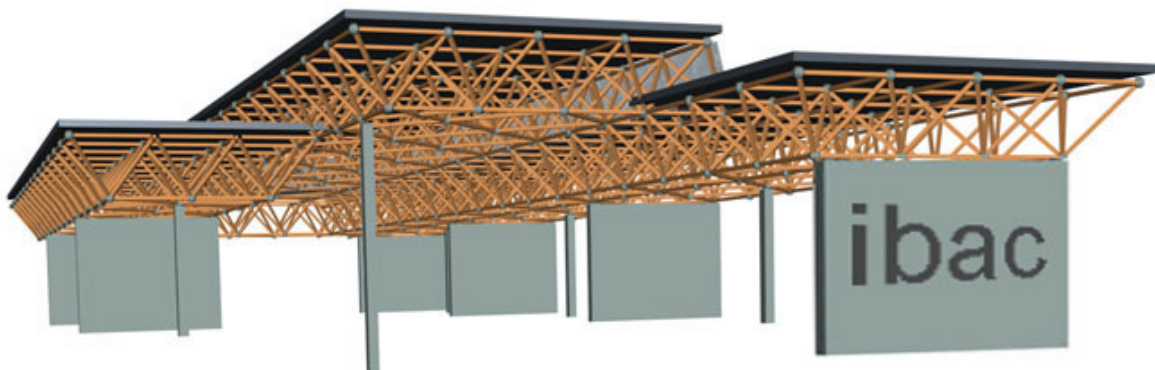
Ausstellungspavillon, Detailansicht linearer Träger

8.3 Werkhofüberdachung, ibac, RWTH Aachen

Das Flachdach ist als ebenes räumliches Knotenstabtragwerk konzipiert aus Induo - Stäben mit Stabinnenverschraubung und Polyederknoten als massive Betonfertigteile.

Die Dachverfaltung als Höhenversatz nimmt Bezug auf die modulare Struktur. Die auskragende Überhöhung unterstreicht als Empfangsgeste die markante Zugangssituation.

Realisierungsentwurf für das Institut für Bauforschung (ibac) Schinkelstr. 3



Werkhofüberdachung, Perspektive

Entwurfsverfasser: Johann-Wilhelm Heyden, Florian Mähl, Sascha Meis
Baukonstruktion I (Tragwerklehre), RWTH Aachen 2001



Werkhofüberdachung, städtebauliche Einbindung



Ferienhaus, Ansicht verglaste Hauptfassade¹

8.4 Ferienhaus

Simulation der Konstruktion mit innenverschraubten Induo - Stäben an Scheibenknoten als Stahlbetonfertigteile.

Die geometrische Grundlage der Halbkugelform für das einlagige räumliche Knotenstabtragwerk bildet die Geodätische Kuppel.



Ferienhaus, Innenansicht des Wohnraums²

Werkfoto: Losberger Holzleimbau, Eppingen, D



Domkirche, Außenansicht³

8.5 Domkirche S. Mass. Kolbe in Varese, Italien

Simulation der Konstruktion mit innenverschraubten Induo - Stäben (Rechteckquerschnitt in Hochkantlage) an Zylinderknoten als Stahlbetonfertigteile. Der Kuppelbau beruht auf dem Prinzip einer dreiläufigen Ringnetzku­ppel mit ca.160 standardisierten Bogen­elementen.



Domkirche, Innenansicht⁴

Architekt: J. Dahinden, Zürich, CH

Abbildungen zu Kap. 8:

^{1, 2} Lips - Ambs, 1999, S. 46

^{3, 4} Lips - Ambs, 1999, S. 74

9 Zusammenfassung

Der Induo - Verbundanker stellt ein leistungsfähiges Verbindungsmittel im konstruktiven Holzbau dar. Im industriellen Produktionsprozeß von Konstruktionshölzern wird der Verbundanker in Verbindung mit der Kreuzbalkentechnik an beliebiger Position in Richtung der Stablängsachse eingebracht.

Mit der Verbundtechnik, einer vergleichbaren „Innenvernagelung“ quer zur Stabachse, ist der Verbundanker insbesondere in der Lage, Normalkräfte des Stabelements aufzunehmen und abzusetzen.

Da bei Fachwerken, insbesondere bei räumlichen Knotenstabtragwerken, nur Normalkräfte auftreten, liegen die Chancen des vorliegenden Ankersystems vor allem in der Anwendung bei den genannten Tragwerken.

Geometrische und statische Grundlagen geben den Einstieg zur realisierbaren Verknüpfung von Struktur und Form für optimierte Tragstrukturen. Dabei bilden die Platonischen Grundkörper und ihre Gesetzmäßigkeiten zur räumlichen Addition den Ausgangspunkt zur Entwicklung homogener Strukturen. Im Gedankenmodell werden die ideellen Grundelemente der Platonischen Körper, die Kante und die Ecke den realen Entsprechungen, dem Stab und dem Knoten, als Tragwerkelemente zugeordnet.

Innerhalb der Tragstruktur verlaufen die Kräfte auf der Wirkungslinie der Stabelemente und schneiden sich ohne Exzentrizität in den Knoten. Über die Knoten als Gelenkpunkte des statischen Systems nehmen die Stäbe nur Druck- und Zugkräfte auf und leiten diese Normalkraftbelastung wiederum an die Knoten ab. Die Knoten – Stab - Tragwerke sind damit momentenfreie Tragstrukturen. Aufgezeigte Kriterien zur Stabilität dieser Knotenstabtragwerke ermöglichen, den Übergang von torsionssteifen zu torsionsweichen Tragsystemen zu bewerten.

Die Entscheidung für einen bestimmten Knotenstabtragwerkstyp macht im konkreten Einzelfall immer eine genaue Untersuchung der Anforderung an das Tragsystem erforderlich. Neben der ästhetischen Wirkung des Systems spielen, geometrische, statische und wirtschaftliche Parameter die entscheidende Rolle.

Insbesondere sind ebene Knotenstabtragwerke hervorzuheben, da sie trotz der elementierten Grundstruktur aus Knoten und Stäben eine Vielzahl unterschiedlicher, auf die Gegebenheiten abgestimmten Konstruktionen ermöglichen. Sie sind hoch effizient durch ihre aufgelöste Stabstruktur mit Normalkraftbeanspruchung gegenüber der konventionellen Massivplatte mit Momenten-

beanspruchung. Zusätzlich erzielt die homogene Struktur von regelmäßigen Knotenstabtragwerken eine hohe Wirtschaftlichkeit durch ein Minimum von Knoten- und Stabtypen.

In der Dissertation werden dazu beispielhaft mehrere Knotenstabtragwerksstrukturen aufgezeigt und unter gleichen Randbedingungen verglichen. Die einheitlichen Parameter sind gleicher quadratischer Grundriß und Rastermaß. Die sich daraus ergebenden Charakteristika wie Gurtlage, Bauhöhe, Zahl der statisch wirksamen Achsen, Gesamtstabilität und Anzahl der Regelstablängen und Regelknoten liefern unter anderem Kriterien zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und Anwendung.

Zusätzlich durchgeführte eigene statische Untersuchungen analysieren die aufgeführten ebenen Knotenstabtragwerke im Detail. Den Tragwerkskonstruktionen sind dabei die Tragwerkselemente Induo – Stab, Verbundanker und Anschlußverschraubung mit ihren Belastungsgrenzen zugrunde gelegt. Statische Forderungen wie einheitliche Auflagerkriterien mit zwängungsfreier Lagerung und gleiche äußere Krafteinwirkung gewährleisten die Vergleichbarkeit. Die Ergebnisse geben Aufschluß über die Belastung der einzelnen Tragwerkselemente und verdeutlichen im Vergleich mit den Belastungsgrenzen ihre strukturellen Stärken und Schwächen. Die Resultate sind im einzelnen aufgeführt und kommentiert, sowie für die Beurteilung der ebenen Knotenstabtragwerkstypen untereinander tabellarisch übersichtlich zusammengefaßt.

Das statische Verhalten bestätigt, daß ein Ausschöpfen jedes Einzelelements bis an seine Belastungsgrenze zu einer ausgeglichenen Auslastung des Gesamtsystems führt und damit statisch effektiv und wirtschaftlich ist.

Anschließende Untersuchungen verdeutlichen die Auswirkungen bei Veränderung der Parameter. Vergrößerung der Spannweiten, modifizierte Auflagersituationen, Abweichung vom quadratischen zu rechteckigen Grundrissen und Kragarmausbildung sowie Durchlaufwirkung bei gekoppelten Systemen, führen zu Ergebnissen, die in Bemessungshilfen und Anwendungshinweisen einfließen.

Für den Entwurf von räumlichen Knotenstabtragwerken in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundanker bieten die Richtwerte für das Verhältnis von Spannweite zu Bauhöhe eine Dimensionierungshilfe und unterstützen damit zu einem entscheidenden Zeitpunkt den Entwurfsprozeß.

Räumlich gekrümmte Knotenstabtragwerke, z.B. Tonnen und Kupplen, stellen auf Grund ihrer gestalterischen Potentiale eine interessante Ergänzung zu den ebenen

Knotenstabtragwerken dar. Darüber hinaus weisen sie gegenüber ebenen Knotenstabtragwerken eine steigende statische Leistungsfähigkeit auf, da sich bei einfach oder doppelt gekrümmten Strukturen ein den Schalen ähnliches Tragverhalten ergibt.

Wie bei den ebenen Knotenstabtragwerken bildet die Zusammenstellung geometrischer und struktureller Fakten den Ausgangspunkt für die eigene statische Analyse. Das statische Verhalten von gebräuchlichen Tragstrukturen, einachsig gekrümmte Halbkreis- und Segmenttonnen sowie zweiachsig gekrümmte radial-konzentrische und geodätische Kuppeln, wird exemplarisch untersucht.

Die Auflagerungsart stellt sich dabei als wichtiger Parameter für die Effizienz gekrümmter Tragsysteme heraus. Halbkreistonnen erfordern eine vollständig umlaufende Auflagersituation gegenüber Segmenttonnen, die auch linienförmig gelagert ausführbar sind bei hinreichender Verstärkung der Stirnseitenränder. Eckpunkt-gelagerte Tonnentragwerke scheiden als Alternative weitgehend aus, da sich die dazu notwendige vergleichbare Schalenwirkung durch die Auflösung in ein Stabtragwerk nur ansatzweise einstellt.

Anwendungsbeispiele zu materialisierten gekrümmten Knotenstabtragwerken in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik sind über numerische Aussagen anschaulich miteinander vergleichbar und bilden somit für den Tragwerkentwurf eine anwendungsbezogene Hilfestellung.

Für begrenzte Spannweiten sind einlagig ausgebildete gekrümmte Knotenstabtragwerke durch ihren geringen Materialaufwand eine wirtschaftliche Alternative. Insbesondere für asymmetrische Lastfälle müssen Momente in begrenzten Umfang an die Knoten übertragbar sein, um die Steifigkeit des Systems zu gewährleisten. Für diese besondere Ausführung eines Knoten – Staban-schlusses zeigt eine statische Abschätzung die Belastungsgrenze auf.

Für Tragkonstruktionen als räumliche Knotenstabtragwerke hat die Knotenkonstruktion als Fügung von Knoten, Anschlüssen und Stäben hinsichtlich Geometrie, Gestaltung, Material, Festigkeit, Herstellung und Montage große Anforderungen zu erfüllen. Das Aufzeigen und die Analyse historischer und aktueller Knotenkonstruktionsbeispiele gibt einen Einblick in die konstruktive und gestalterische Vielfalt der unterschiedlichen Lösungsansätze. Die Erkenntnisse dieser Untersuchung fließen ein in die Suche nach aktuellen marktgängigen Lösungen, eigenentwickelten Abwandlungen vorhandener Techniken und neuentwickelten Lösungsmöglichkeiten für die spezielle Anwendung von räumlichen Knotenstabtragwerken in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik. Diese Vorgabe führt nicht zu konstruktiven bzw. statischen Ein-

schränkungen der Knotenkonstruktionen, sondern unterstreichen die strukturellen Vorteile als normalkraftbelastbares Verbindungsmittel im Kontext der beteiligten Anschluß- und Knotenelemente. Die Gesamtlösungen zeigen Möglichkeiten auf, unterschiedliche Ansprüche in Bezug auf Gestaltung, Baustoffe, serieller Fertigung, Montagefreundlichkeit und Brandschutz zu erfüllen. Die optimierte Kombination der unterschiedlichen Lösungsvorschläge zu Knoten, Knotenanschlüssen und Stabendenausbildung bewirkt ein synergetisches Ergebnis. Hervorzuheben sind die Eigenentwicklungen der Stabinnenverschraubung in Verbindung mit den Massivknoten als Polyederknoten für mehrlagige Knotenstabtragwerke und als Scheiben- bzw. Zylinderknoten für die besonders wirtschaftlichen gekrümmten Knotenstabtragwerke in einlagiger Ausführung. Als Ausführungsalternativen zu konventionellen Baustoffen wie Stahl und Beton weisen innovative Anwendungen von modernen Baustoffen, z.B. Leichtbeton, Holzfaserbeton, mineralische bzw. synthetische Gläser, visionär in die Zukunft.

Für den Bereich des Gelenkpunktes von Knotenstabtragwerken liefert die Arbeit anhand von Untersuchungen und Eigenentwicklungen den Nachweis, daß der Werkstoff Holz in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundankertechnik nicht nur gleichwertig zu konventionellen stählernen Knotenstabtragwerken anzusehen ist, sondern als konkurrenzfähige Gesamtlösung konstruktive, statische und gestalterische Vorteile aufweist.

Räumliche Knotenstabtragwerke schöpfen ihre architektonische Qualität aus der sichtbaren Konstruktion, geprägt durch die Stringenz der Geometrie und der technisch-konstruktiven Aussagekraft der Details. Um brandschutztechnische Verkleidungen im Ganzen oder im Detail bei räumlichen Knotenstabtragwerken in Ausführung mit Kreuzbalken und Induo – Verbundanker zu vermeiden werden einige Kriterien für ein Brandsicherheitskonzept aufgezeigt.

Allgemein liegt der positive Effekt der Kraftumlagerung den Knotenstabtragwerken als hochgradig statisch unbestimmte Systeme zugrunde. Kommt es im Brandfall zum Versagen eines einzelnen Stabes, so stellen sich zwar größere Verformungen ein, aber die Kraftumlagerung auf die benachbarten Stäbe verhindern ein Versagen des gesamten Tragwerks. Die aufgeführte statische Untersuchung simuliert einen Brandfall über fünf Phasen und dokumentiert anschaulich die ausreichende (Rest-)Tragfähigkeit.

Entsprechend Brettschichtholz sind Kreuzbalken den normalentflammbaren Baustoffen (B 2) zuzuordnen und können in der Feuerwiderstandsdauer durch Querschnittsvergrößerung der Balken, salzhaltige Imprägnierung oder dämmschichtbildenden Anstrich gesteigert werden.

Die bauliche Ausnutzung im Detail berücksichtigt eine

besondere Differenzierung der Beflammung der einzelnen Kreuzbalkenflanken, z.B. allseitige Beflammung der Untergurtlagen und Diagonalen sowie die dreiseitige Beflammung für Balkenlagen mit flächig aufgelegter Dachkonstruktion.

Der Induo – Verbundanker selbst ist durch seine Innenlage im Kreuzbalken vor direkter Beflammung geschützt. Die freiliegenden Stahlteile für Anschluß und Knoten können durch Anstrich aus Feuerschutzmittel brandschutztechnisch gesteigert werden. Eine sinnvolle Alternative für die Gelenk- und Anschlußausbildung stellt der Massivknoten als Betonfertigteile dar. In Verbindung mit der Stabinnenverschraubung sind die Anschlüsse und die Bewehrung durch die Betonummantelung vor einer direkten Beflammung geschützt.

Die Einzelkriterien fließen bei ganzheitlicher Betrachtung in ein projektbezogenes Brandsicherheitskonzept ein. Die probabilistische Betrachtung der Einzelergebnisse in Kombination mit dem Umlagerungseffekt führt zur Ausschöpfung von Reserven, die eine Steigerung der Feuerwiderstandsfähigkeit der Gesamtkonstruktion erreicht.

Das ästhetische Erscheinungsbild und die architektonische Ausgewogenheit dieser Raumfachwerke, im Ganzen und im Detail, demonstrieren Gestaltungsbeispiele als Computeranimation in fotorealistischer Darstellung. Die aufgezeigten Möglichkeiten in Konstruktion, Statik und Proportion setzen neue Maßstäbe und zeigen innovative Wege im konstruktiven Holzbau auf, die den räumlichen Knotenstabtragwerken weitere Perspektiven eröffnen.

Eine letzte Betrachtung

„Kette und Netz“ – ein Weg zur weiteren Steigerung der Tragfähigkeit

Alle an einer Tragwerkstruktur beteiligten Tragwerkelemente und ihre Übergänge zwischen den Elementen stoßen irgendwann an die Grenzen ihrer Beanspruchbarkeit. Der unterste aller dieser Werte der Beanspruchbarkeit, gleichsam das schwächste „Glied einer Kette“, stellt die Obergrenze der Gesamttragfähigkeit der Struktur dar.

Die Struktur eines Knotenstabtragwerkes ist dabei einem zweidimensionalen, flächigen Kettennetz vergleichbar. Durch geschickte Wahl des Tragsystems können Umlagerungen von Kräften vorgenommen werden. Damit kann eine gleichmäßigere Auslastung des „Netzes“ erfolgen und sehr frühe Überlastungen an einzelnen Stellen vermieden werden.

Der einzelne Knoten und seine Übergänge stellt in diesem Bild jedoch eine eindimensionale „Kette“ dar, deren schwächstes Glied die Obergrenze der Beanspruchung des Knotens ergibt.

Die einzelnen Glieder sind:

- der Kreuzbalken, mit Druck- oder Zugbeanspruchung
- der Übergang von Kreuzbalken an Verbundanker
- die Festigkeit des Verbundankers
- der Übergang von Verbundanker an Gewindebolzen
- die Festigkeit des Gewindebolzens
- der Übergang von Gewindebolzen an Knoten
- die Tragfähigkeit des Knotens

Durch Verbesserung eines Kettengliedes, läßt sich die gesamte Tragkraft nur steigern, sofern es sich um das schwächste Glied der Kette handelt. Beim augenblicklichen Entwicklungsstand liegen alle genannten Tragfähigkeitswerte in der gleichen Größenordnung von ungefähr 45 kN. Um einen Sprung in der bisher erreichten Tragfähigkeit zu erreichen, müssen an allen genannten Gliedern Verbesserungen vorgenommen werden, was sich in den meisten Fällen auch ohne weiteres einrichten läßt. Dabei werden sich dann neue „Flaschenhälse“ der Beanspruchung herausstellen.

Beispielhafte Maßnahmen für

- den Kreuzbalken:
Querschnitt vergrößern und/oder höhere Holzgüteklasse
- den Übergang von Kreuzbalken an Verbundanker:
Optimierung des Verbundankers, z.B. Form / Position der Dübelstifte, Verlängerung des Ankerkörpers
- die Festigkeit des Verbundankers:
Materialgüte erhöhen, z.B. Gußeisen mit Kugelgraphit oder Stahlguß
- den Übergang von Verbundanker an Gewindebolzen:
Gewindelänge vergrößern oder duktileres Material wählen
- die Festigkeit des Gewindebolzens:
Bolzenquerschnitt vergrößern und/oder Materialgüte erhöhen
- den Übergang von Gewindebolzen an Knoten:
Gewindelänge, Bolzenquerschnitt vergrößern und/oder Materialgüte erhöhen
- die Tragfähigkeit des Knotens:
Gesamtgröße erhöhen und/oder Massivkugel statt Hohlkörper

In diesen Entwicklungsschritten und Optimierungsmaßnahmen liegt eine Steigerung der aufnehmbaren Kräfte von ca 45 – 55%.

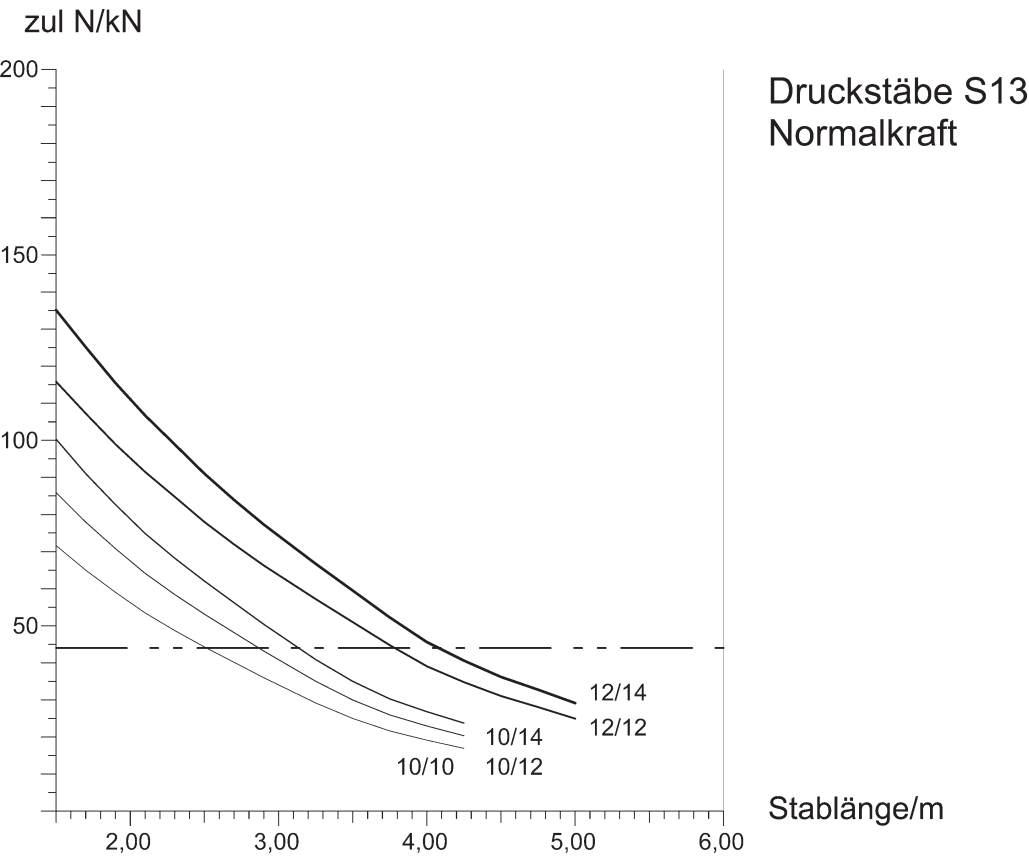
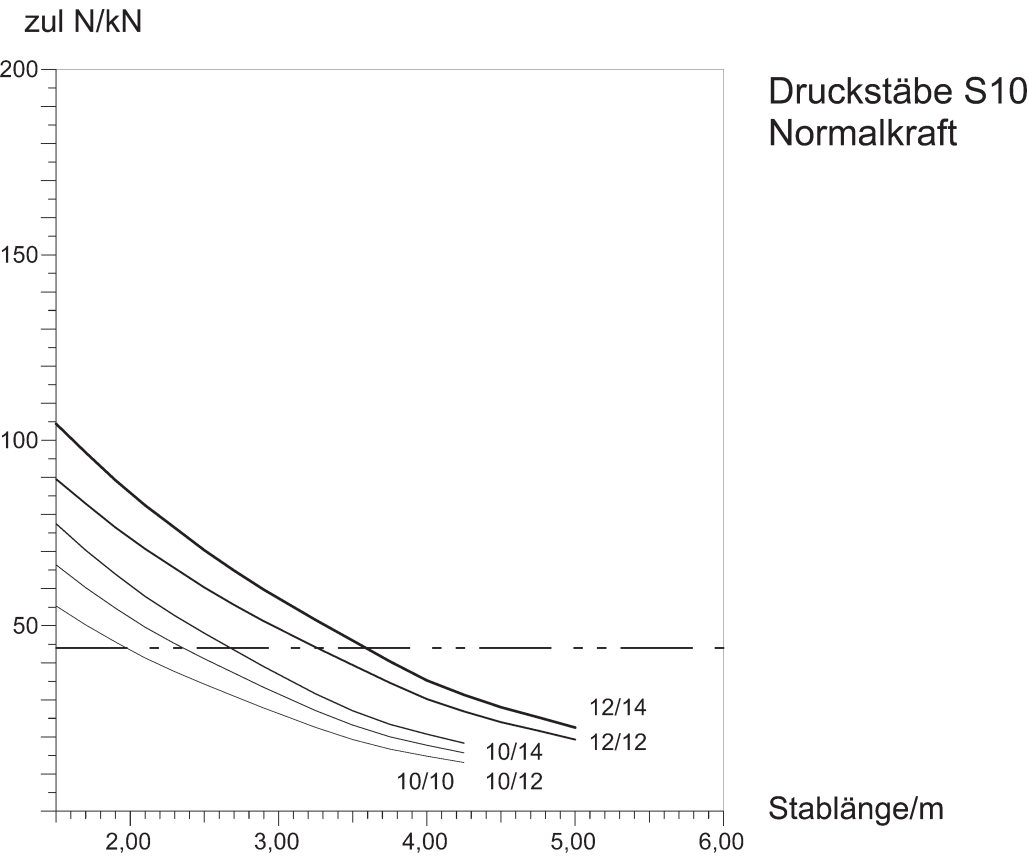
10 Anhang

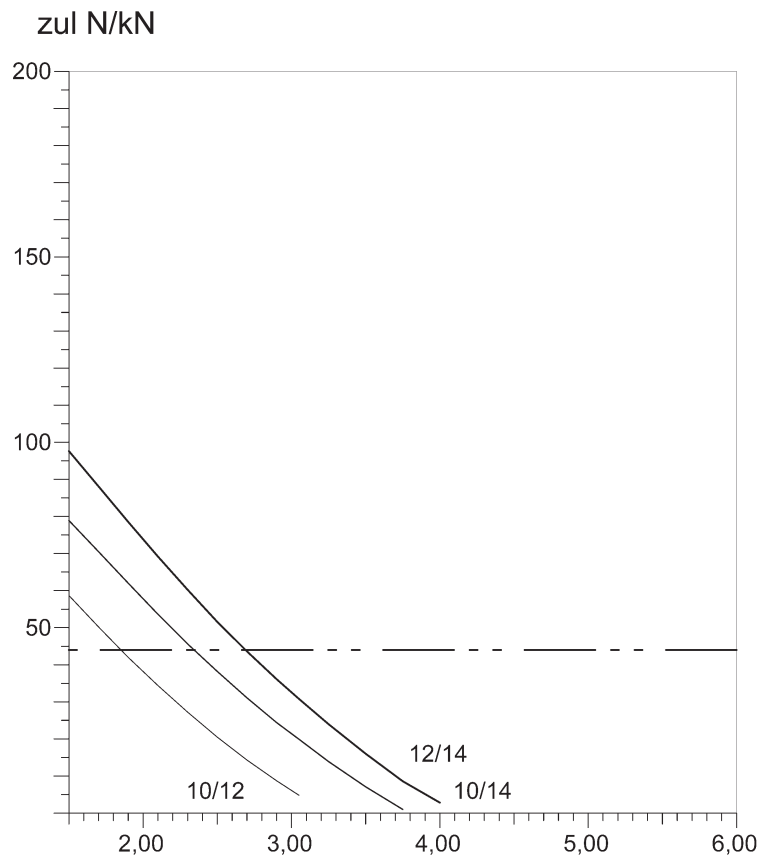
- **Belastungsgrenzen**
- **Berechnungsergebnisse**
aus dem Programmsystem InfoCAD*
(Modul: Räumliches Stabwerk)

* Software für Tragwerkplanung;
InfoGraph GmbH, Aachen

10.1 Belastungsgrenzen

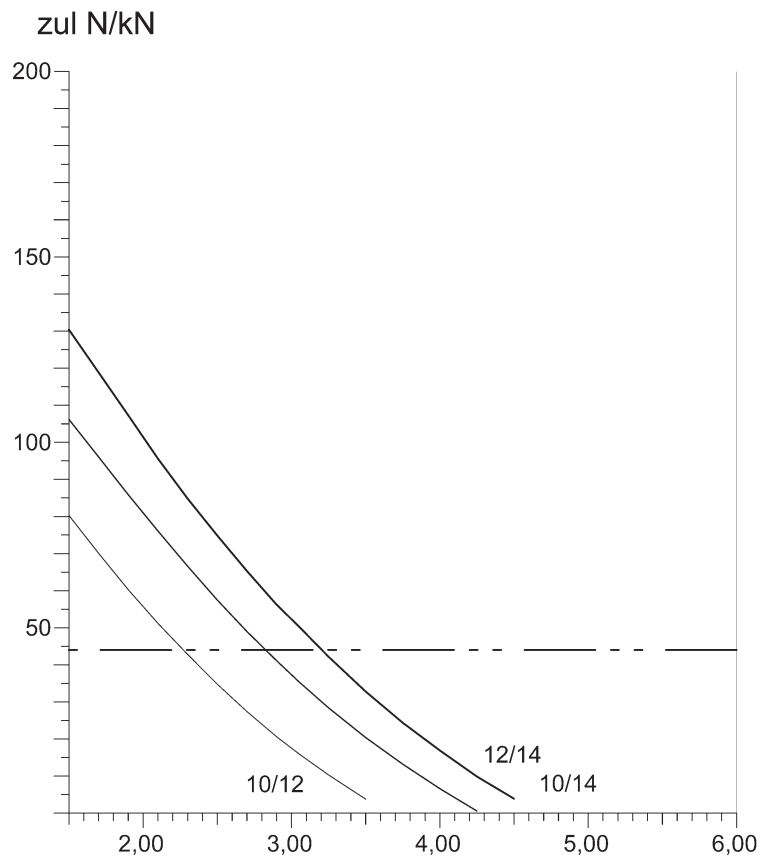
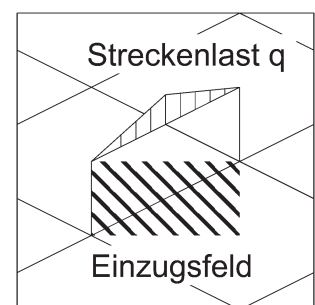
Induo-Verbundanker Verschraubung M16, 8.8		44 - 50 kN 91 kN
Zugstäbe Kreuzbalken	S10	zul $s_{ZII} = 0,74 \text{ kN/cm}^2$
		10/10 74 kN
		10/12 89 kN
		10/14 104 kN
		12/12 107 kN
		12/14 124 kN
Zugstäbe Kreuzbalken	S13	zul $s_{ZII} = 0,91 \text{ kN/cm}^2$
		10/10 91 kN
		10/12 109 kN
		10/14 127 kN
		12/12 131 kN
		12/14 153 kN
Biegebalken Kreuzbalken	S10	zul $s_B = 1,10 \text{ kN/cm}^2$
		10/10 1,84 kNm
		10/12 2,64 kNm
		10/14 3,60 kNm
		12/12 3,17 kNm
		12/14 4,31 kNm
Biegebalken Kreuzbalken	S13	zul $s_B = 1,40 \text{ kN/cm}^2$
		10/10 2,34 kNm
		10/12 3,36 kNm
		10/14 4,58 kNm
		12/12 4,03 kNm
		12/14 5,49 kNm
Druckstäbe Kreuzbalken	S10 gedrunen	zul $s_{DII} = 0,85 \text{ kN/cm}^2$
		10/10 85 kN
		10/12 102 kN
		10/14 119 kN
		12/12 122 kN
		12/14 143 kN
Druckstäbe Kreuzbalken	S13 gedrunen	zul $s_{DII} = 1,10 \text{ kN/cm}^2$
		10/10 110 kN
		10/12 132 kN
		10/14 154 kN
		12/12 158 kN
		12/14 185 kN





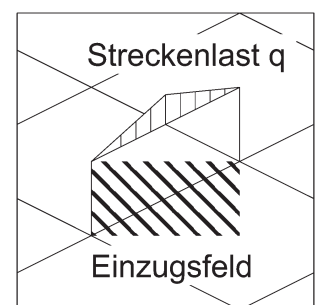
Druckstäbe S10 Normalkraft + Moment

Mittelfeld bei quadratischem
Raster und gleichmäßiger
Lastabtragung auf alle
Stäbe



Druckstäbe S13 Normalkraft + Moment

Mittelfeld bei quadratischem
Raster und gleichmäßiger
Lastabtragung auf alle
Stäbe



BELASTUNGSGRENZEN

Druckstäbe Kreuzbalken Normalkraft

S10 zul $\sigma_{II} = 0,85 \text{ kN/cm}^2$ S13 zul $\sigma_{II} = 1,10 \text{ kN/cm}^2$

s_k (cm)	zul N_{DII} (kN) 10/10 (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) 10/12 (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) 10/14 (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) 12/12 (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) 12/14 (S10/S13)
gedrungen	85,0 / 110,0	102,0 / 132,0	119,0 / 154,0	122,4 / 158,4	142,8 / 184,8
150	55,3 / 71,6	66,4 / 85,9	77,5 / 100,3	89,5 / 115,8	104,4 / 135,1
160	53,1 / 68,8	63,8 / 82,5	73,4 / 96,3	86,2 / 111,5	100,5 / 130,1
170	50,2 / 65,0	60,2 / 78,0	70,3 / 91,0	82,9 / 107,2	96,7 / 125,1
180	48,2 / 62,4	57,8 / 74,8	67,5 / 87,3	79,7 / 103,1	93,0 / 120,3
190	45,6 / 59,1	54,8 / 70,9	63,9 / 82,7	76,5 / 99,0	89,3 / 115,5
200	43,7 / 56,5	52,4 / 67,8	61,2 / 79,2	73,4 / 95,0	85,7 / 110,9
210	41,3 / 53,5	49,6 / 64,2	57,8 / 74,8	70,4 / 91,1	82,1 / 106,3
220	39,6 / 51,3	47,5 / 61,5	55,5 / 71,8	67,6 / 87,4	78,8 / 102,0
230	37,4 / 48,4	44,9 / 58,1	52,4 / 67,8	65,7 / 85,1	76,7 / 99,2
240	36,0 / 46,5	43,1 / 55,8	50,3 / 65,1	62,9 / 81,4	73,4 / 95,0
250	34,0 / 44,0	40,8 / 52,8	47,6 / 61,6	60,3 / 78,1	70,4 / 91,1
260	32,6 / 42,1	39,1 / 50,6	45,6 / 59,0	57,8 / 74,8	67,4 / 87,2
270	31,3 / 40,5	37,5 / 48,6	43,8 / 56,7	55,4 / 71,8	64,7 / 83,7
280	29,6 / 38,3	35,5 / 45,9	41,4 / 53,6	53,1 / 68,7	62,0 / 80,2
290	28,2 / 36,5	33,9 / 43,8	39,5 / 51,1	51,0 / 66,1	59,5 / 77,1
300	26,1 / 33,8	31,3 / 40,5	36,5 / 47,3	49,0 / 63,4	57,1 / 73,9
305	25,2 / 32,6	30,2 / 39,1	35,2 / 45,6	48,2 / 62,4	56,3 / 72,8
325	22,5 / 29,2	27,0 / 35,0	31,5 / 40,8	44,4 / 57,5	51,8 / 67,1
350	19,3 / 25,0	23,1 / 30,0	27,0 / 35,0	39,9 / 51,6	46,6 / 60,2
375	16,7 / 21,6	20,0 / 25,9	23,3 / 30,2	34,9 / 45,1	40,7 / 52,7
400	14,8 / 19,1	17,7 / 23,0	20,7 / 26,8	30,2 / 39,1	35,3 / 45,6
425	13,1 / 16,9	15,7 / 20,3	18,3 / 23,7	26,9 / 34,8	31,4 / 40,7
450				24,0 / 31,0	28,0 / 36,2
475				21,7 / 28,0	25,3 / 32,7
500				19,3 / 25,0	22,6 / 29,2

Querschnitt	Ideallänge (cm) (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) (S10/S13)	max. Länge (cm) $\lambda = 150$	zul N_{DII} (kN) (S10/S13)
10/10	200 / 250	43,7 / 44,0	434	12,6 / 16,3
10/12	230 / 290	44,9 / 43,8	434	15,1 / 19,5
10/14	270 / 310	43,8 / 44,7	434	17,6 / 22,8
12/12	325 / 375	44,4 / 45,1	519	18,1 / 23,4
12/14	360 / 410	43,8 / 44,1	519	21,1 / 27,4

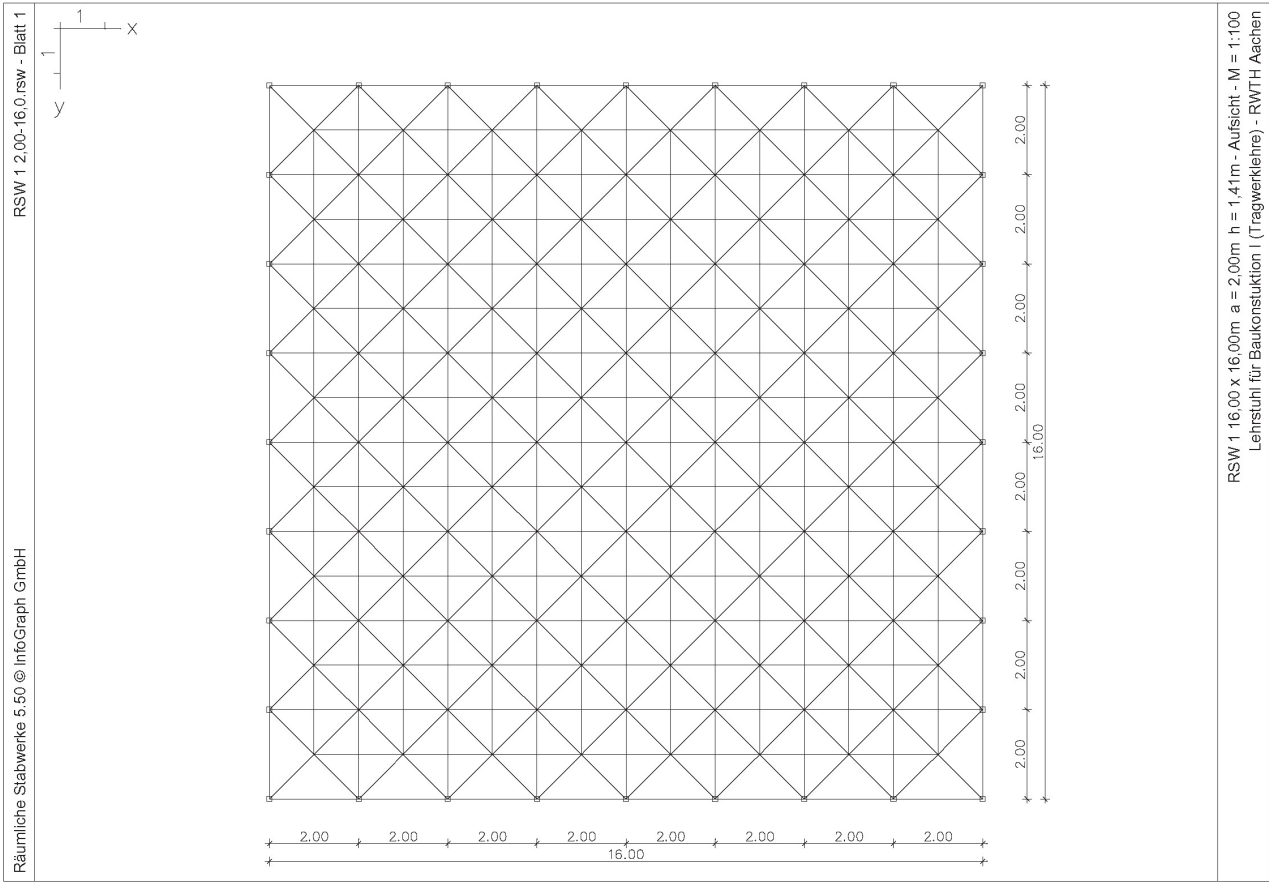
Druckstäbe Kreuzbalken Normalkraft + Biegung	S10	zul $\sigma_{II} = 0,85 \text{ kN/cm}^2$
		zul $\sigma_B = 1,10 \text{ kN/cm}^2$
	S13	zul $\sigma_{II} = 1,10 \text{ kN/cm}^2$
		zul $\sigma_B = 1,40 \text{ kN/cm}^2$

s_k (cm)	vorh M (kNcm)	zul N_{DII} (kN) 10/12 (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) 10/14 (S10/S13)	zul N_{DII} (kN) 12/14 (S10/S13)
150	56,25	58,7 / 80,3	78,9 / 106,2	97,6 / 130,4
160	64,00	54,4 / 75,2	74,3 / 100,5	92,3 / 123,9
170	72,25	50,2 / 70,1	70,5 / 96,1	88,1 / 118,9
180	81,00	46,0 / 65,2	65,7 / 90,4	82,7 / 112,3
190	90,25	42,0 / 60,3	62,0 / 85,9	78,5 / 107,3
200	100,00	38,0 / 55,6	57,4 / 80,4	73,3 / 101,0
210	110,25	34,2 / 51,0	52,3 / 76,1	69,2 / 93,6
220	121,00	30,5 / 46,6	50,1 / 71,8	65,1 / 91,3
230	132,25	27,4 / 43,0	45,8 / 66,6	60,2 / 85,3
240	144,00	23,8 / 38,8	42,2 / 62,4	56,2 / 80,1
250	156,25	20,5 / 34,8	38,2 / 57,5	51,6 / 74,9
260	169,00	17,3 / 31,0	34,8 / 53,6	47,9 / 70,6
270	182,25	14,3 / 27,4	31,1 / 49,0	43,6 / 65,3
280	196,00	11,4 / 23,9	27,8 / 45,3	40,0 / 61,1
290	210,25	8,7 / 20,6	24,4 / 41,1	36,1 / 56,2
300	225,00	6,0 / 17,4	21,3 / 37,5	32,7 / 52,2
305	232,56	4,8 / 16,0	19,9 / 35,8	31,0 / 50,3
325	264,06	-- / 10,3	13,9 / 28,7	24,4 / 42,2
350	306,25	-- / 3,8	7,1 / 20,4	16,6 / 32,7
375	351,56		1,0 / 13,2	8,1 / 24,4
400	400,00		-- / 6,6	3,5 / 16,9
425	451,56		-- / 0,6	-- / 9,9
450	506,25			-- / 3,9

Querschnitt	Ideallänge (cm) (S10/S13)	zul N _{DII} (kN) (S10/S13)	max. Länge (cm) f = l/300	zul N _{DII} (kN) (S10/S13)
10/12	185 / 225	44,3 / 44,8		
10/14	235 / 280	44,0 / 45,3		
12/14	270 / 320	43,6 / 44,0		

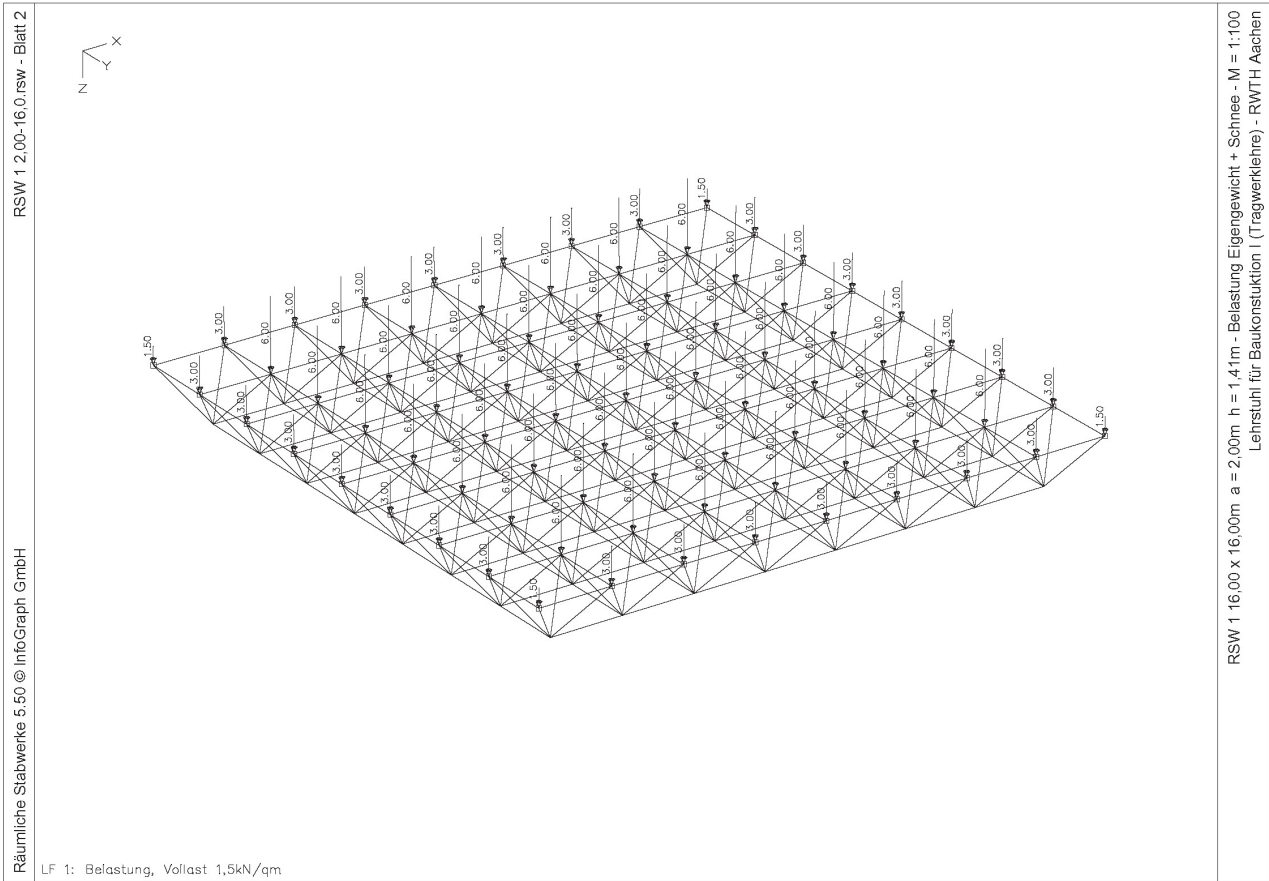
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke

Ergebnisse der Berechnung



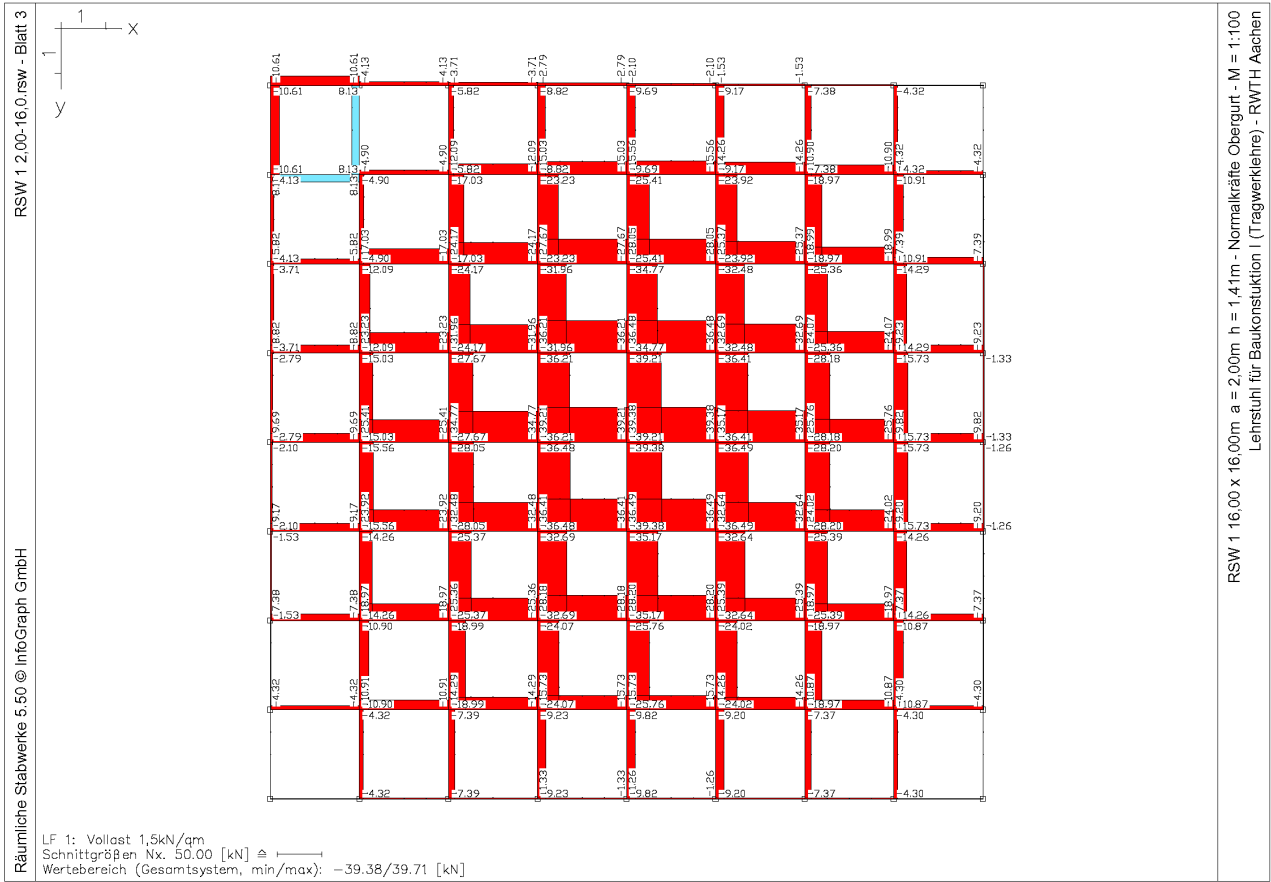
RSW 1, Aufsicht

RSW 1 16.00 x 16.00m a = 2.00m h = 1.41m - Aufsicht - M = 1:100
Lehnstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre) - RWTH Aachen

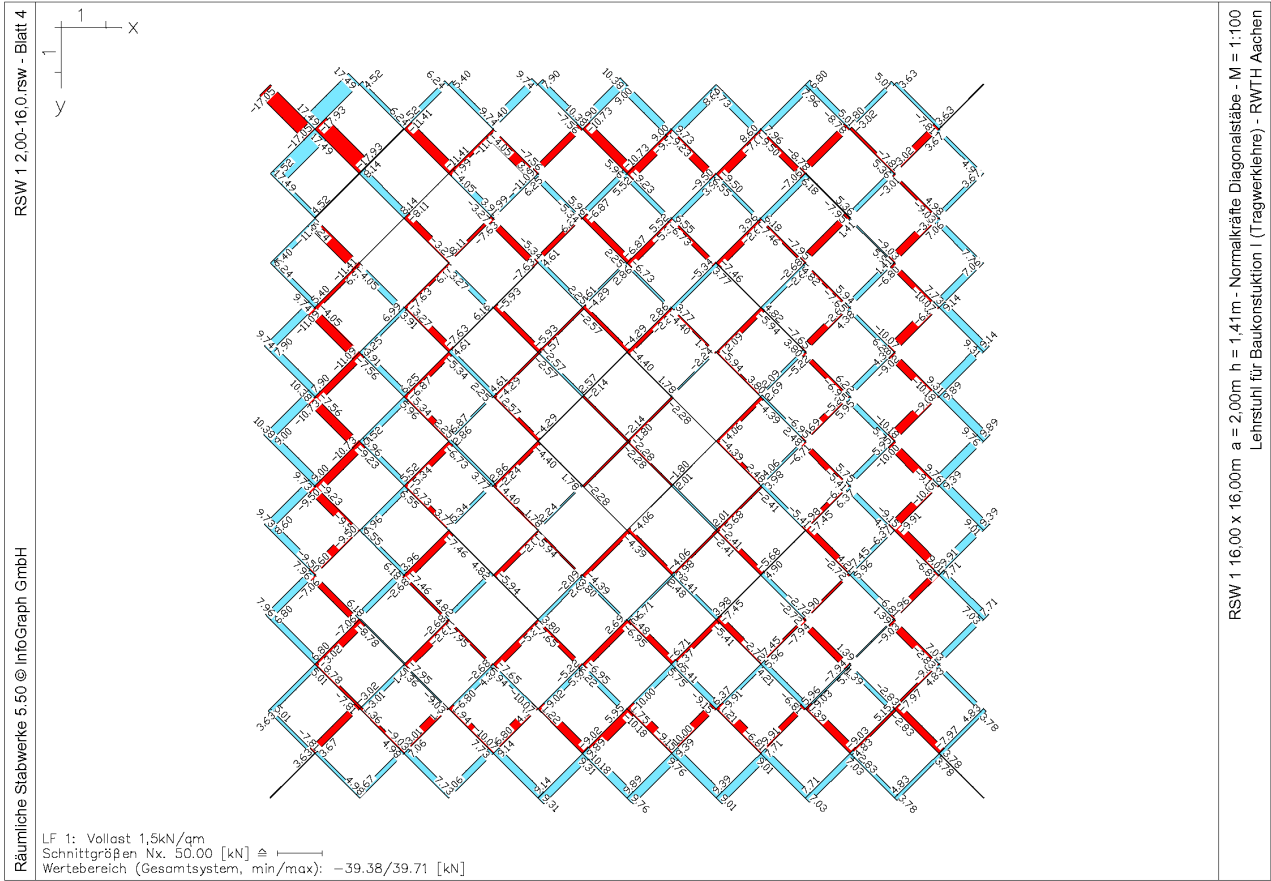


RSW 1, Belastung Eigengewicht + Schnee

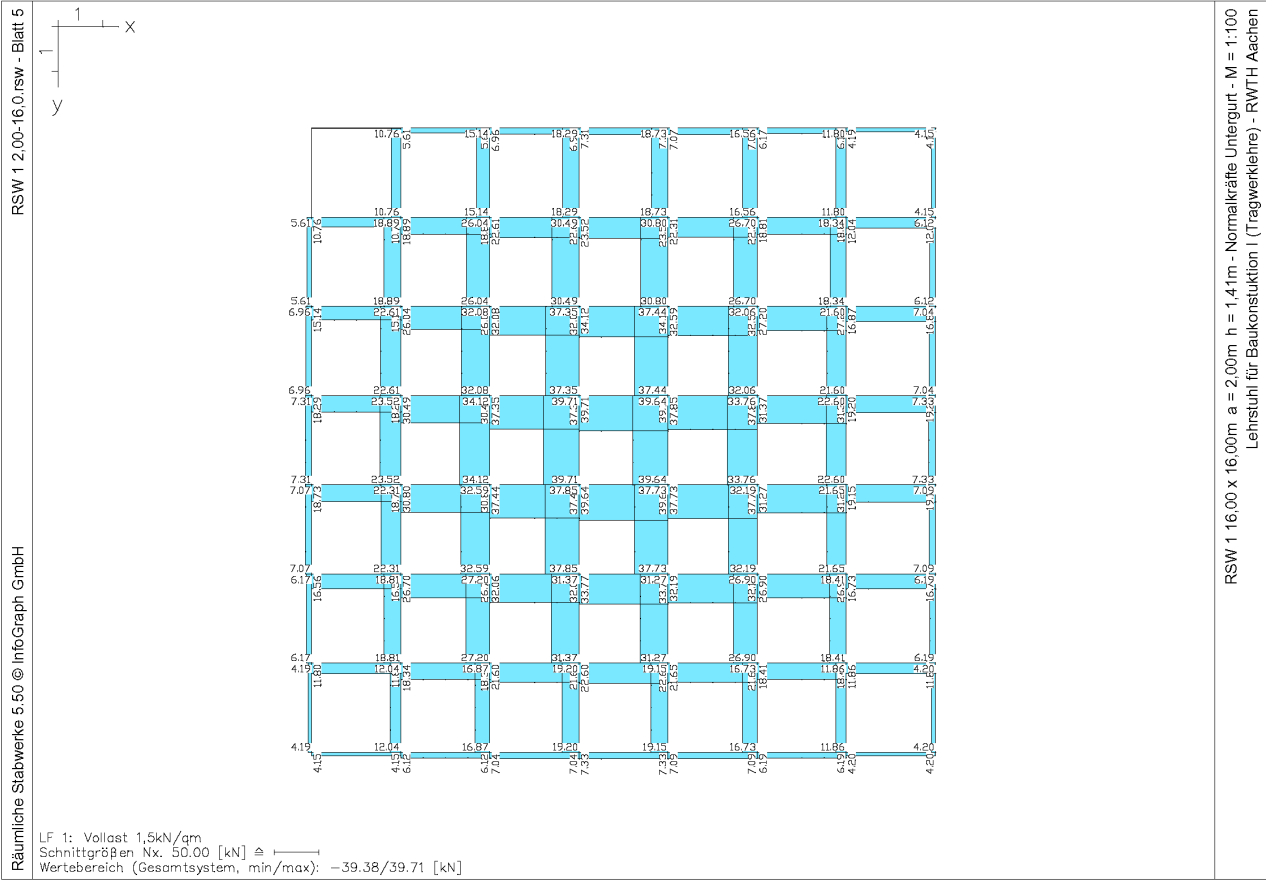
RSW 1 16.00 x 16.00m a = 2.00m h = 1.41m - Belastung Eigengewicht + Schnee - M = 1:100
Lehnstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre) - RWTH Aachen



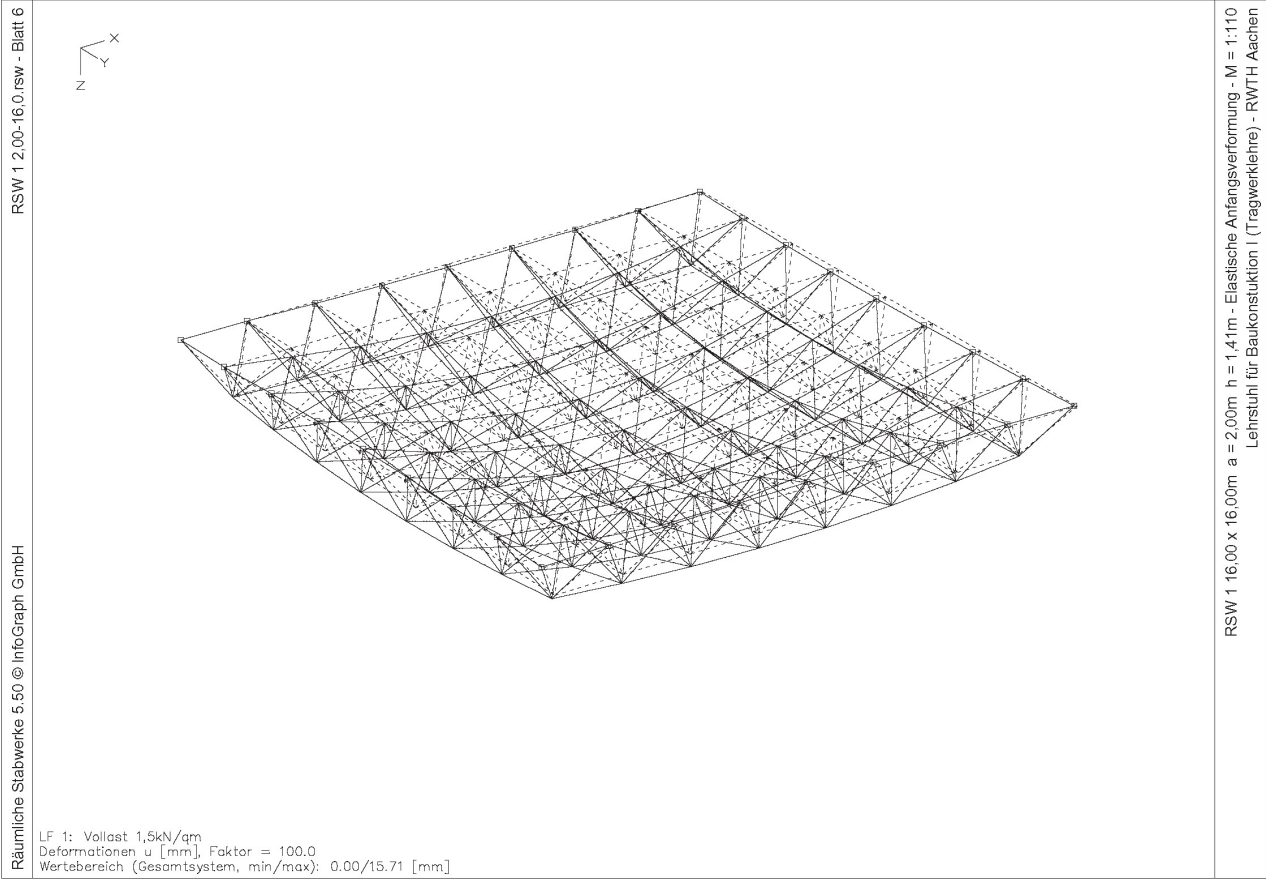
RSW 1, Normalkräfte Obergurt



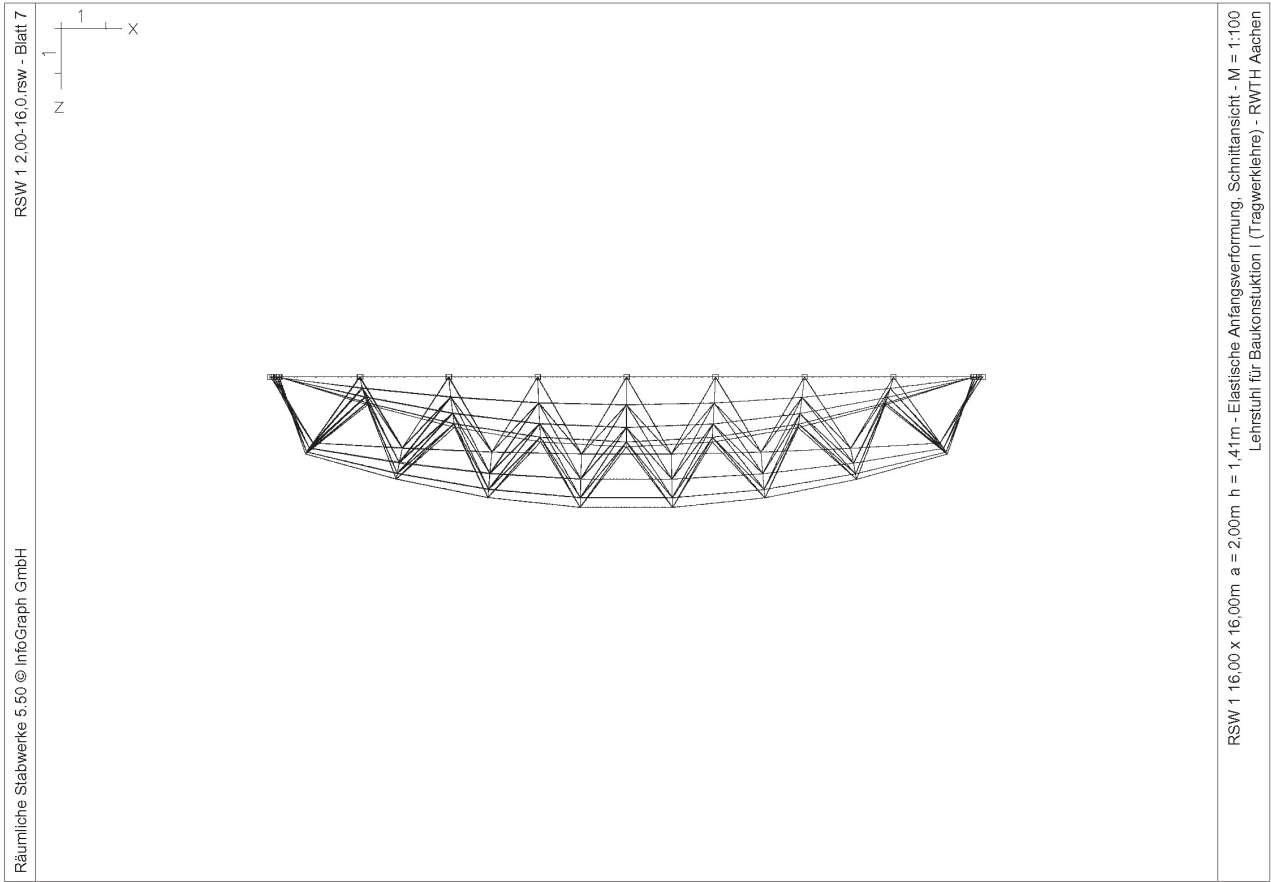
RSW 1, Normalkräfte Diagonalstäbe



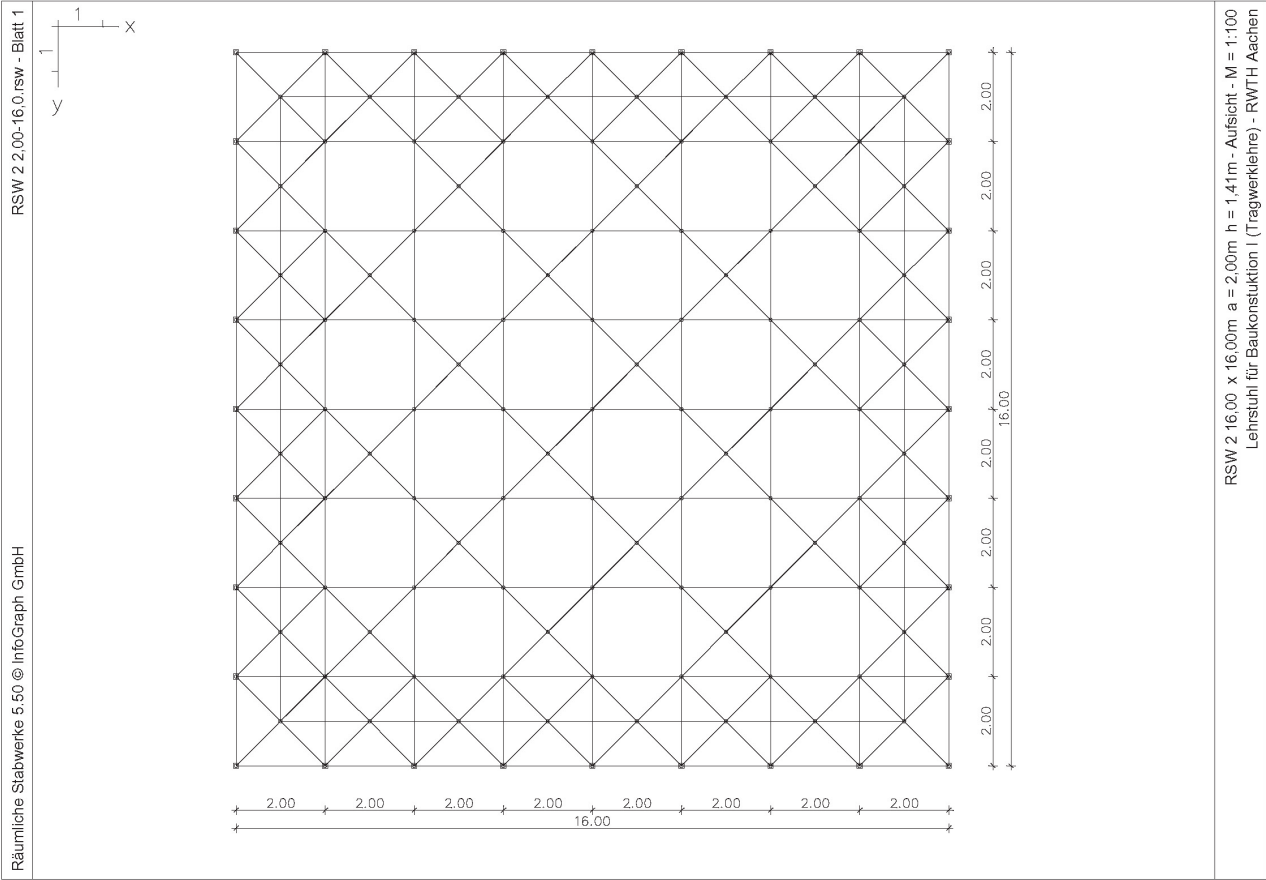
RSW 1, Normalkräfte Untergurt



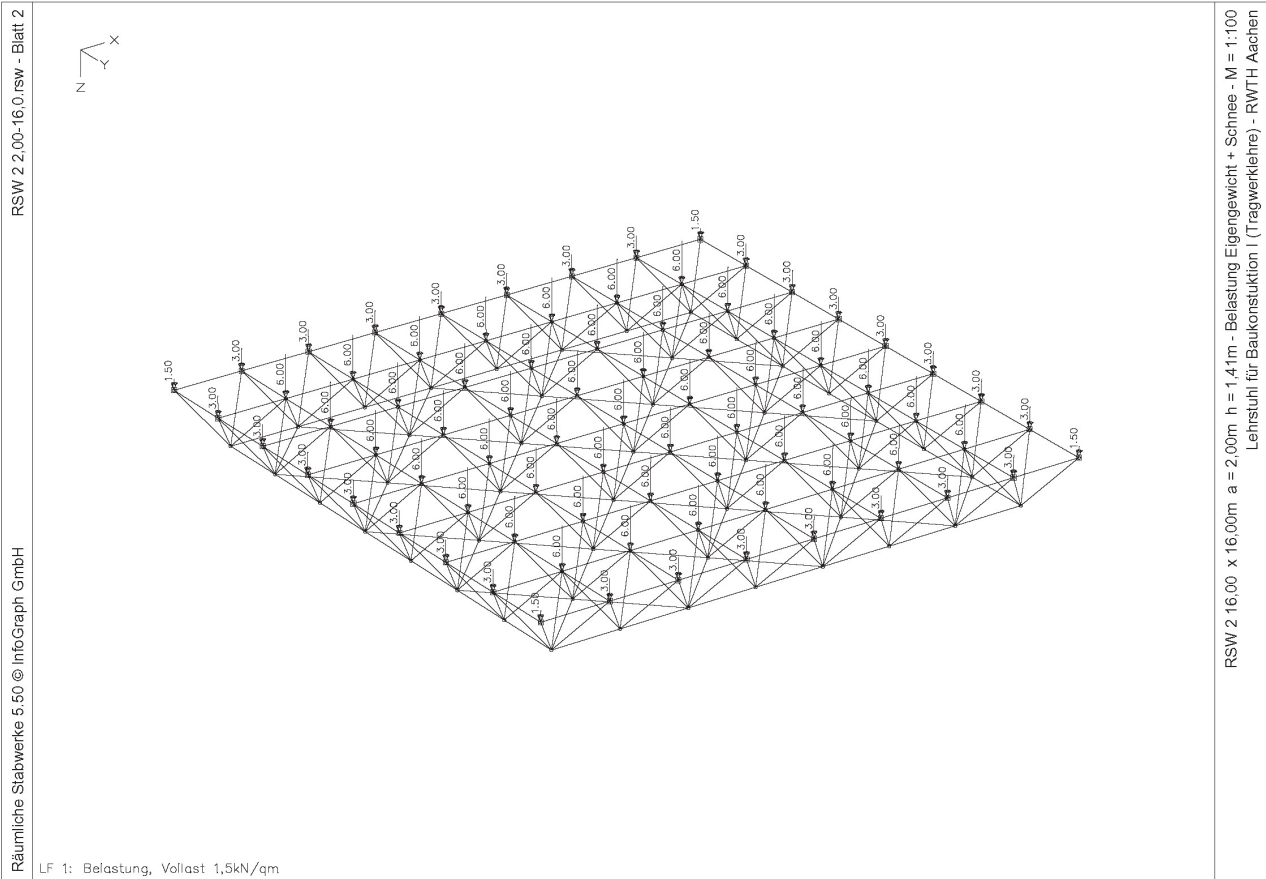
RSW 1, Elastische Anfangsverformung



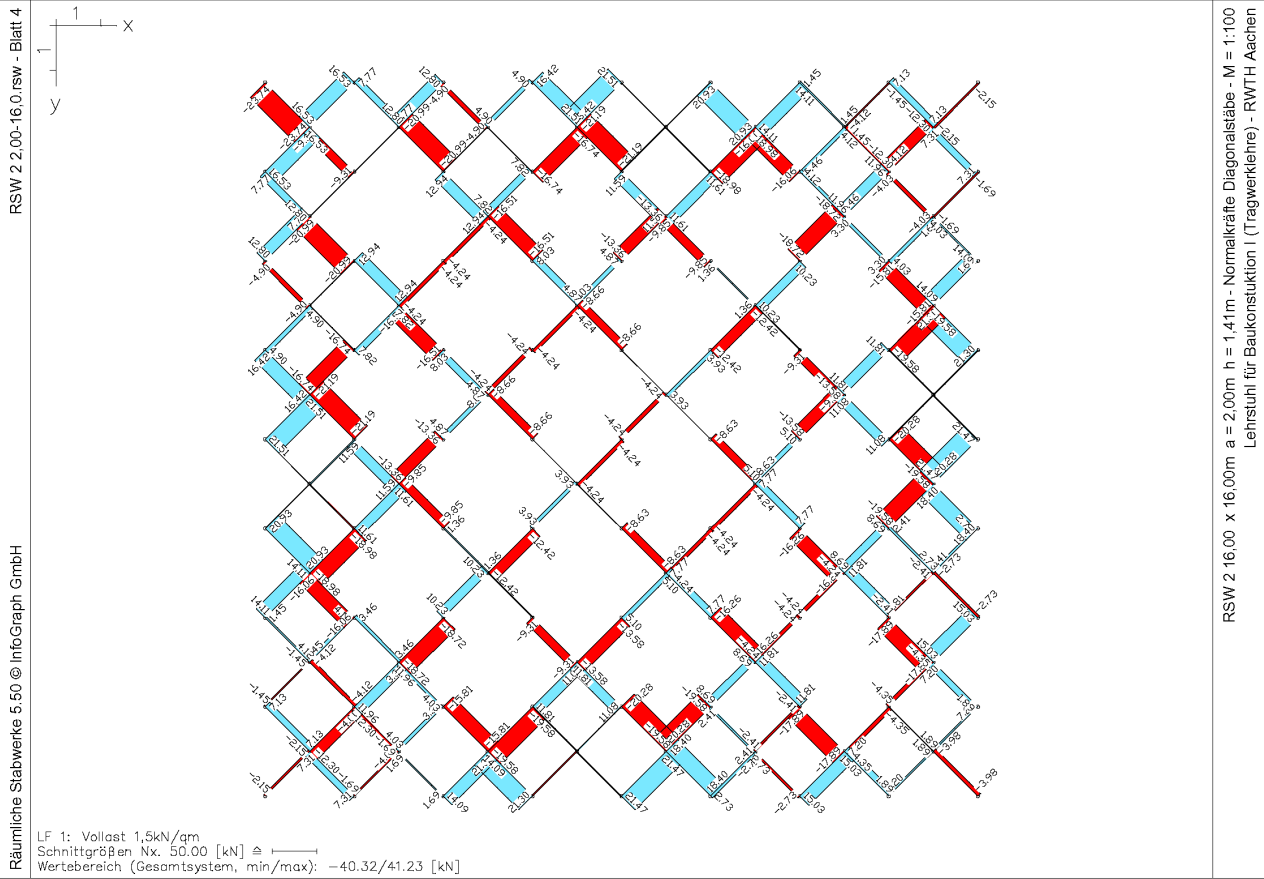
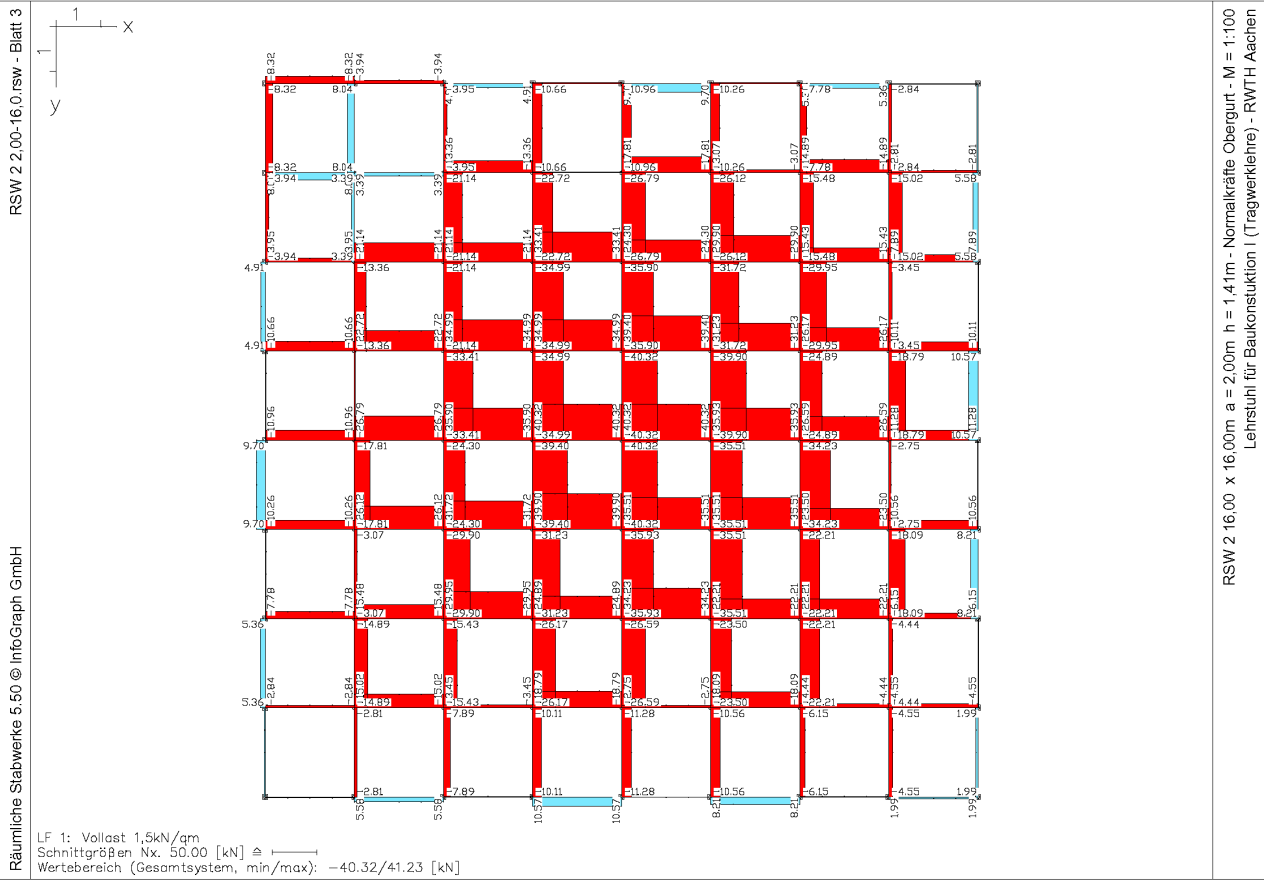
RSW 1, Elastische Anfangsverformung

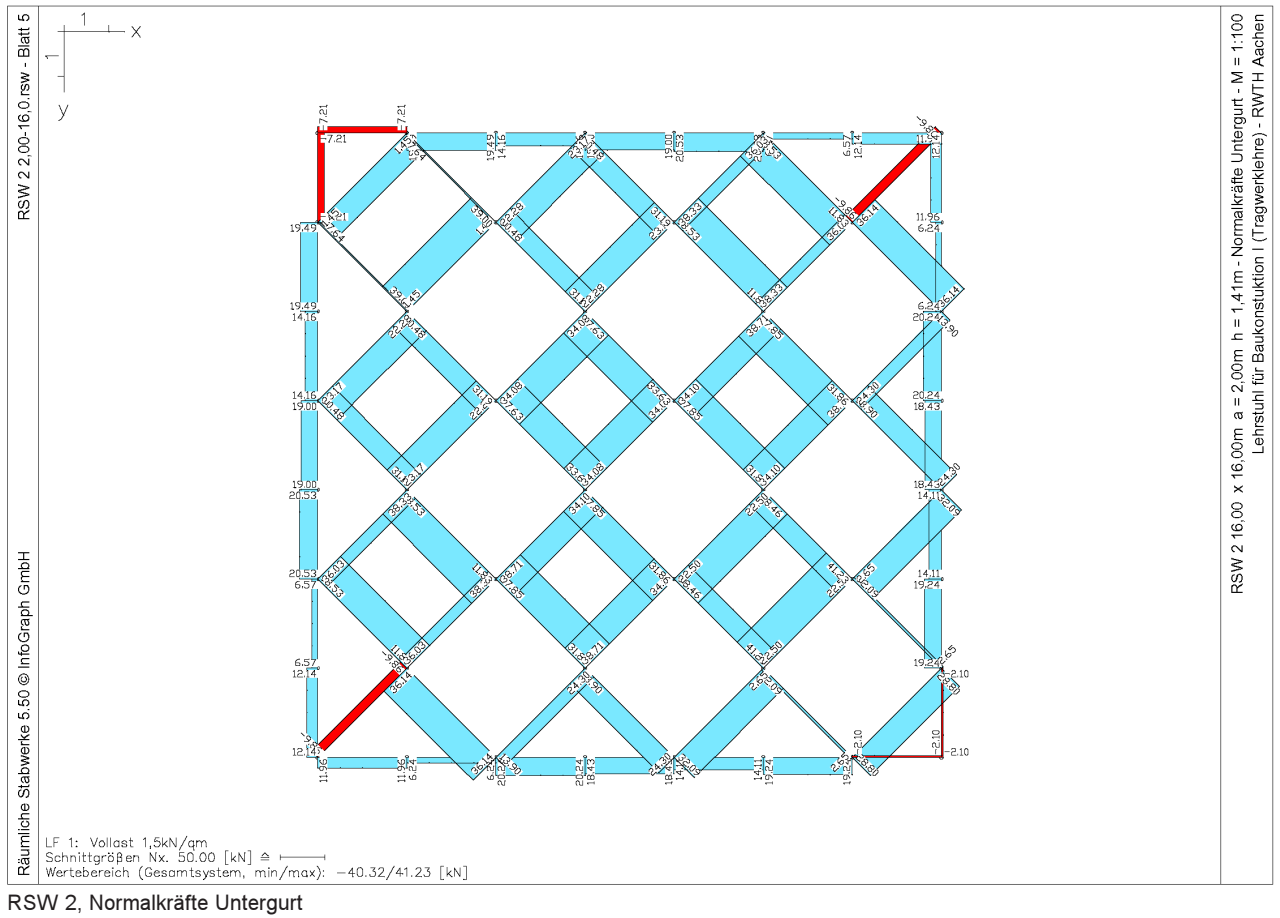


RSW 2, Aufsicht

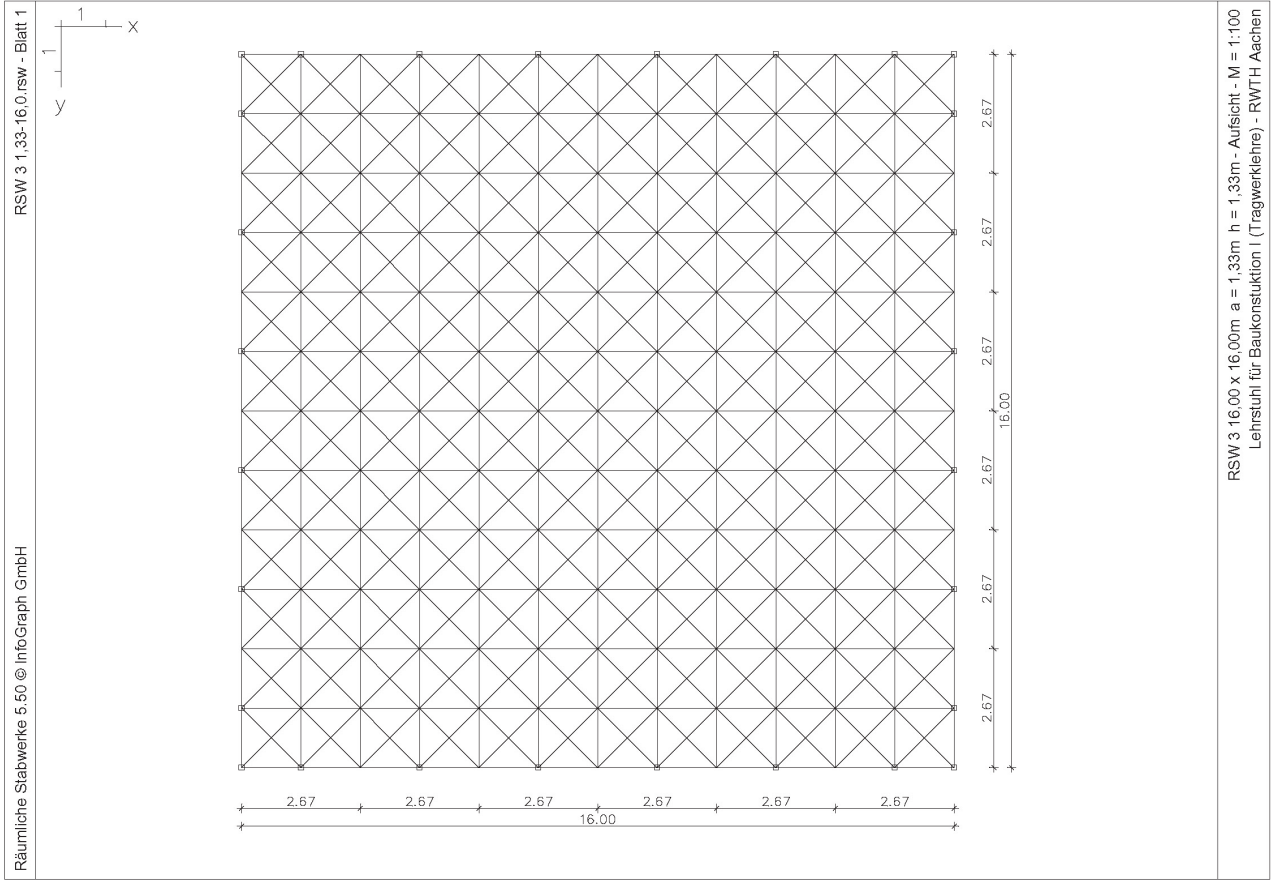


RSW 2, Belastung Eigengewicht + Schnee

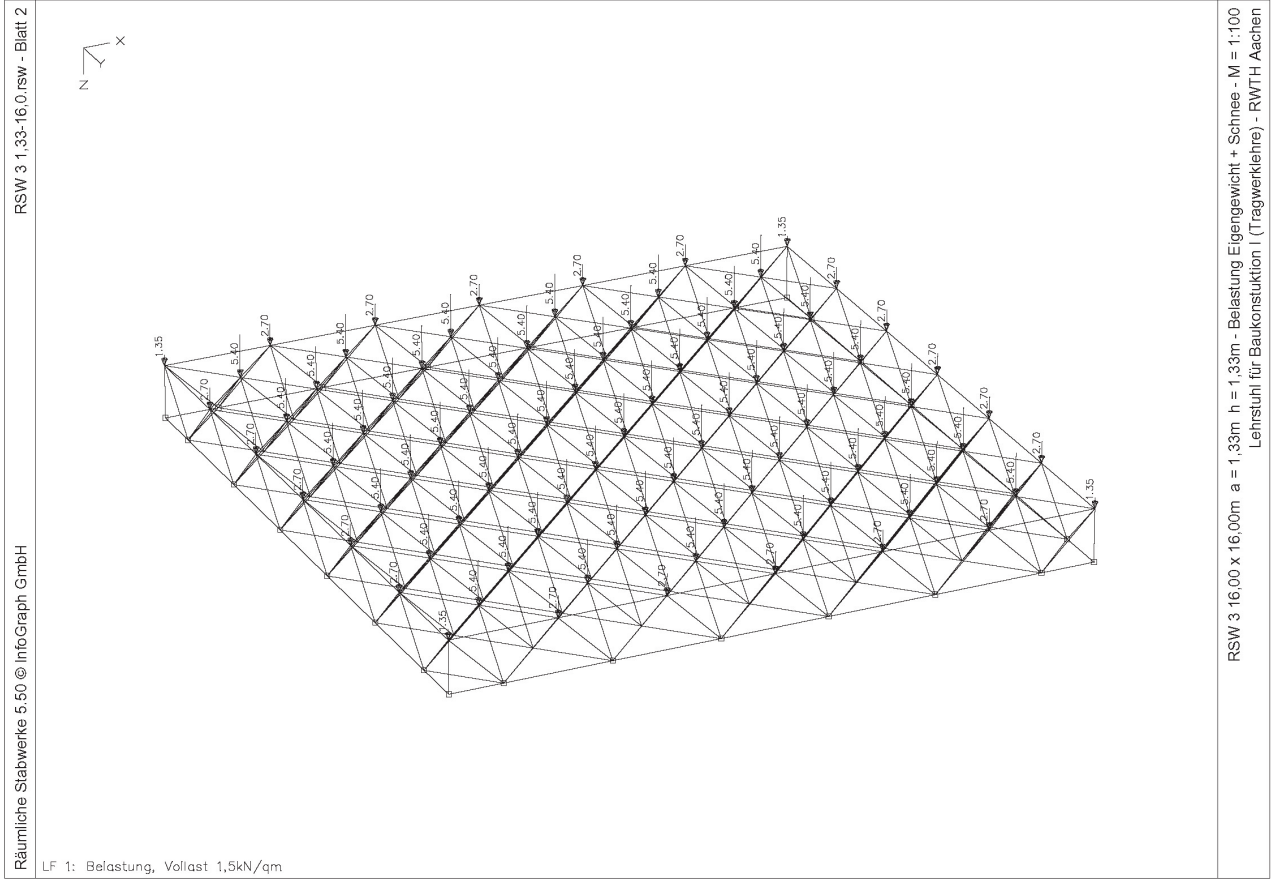




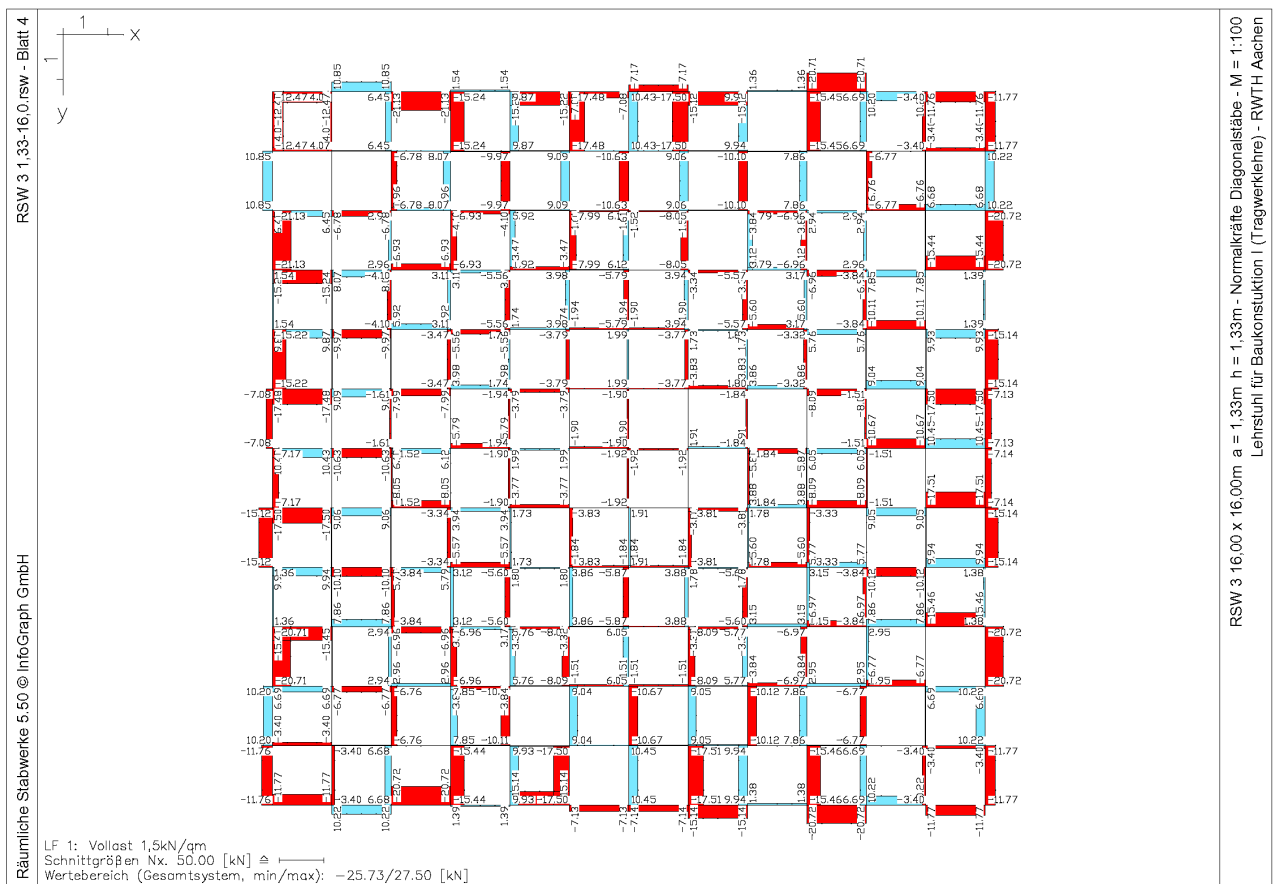
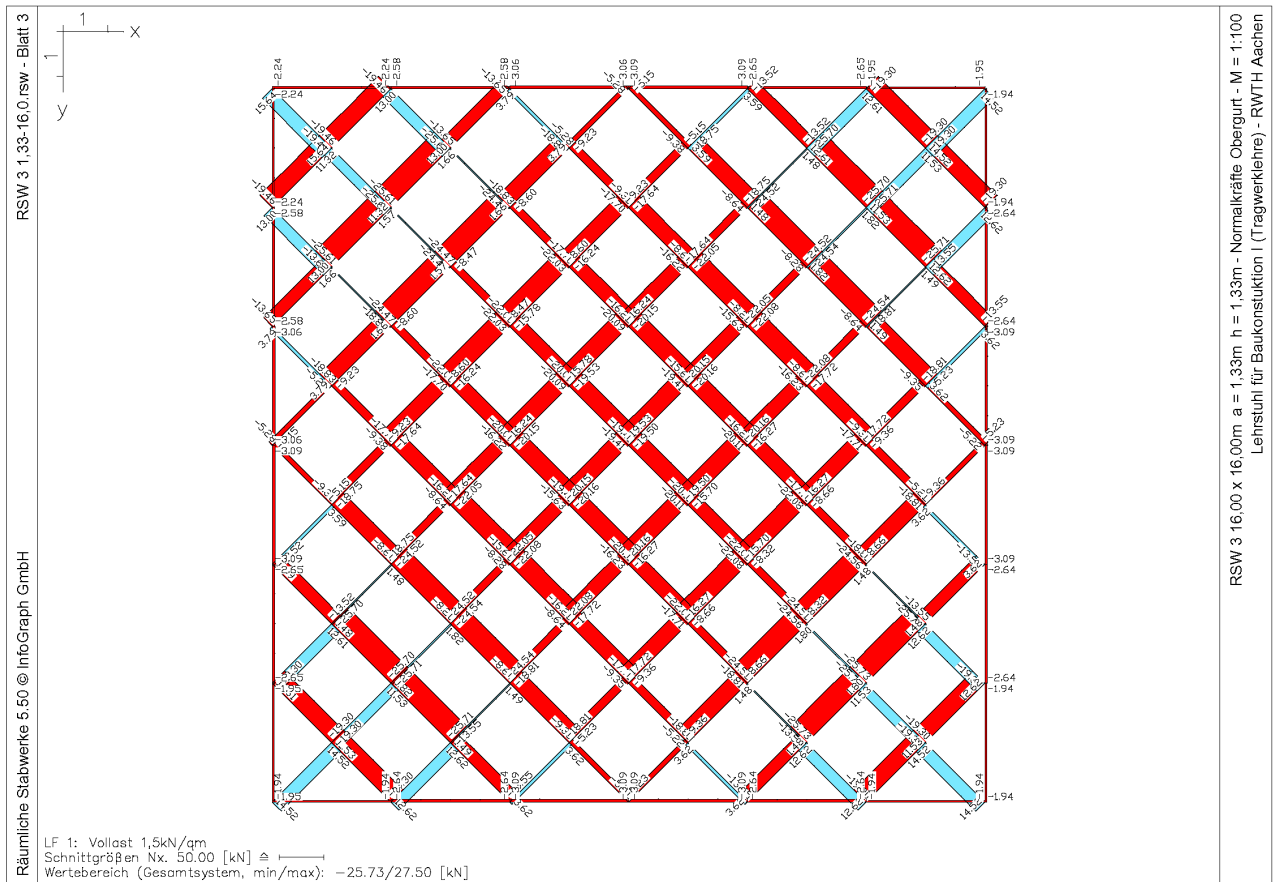
RSW 2, Normalkräfte Untergurt



RSW 3, Aufsicht



RSW 3, Belastung Eigengewicht + Schnee



RSW 4 2.00-16.0.rsw - Blatt 1

1
x
y

Technical drawing of a spatial grid structure (RSW 4 2.00-16.0.rsw) showing a 16.00m x 16.00m grid with 2.00m spacing and diagonal bracing. The drawing includes a coordinate system (x, y) and dimensions.

16.00
2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00

16.00
2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00 2.00

RSW 4 16.00 x 16.00m a = 2.00m h = 2.00m - Aufsicht - M = 1:100
Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerke) - RWTH Aachen

RSW 4, Aufsicht

Räumliche Stabwerke 5.50 © InfoGraph GmbH

LF 1: Belastung, Vollast 1,5kN/qm

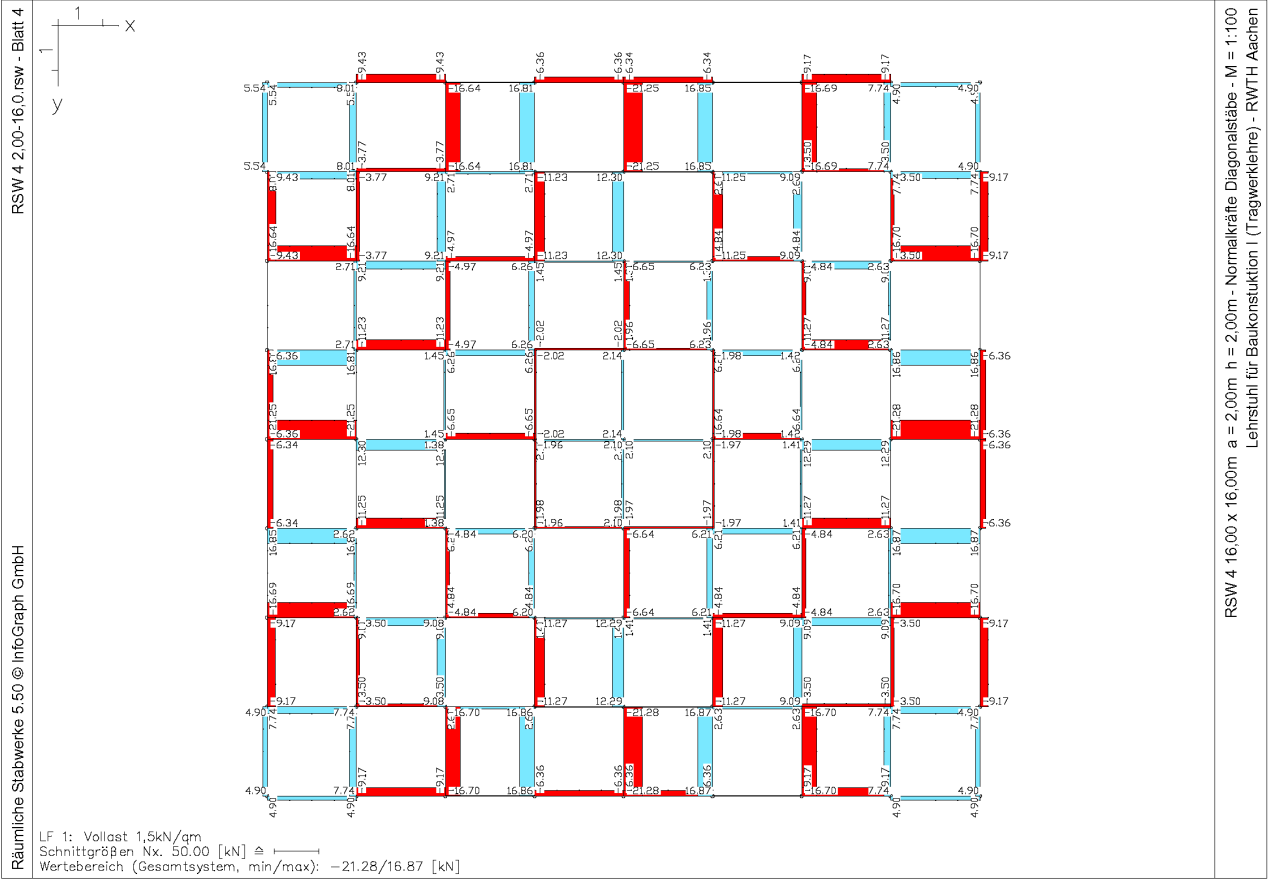
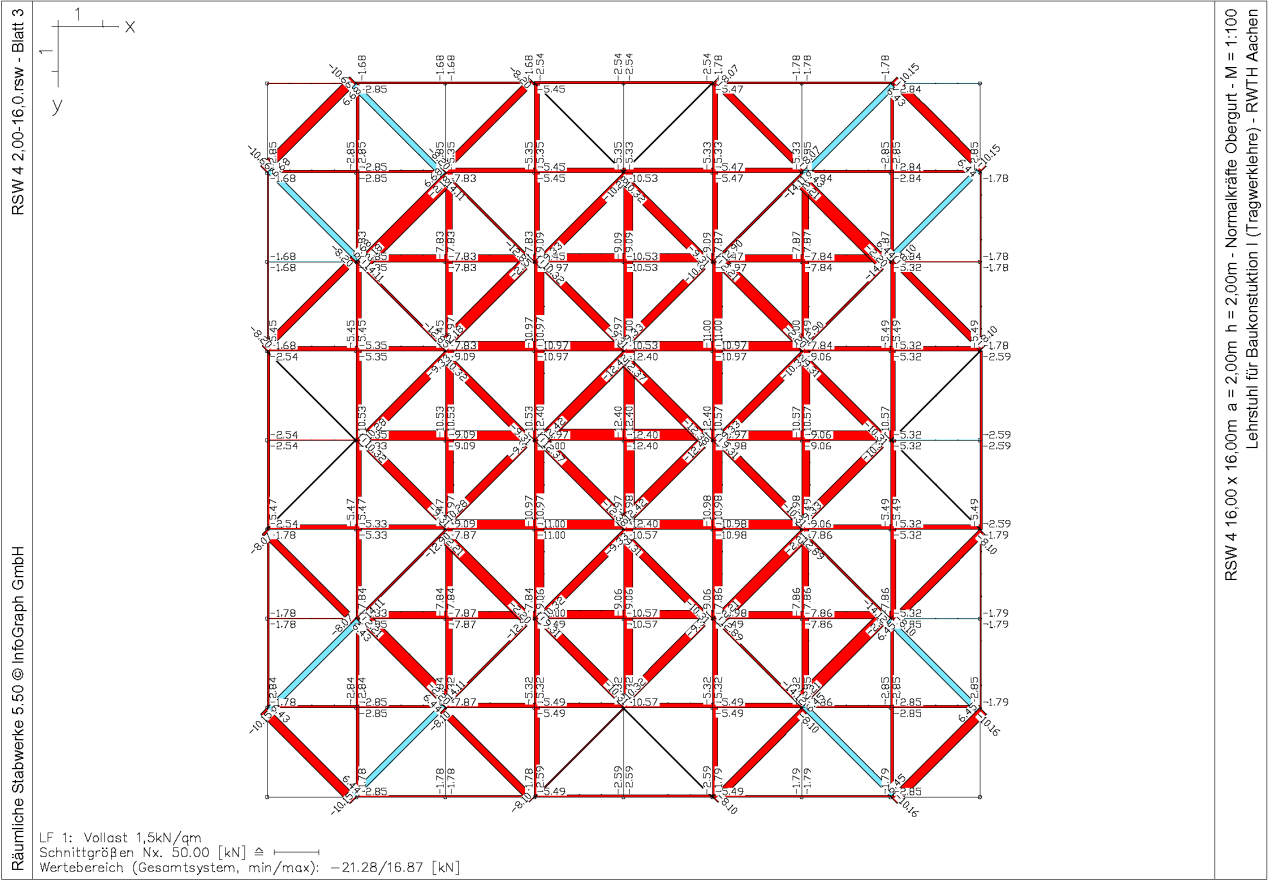
RSW 4 2.00-16.00.nrw - Blatt 2

N

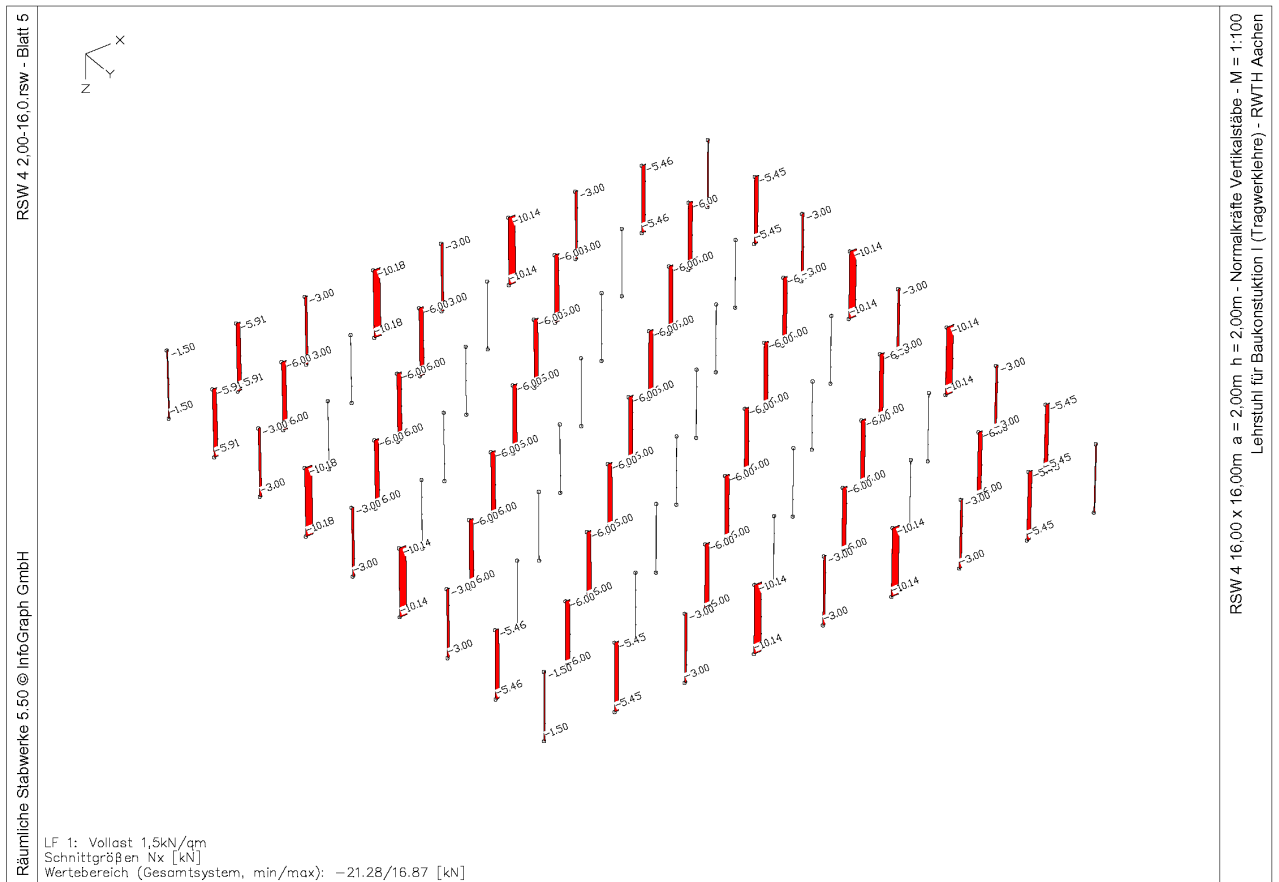
X

RSW 4 16.00 x 16.00m a = 2,00m h = 2,00m - Belastung Eigengewicht + Schnee - M = 1:110
Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerke) - RWTH Aachen

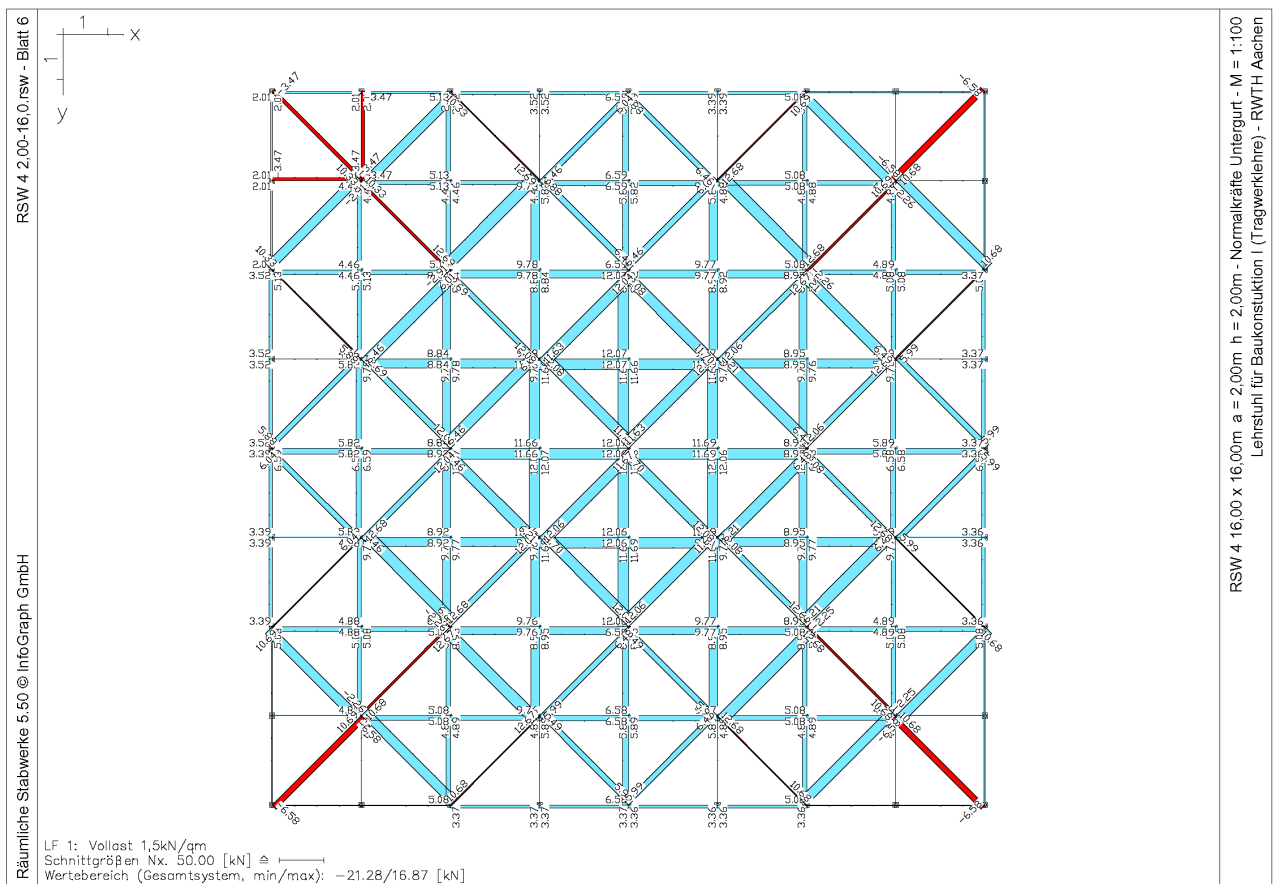
RSW 4, Belastung Eigengewicht + Schnee



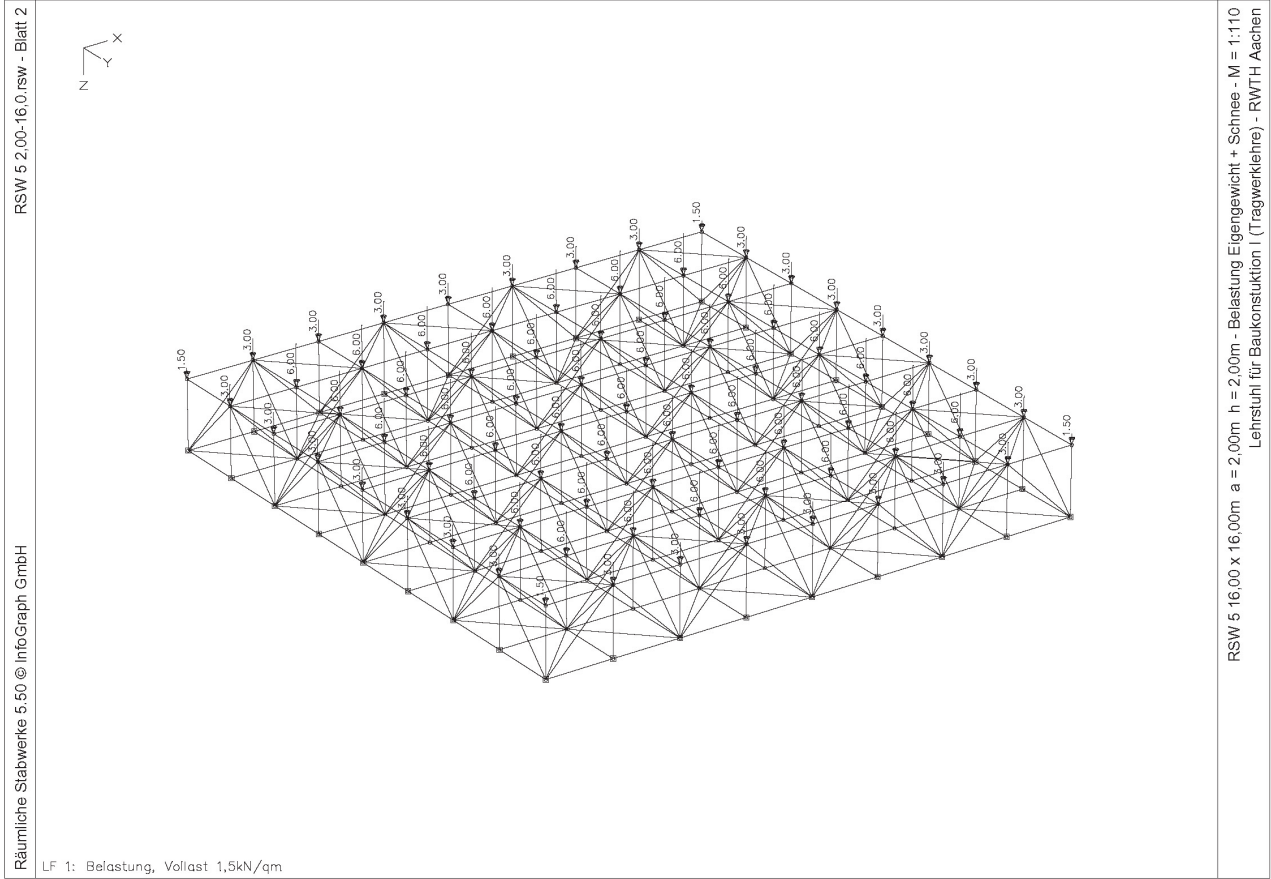
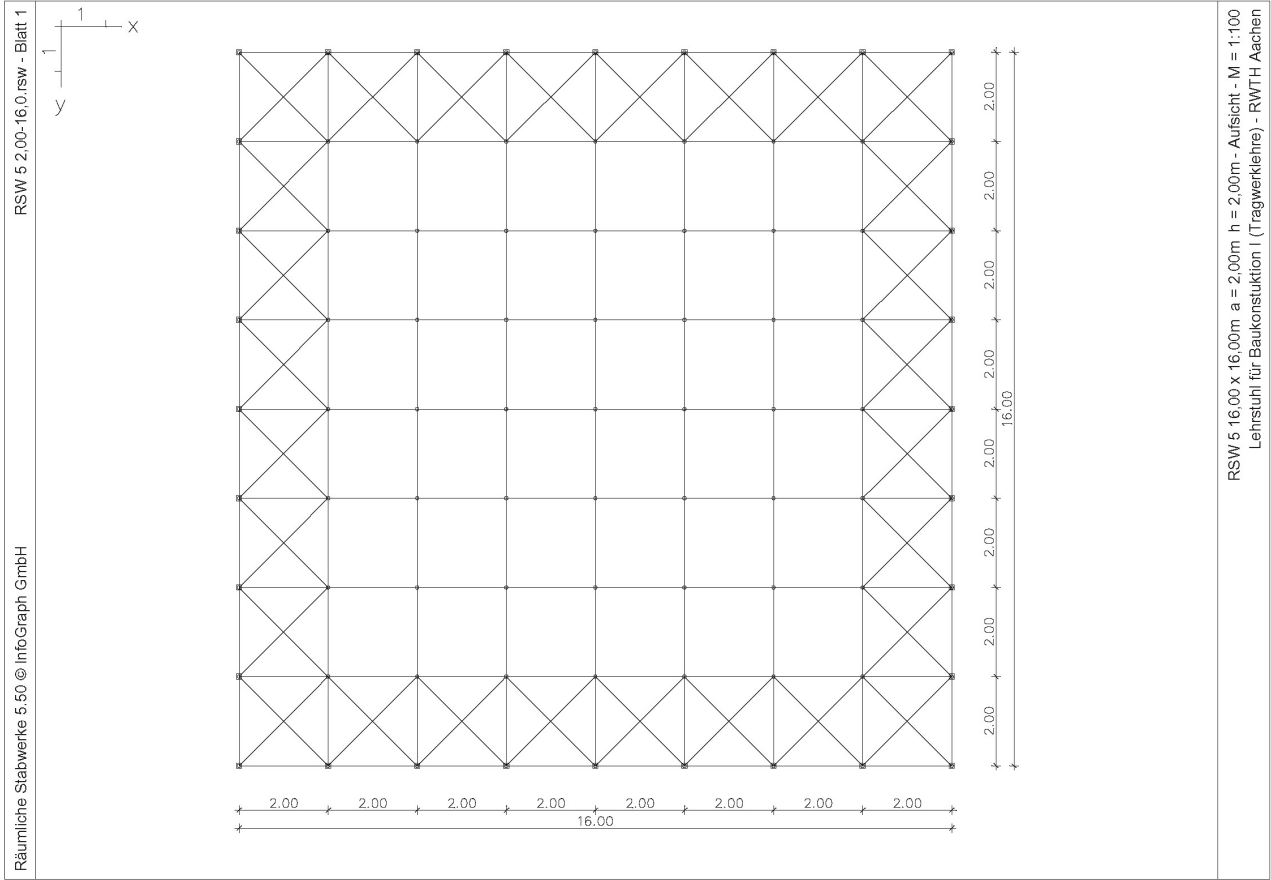
RSW 4, Normalkräfte Diagonale

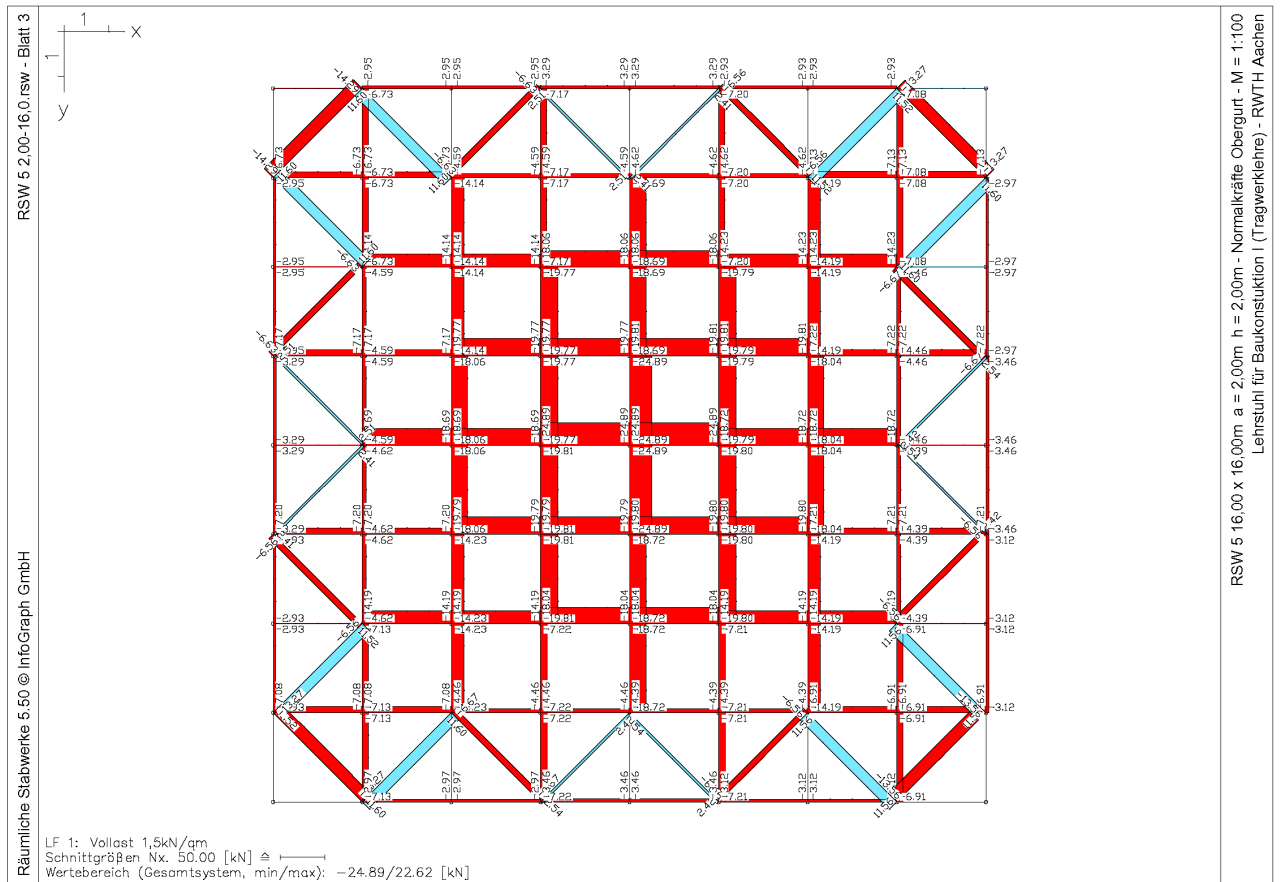


RSW 4, Normalkräfte Vertikalstäbe

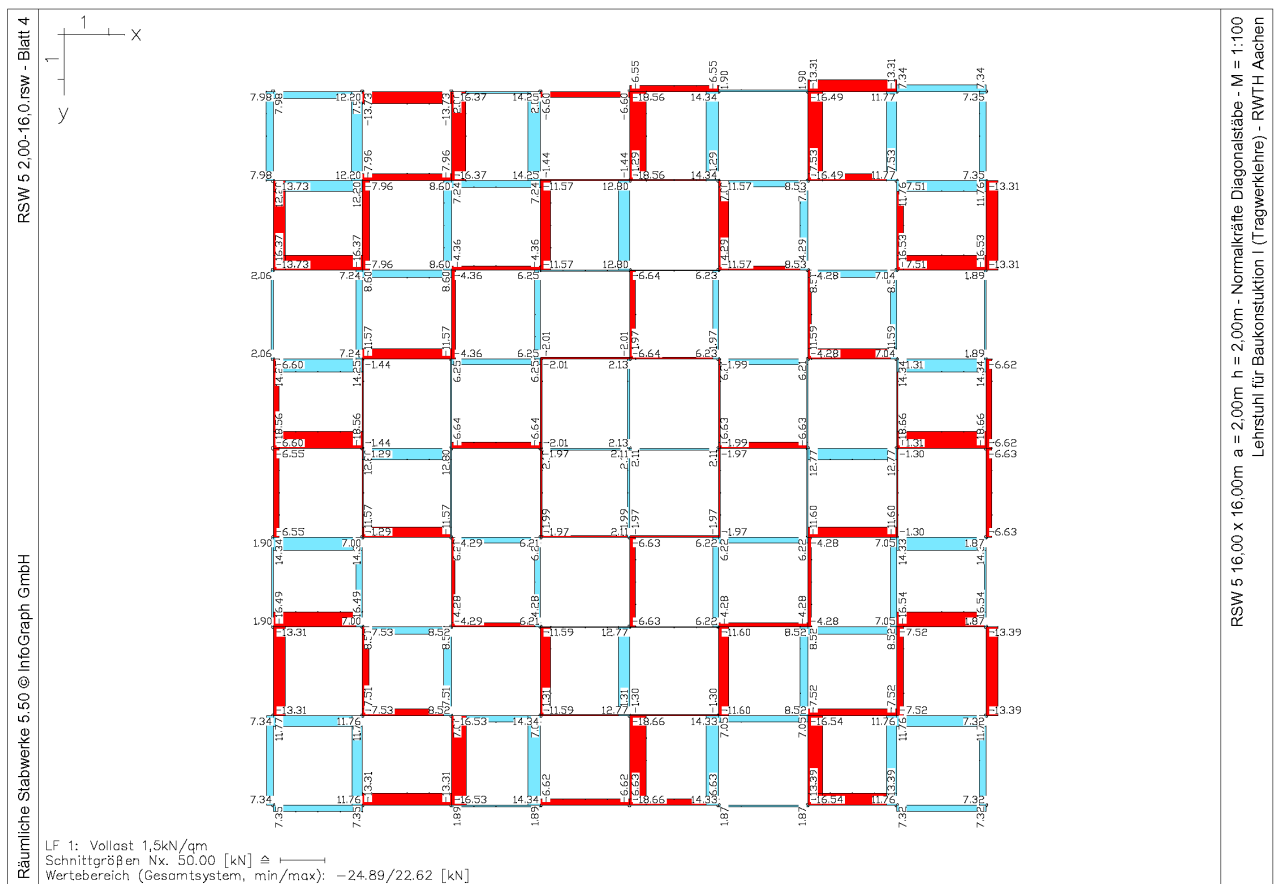


RSW 4, Normalkräfte Untergurt





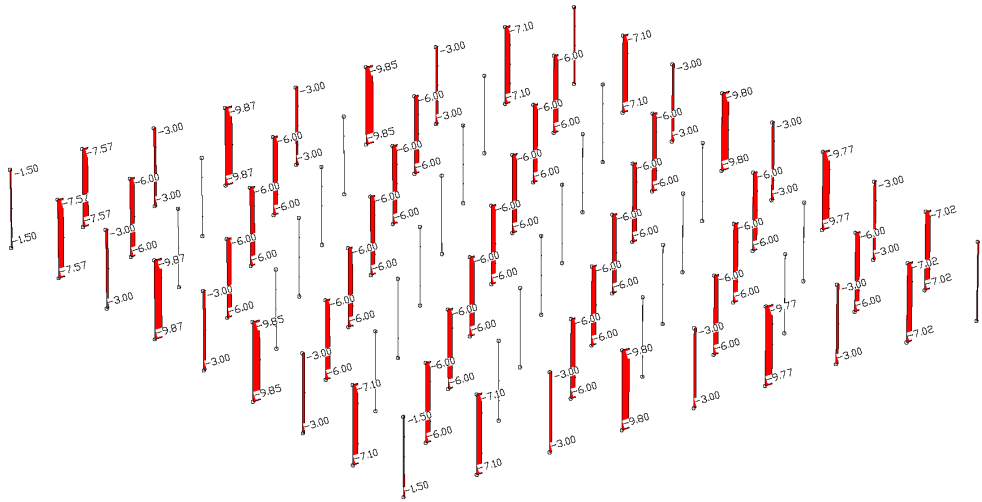
RSW 5, Normalkräfte Obergurt



RSW 5, Normalkräfte Diagonalstäbe

RSW 5 2,00-16,0.rsw - Blatt 5

Räumliche Stabwerke 5.50 © InfoGraph GmbH



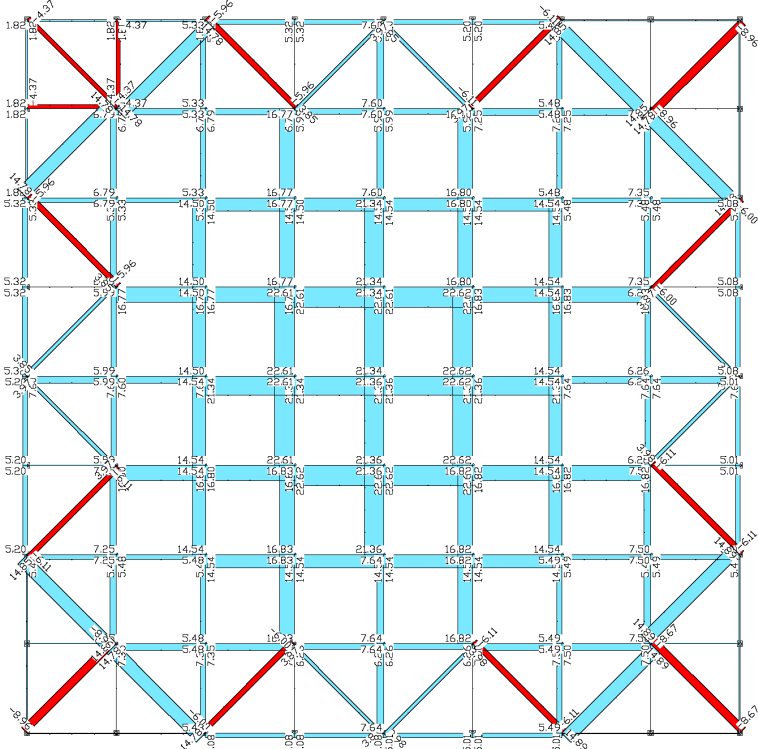
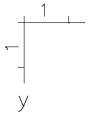
LF 1: Vollast 1,5kN/qm
Schnittgrößen Nx [kN]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -24.89/22.62 [kN]

RSW 5 16,00 x 16,00m a = 2,00m h = 2,00m - Normalkräfte Vertikalstäbe - M = 1:100
Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerke) - RWTH Aachen

RSW 5, Normalkräfte Vertikalstäbe

RSW 5 2,00-16,0.rsw - Blatt 6

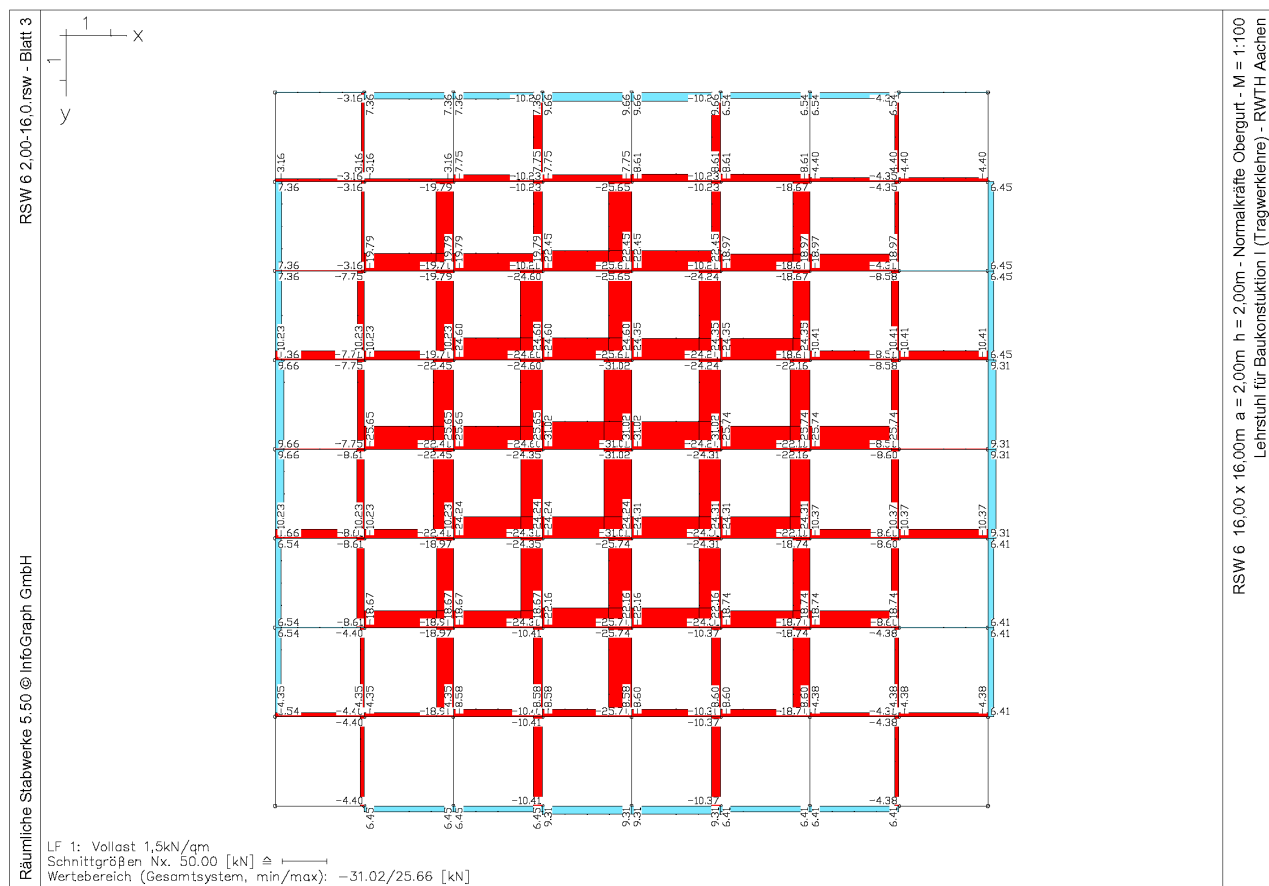
Räumliche Stabwerke 5.50 © InfoGraph GmbH



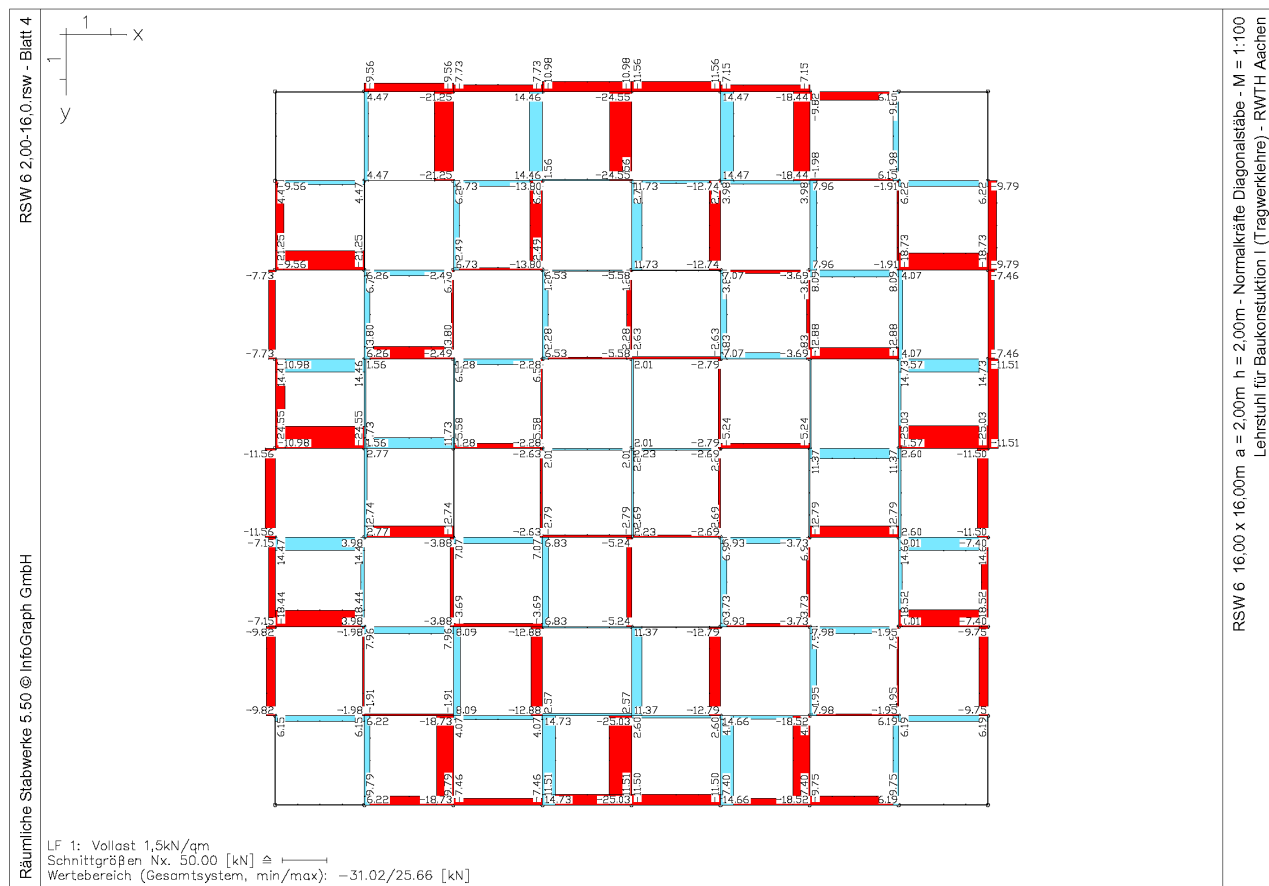
LF 1: Vollast 1,5kN/qm
Schnittgrößen Nx. 50.00 [kN]
Wertebereich (Gesamtsystem, min/max): -24.89/22.62 [kN]

RSW 5 16,00 x 16,00m a = 2,00m h = 2,00m - Normalkräfte Untergurt - M = 1:100
Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerke) - RWTH Aachen

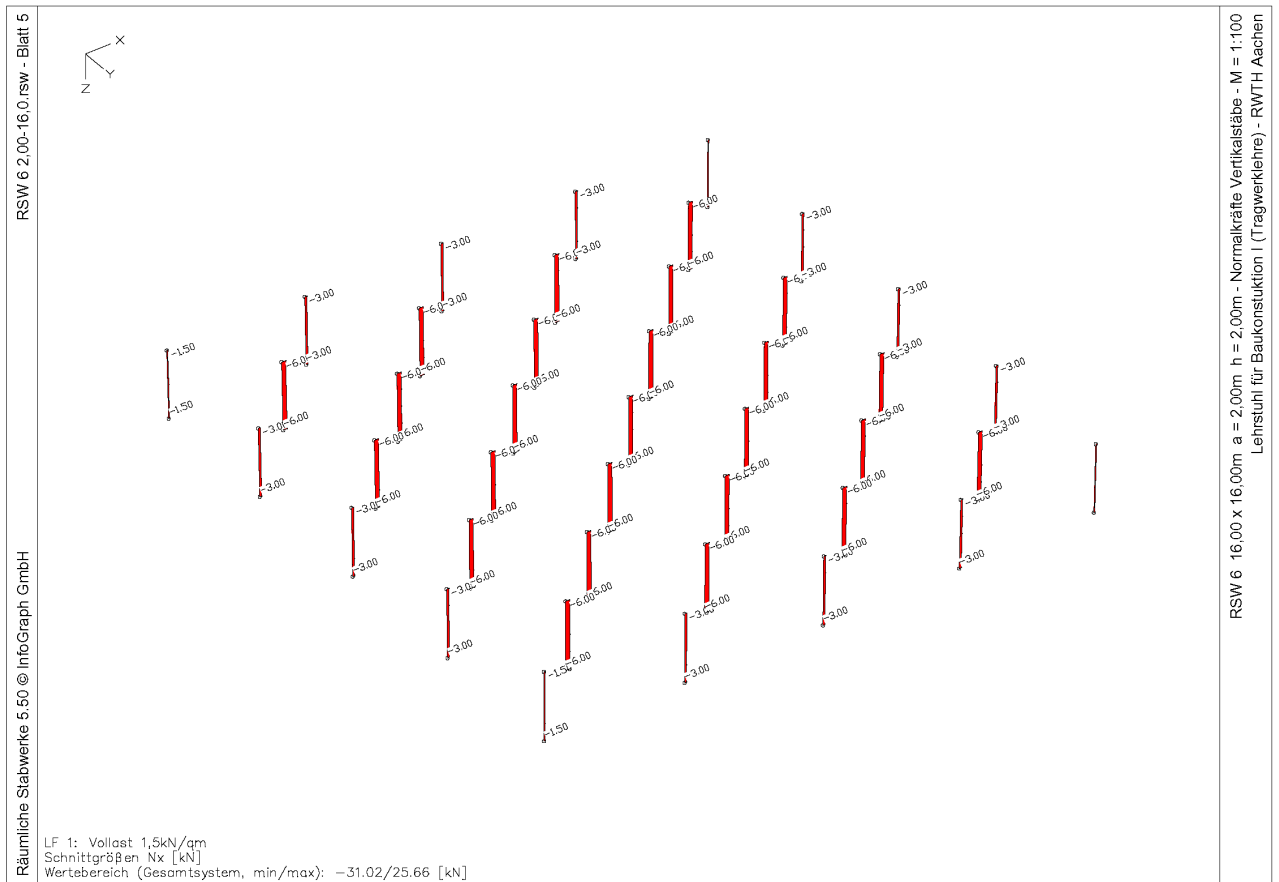
RSW 5, Normalkräfte Untergurt



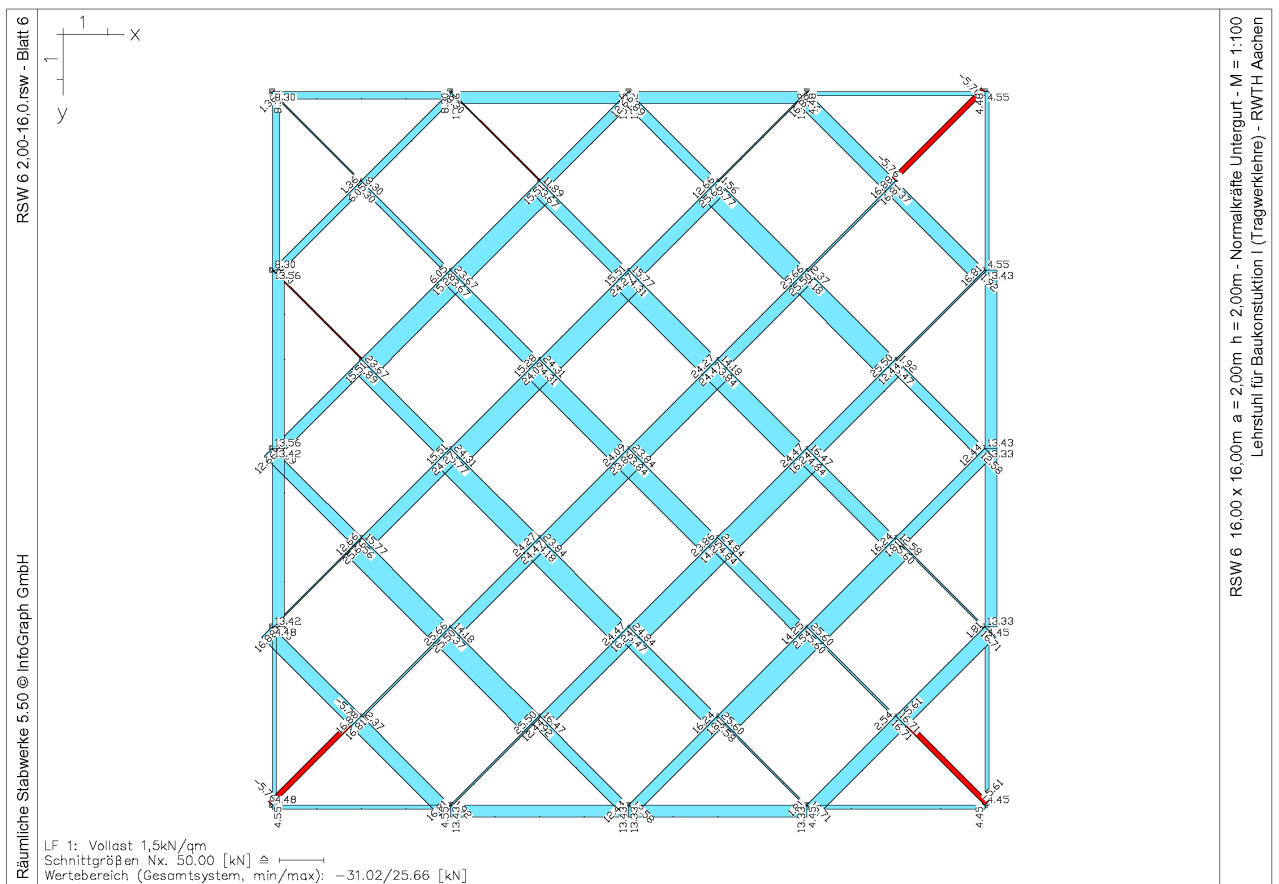
RSW 6, Normalkräfte Obergurt



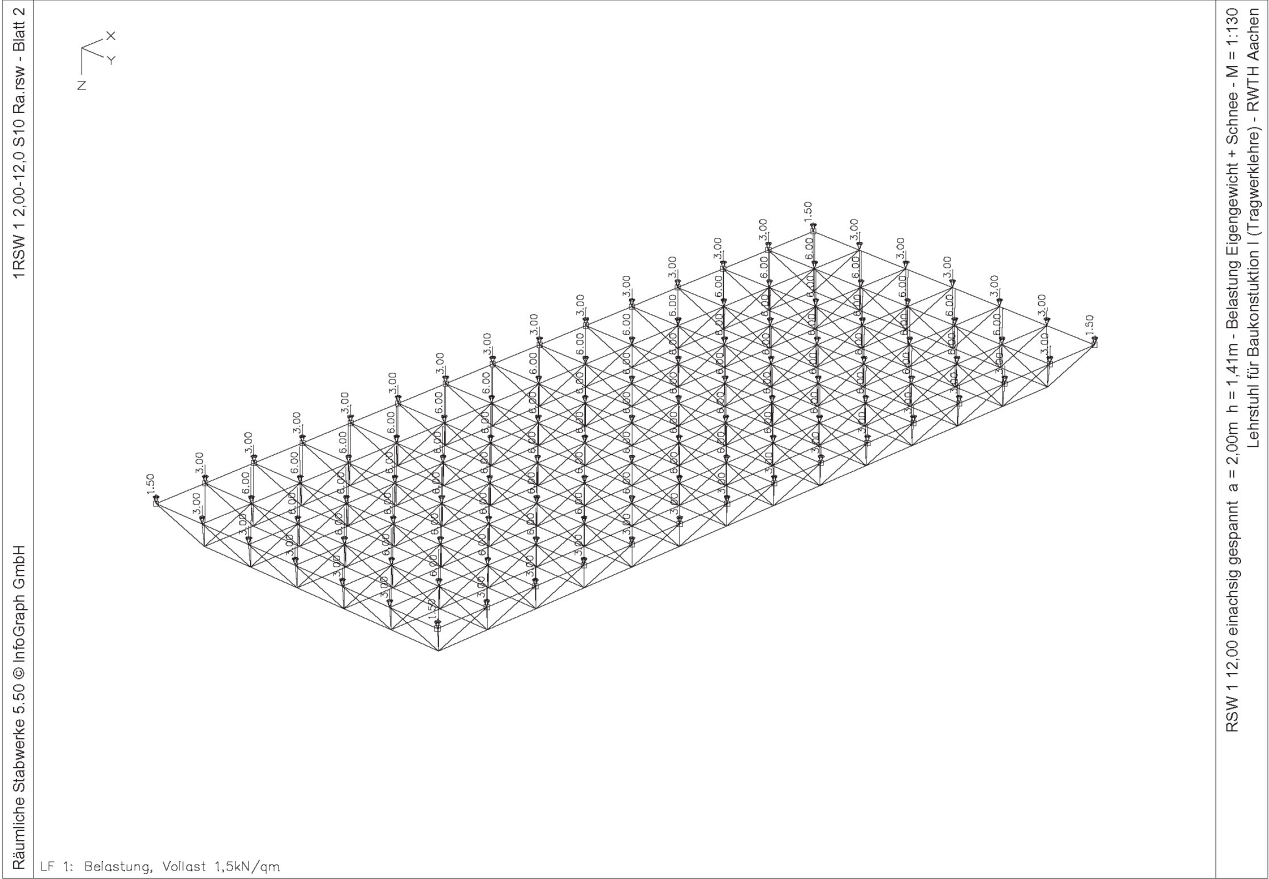
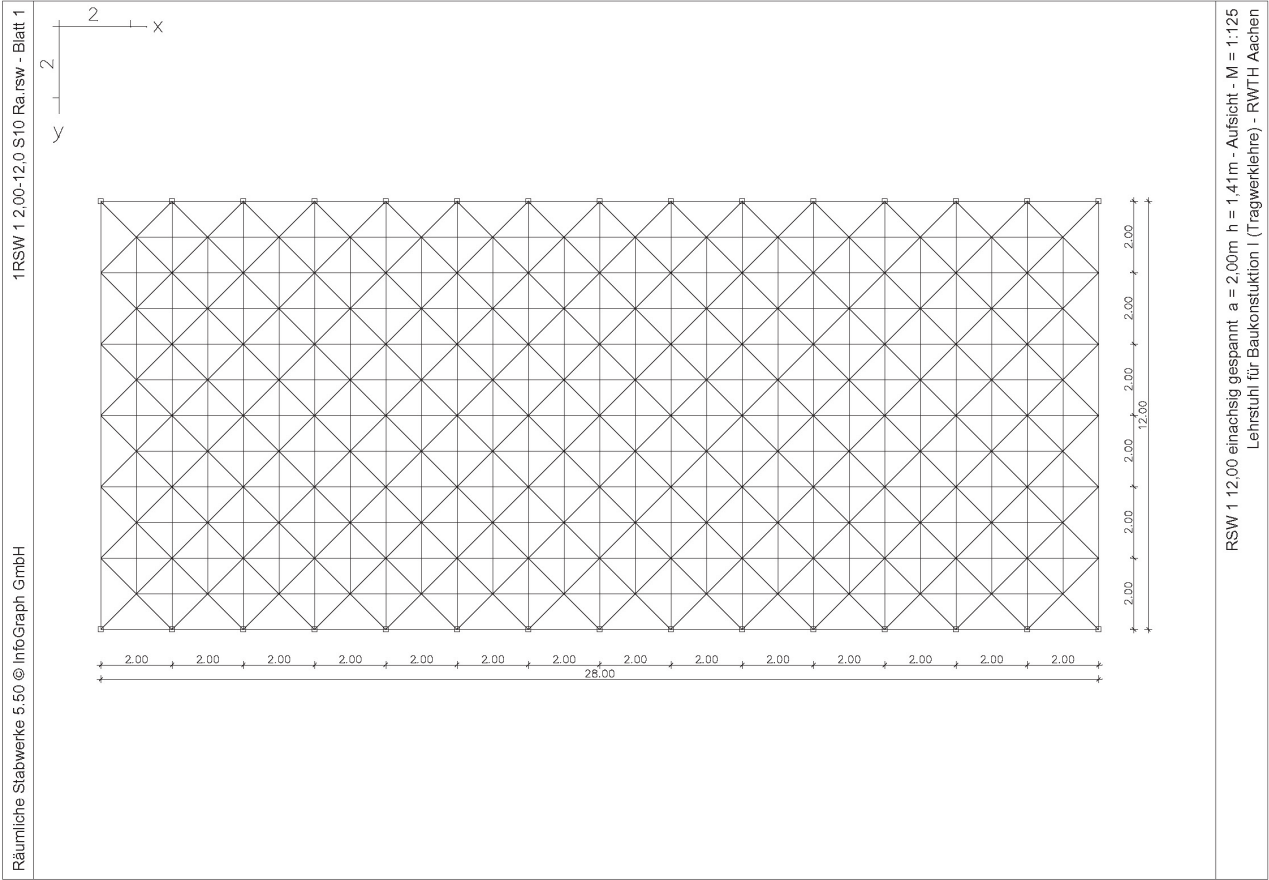
RSW 6, Normalkräfte Diagonalstäbe

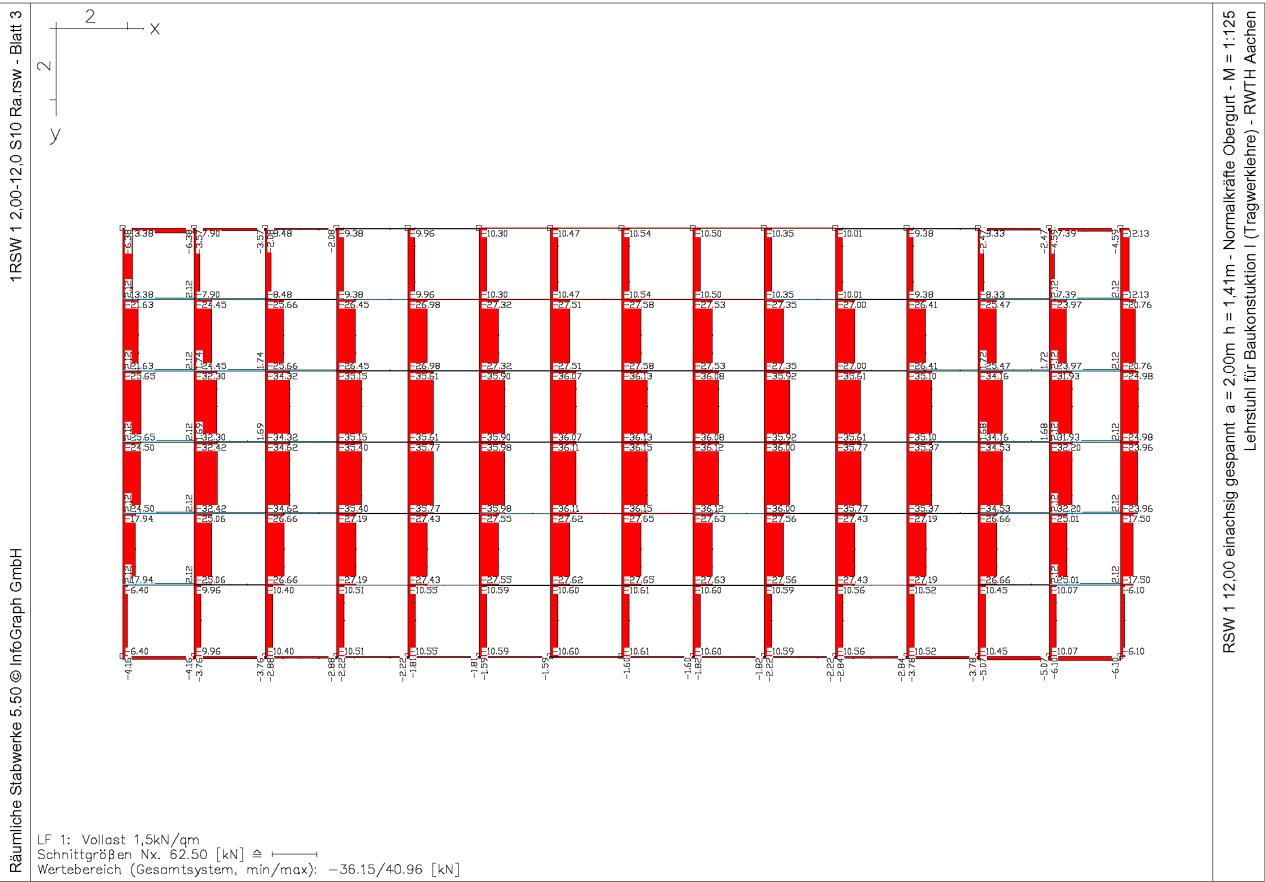


RSW 6, Normalkräfte Vertikalstäbe

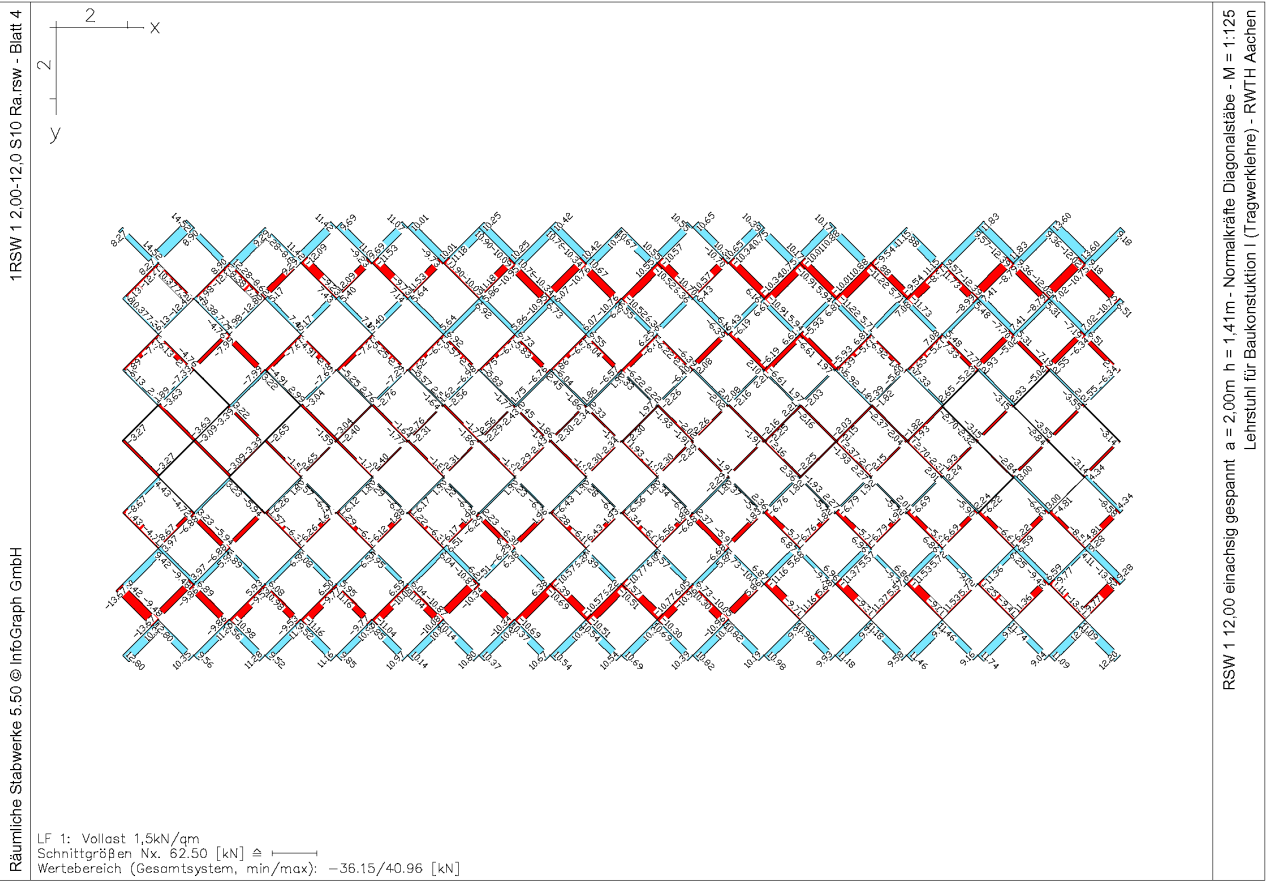


RSW 6, Normalkräfte Untergurt

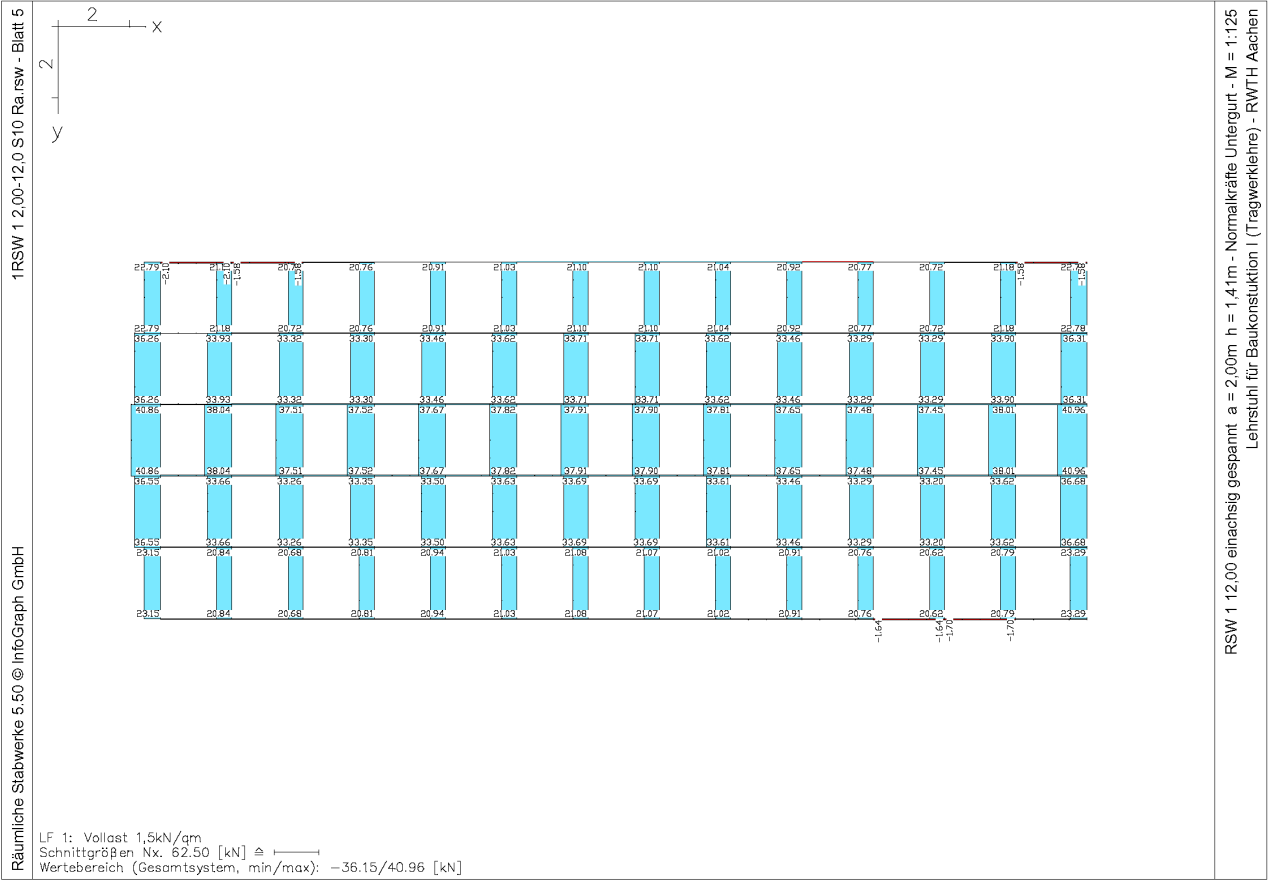


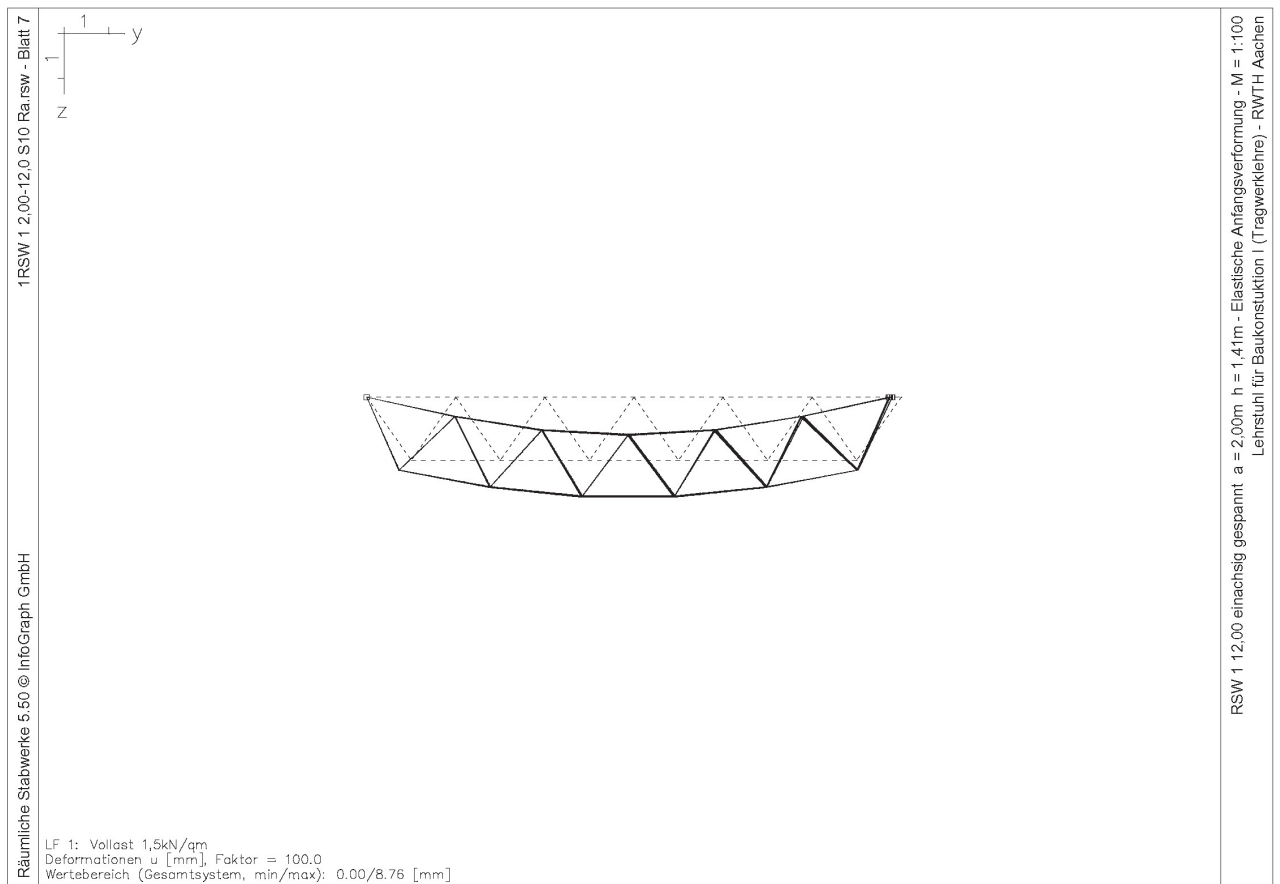


RSW 1, einachsig gespannt, Normalkräfte Obergurt

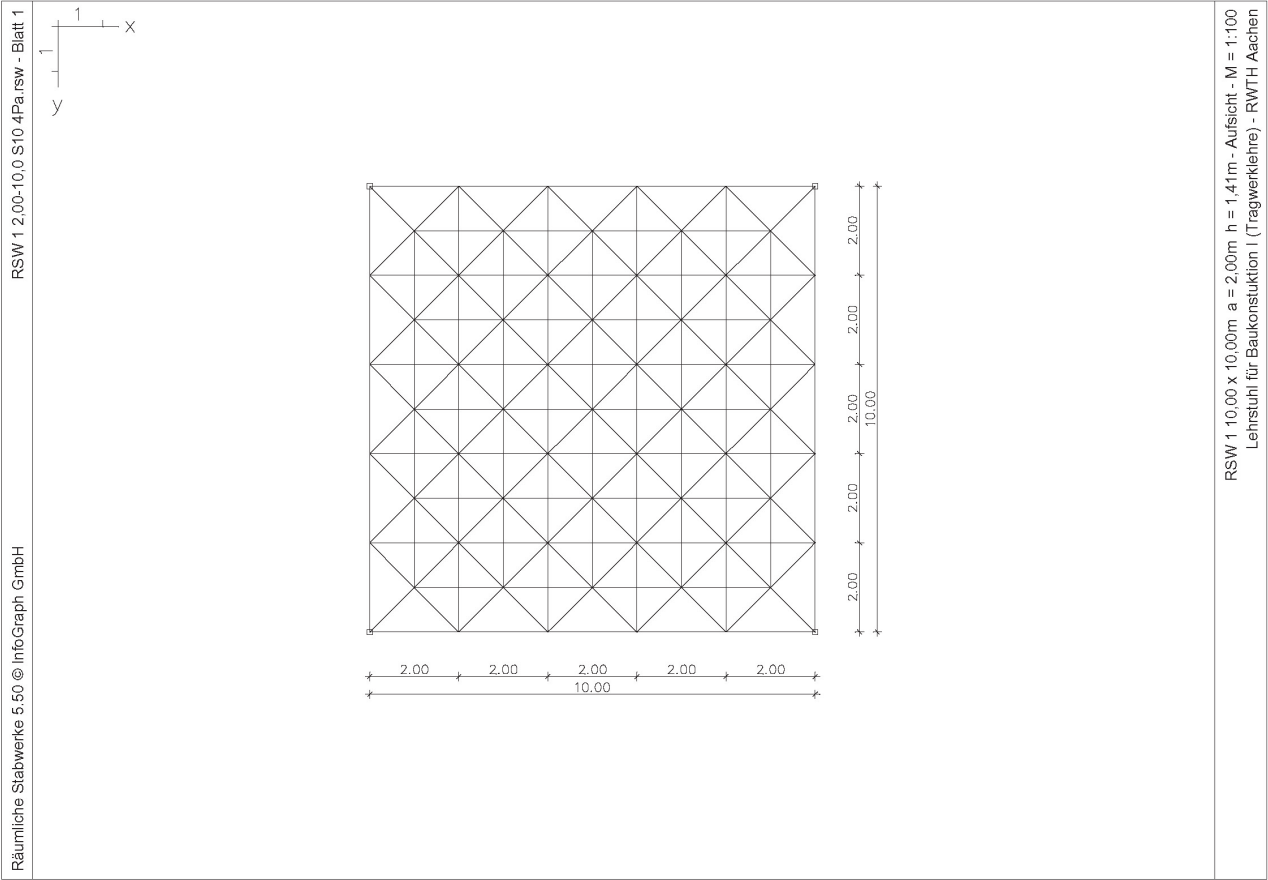


RSW 1, einachsig gespannt, Normalkräfte Diagonalstäbe

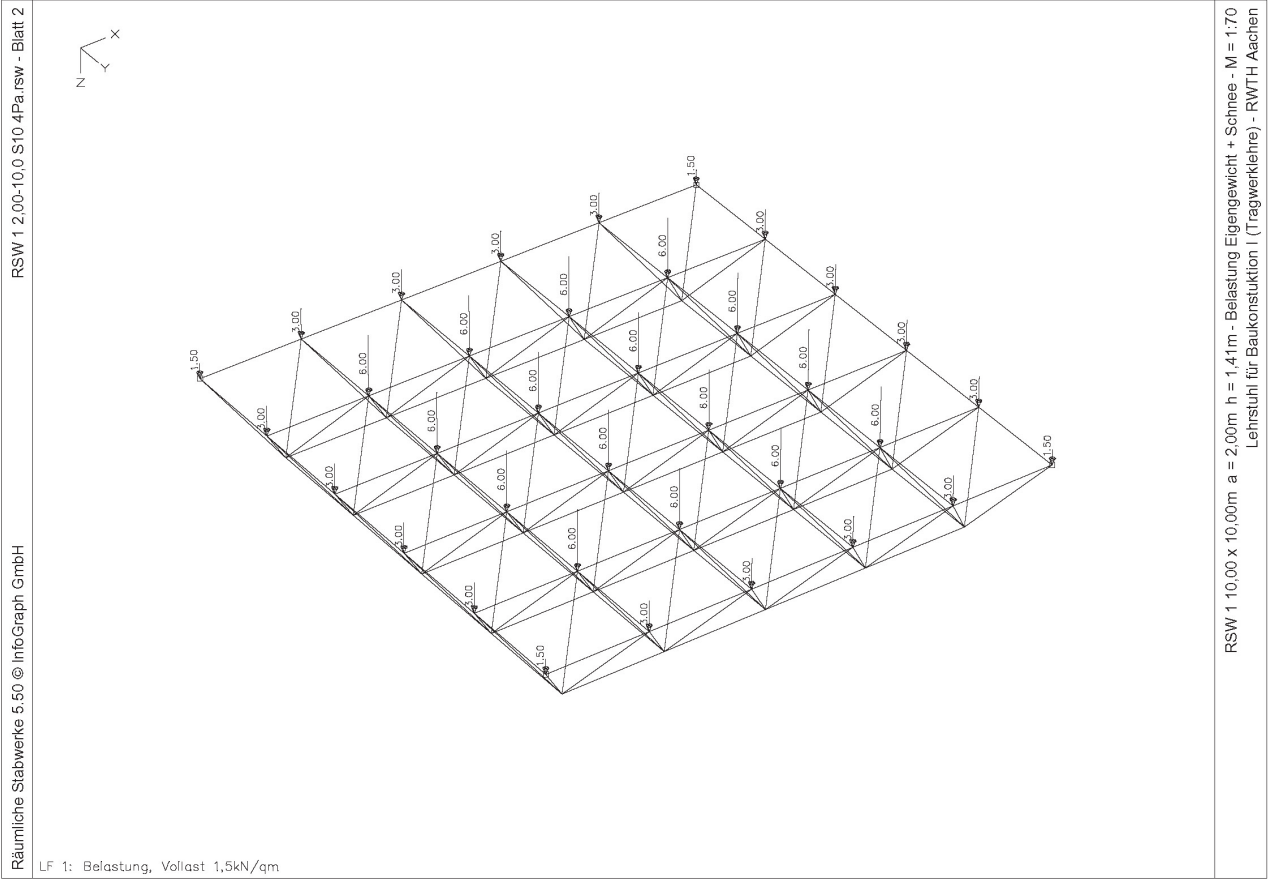




RSW 1, einachsig gespannt, Elastische Anfangsverformung

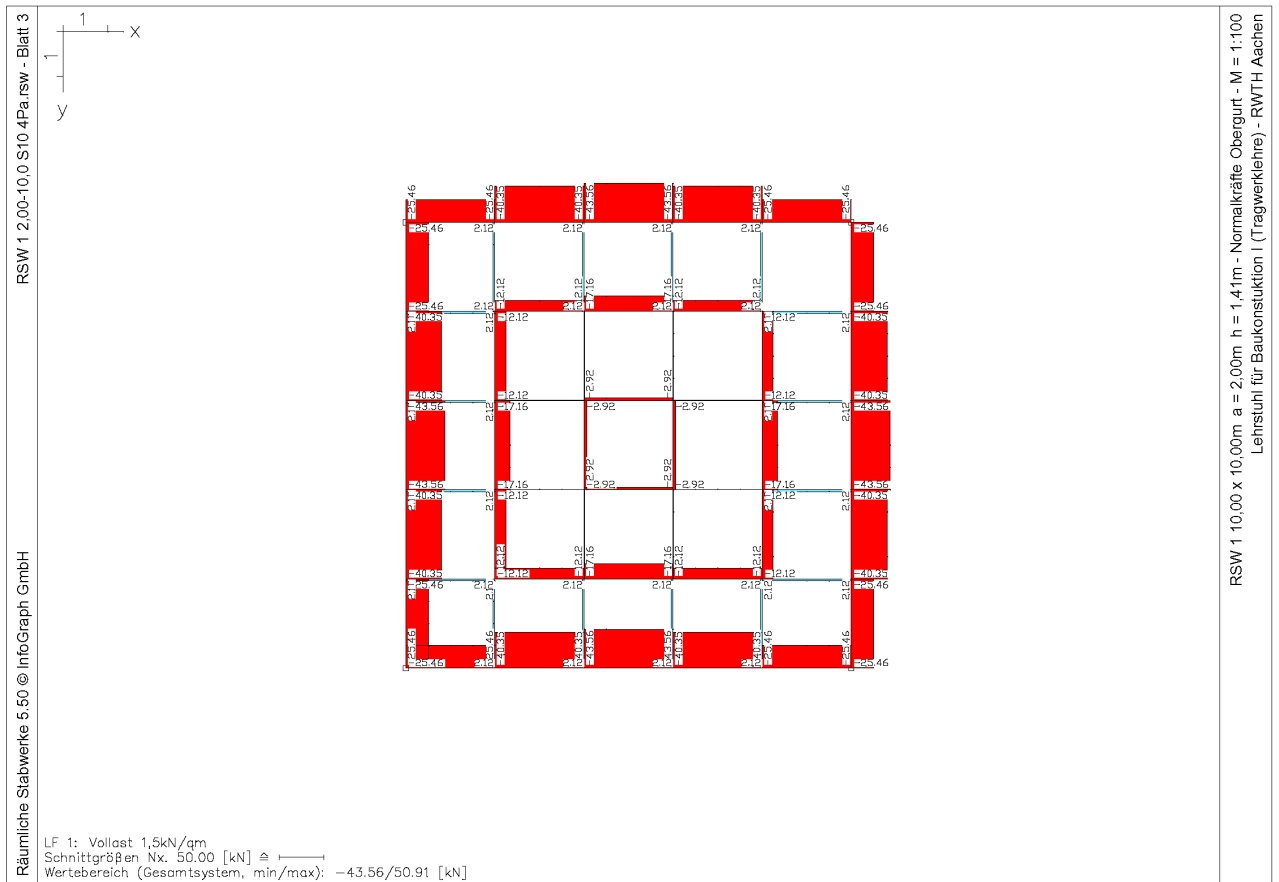


RSW 1, eckpunktgelagert, Aufsicht

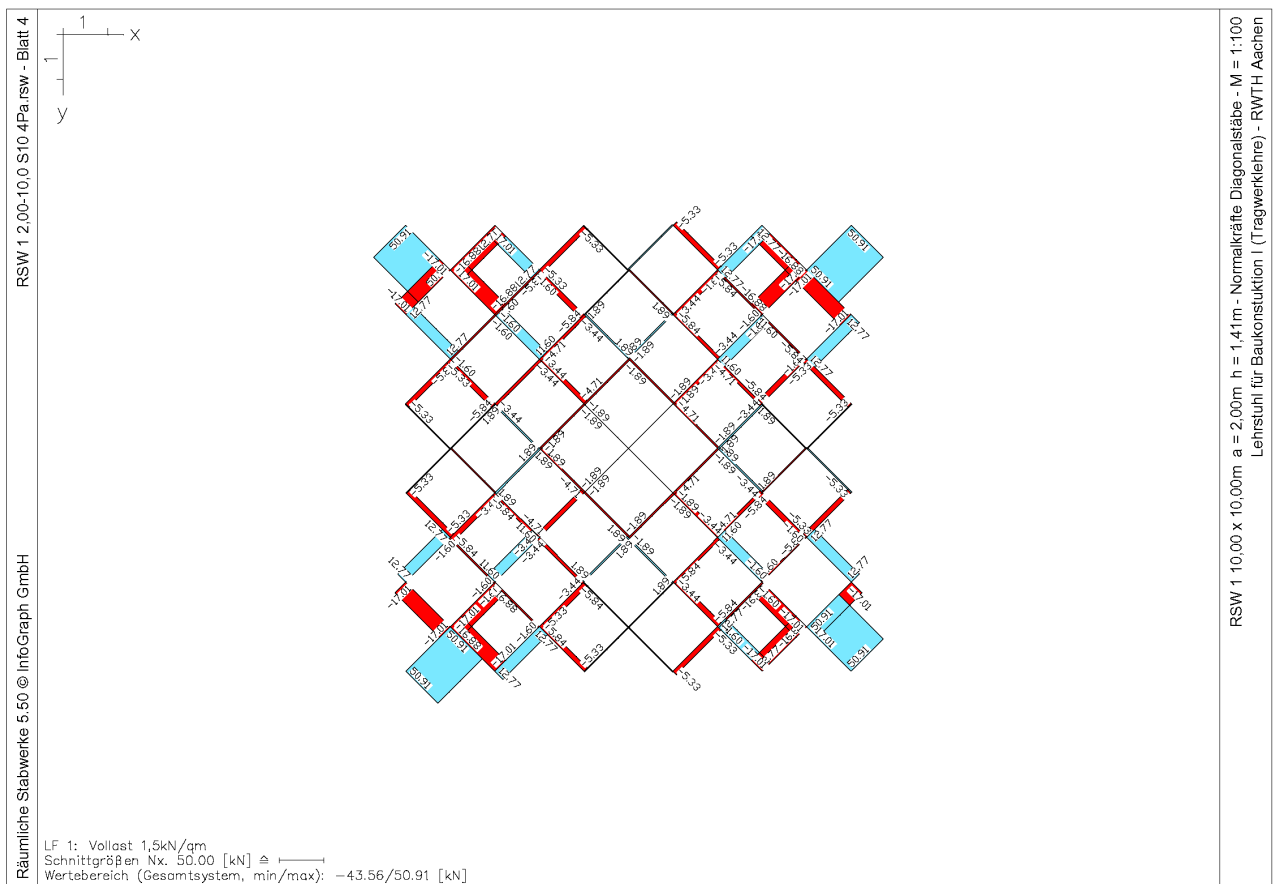


RSW 1, eckpunktgelagert, Belastung Eigengewicht + Schnee

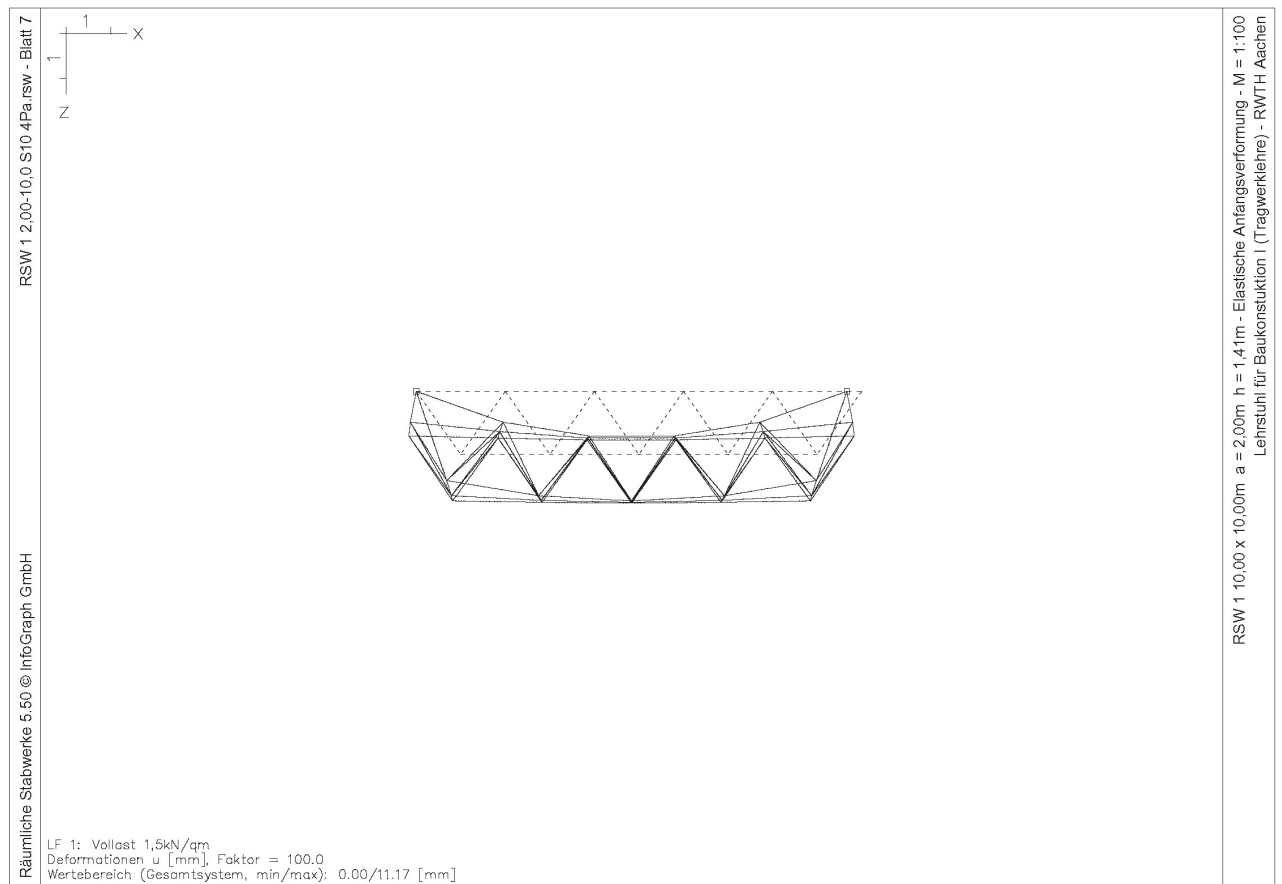
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke - RSW 1, eckpunktgelagert



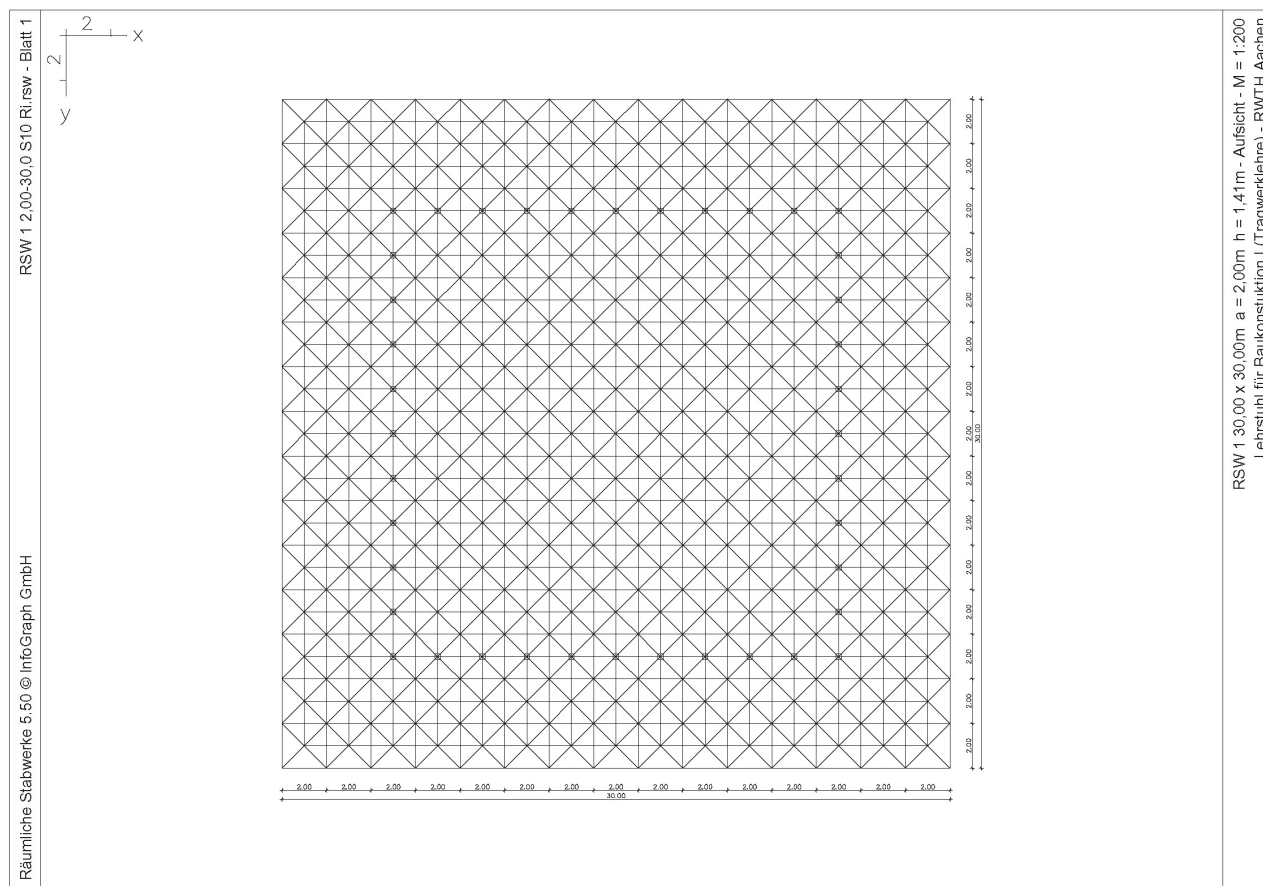
RSW 1, eckpunktgelagert, Normalkräfte Obergurt



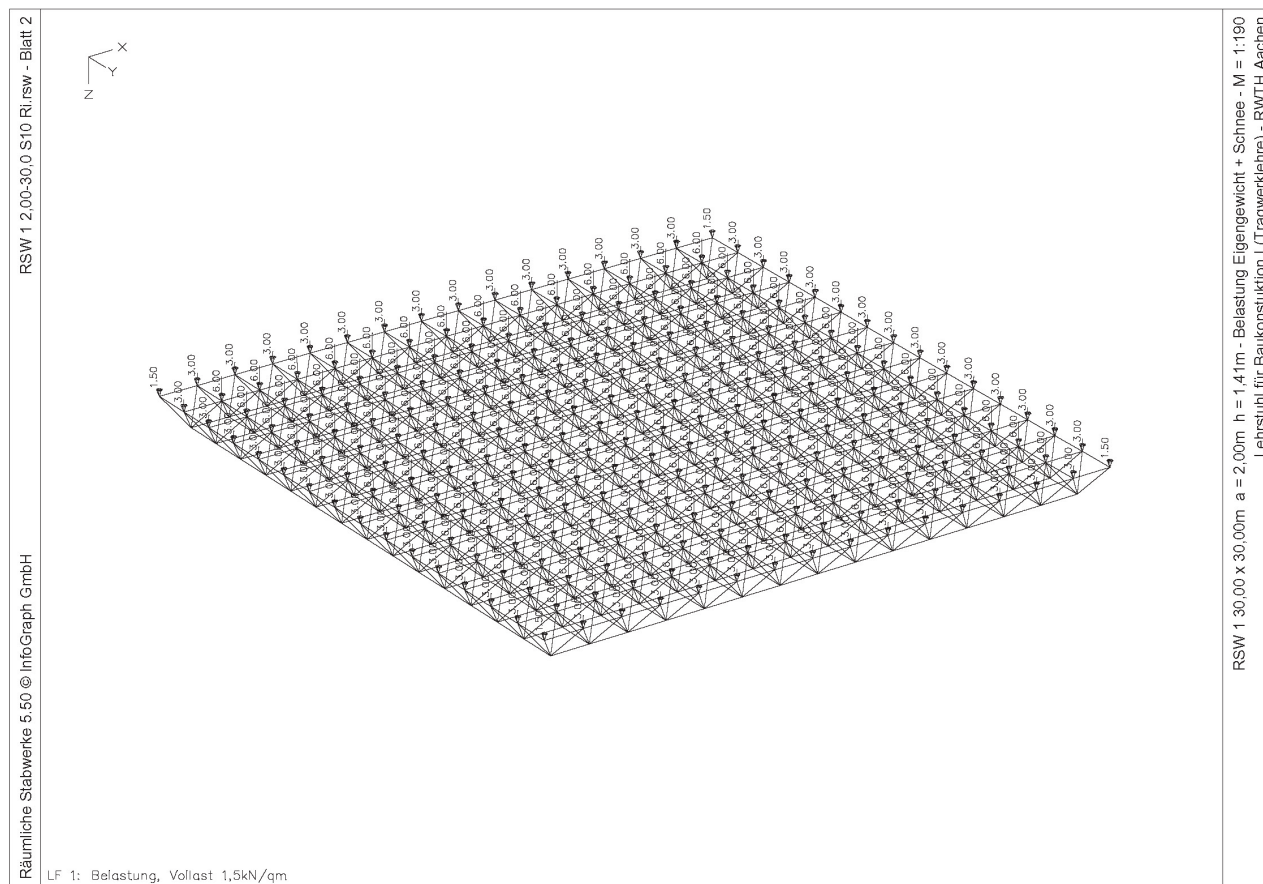
RSW 1, eckpunktgelagert, Normalkräfte Diagonalstäbe



RSW 1, eckpunktgelagert, Elastische Anfangsverformung

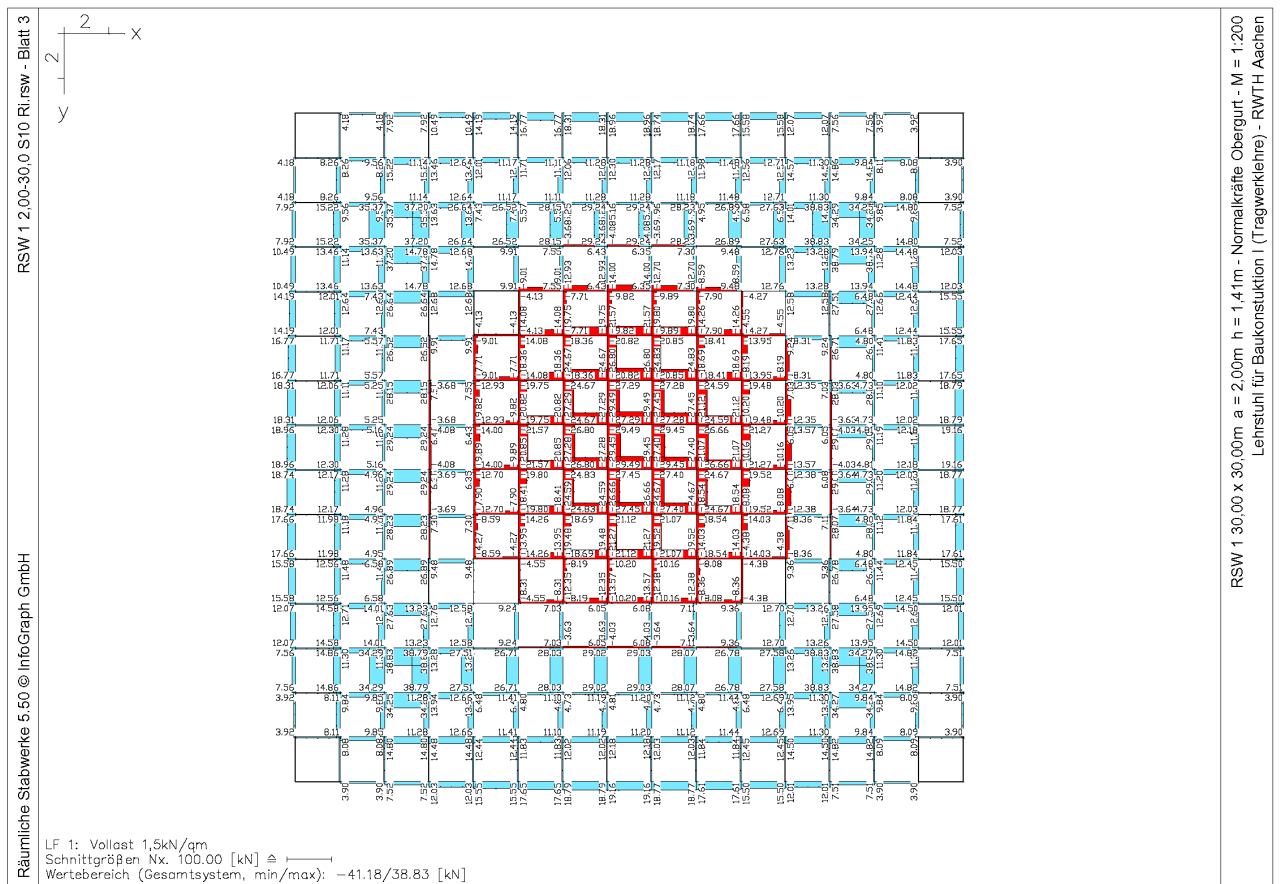


RSW 1, Umfanglagerung mit Auskragung, Aufsicht

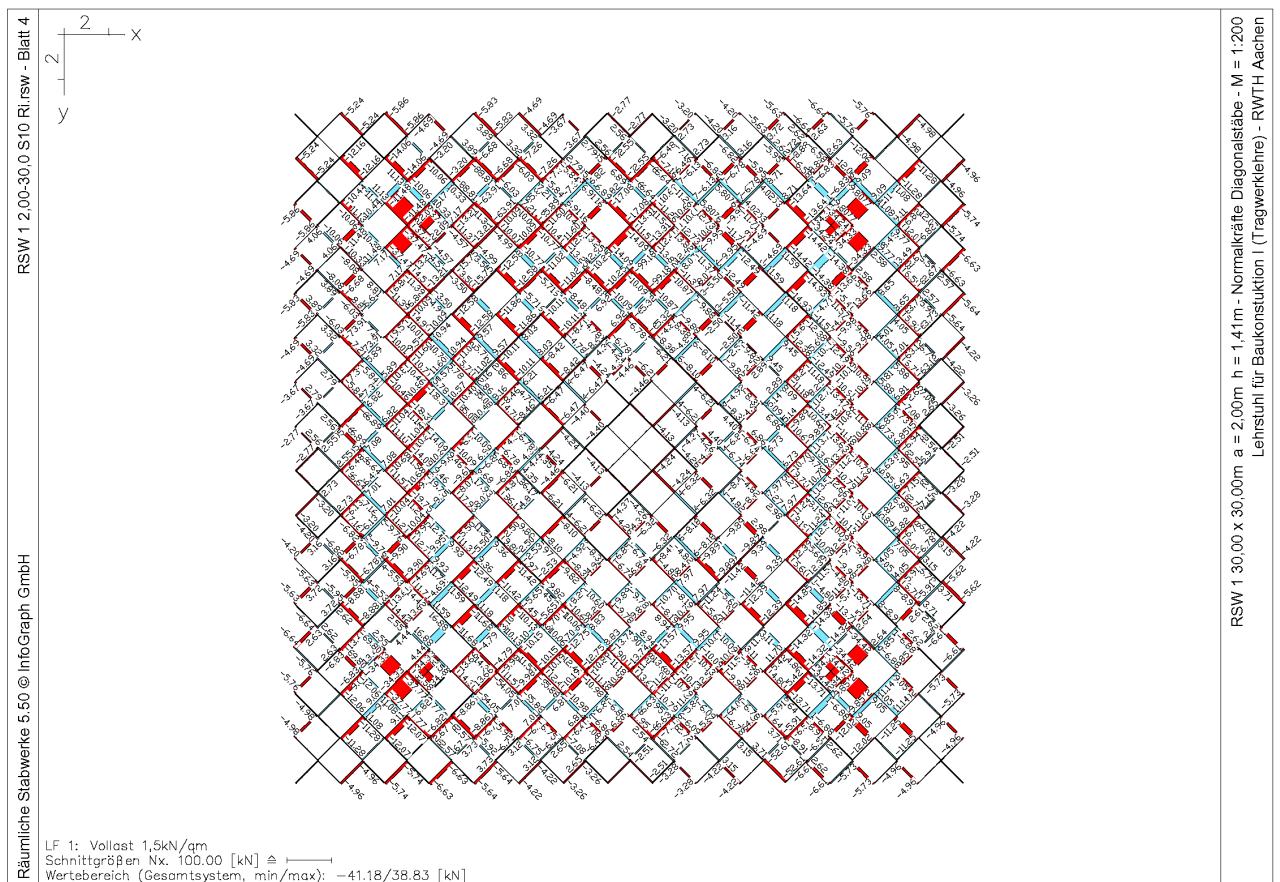


RSW 1, Umfanglagerung mit Auskragung, Belastung Eigengewicht + Schnee

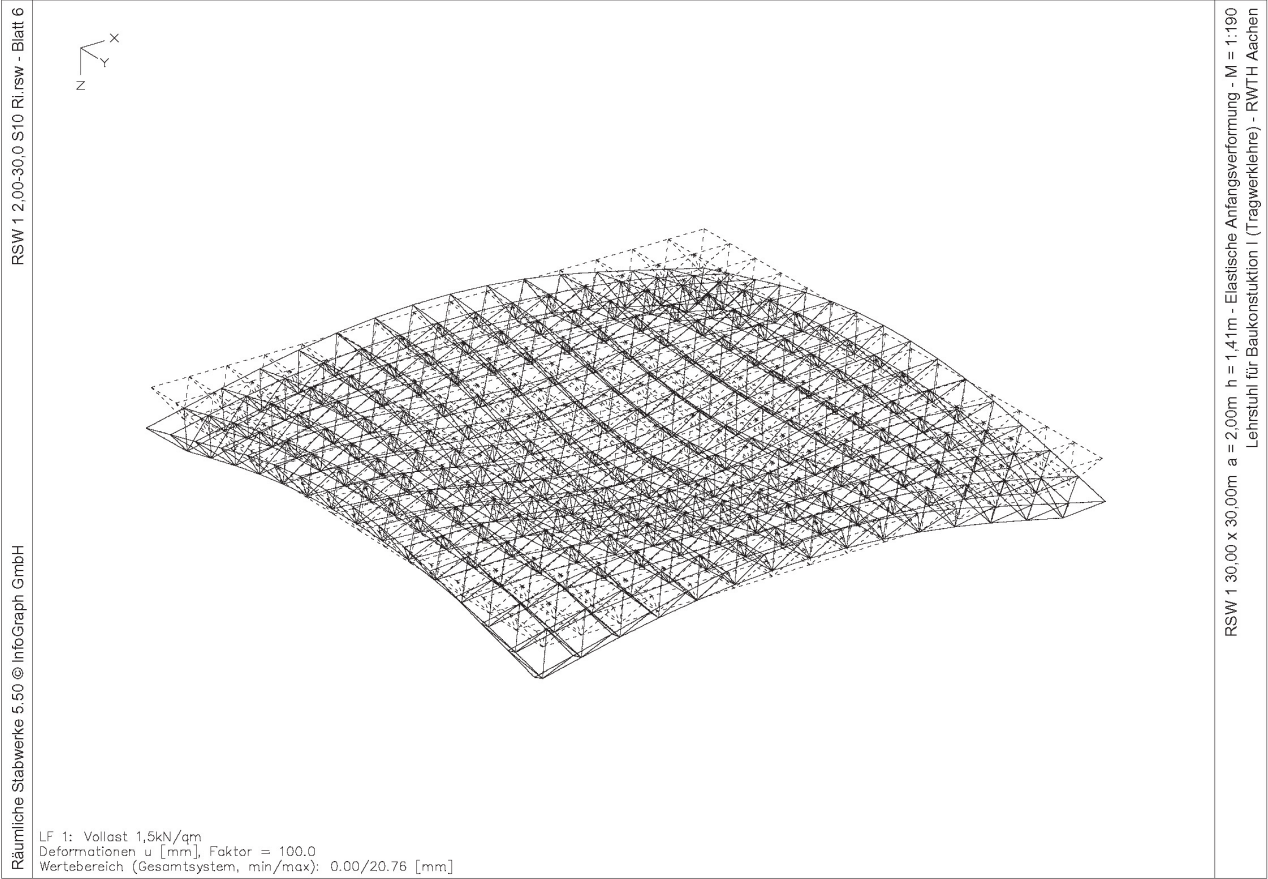
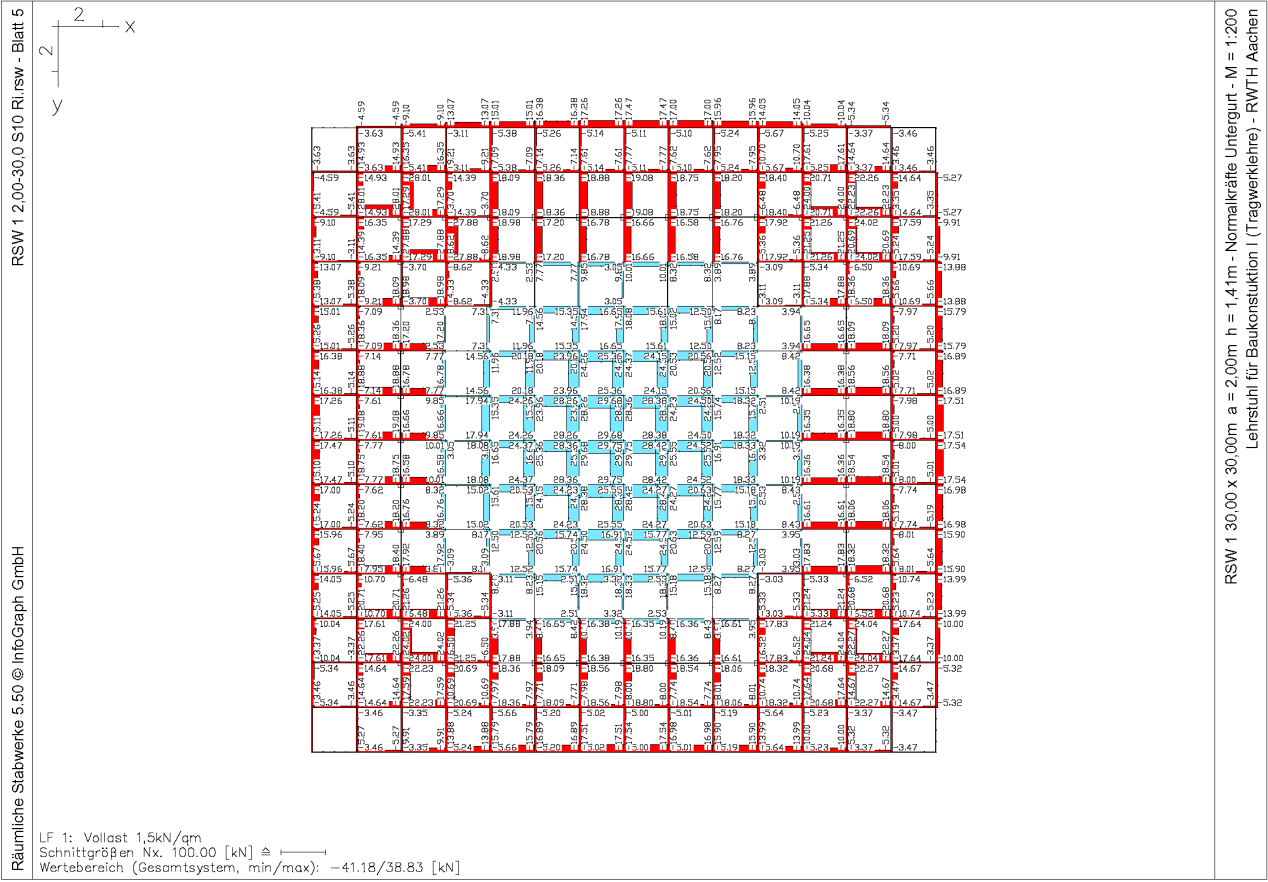
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke - RSW 1, Umfanglagerung mit Auskrugung



RSW 1, Umfanglagerung mit Auskrugung, Normalkräfte Obergurt

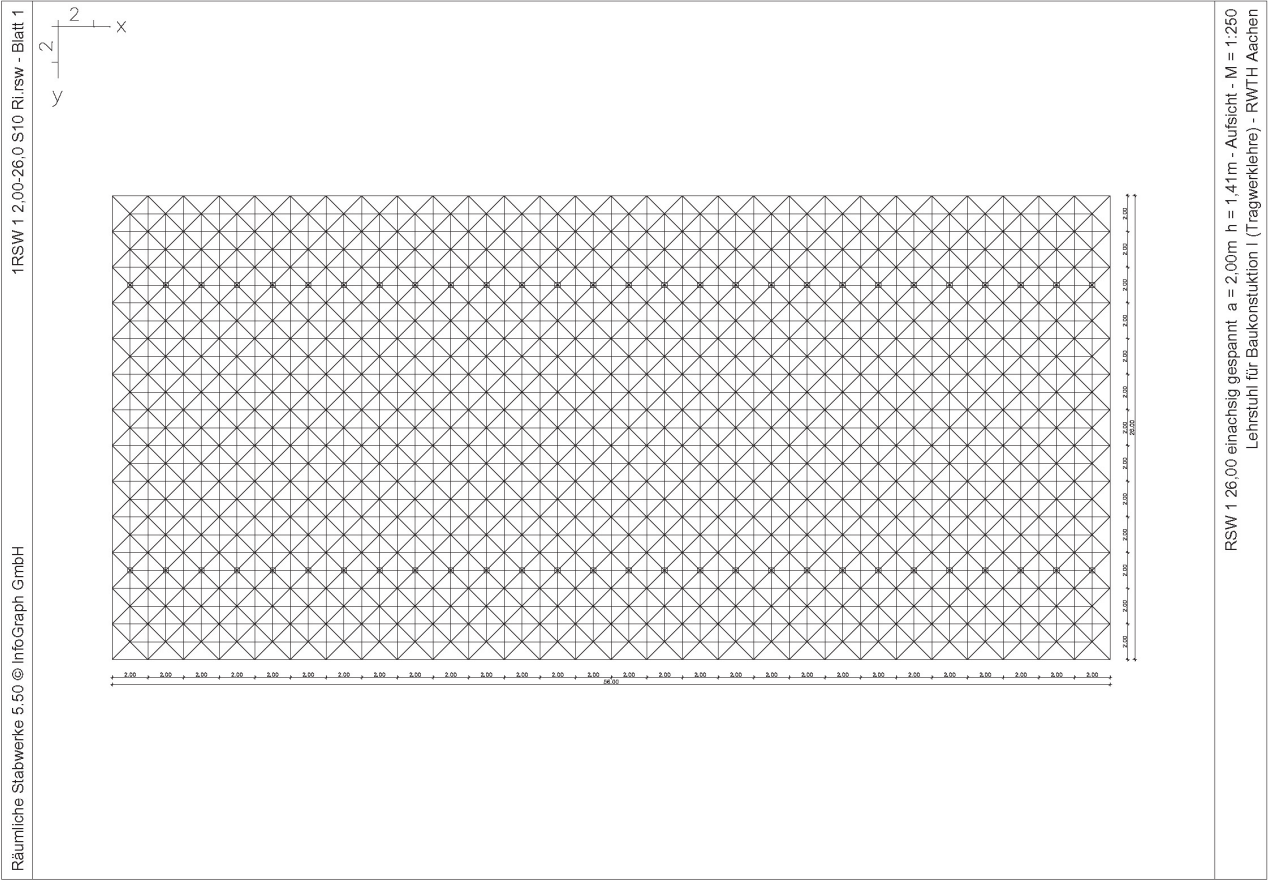


RSW 1, Umfanglagerung mit Auskrugung, Normalkräfte Diagonalstäbe

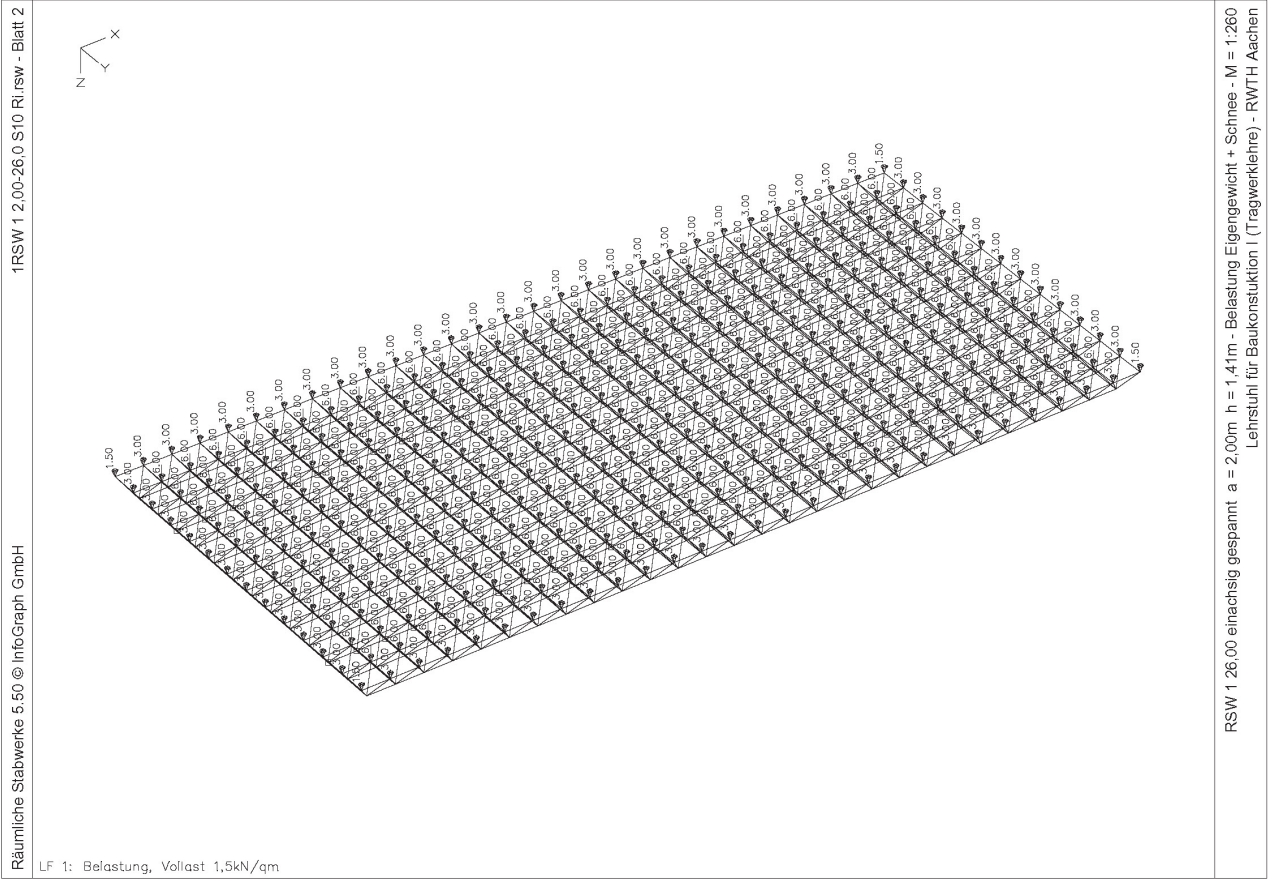




RSW 1, Umfanglagerung mit Auskragung, Elastische Anfangsverformung

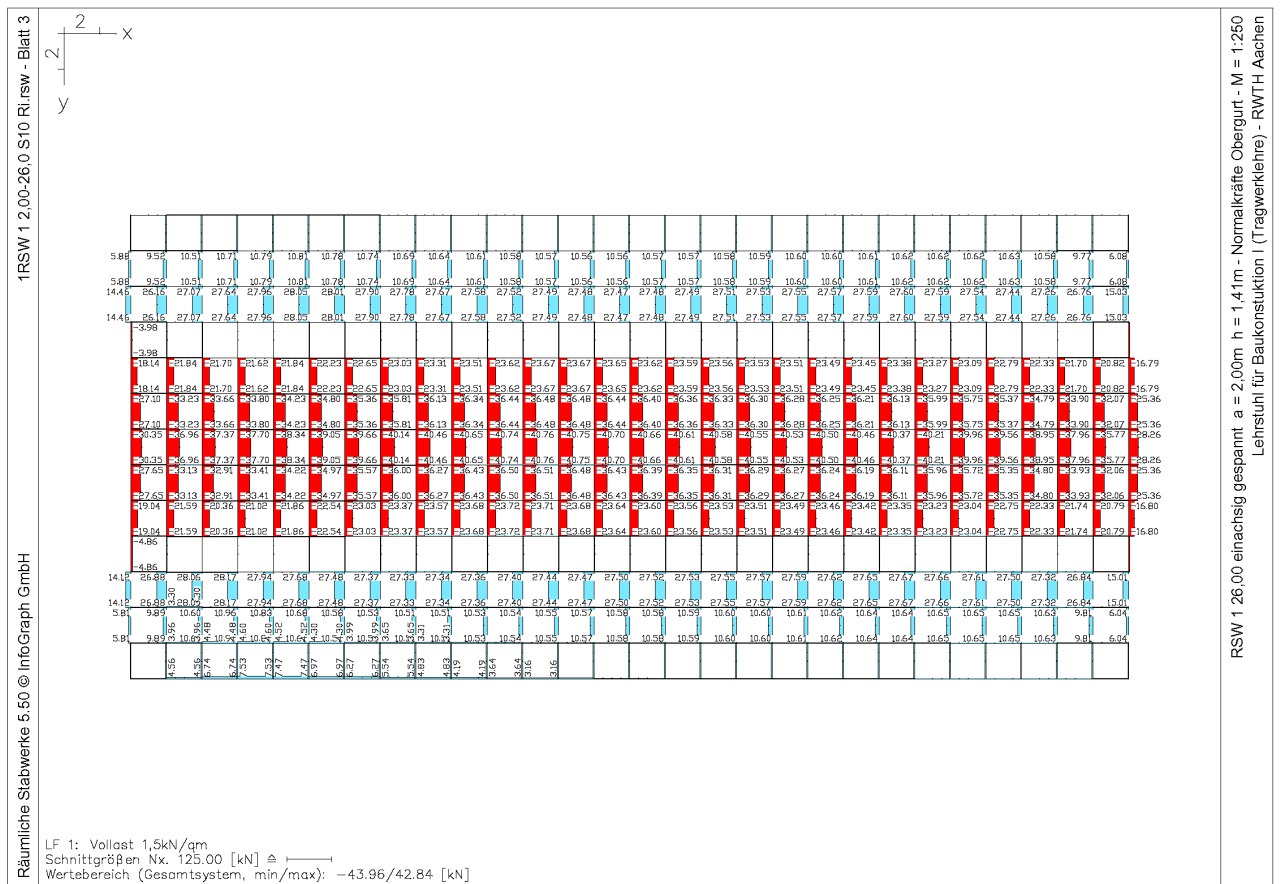


RSW 1, einachsrig gespannt mit Auskragung, Aufsicht

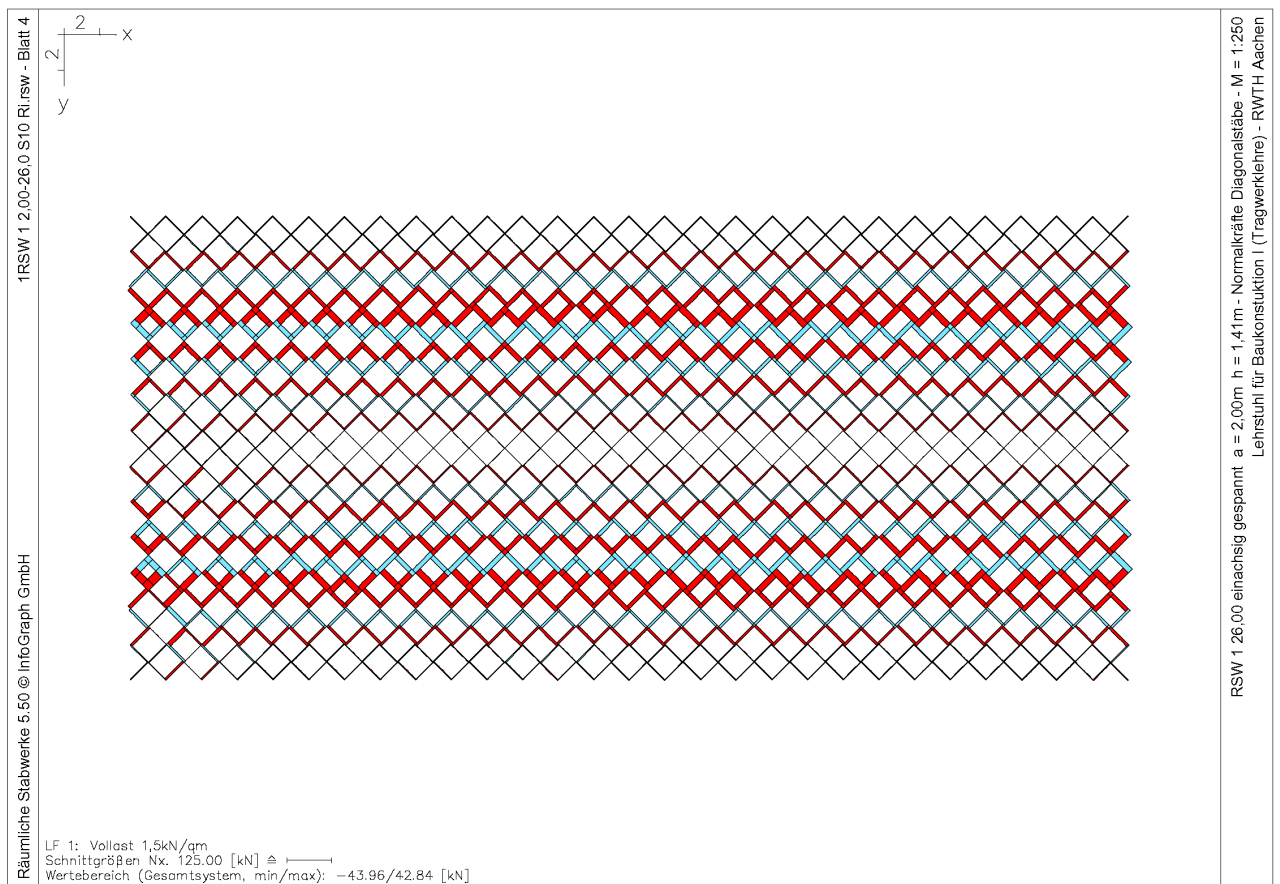


RSW 1, einachsrig gespannt mit Auskragung, Belastung Eigengewicht + Schnee

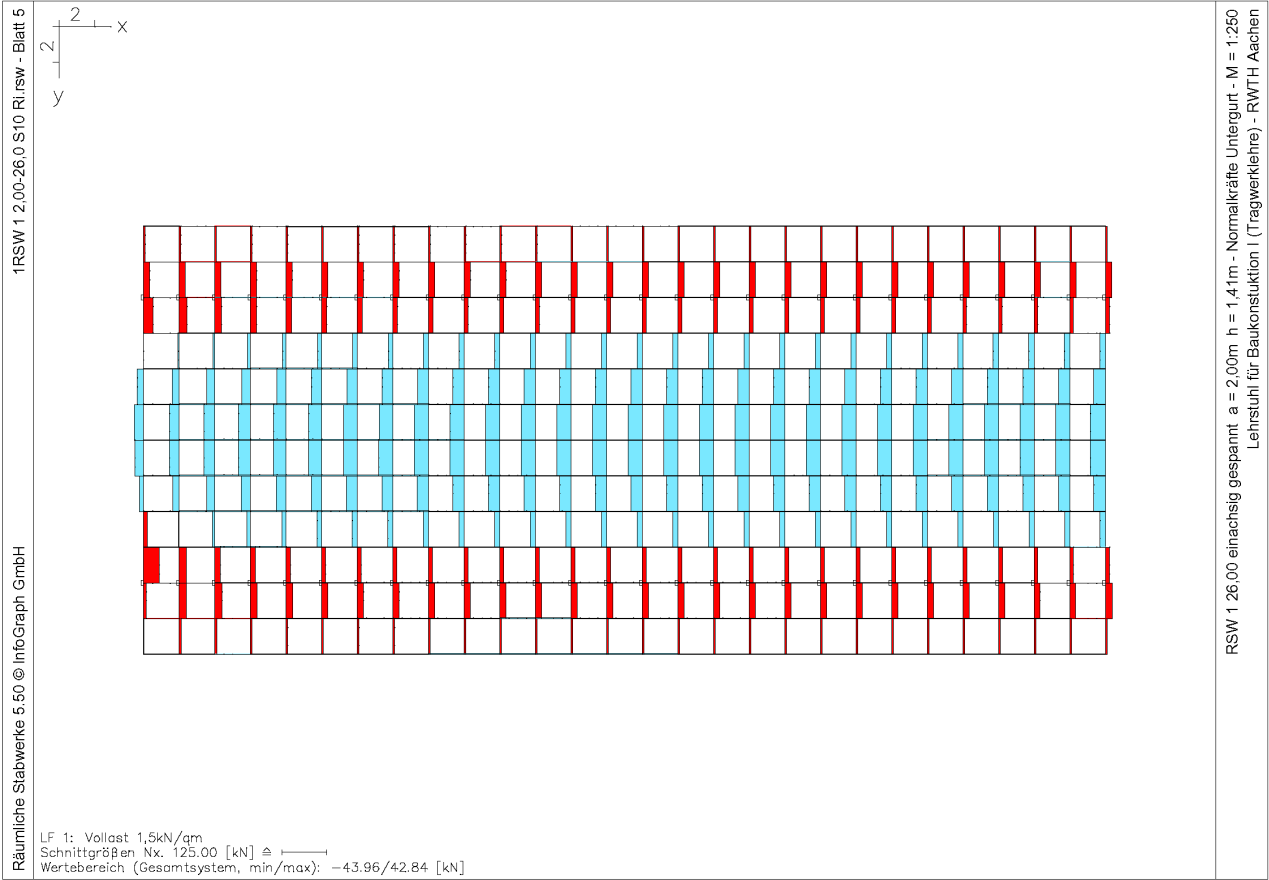
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke - RSW 1, einachsig gespannt mit Auskrugung



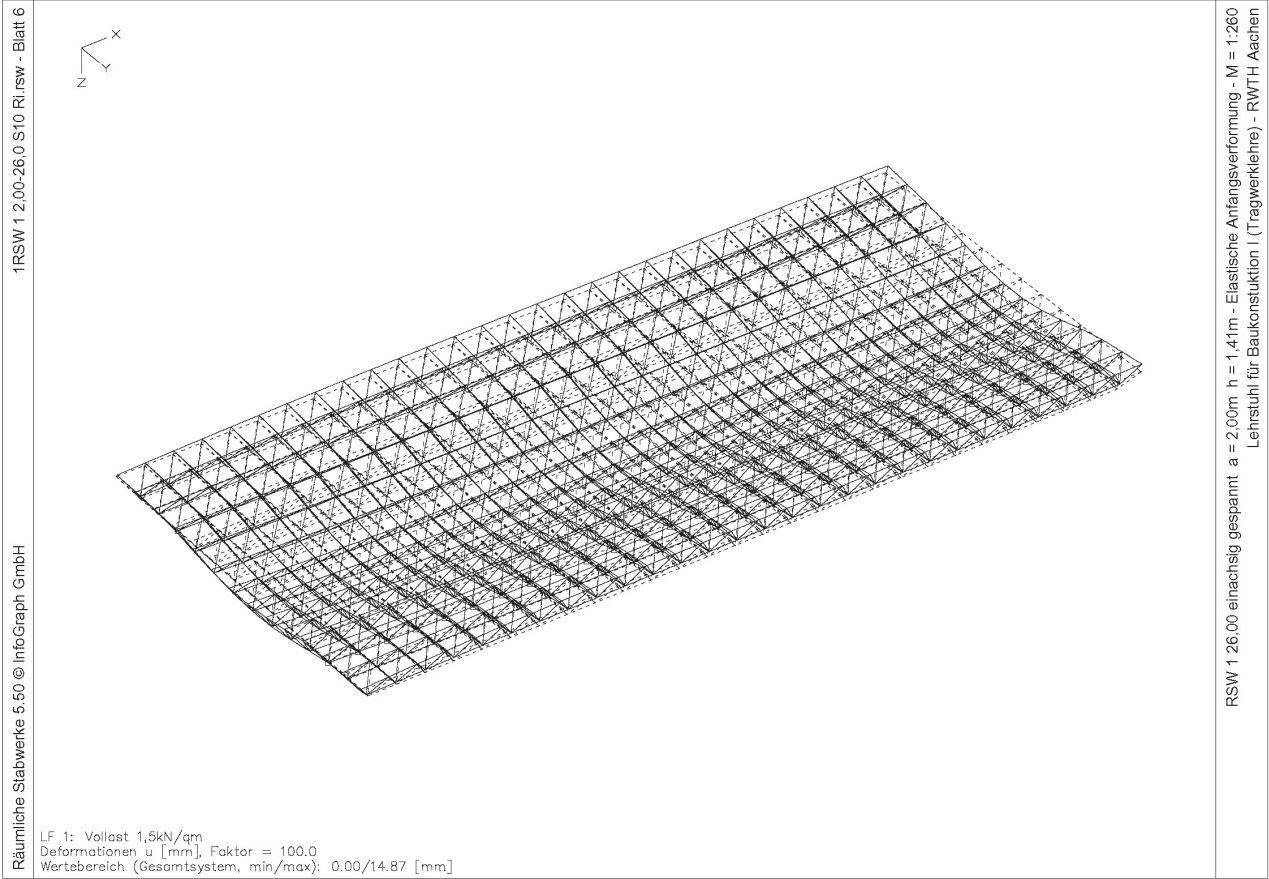
RSW 1, einachsig gespannt mit Auskrugung, Normalkräfte Obergurt



RSW 1, einachsig gespannt mit Auskrugung, Normalkräfte Diagonalstäbe



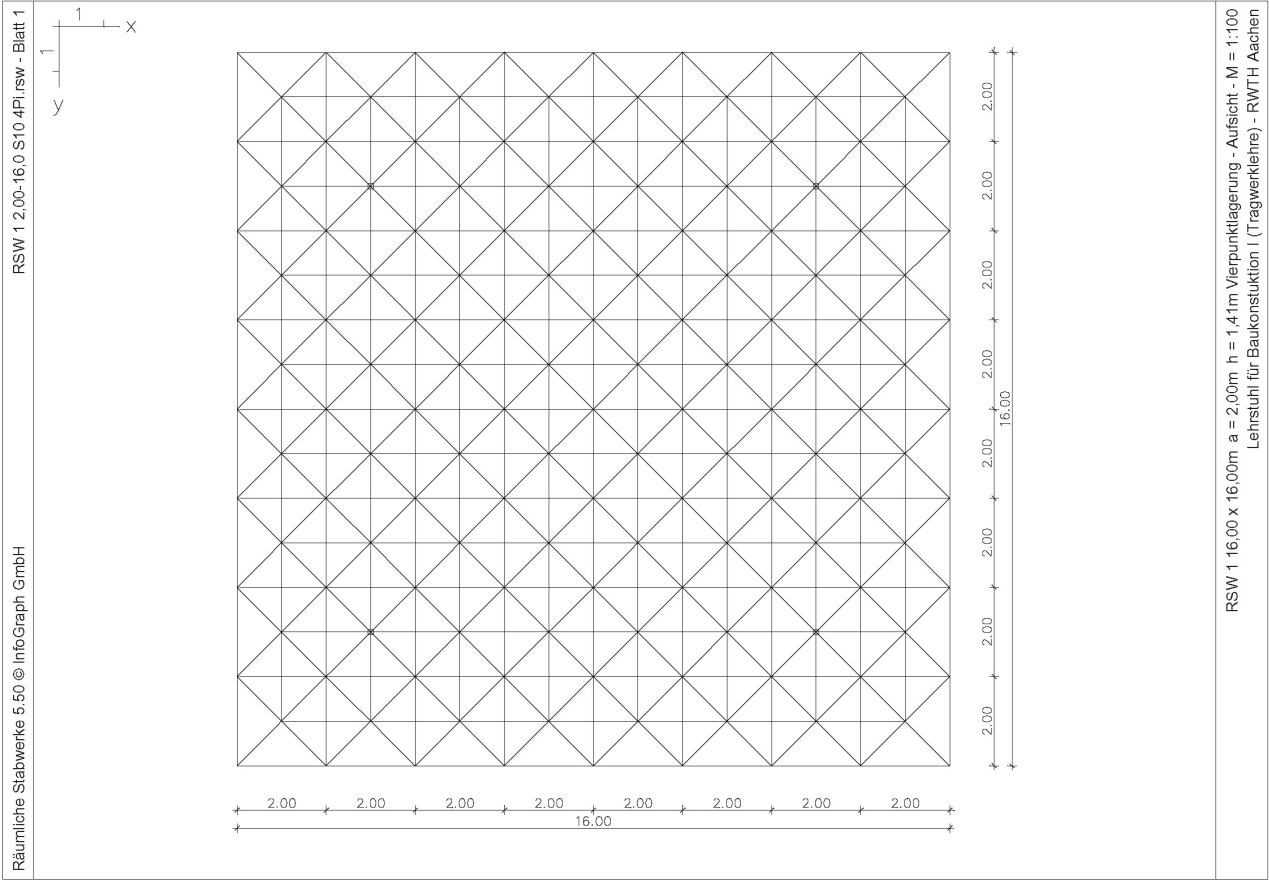
RSW 1, einachsig gespannt mit Auskragung, Normalkräfte Untergurt



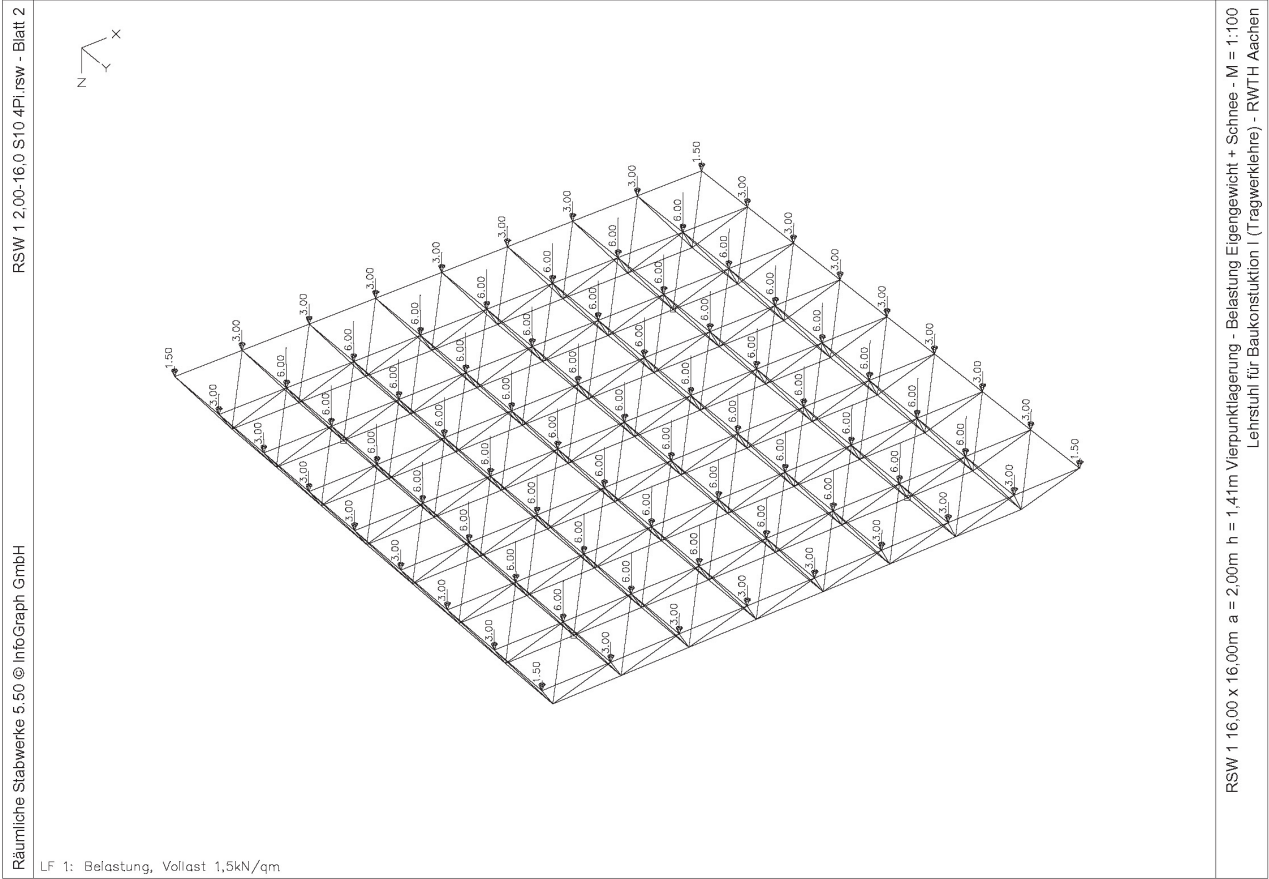
RSW 1, einachsig gespannt mit Auskragung, Elastische Anfangsverformung



RSW 1, einachsig gespannt mit Auskragung, Elastische Anfangsverformung

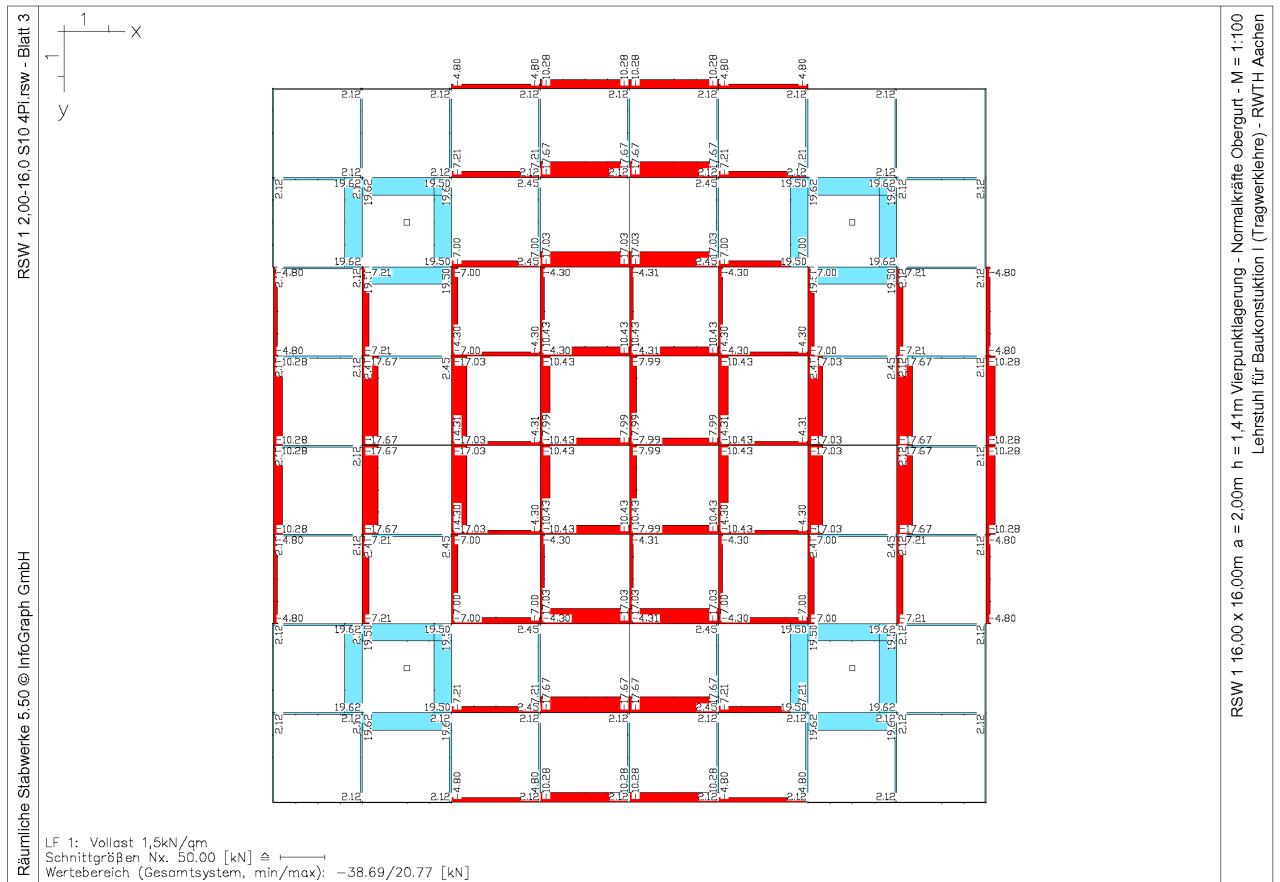


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskrägung, Aufsicht

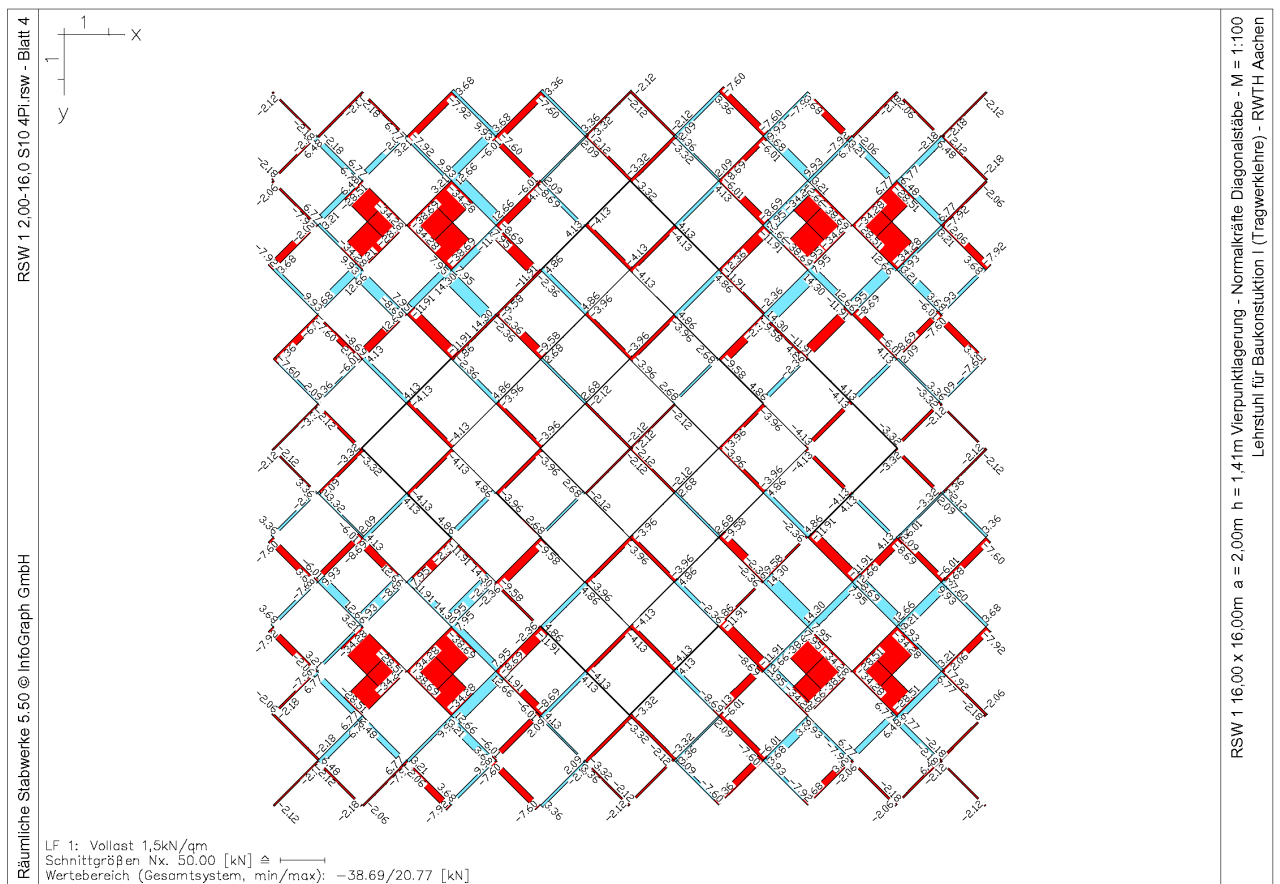


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskrägung, Belastung Eigengewicht + Schnee

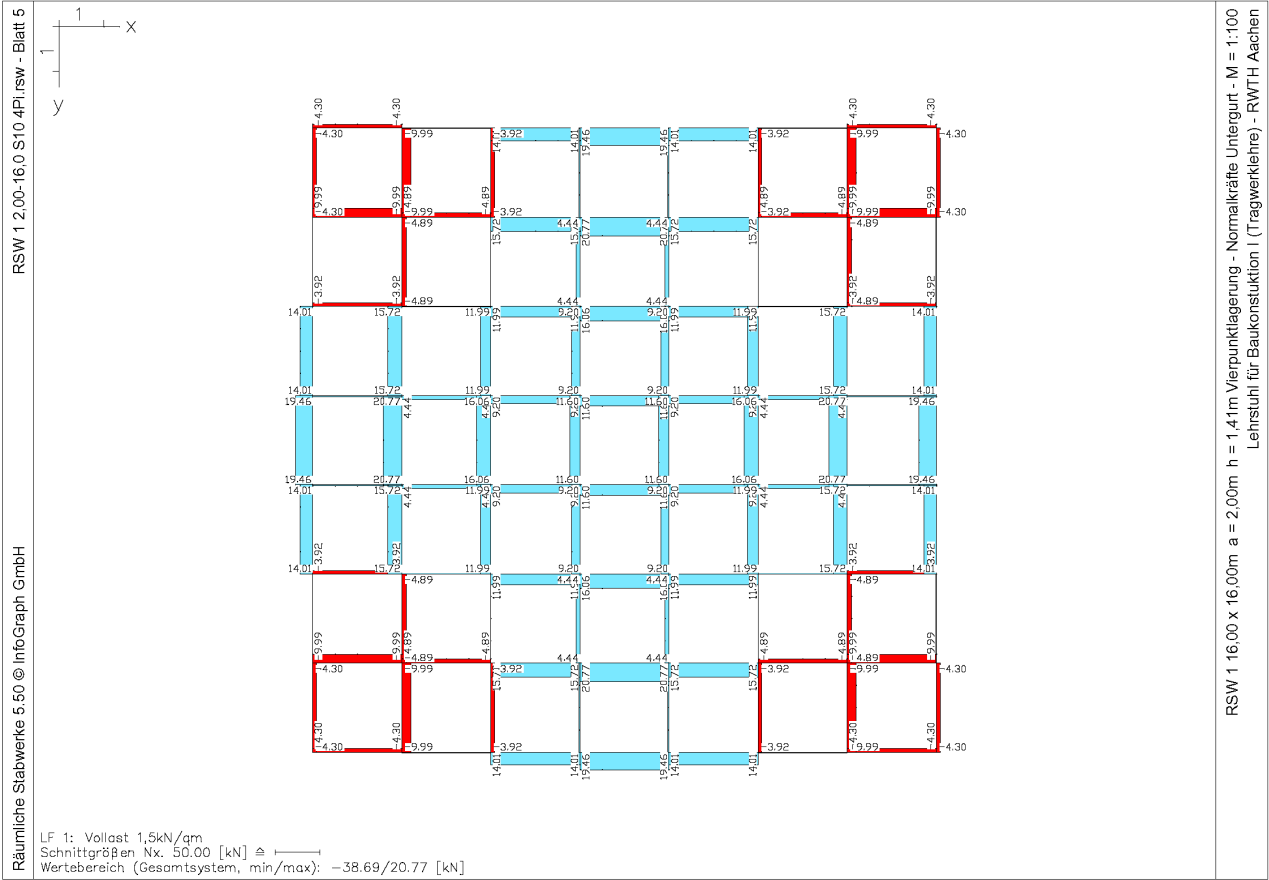
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke - RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung

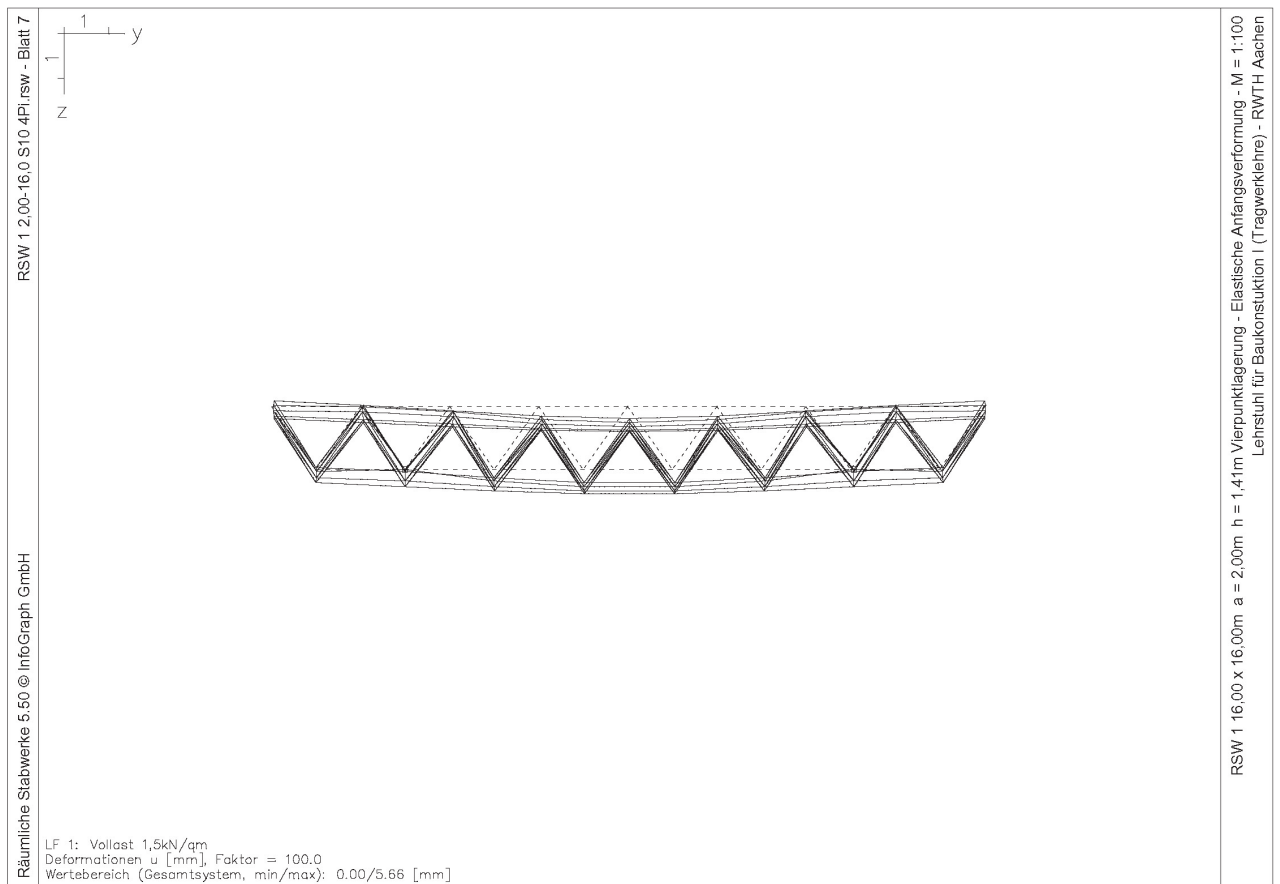


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Normalkräfte Obergurt

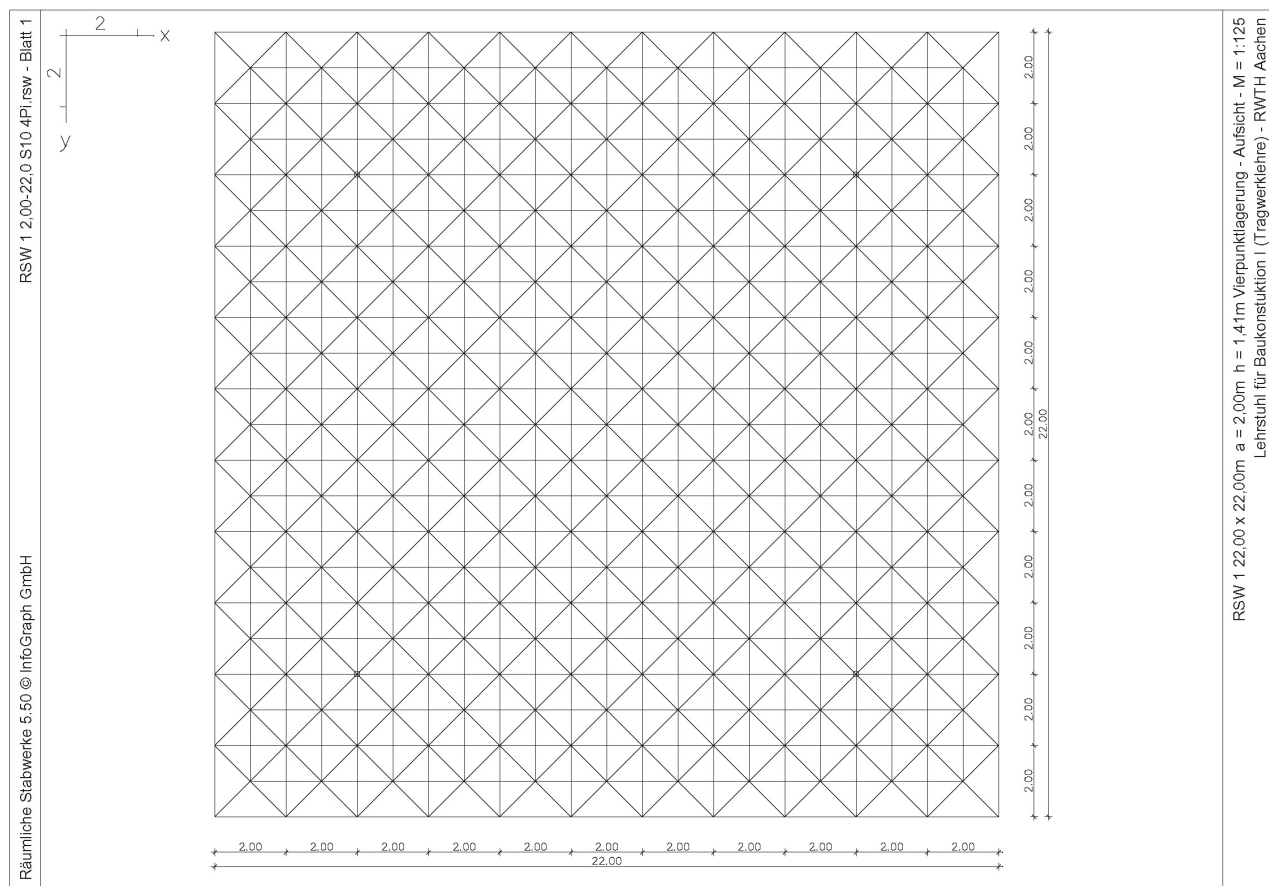


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Normalkräfte Diagonalstäbe

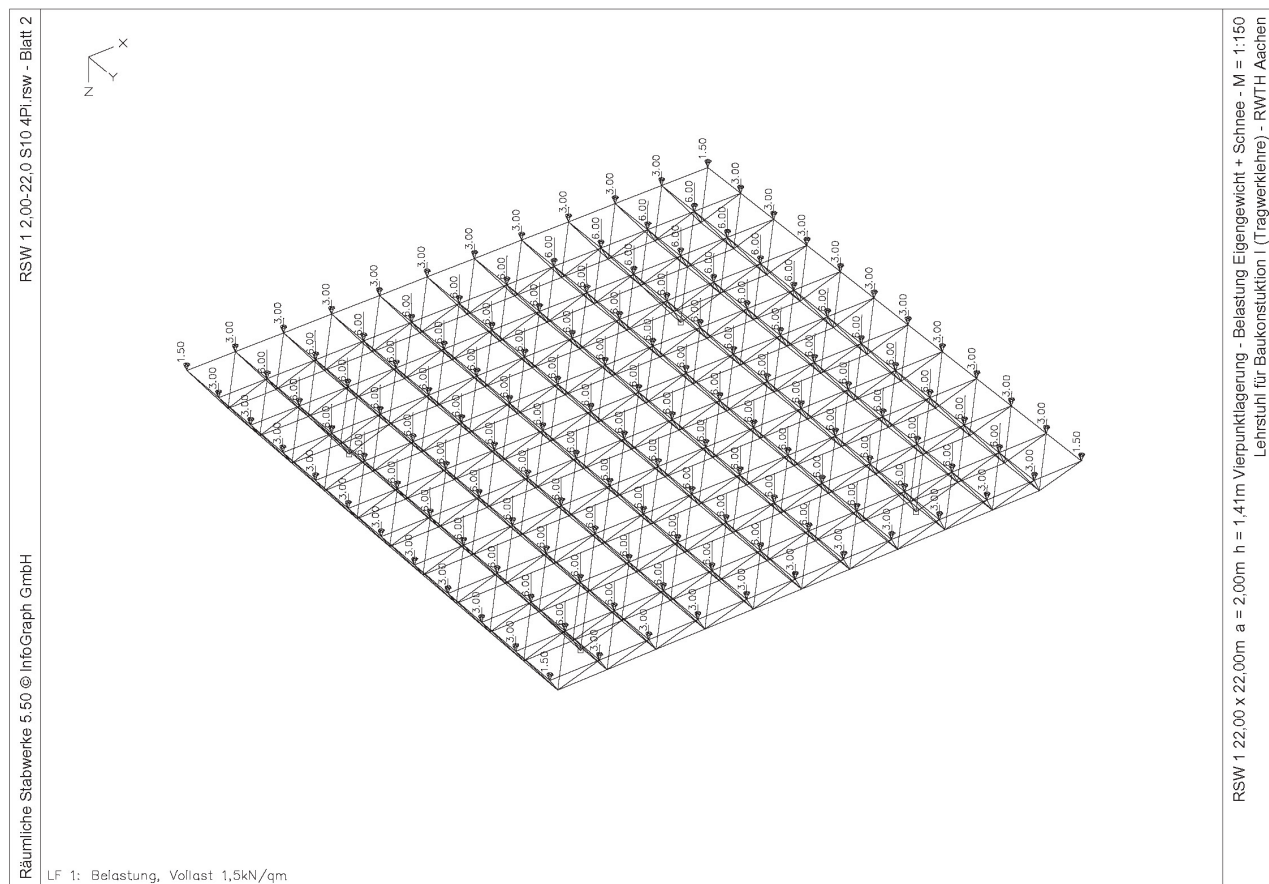




RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Elastische Anfangsverformung

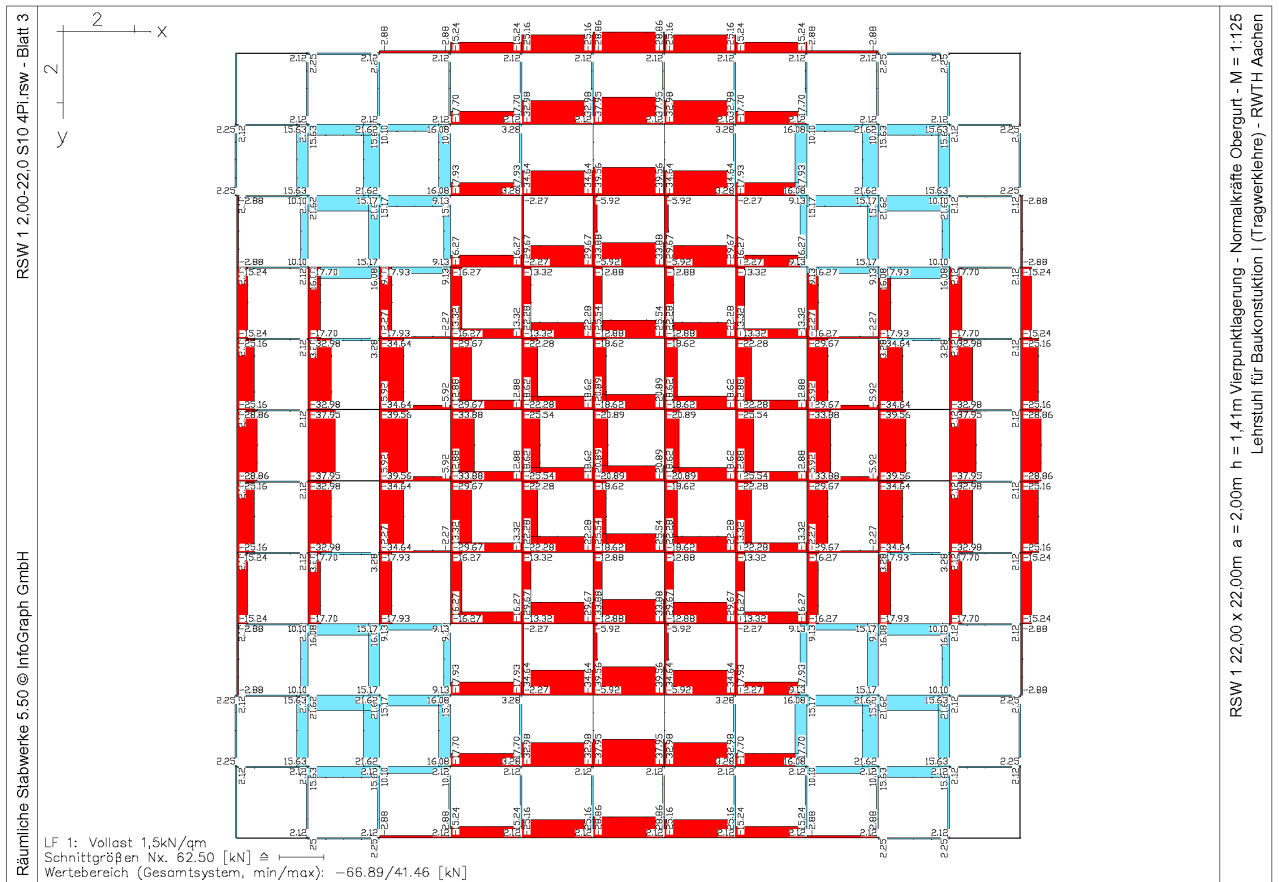


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Aufsicht

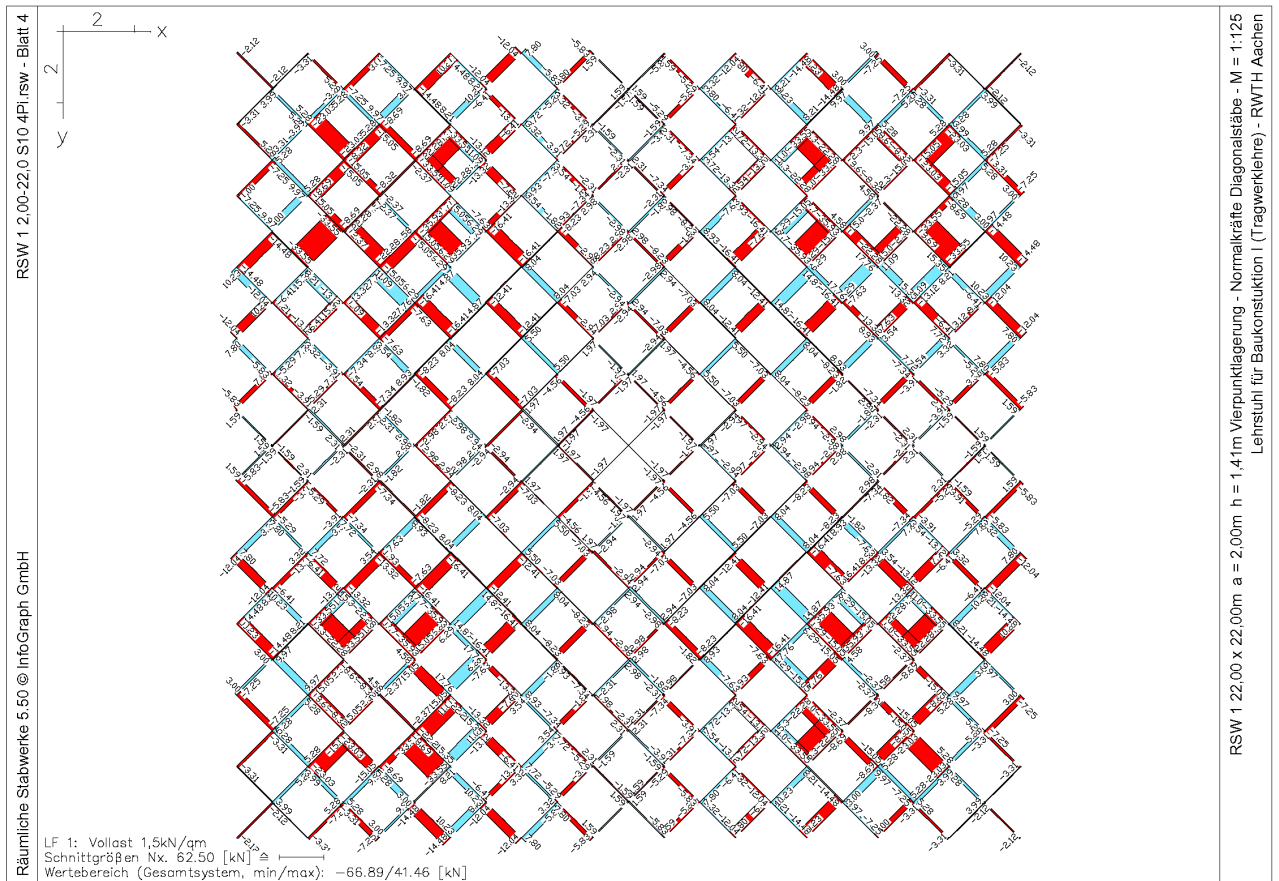


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Belastung Eigengewicht + Schnee

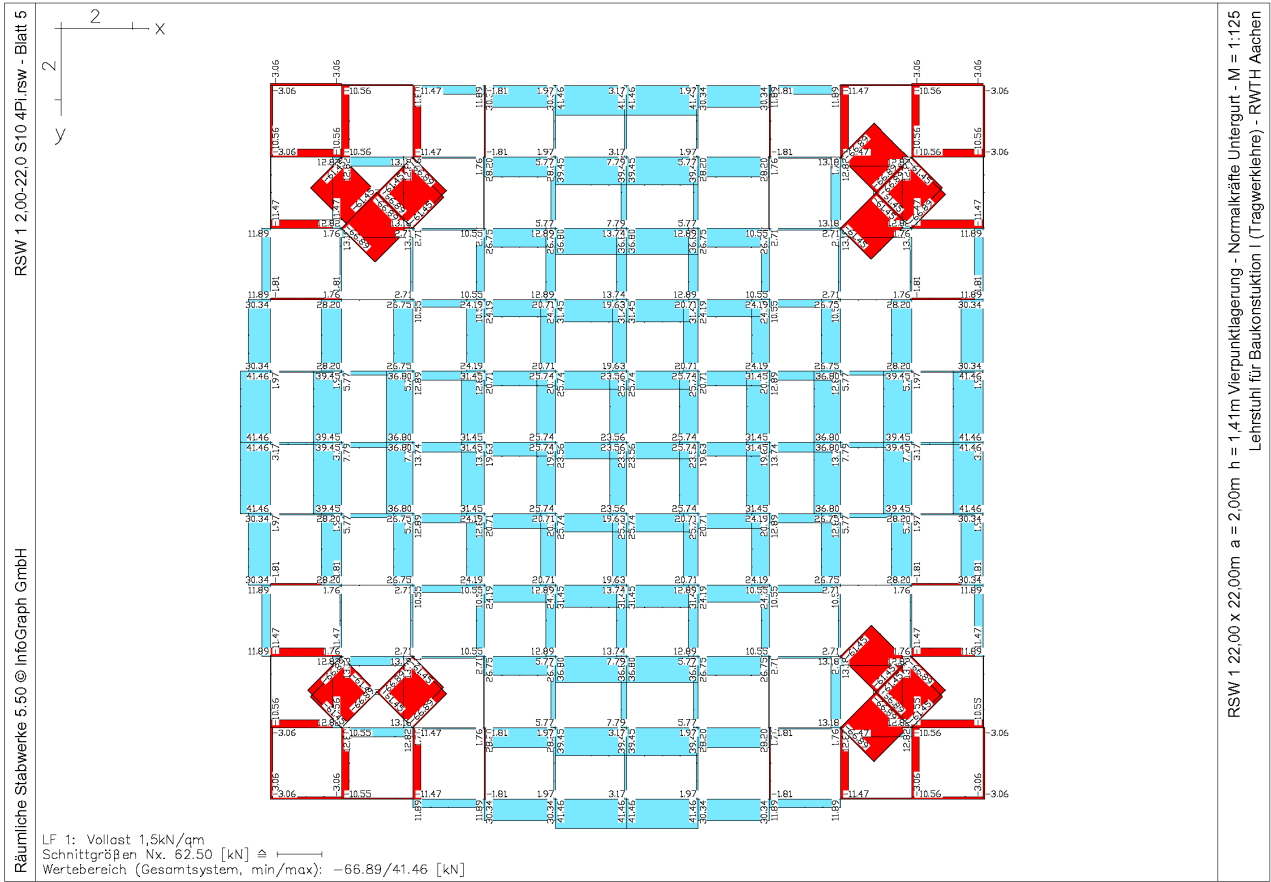
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke - RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung

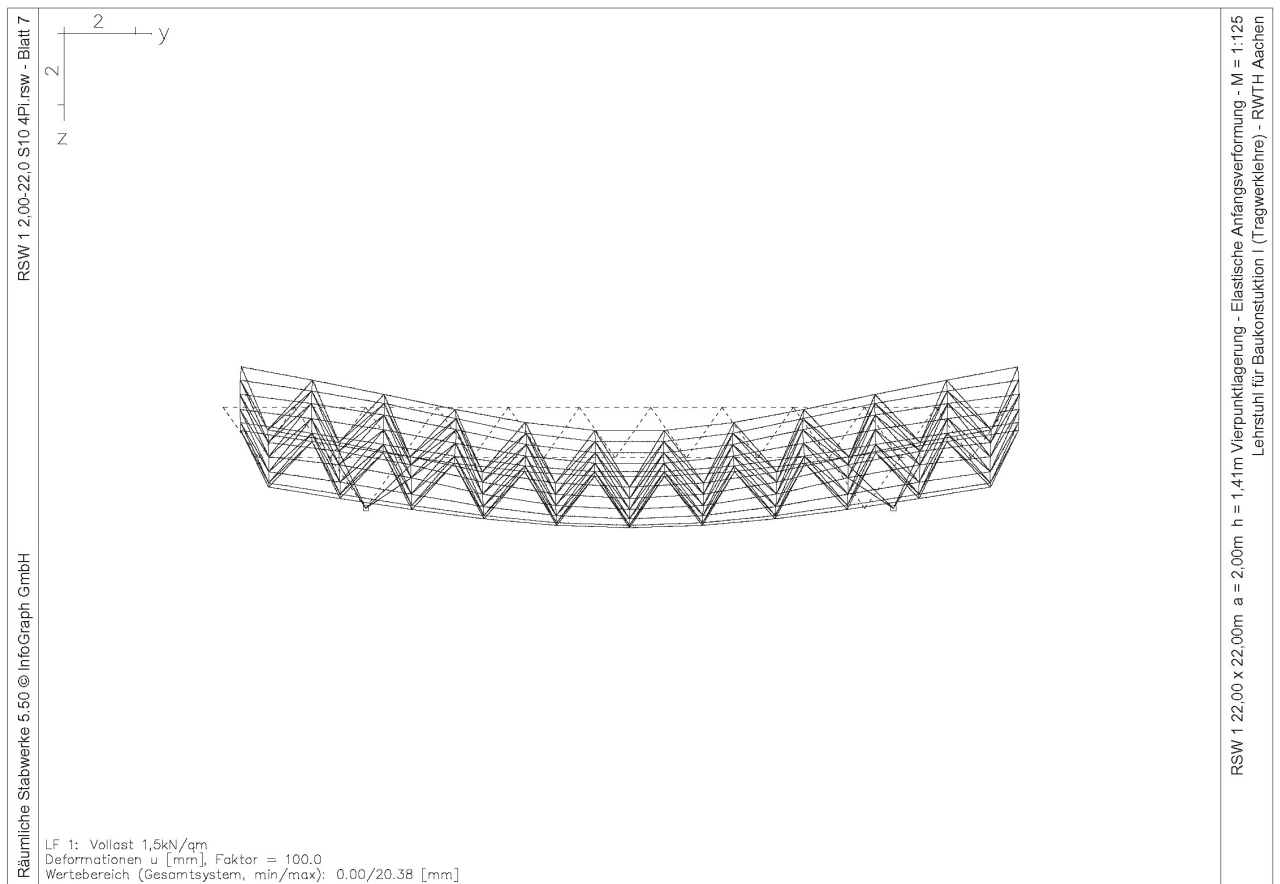


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Normalkräfte Obergurt

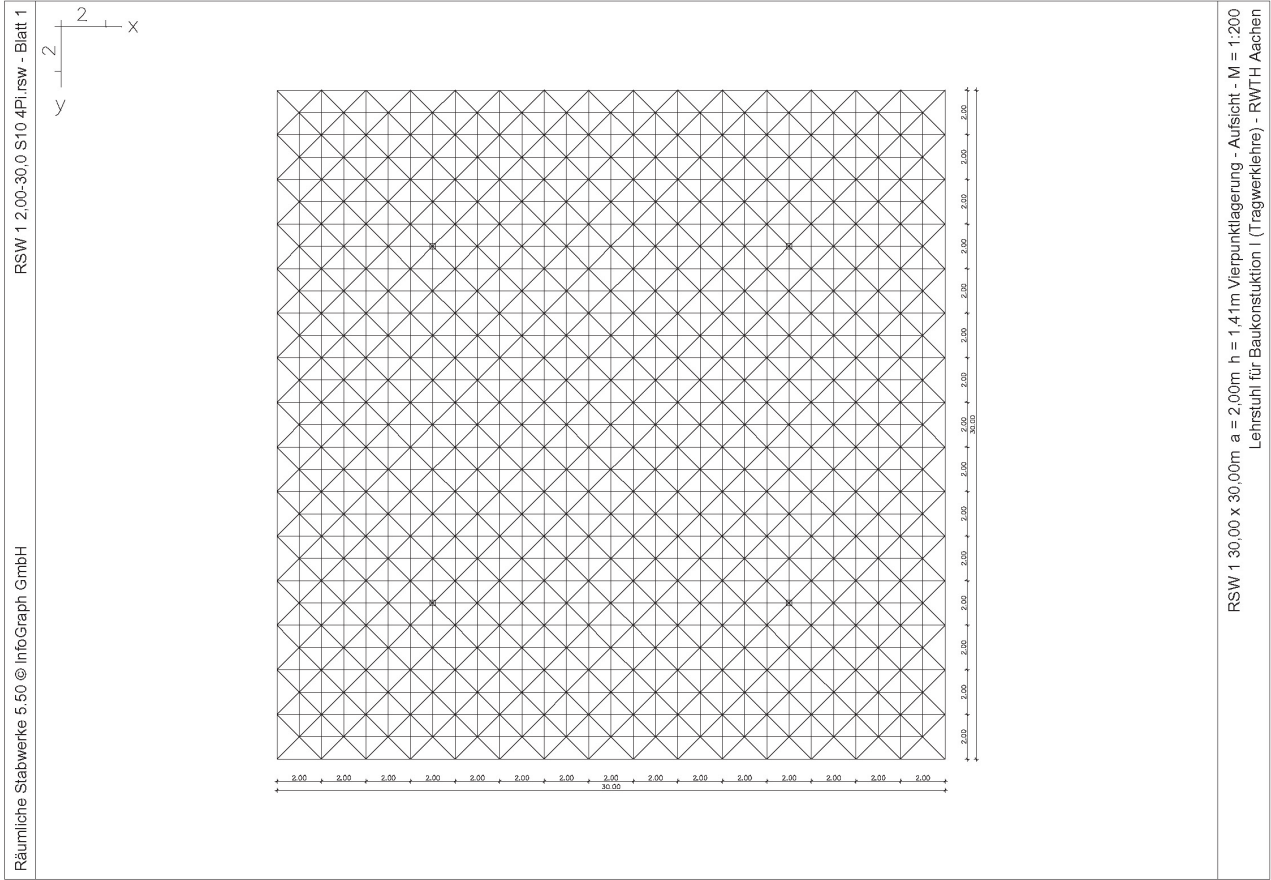


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Normalkräfte Diagonalstäbe

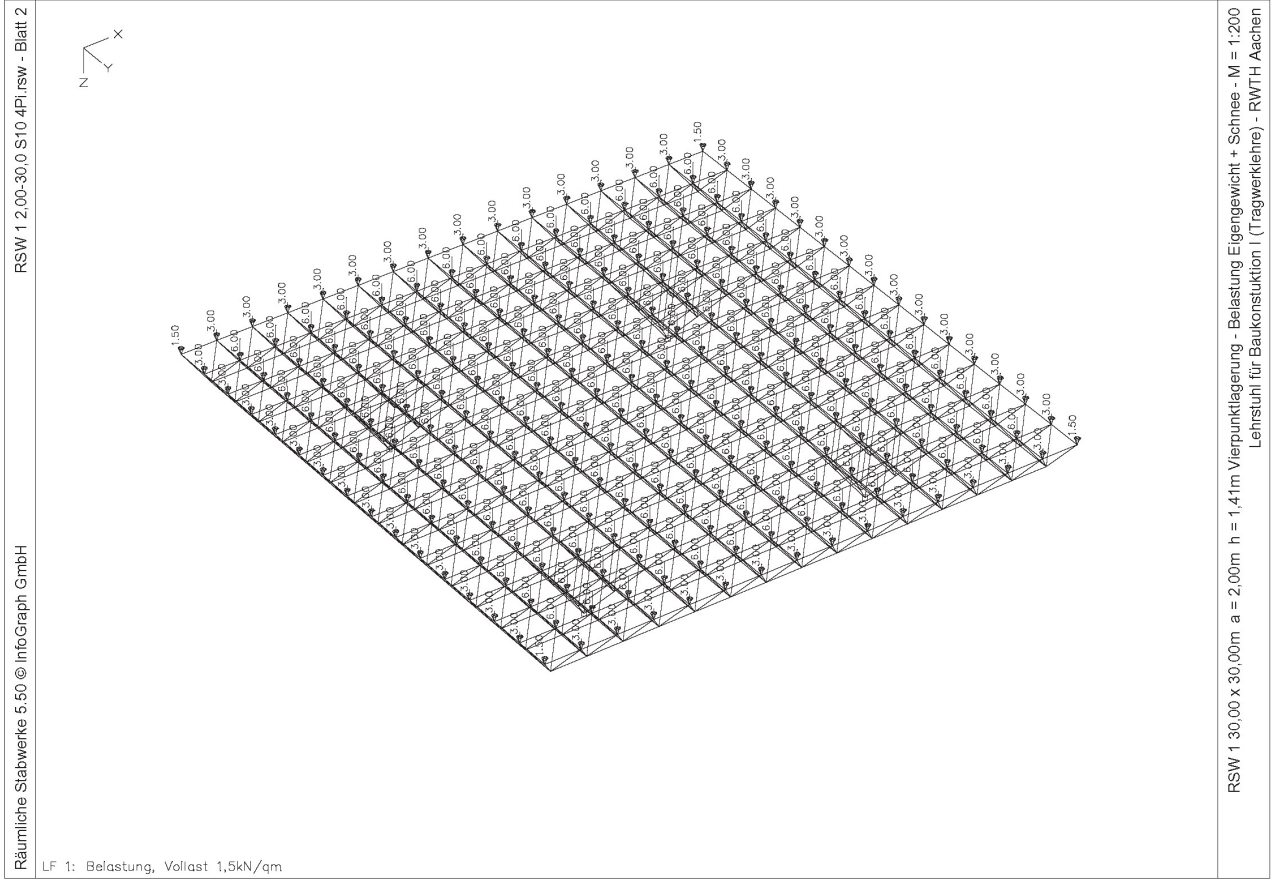




RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Elastische Anfangsverformung

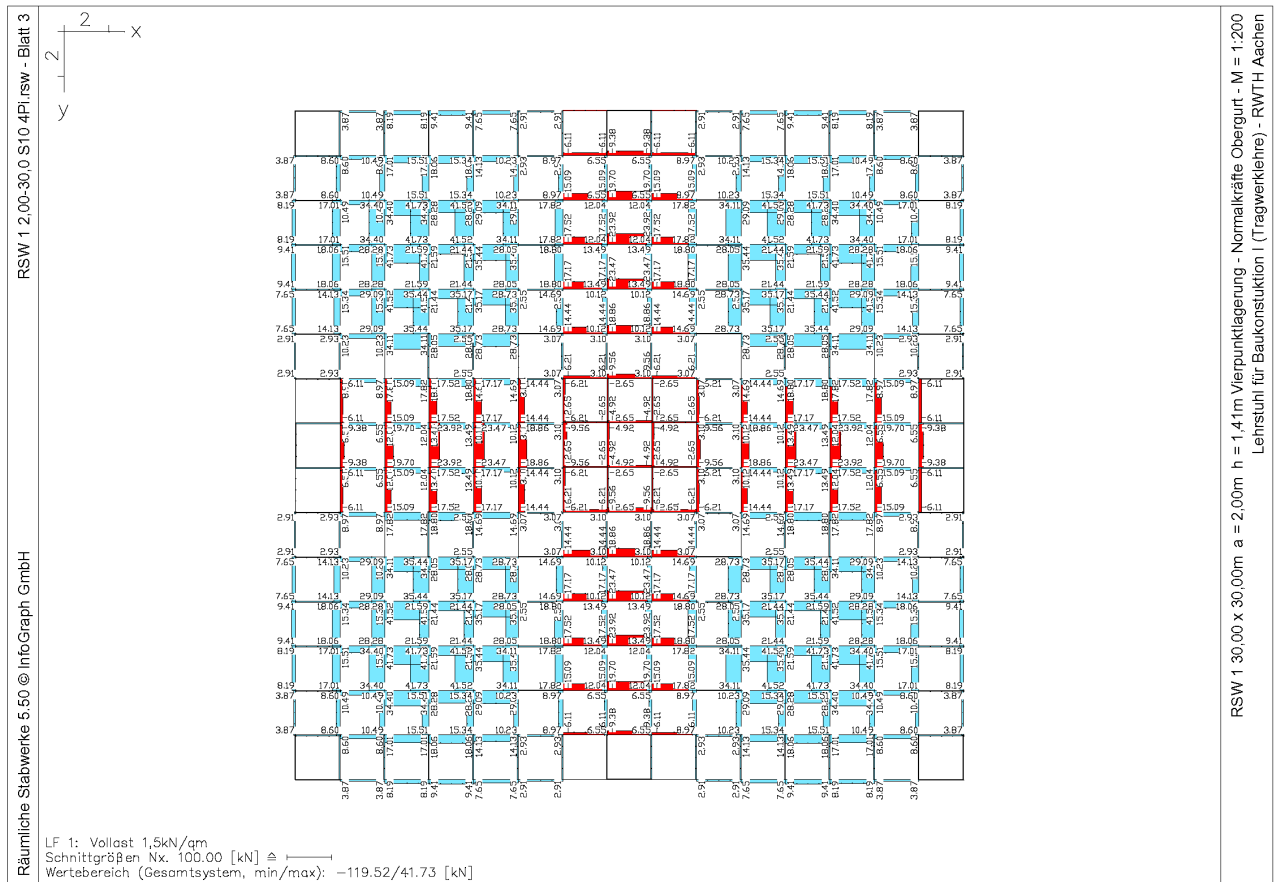


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Aufsicht

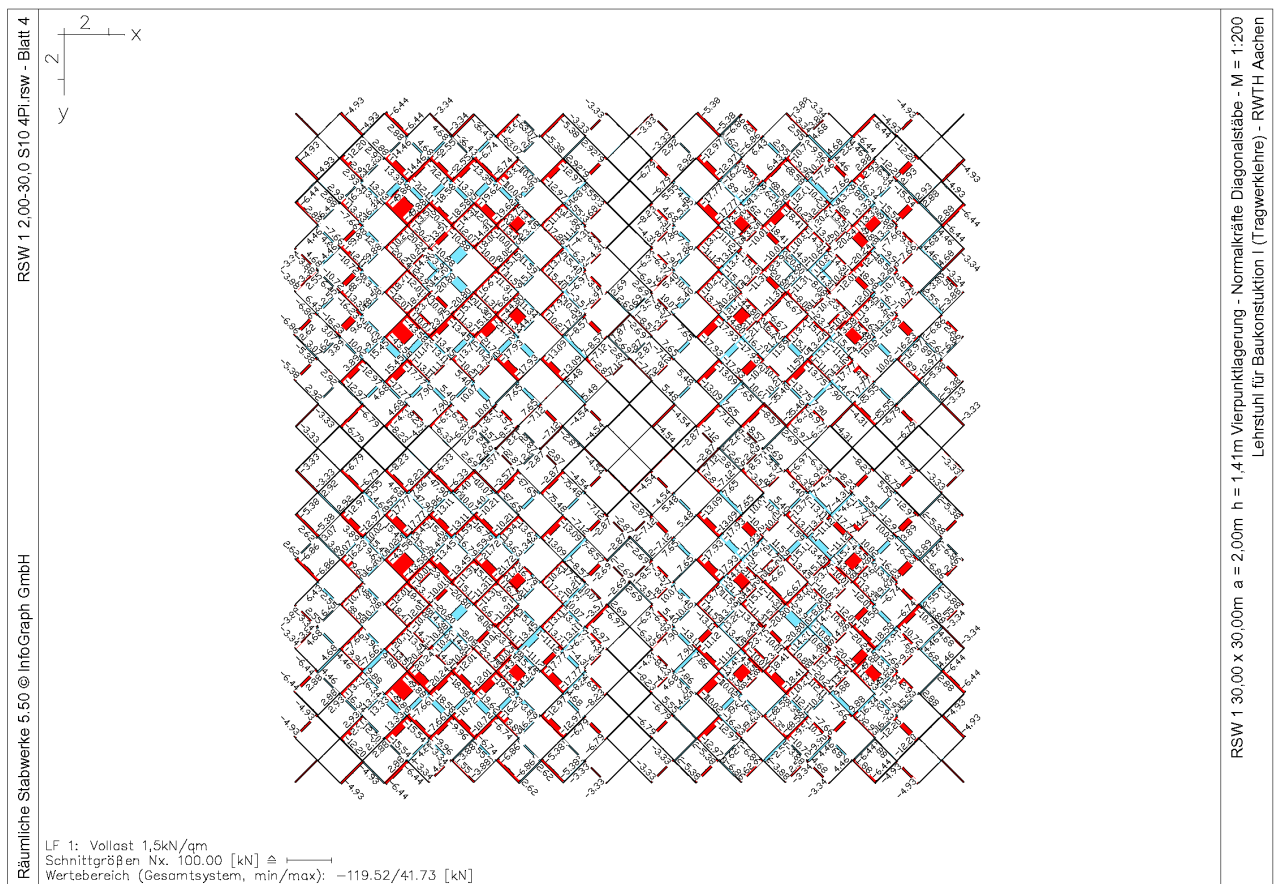


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Belastung Eigengewicht + Schnee

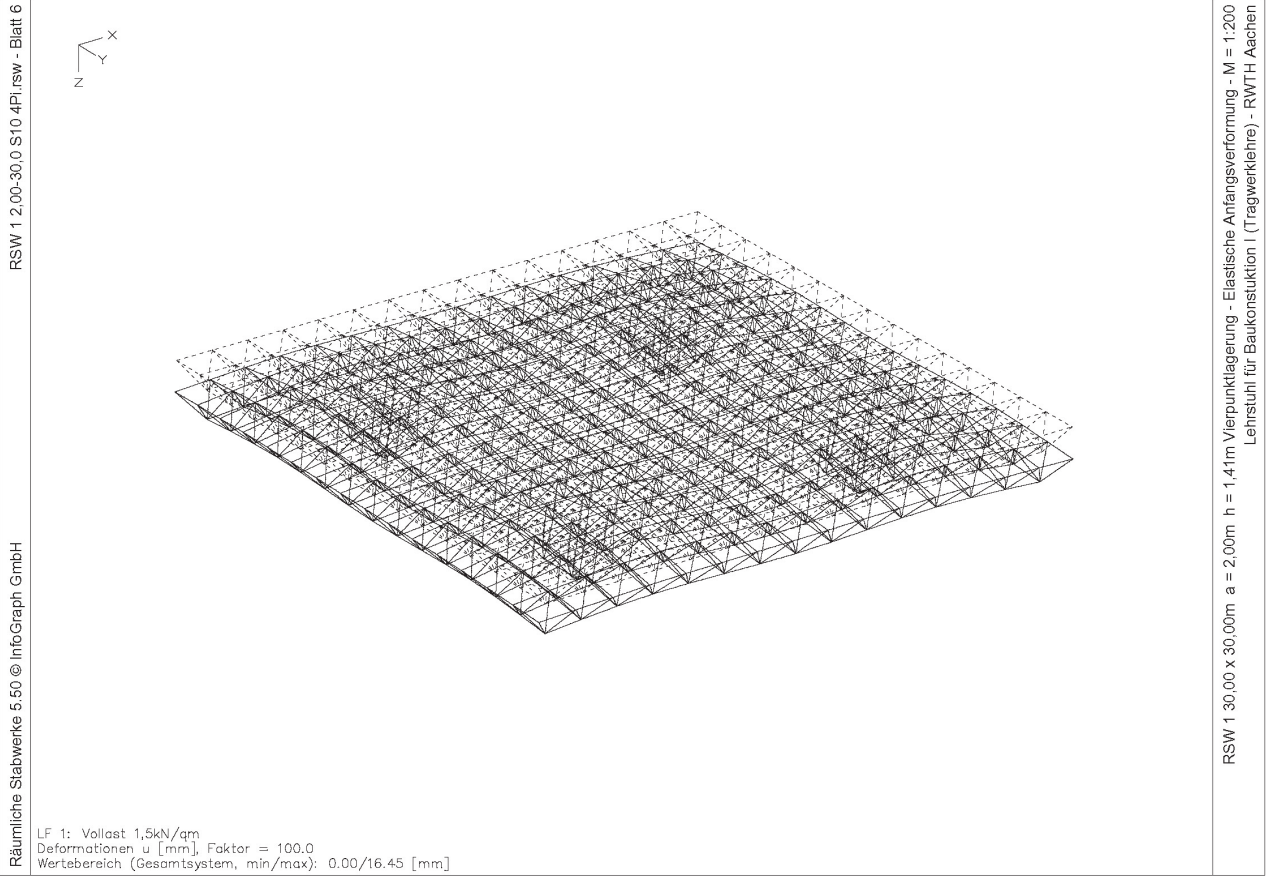
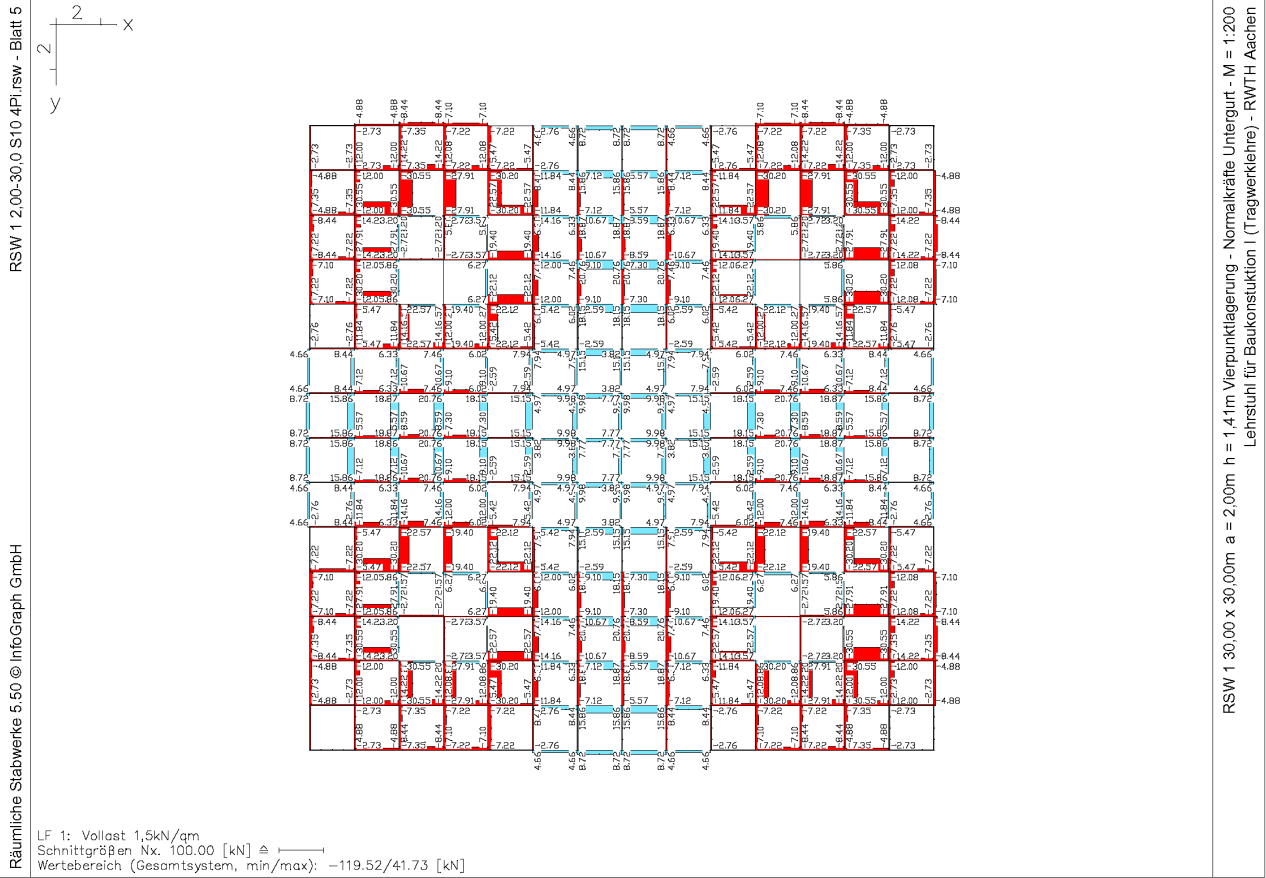
10.2 Ebene Knotenstabtragwerke - RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung



RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Normkräfte Obergurt

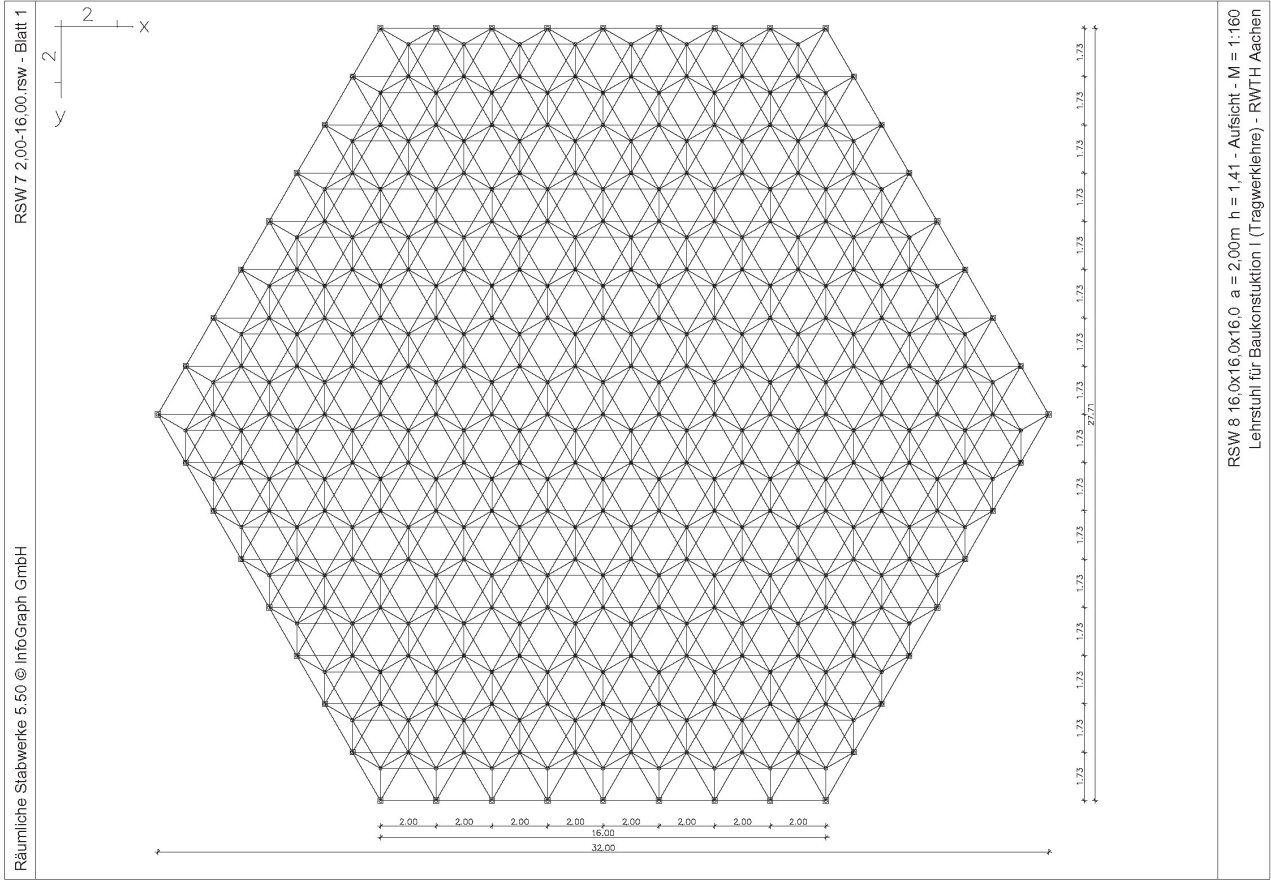


RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Normkräfte Diagonalstäbe

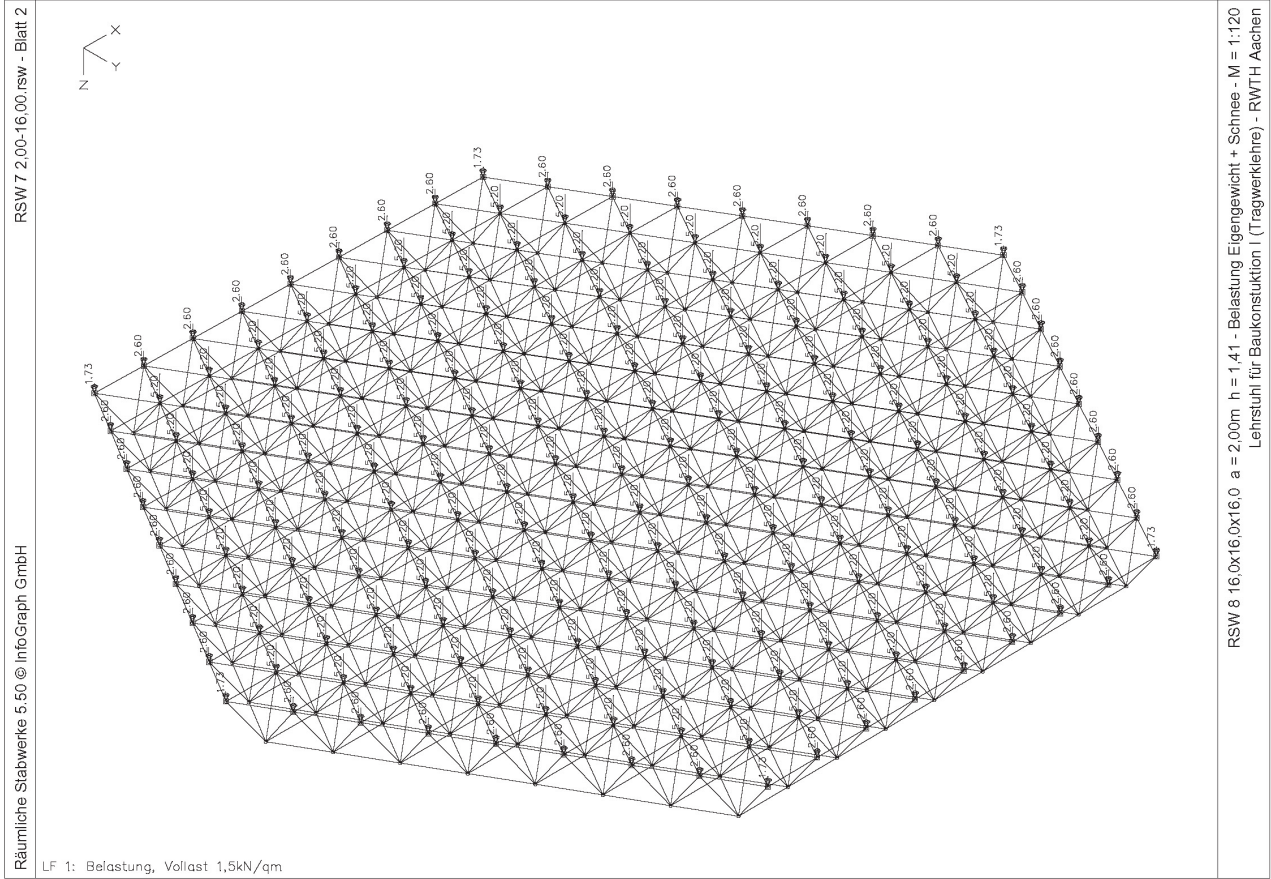




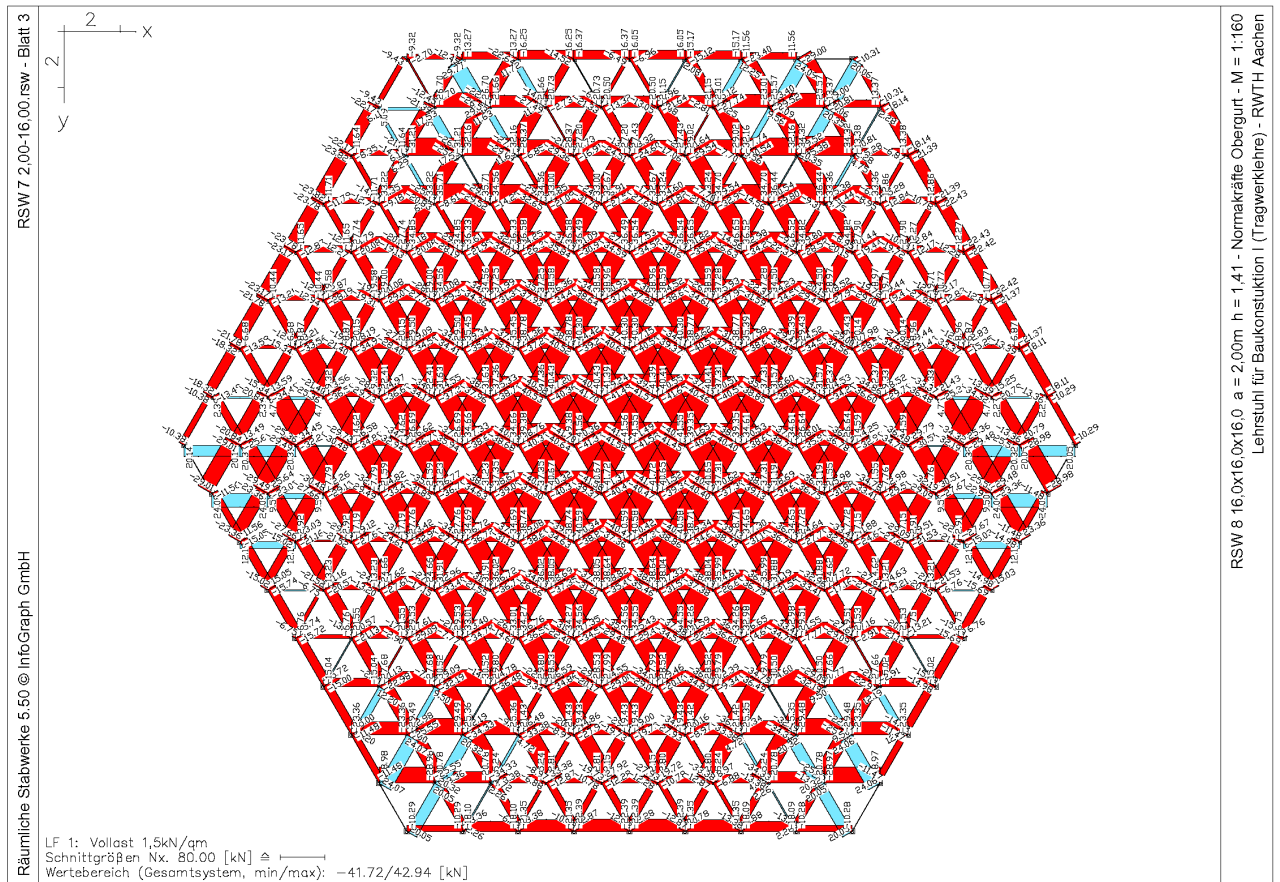
RSW 1, Vierpunktlagerung mit Auskragung, Elastische Anfangsverformung



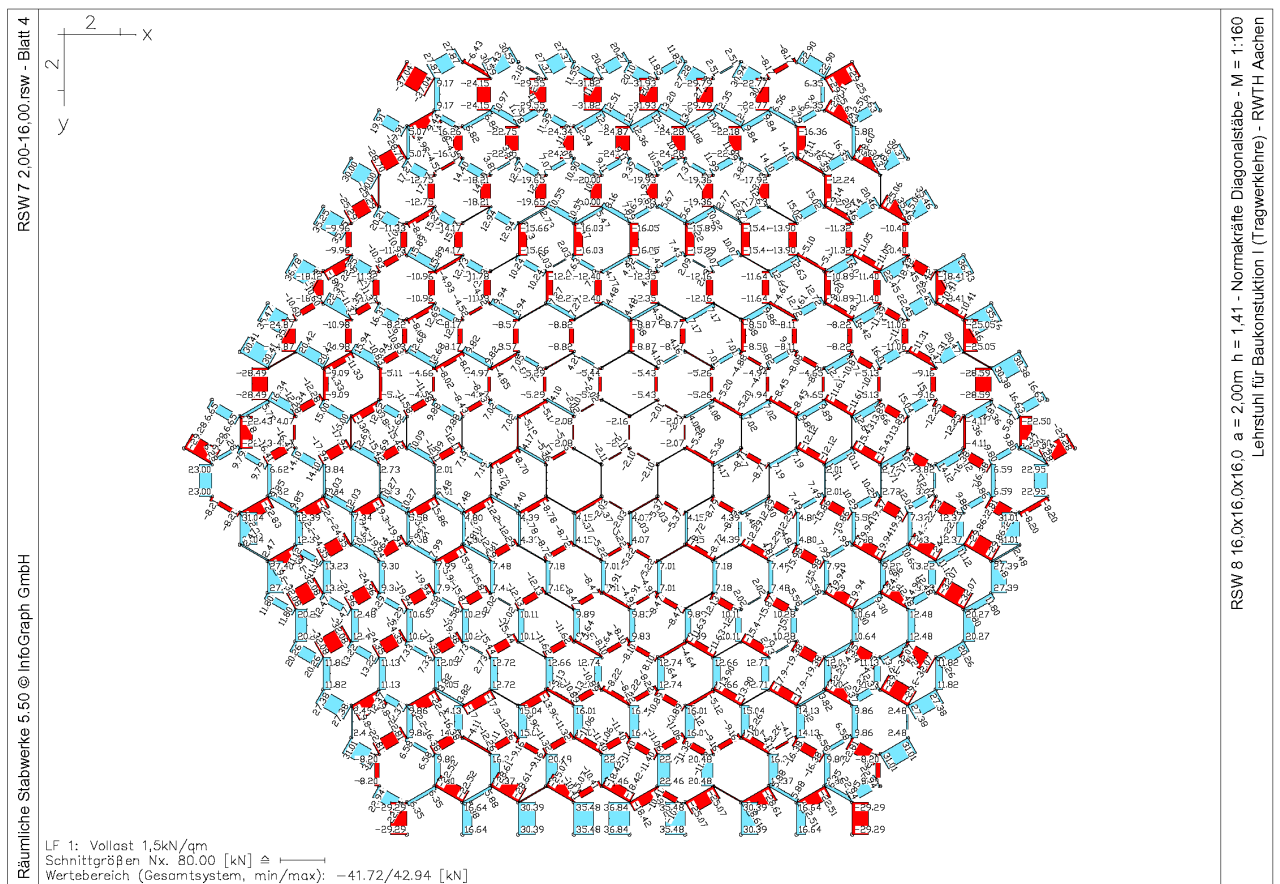
RSW 8, Umfanglagerung, Aufsicht



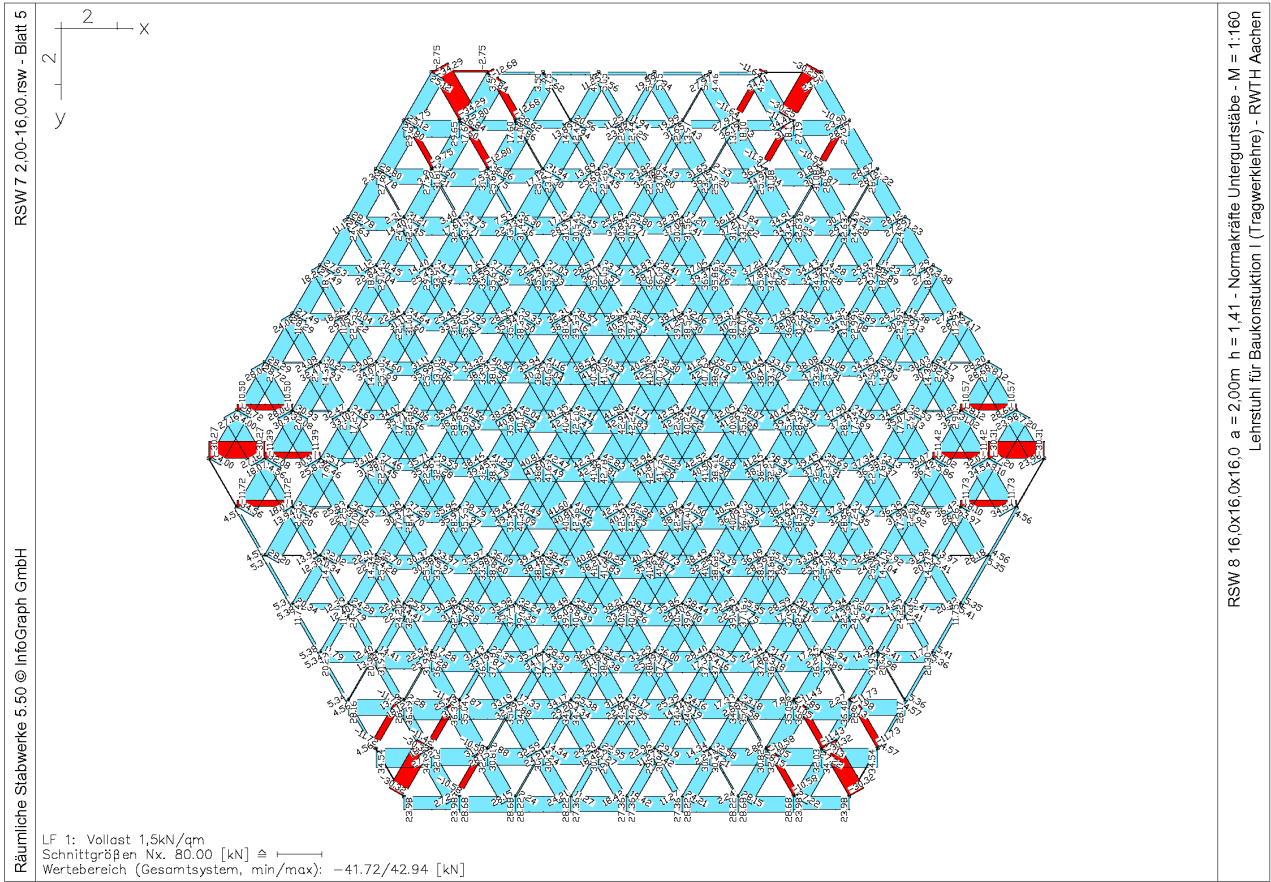
RSW 8, Umfanglagerung, Belastung Eigengewicht + Schnee

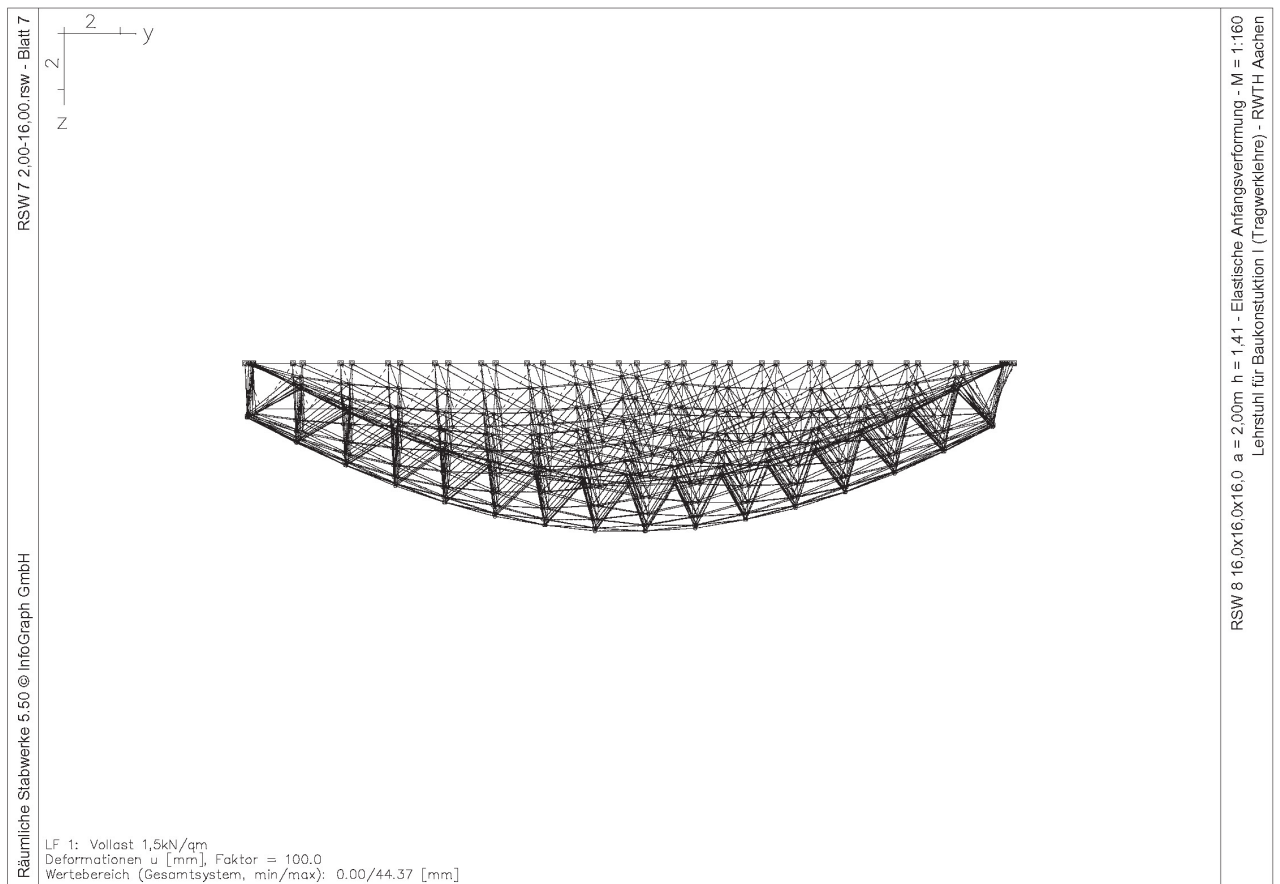


RSW 8, Umfanglagerung, Normkräfte Obergurt



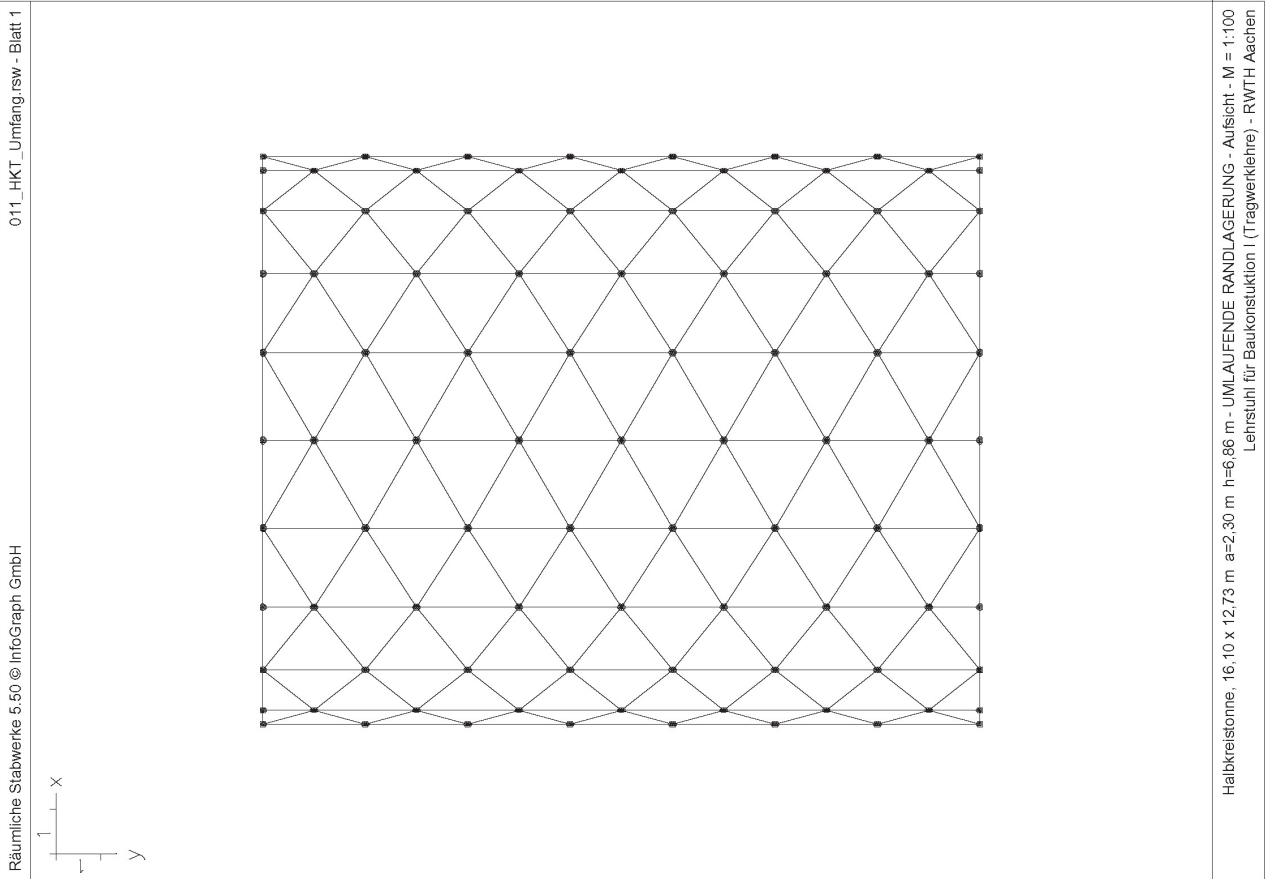
RSW 8, Umfanglagerung, Normkräfte Diagonalstäbe

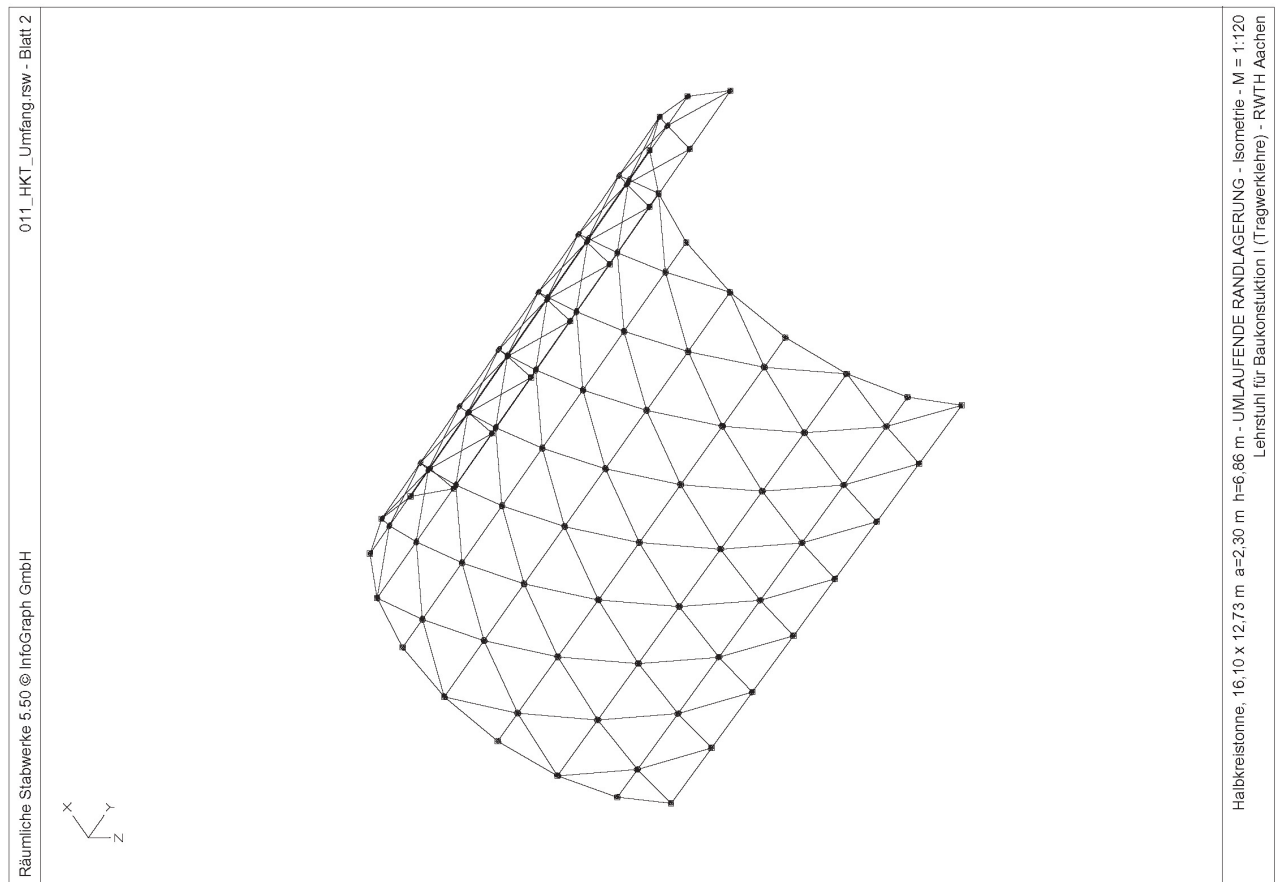




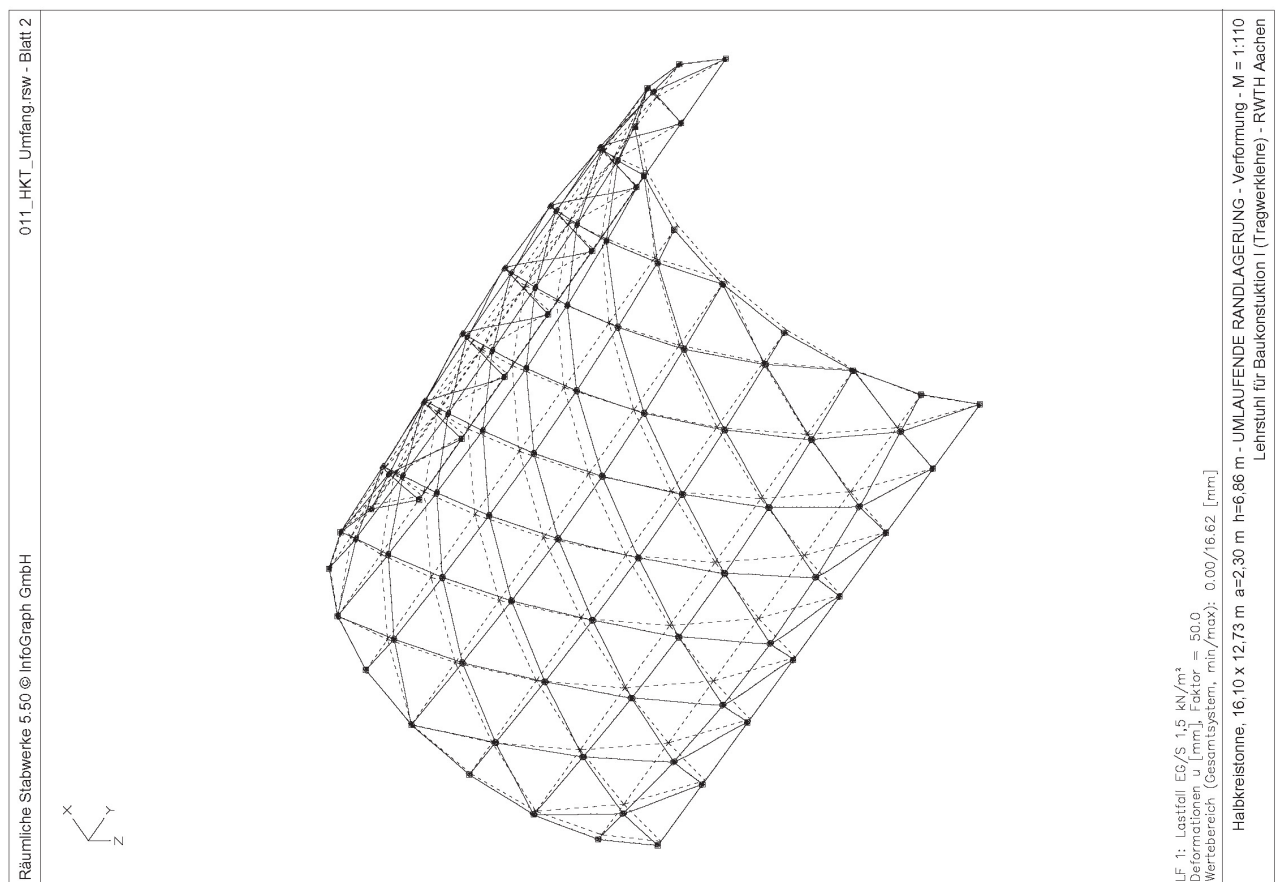
RSW 8, Umfanglagerung, Elastische Anfangsverformung

11.3 Gekrümmte Knotenstabtragwerke

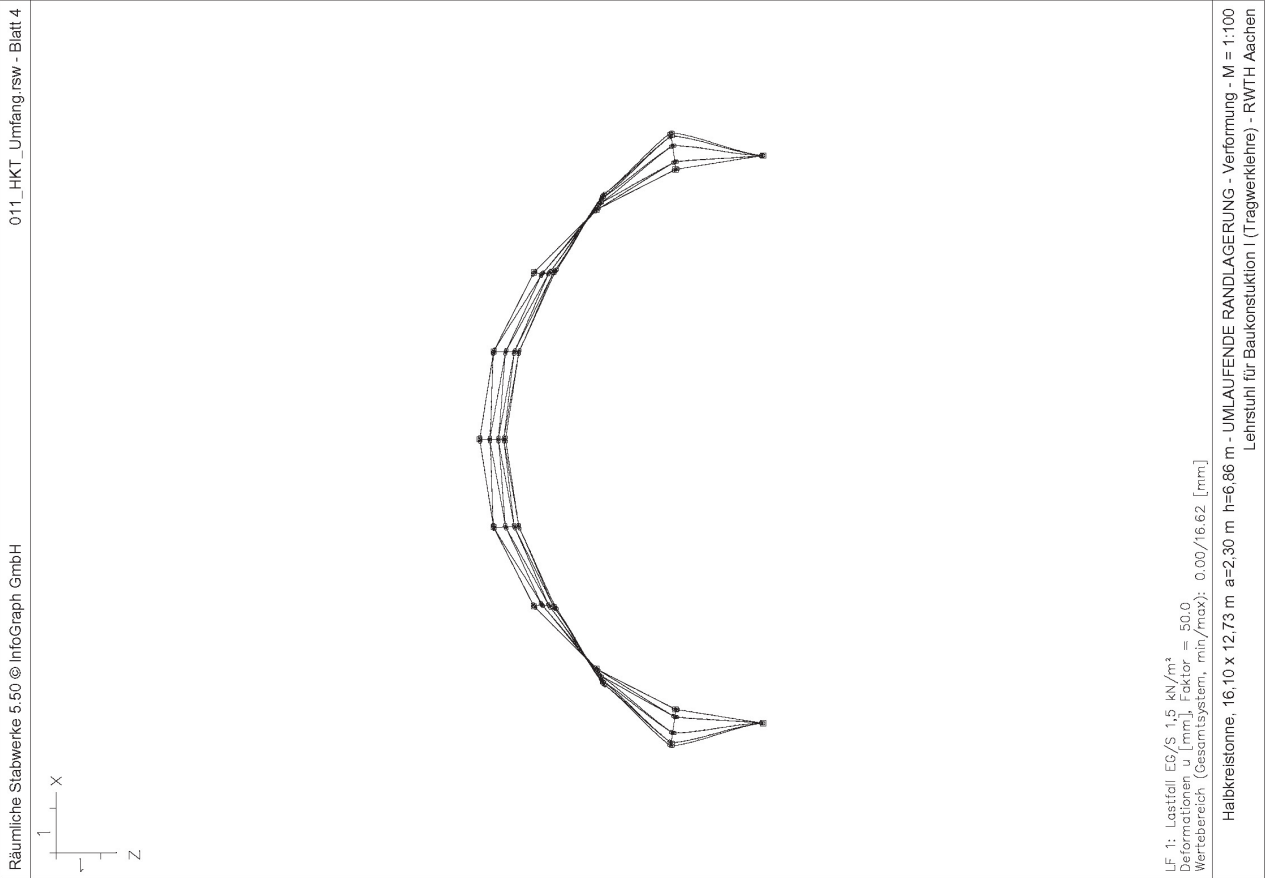




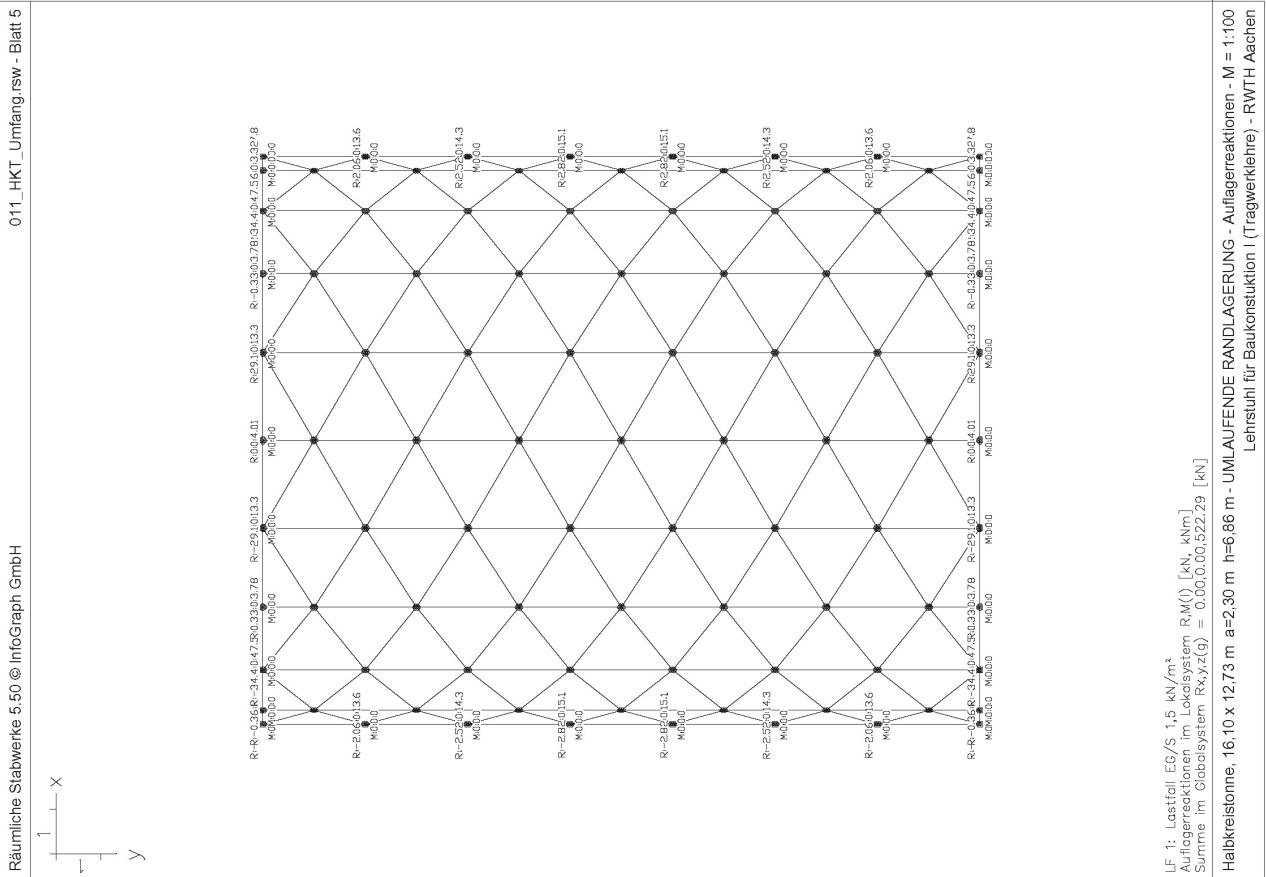
Halbkreistonne, Umfanglagerung, Isometrie



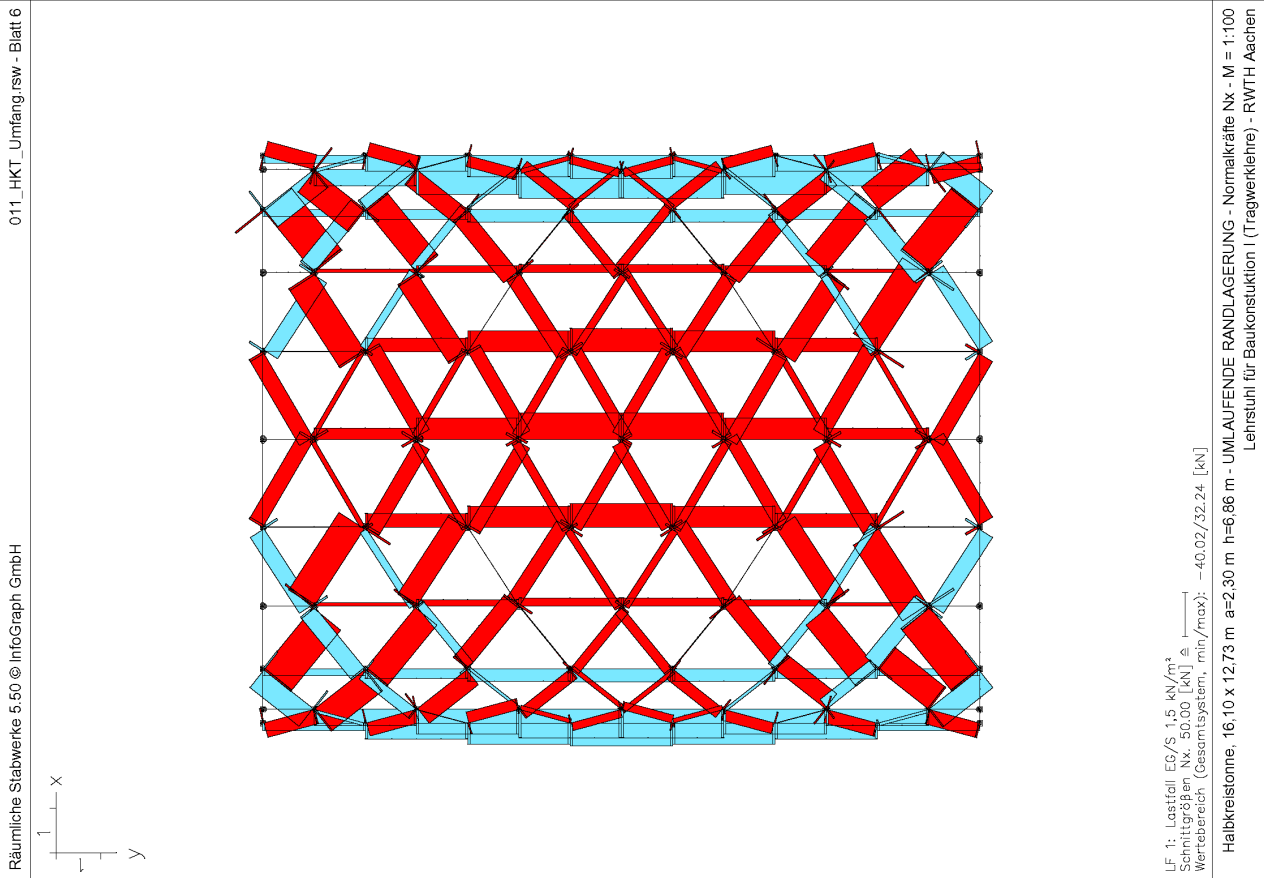
Halbkreistonne, Umfanglagerung, Verformung



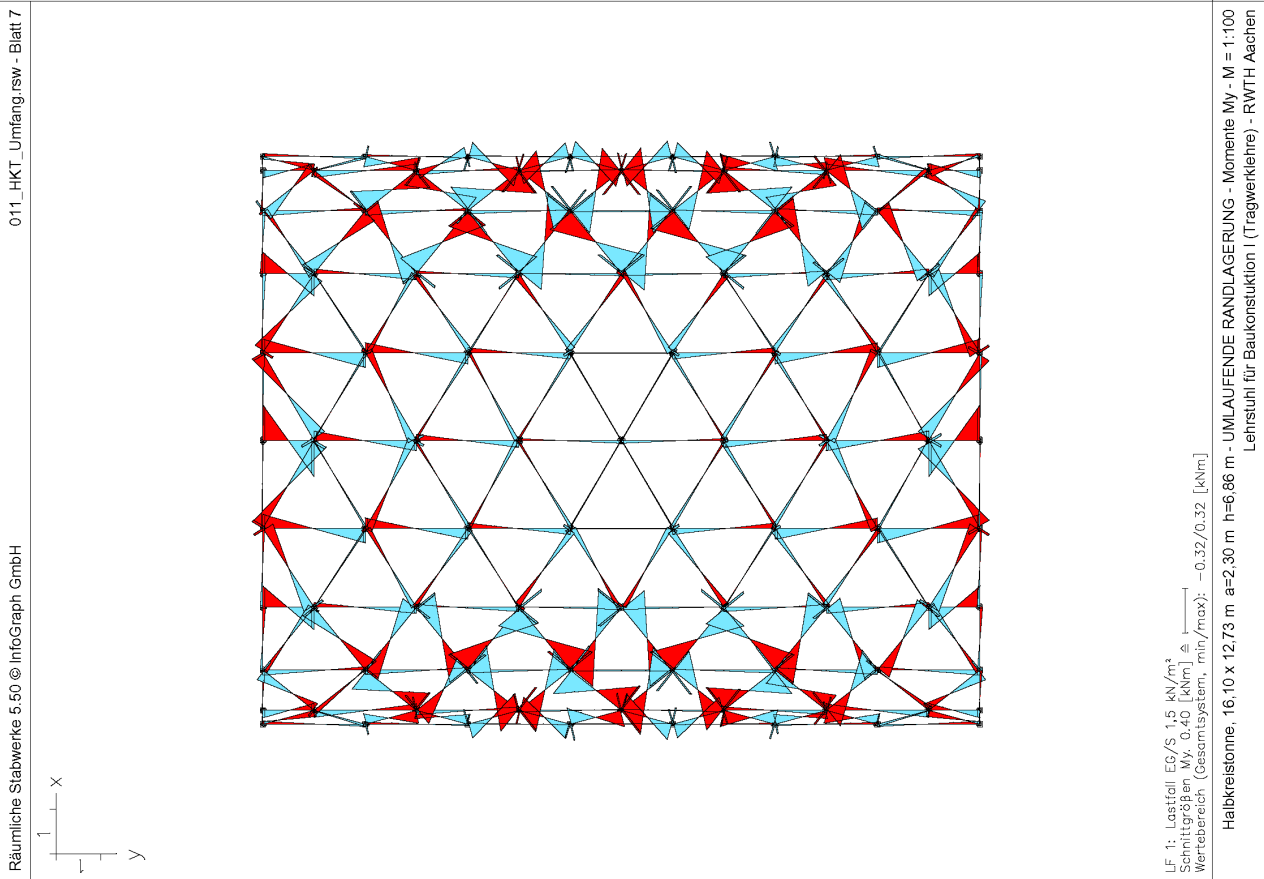
Halbkreislonne, Umfanglagerung, Verformung



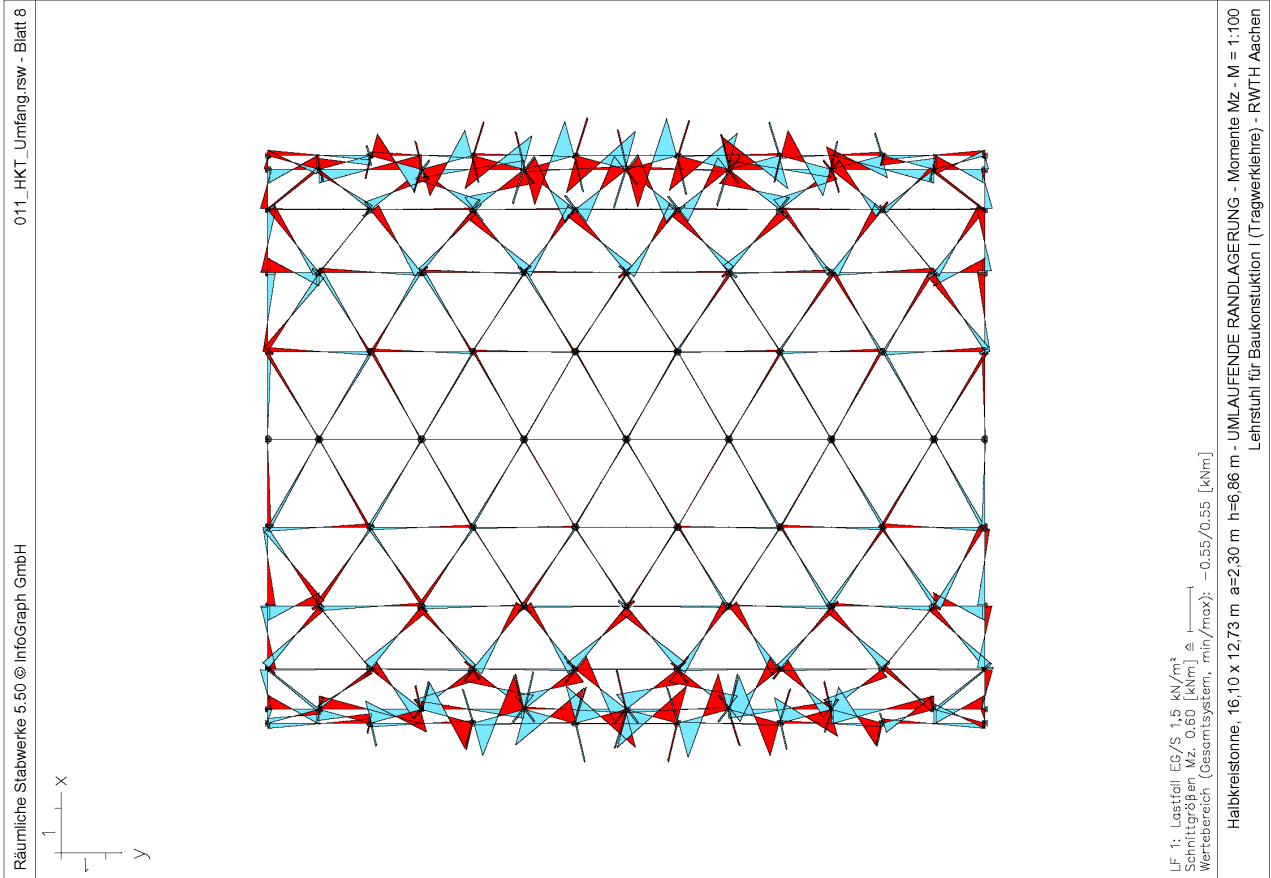
Halbkreislonne, Umfanglagerung, Auflagerreaktionen



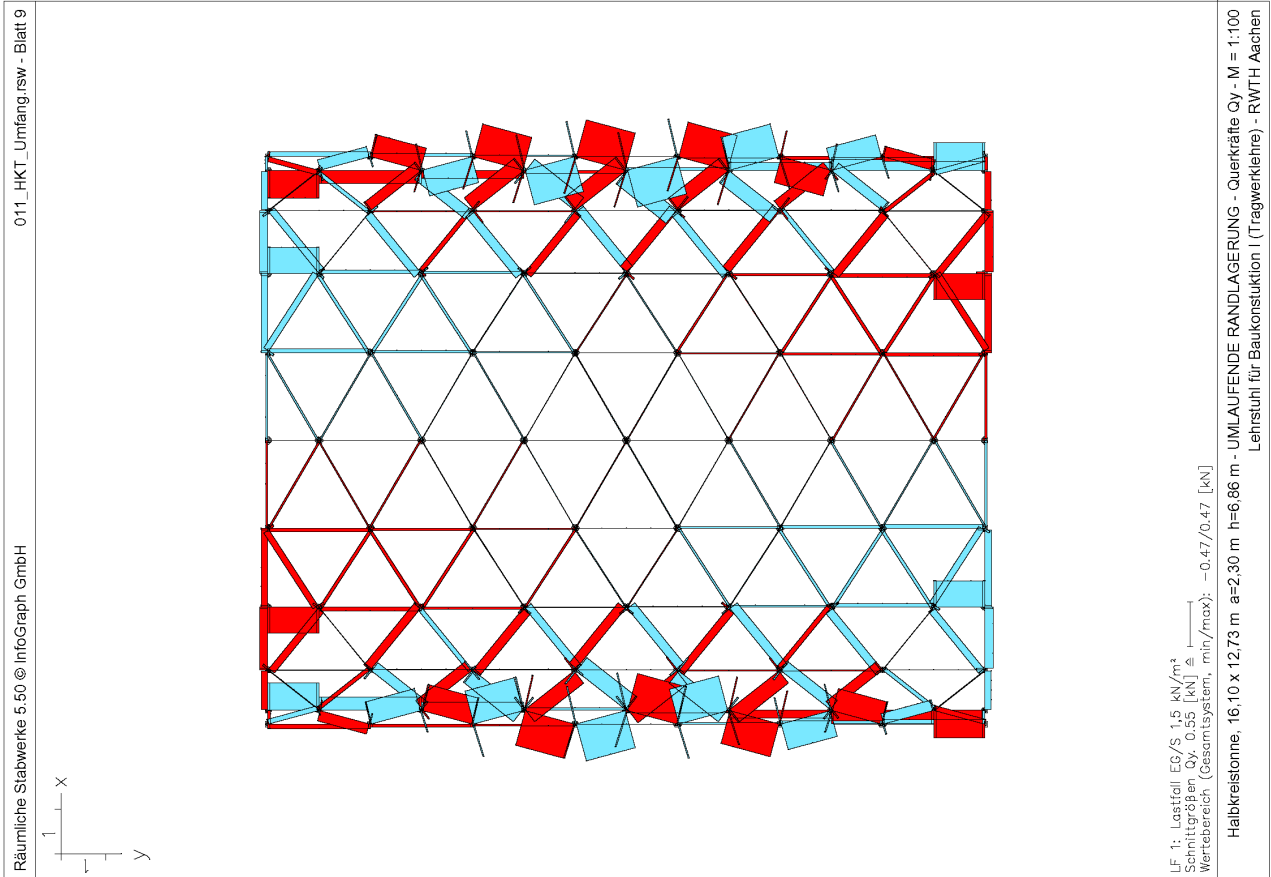
Halbkreistonne, Umfanglagerung, Normalkräfte Nx



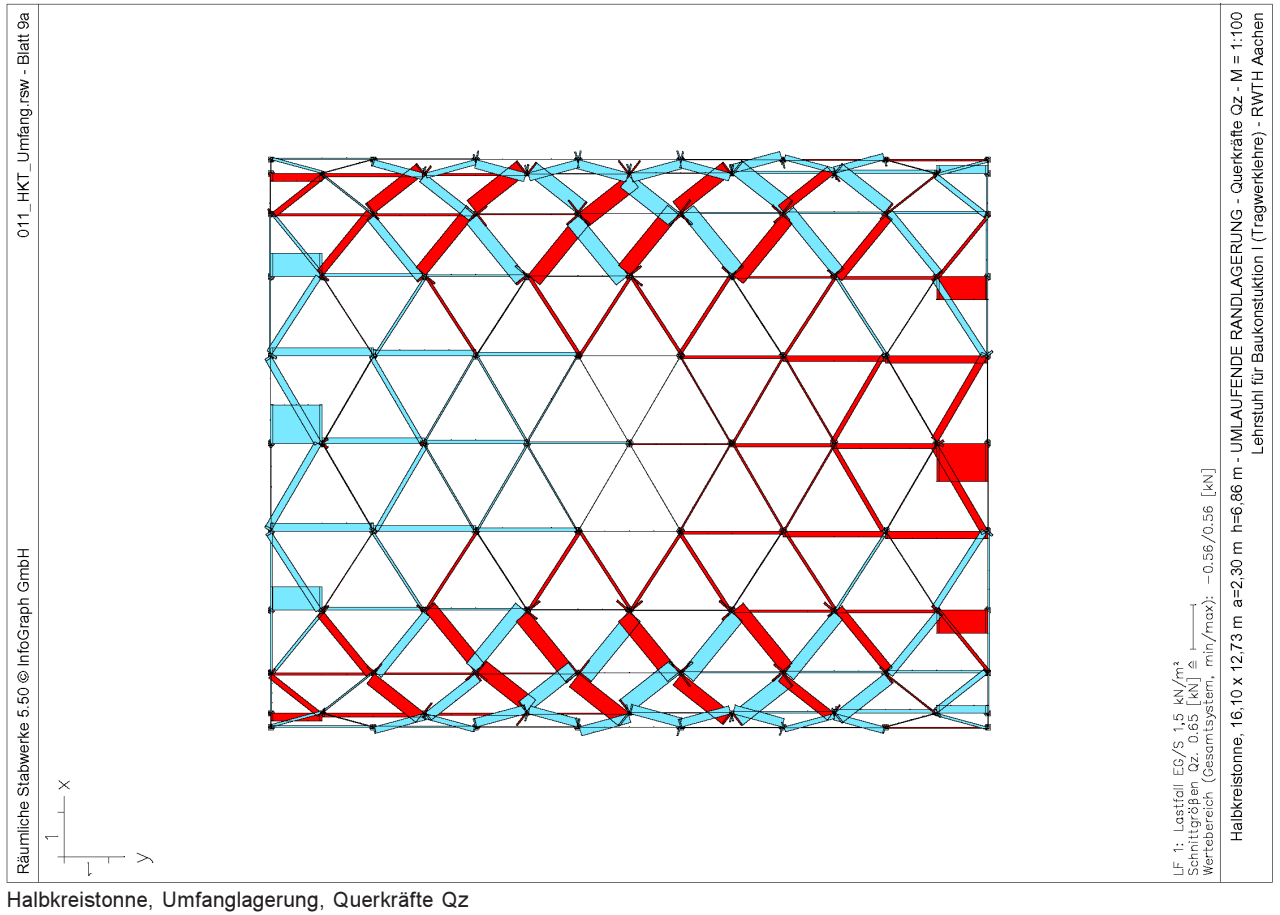
Halbkreistonne, Umfanglagerung, Momente My

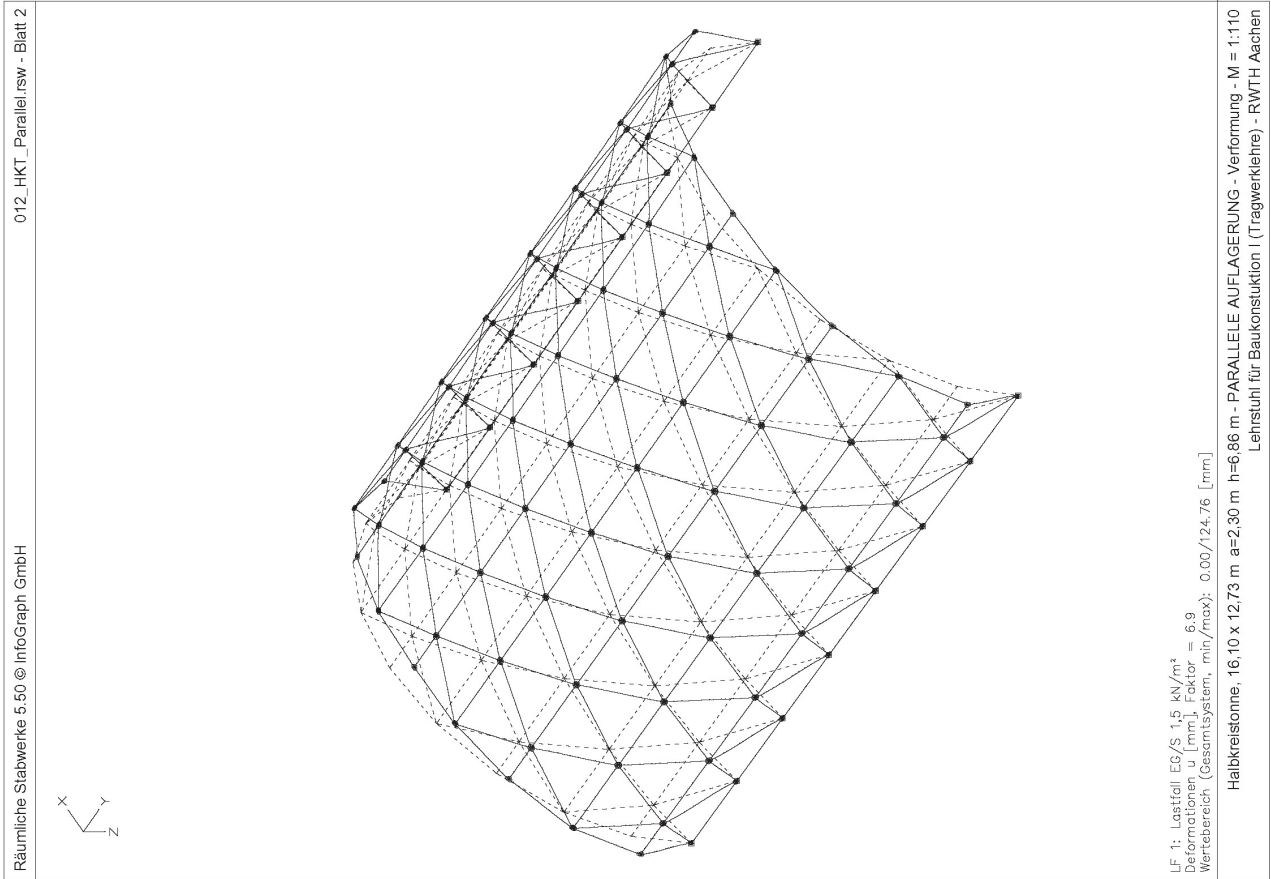
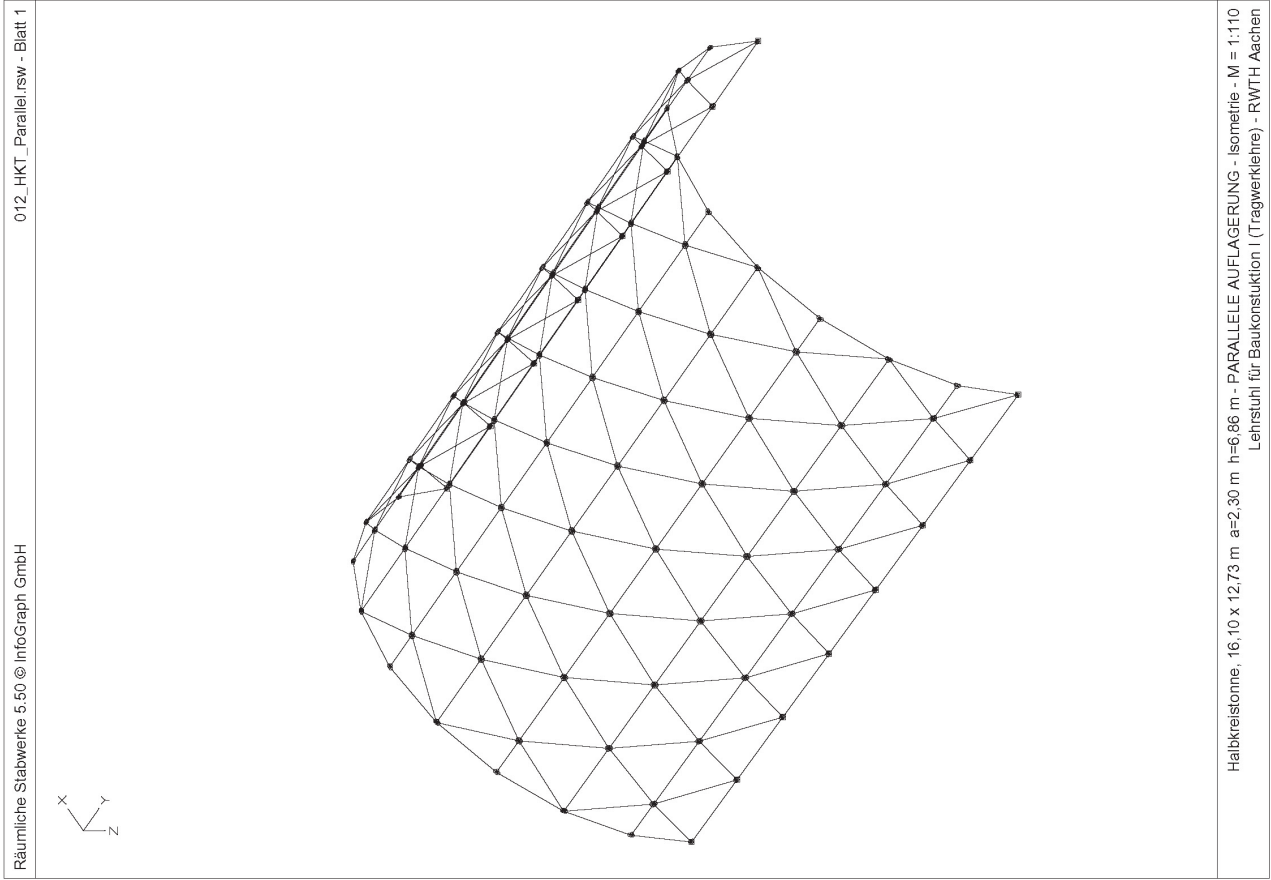


Halbkreistonne, Umfanglagerung, Momente Mz



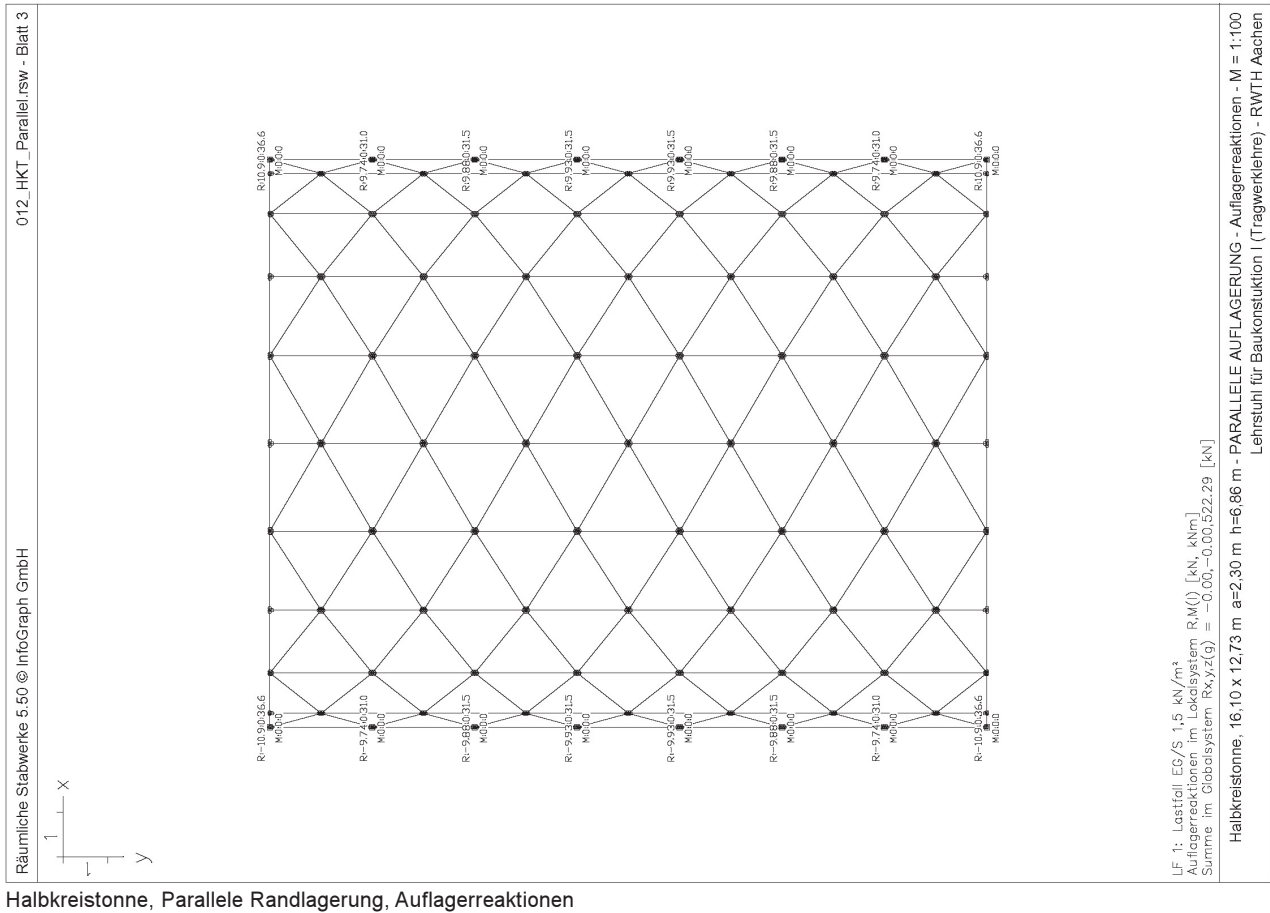
Halbkreistonne, Umfanglagerung, Querkräfte Qy



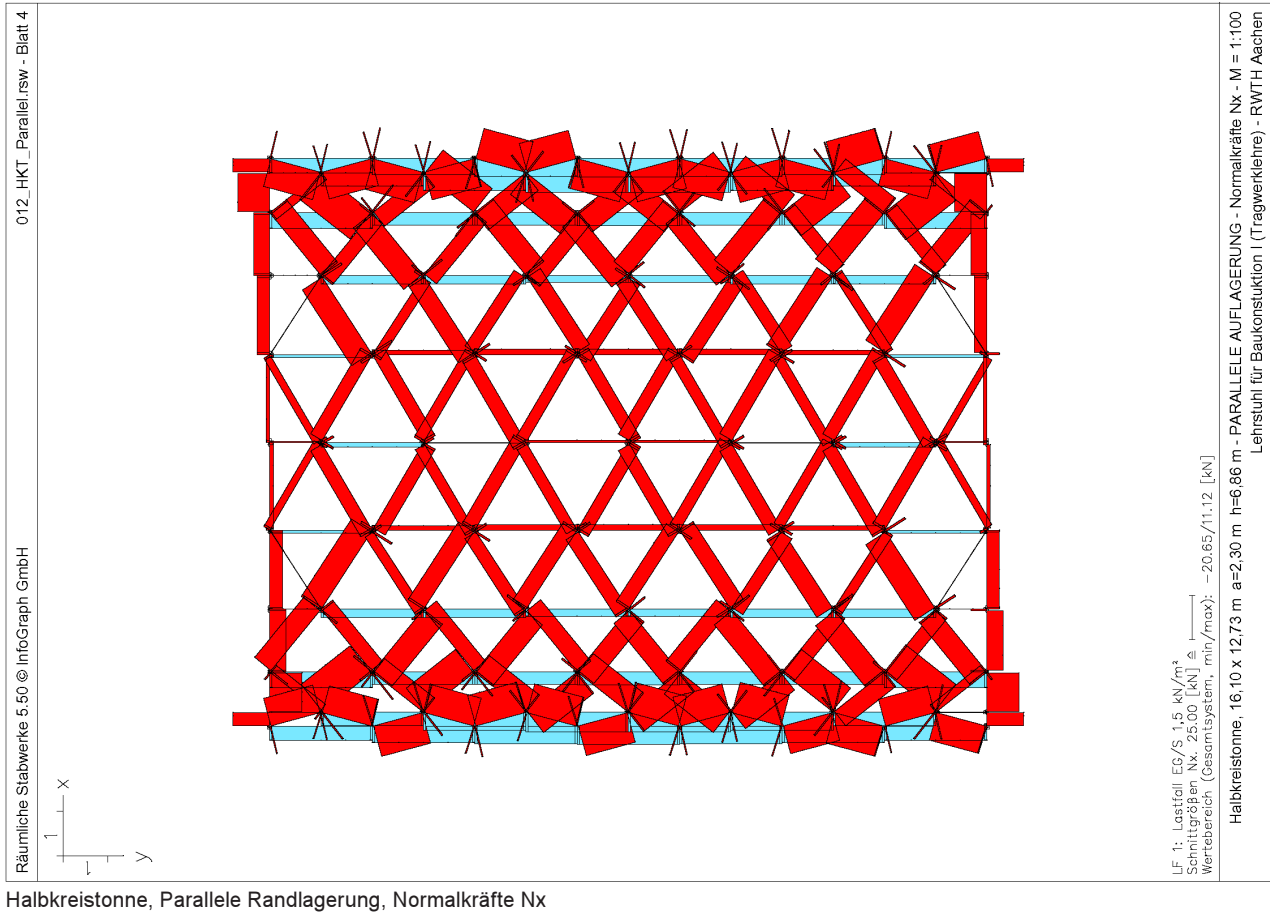


Halbkreistonne, Parallele Randlagerung, Verformung

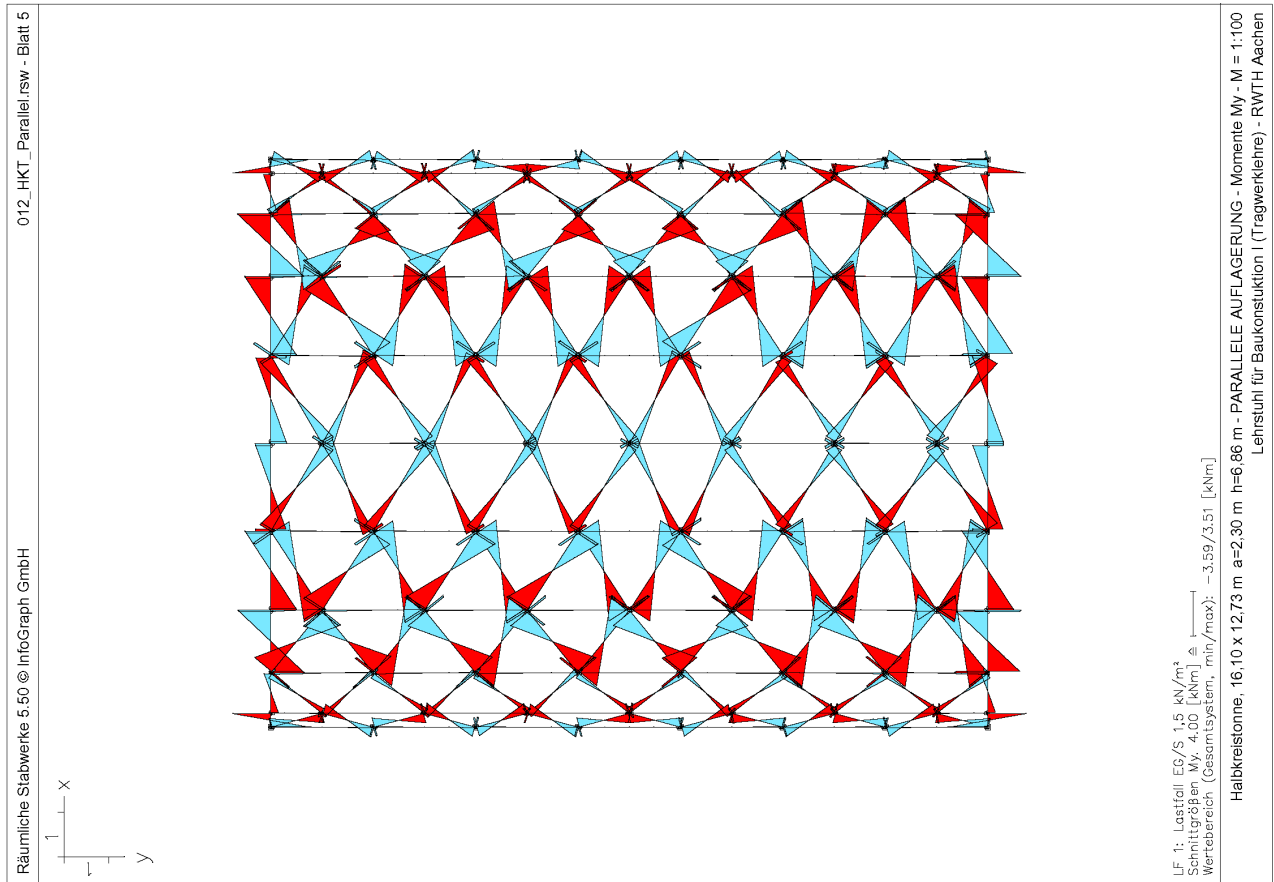
10.3.1 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - **Halbkreistonne**, Parallele Randlagerung



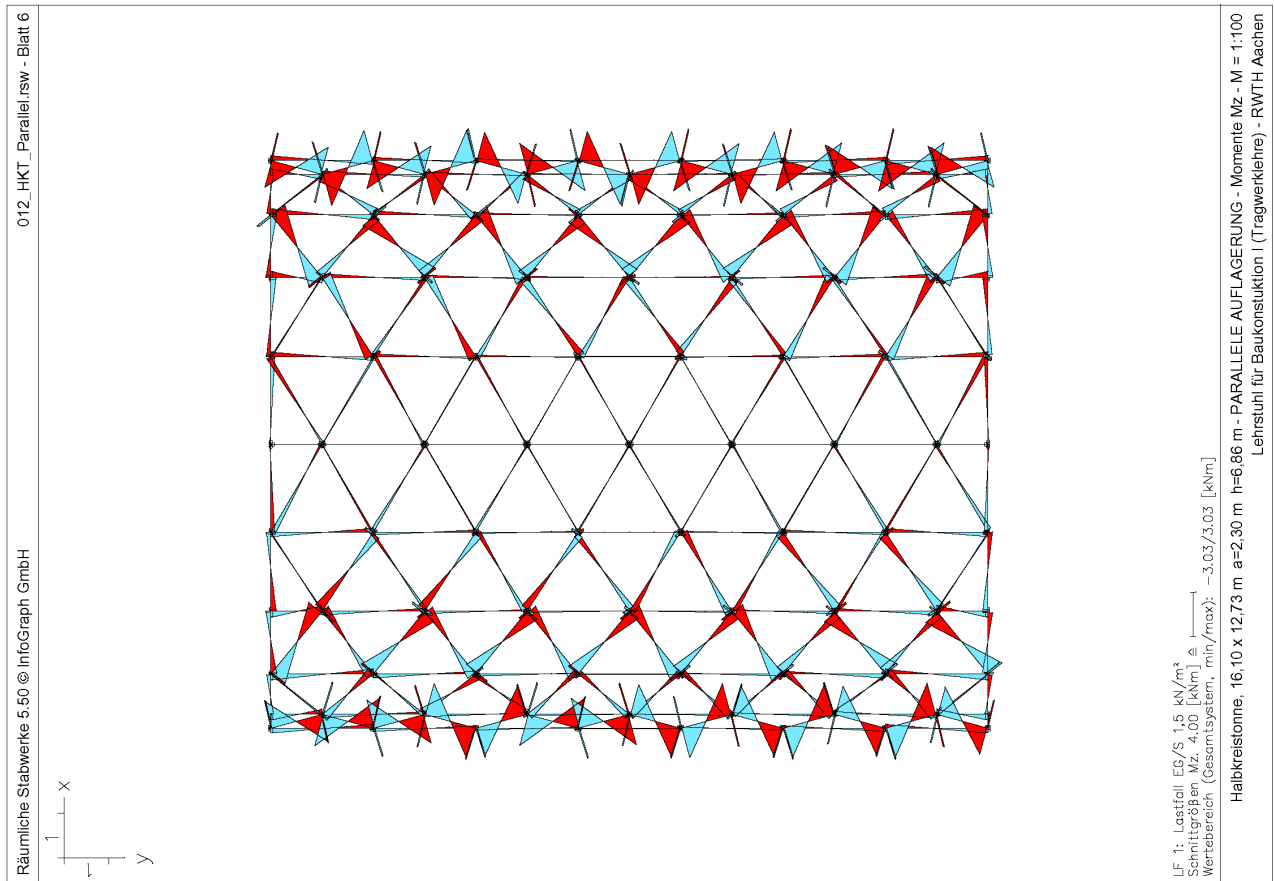
Halbkreistonne, Parallele Randlagerung, Auflagerreaktionen



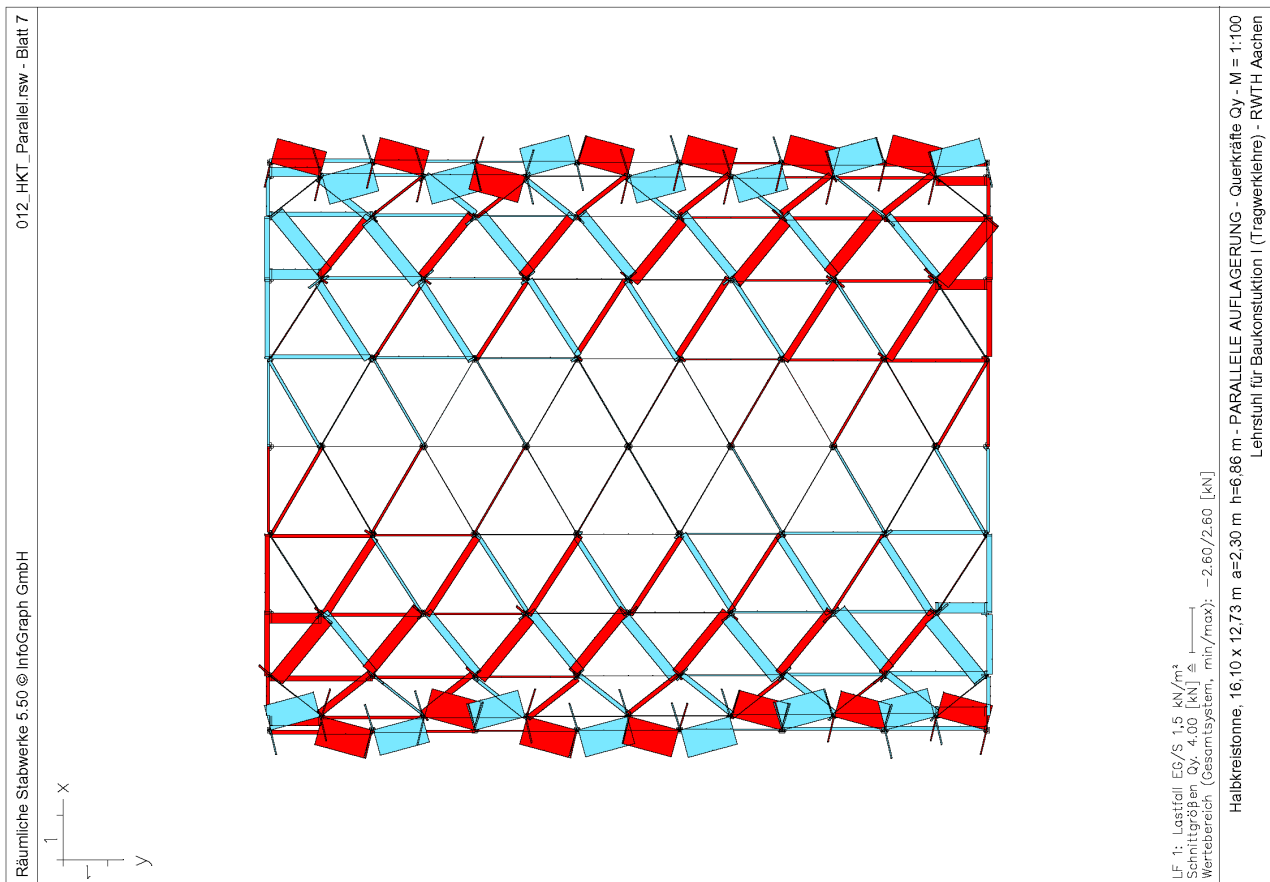
Halbkreistonne, Parallele Randlagerung, Normalkräfte Nx



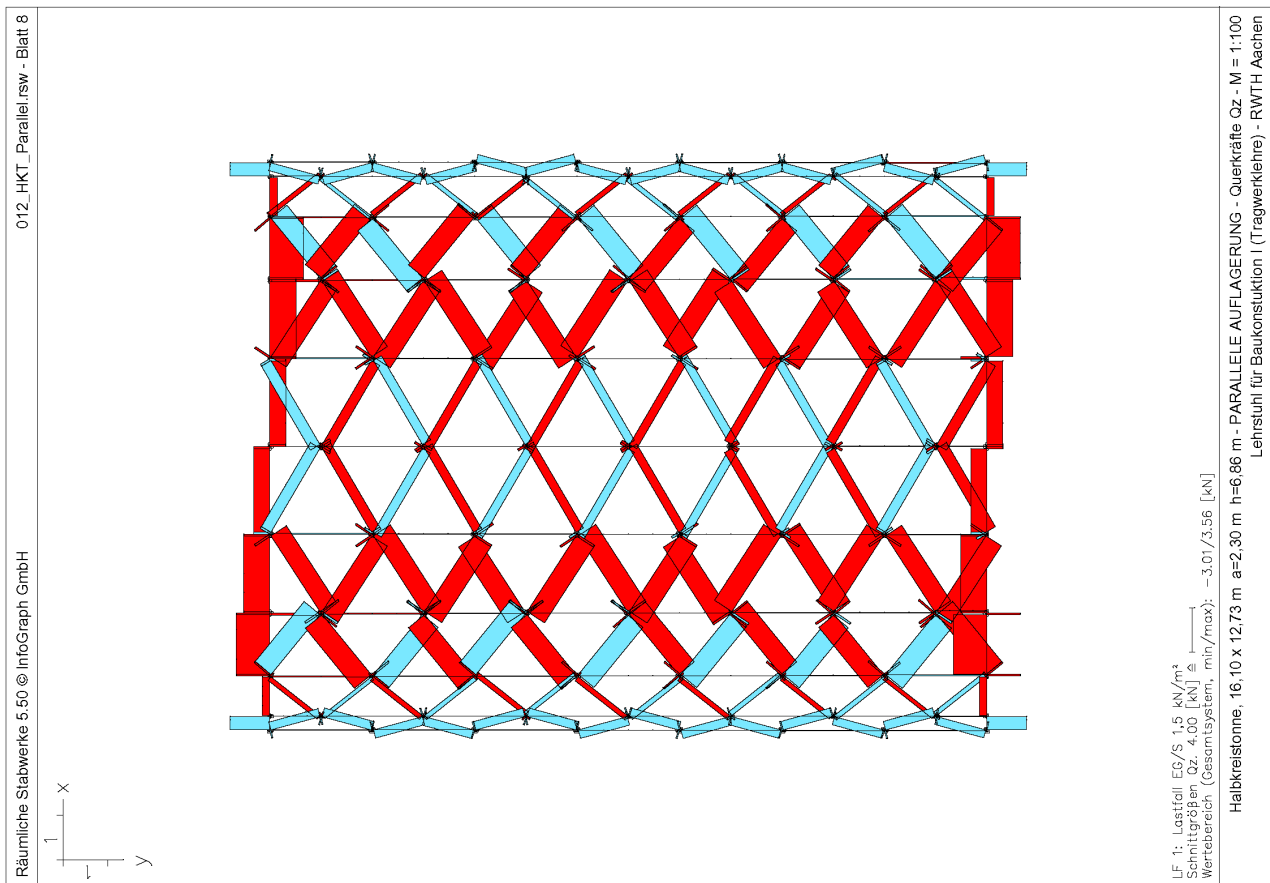
Halbkreistone, Parallele Randlagerung, Momente My



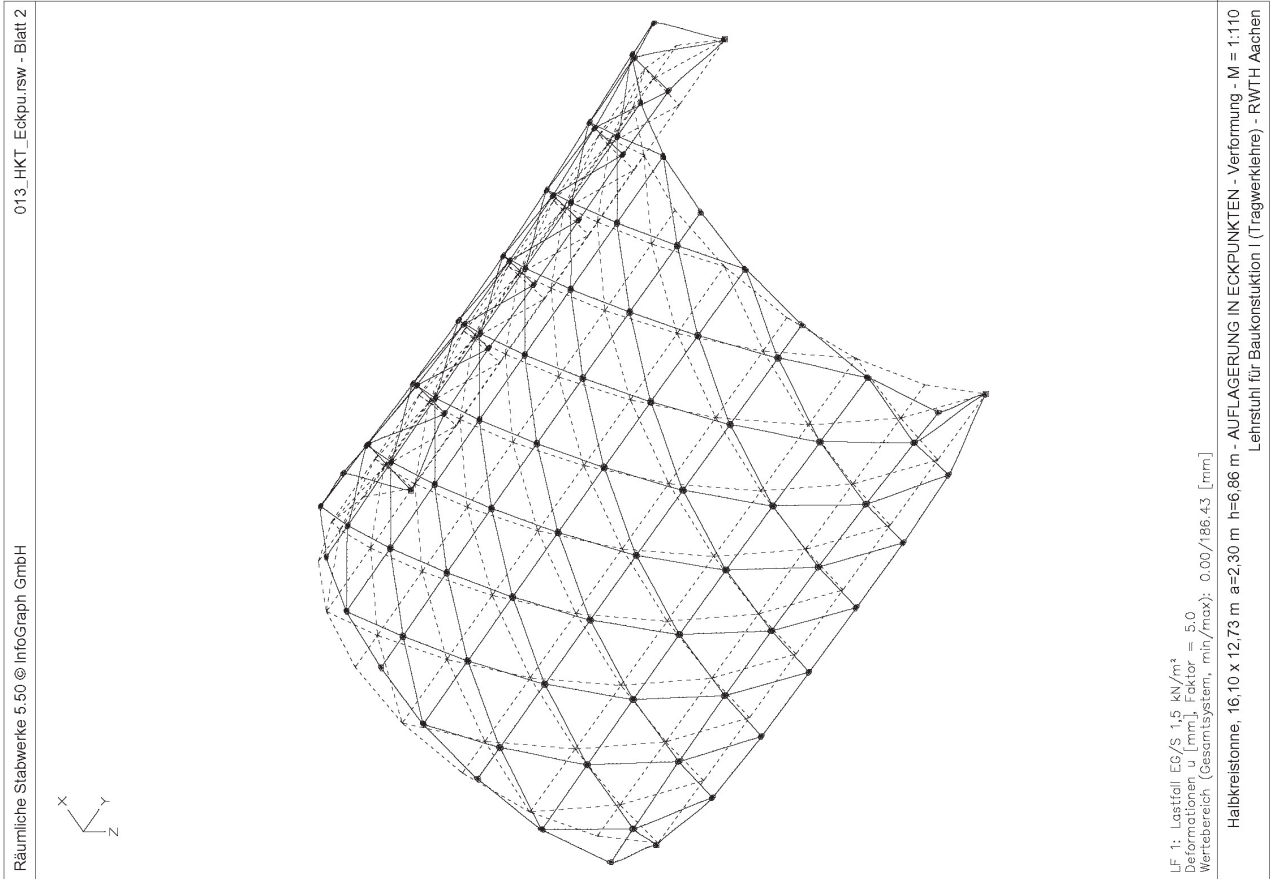
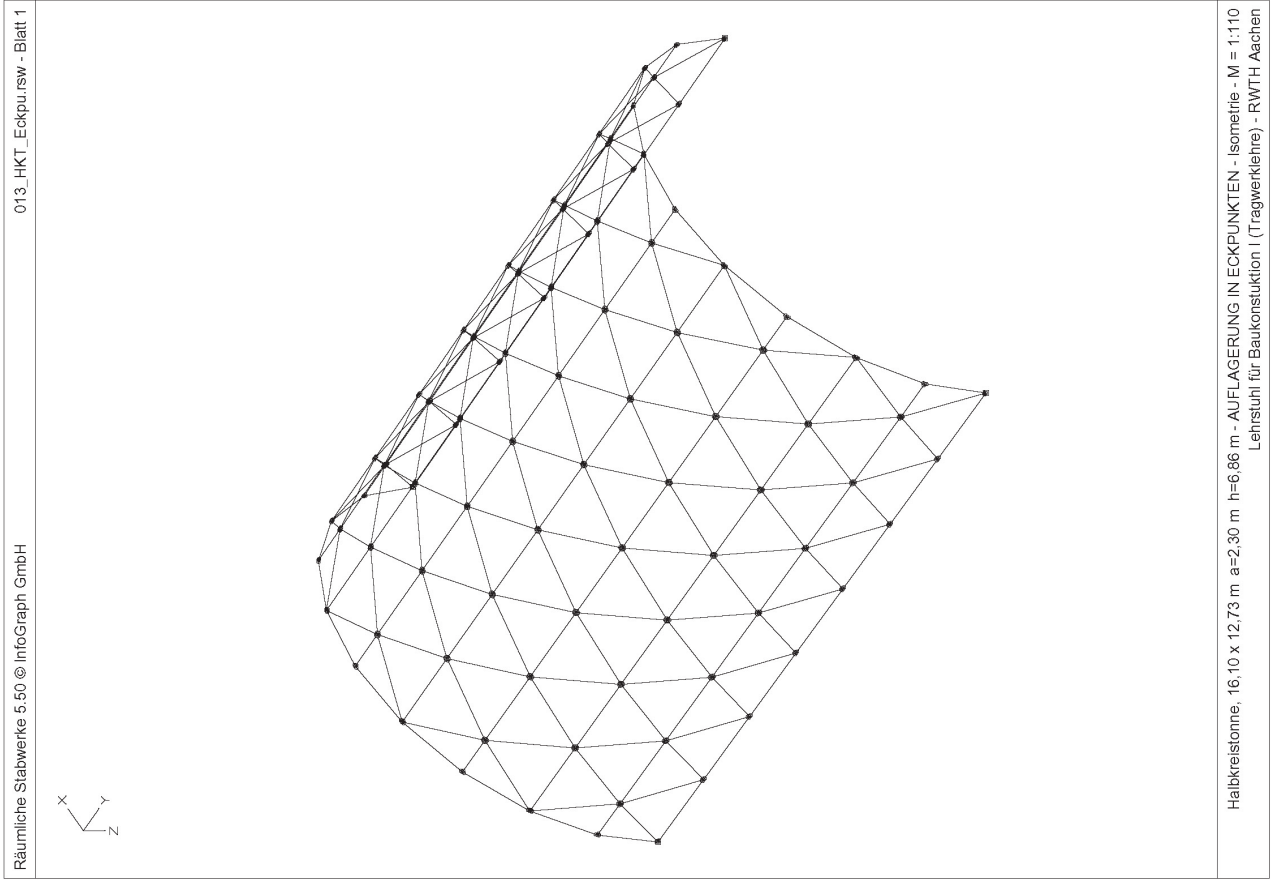
Halbkreistone, Parallele Randlagerung, Momente Mz



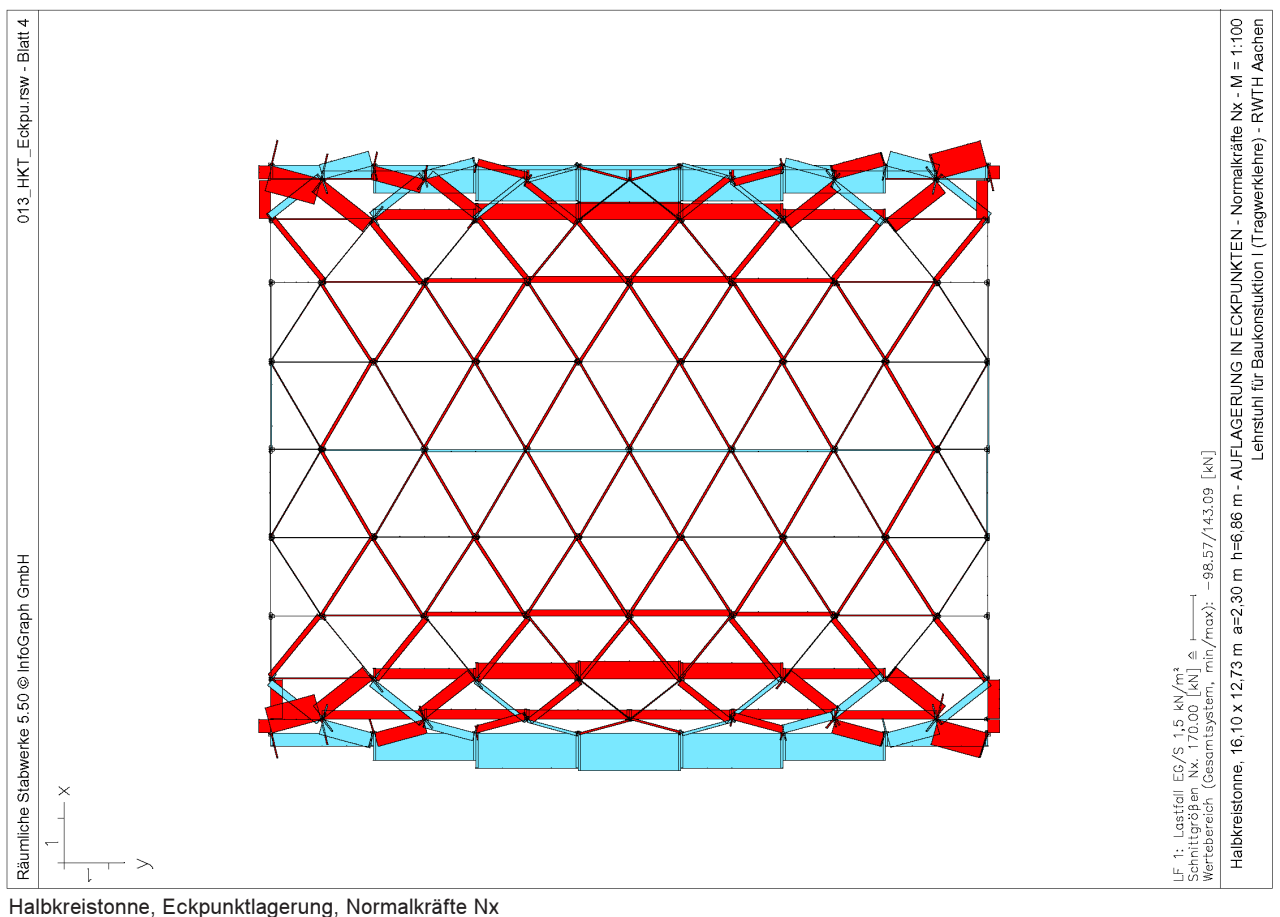
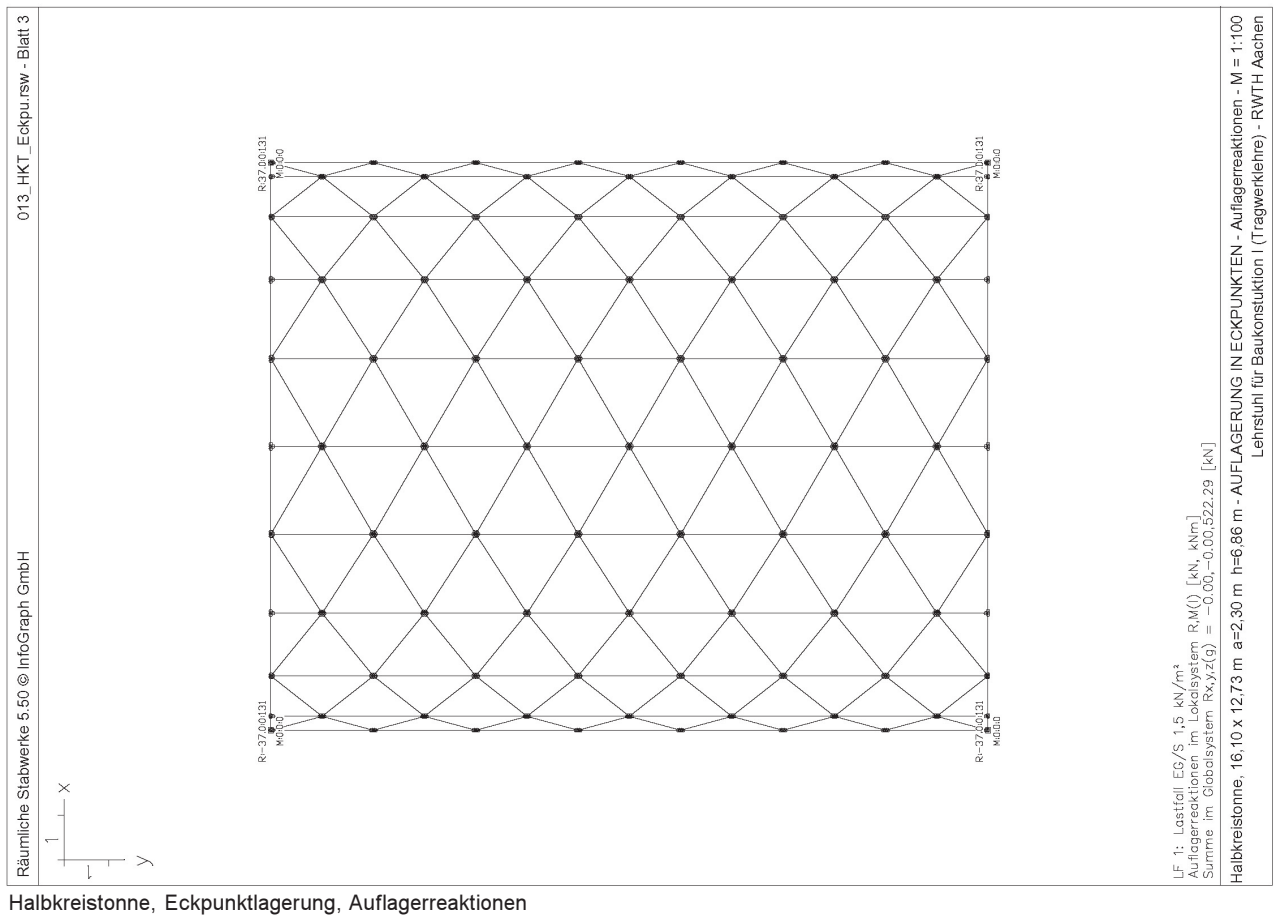
Halbkreistonne, Parallele Randlagerung, Querkräfte Qy

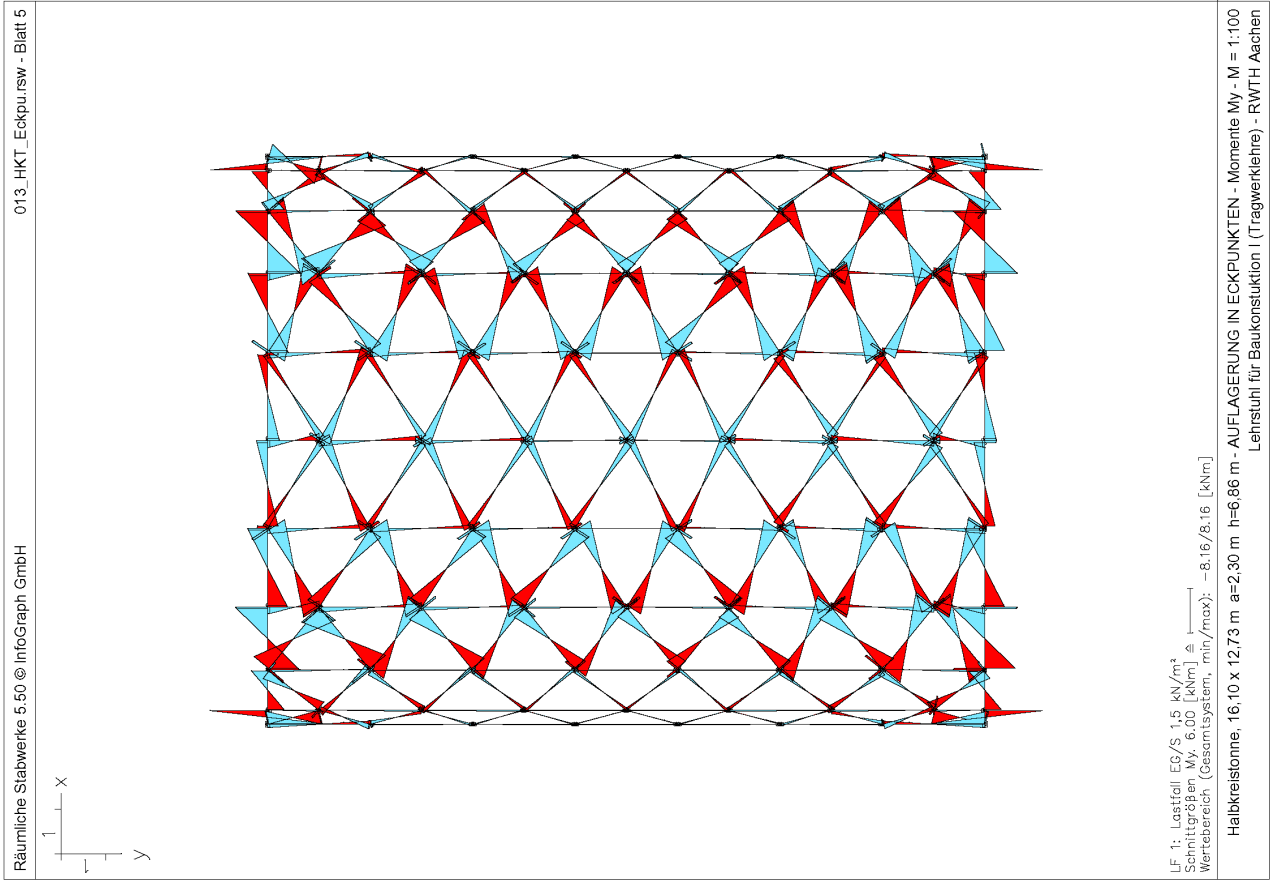


Halbkreistonne, Parallele Randlagerung, Querkräfte Qz

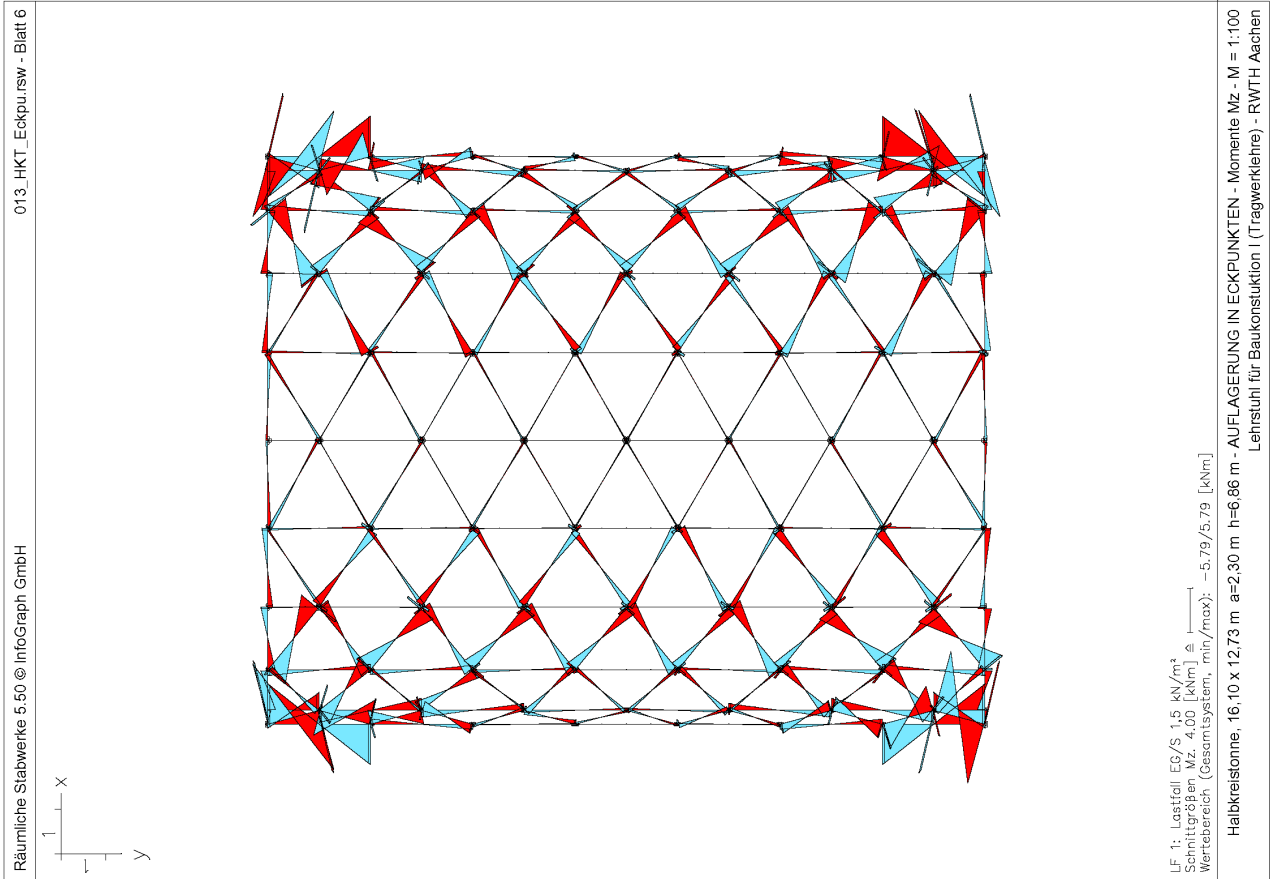


10.3.1 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - **Halbkreistonne**, Eckpunkt Lagerung



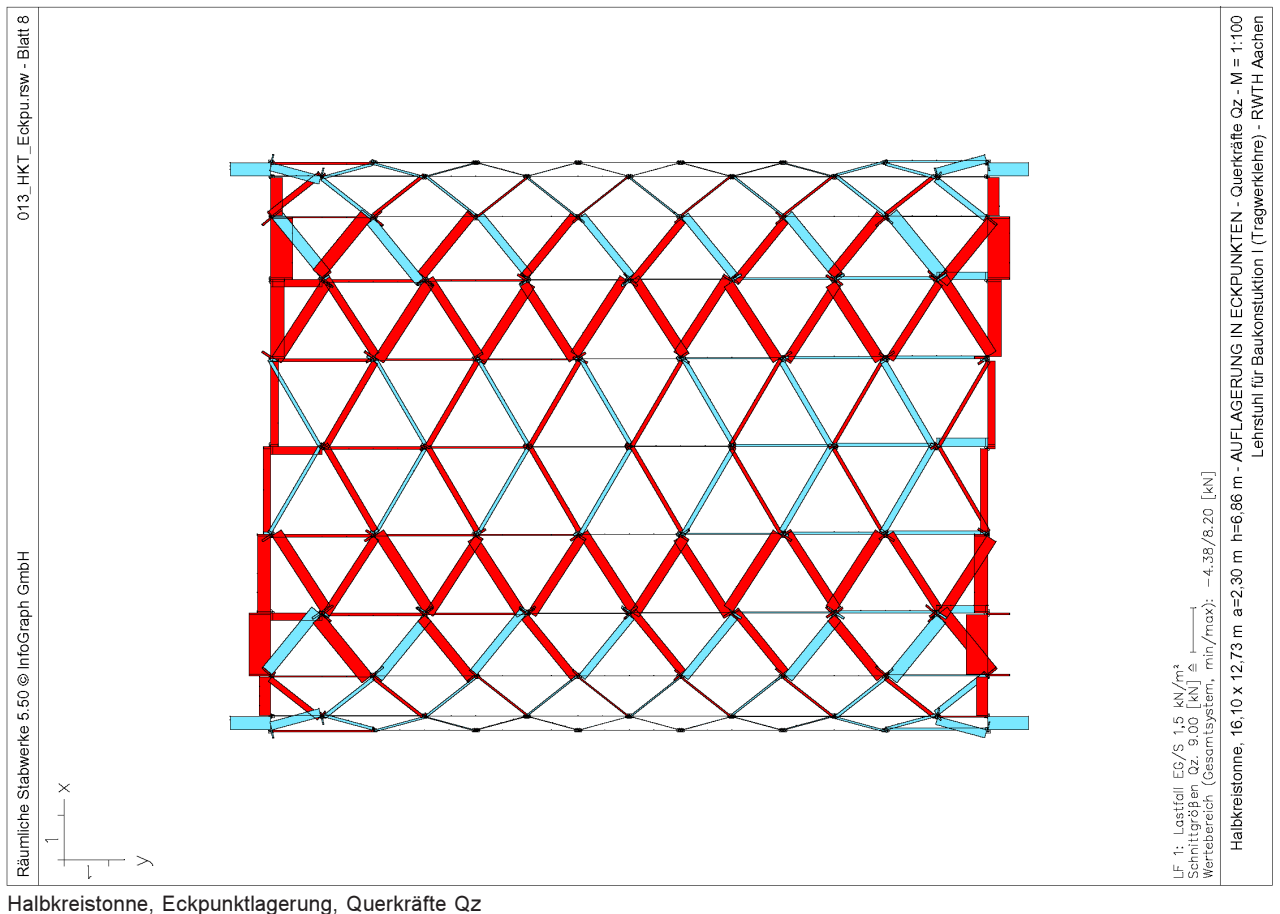
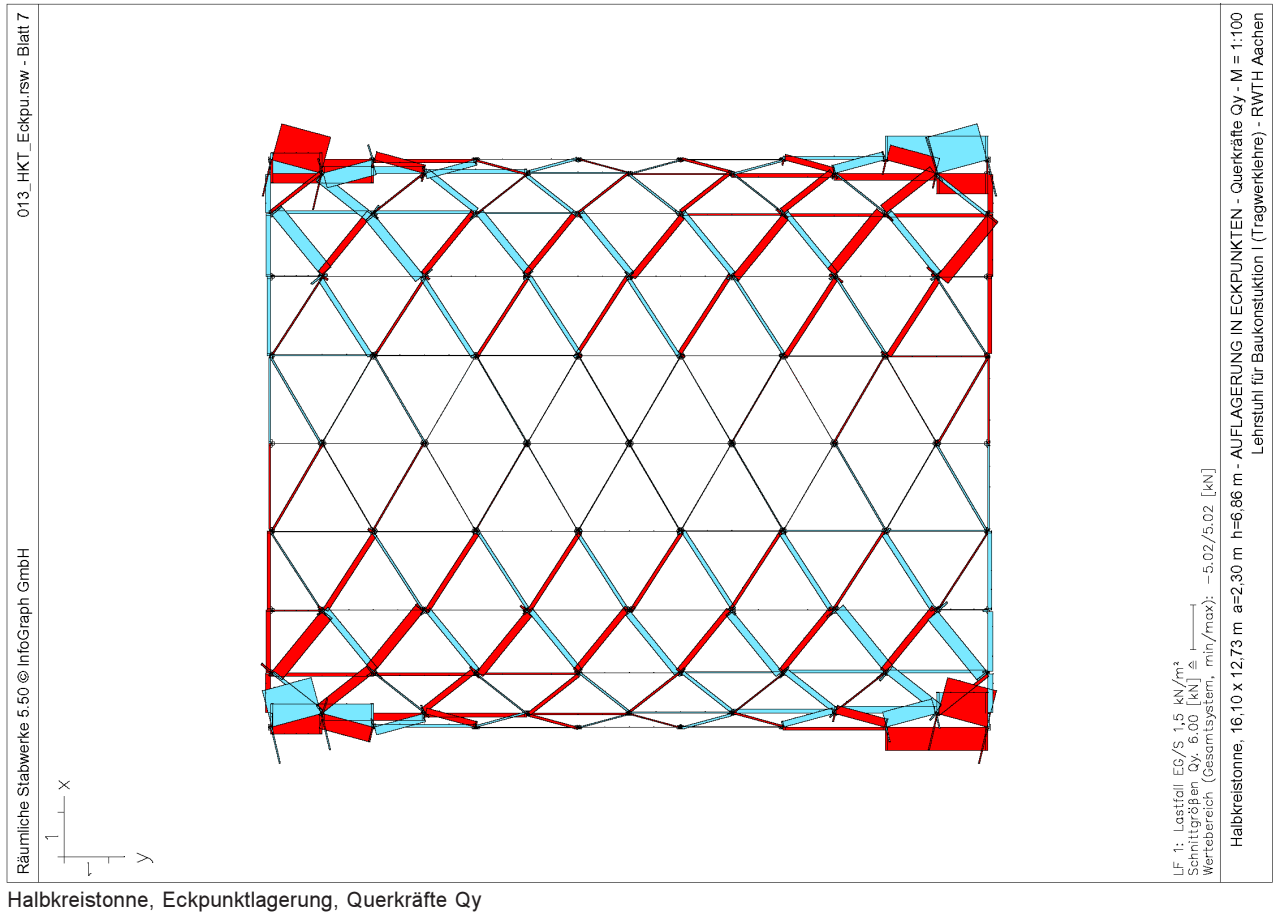


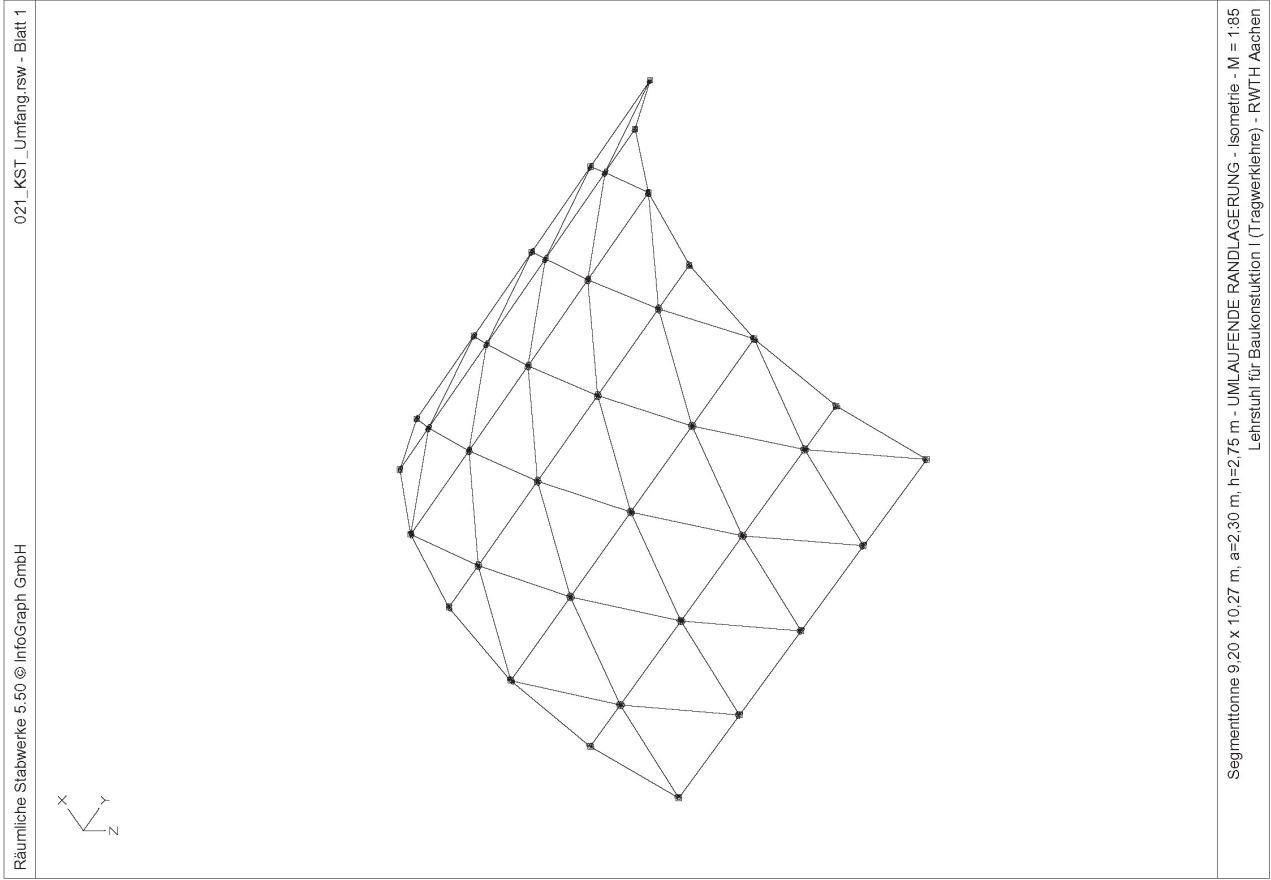
Halbkreistonne, Eckpunkt Lagerung, Momente My



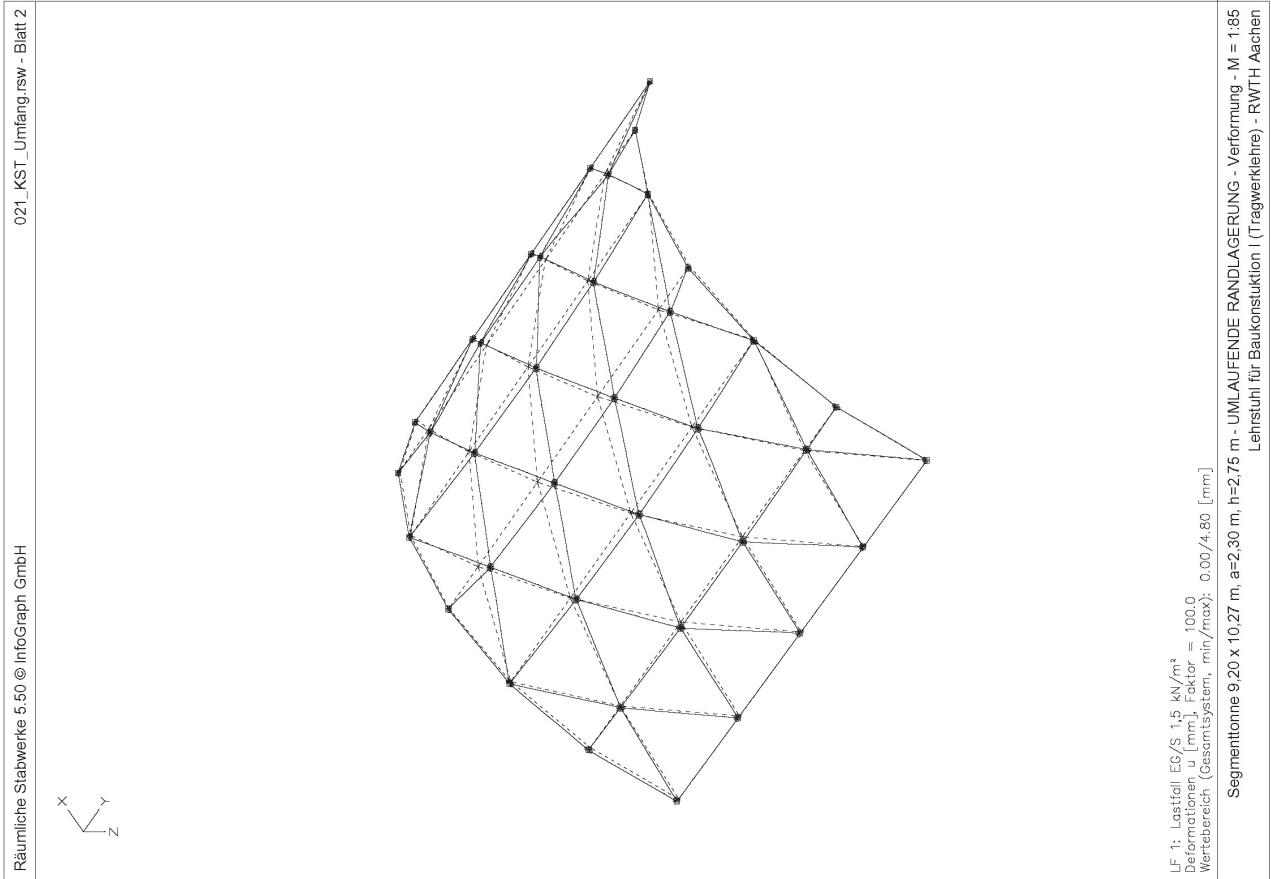
Halbkreistonne, Eckpunkt Lagerung, Momente Mz

10.3.1 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - Halbkreistonne, Eckpunkt Lagerung



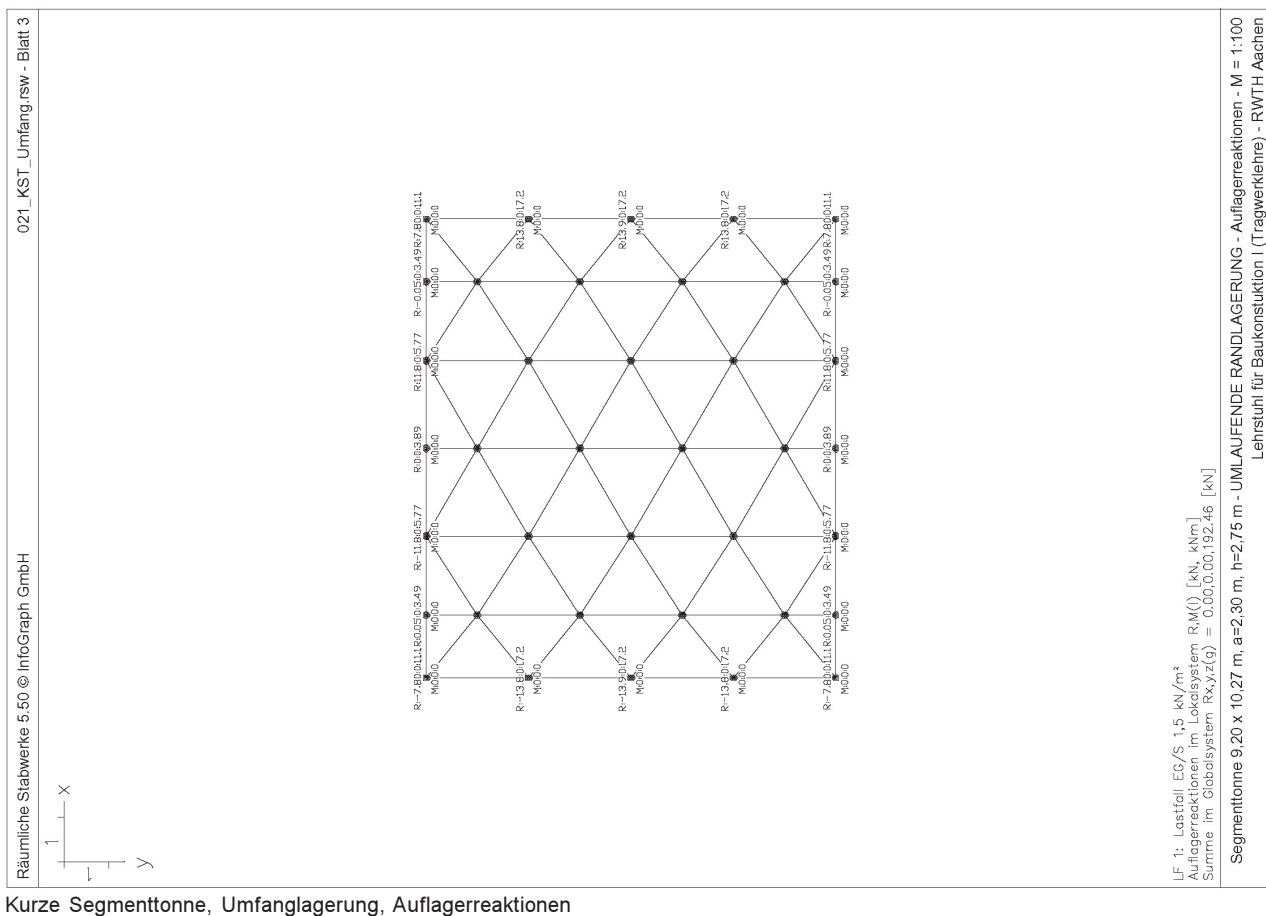


Kurze Segmenttonne, Umfanglagerung, Isometrie

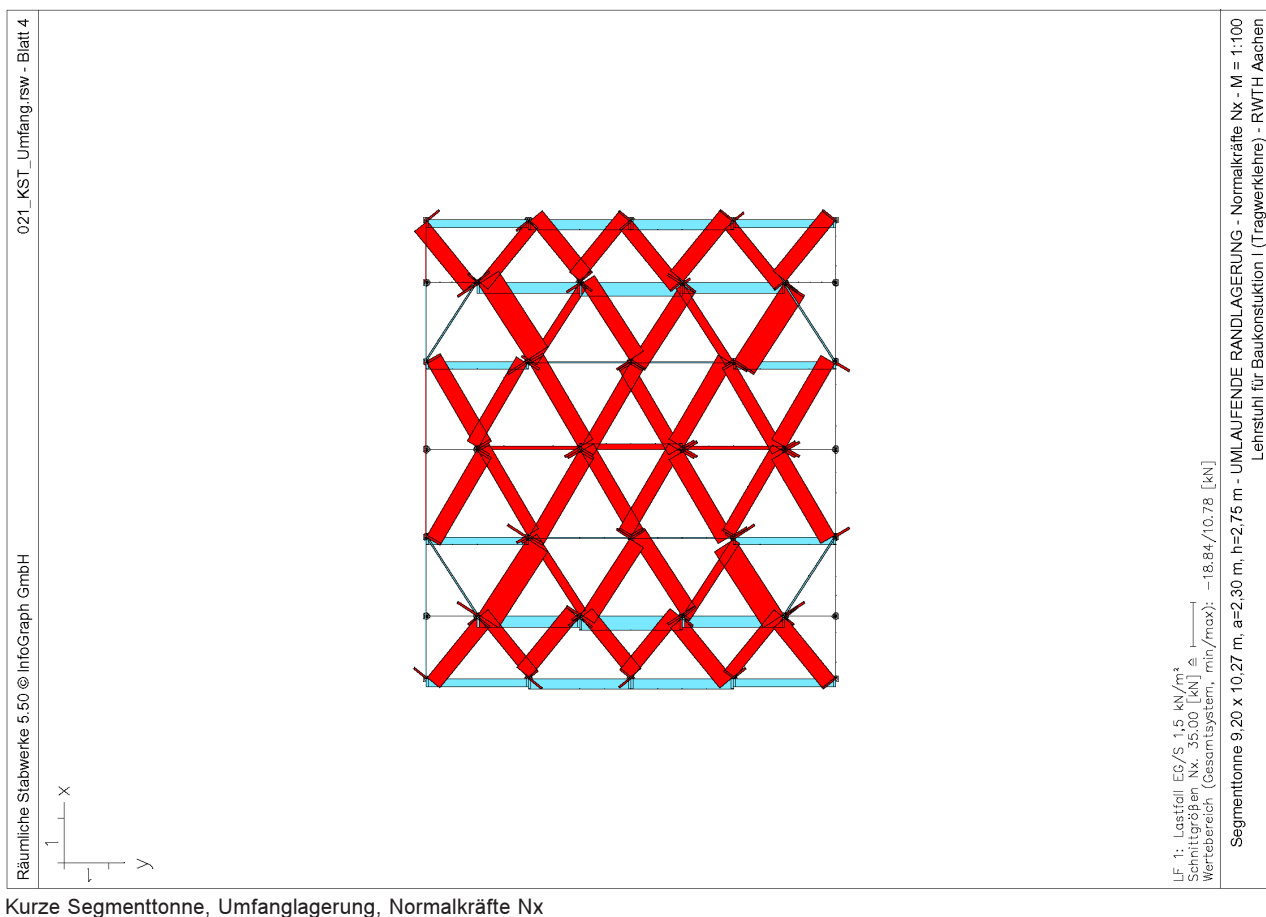


Kurze Segmenttonne, Umfanglagerung, Verformung

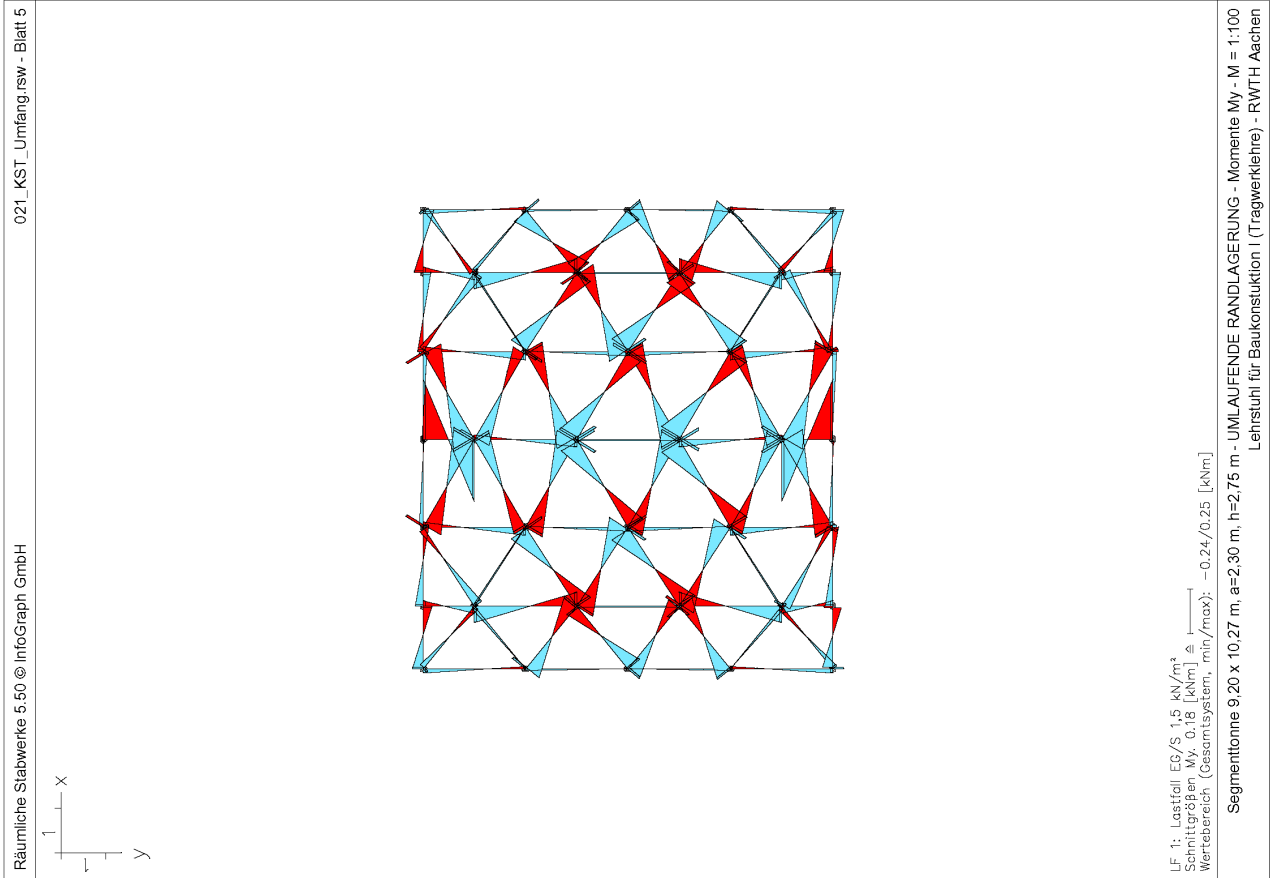
10.3.2 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - Kurze **Segmenttonne**, Umfanglagerungslagerung



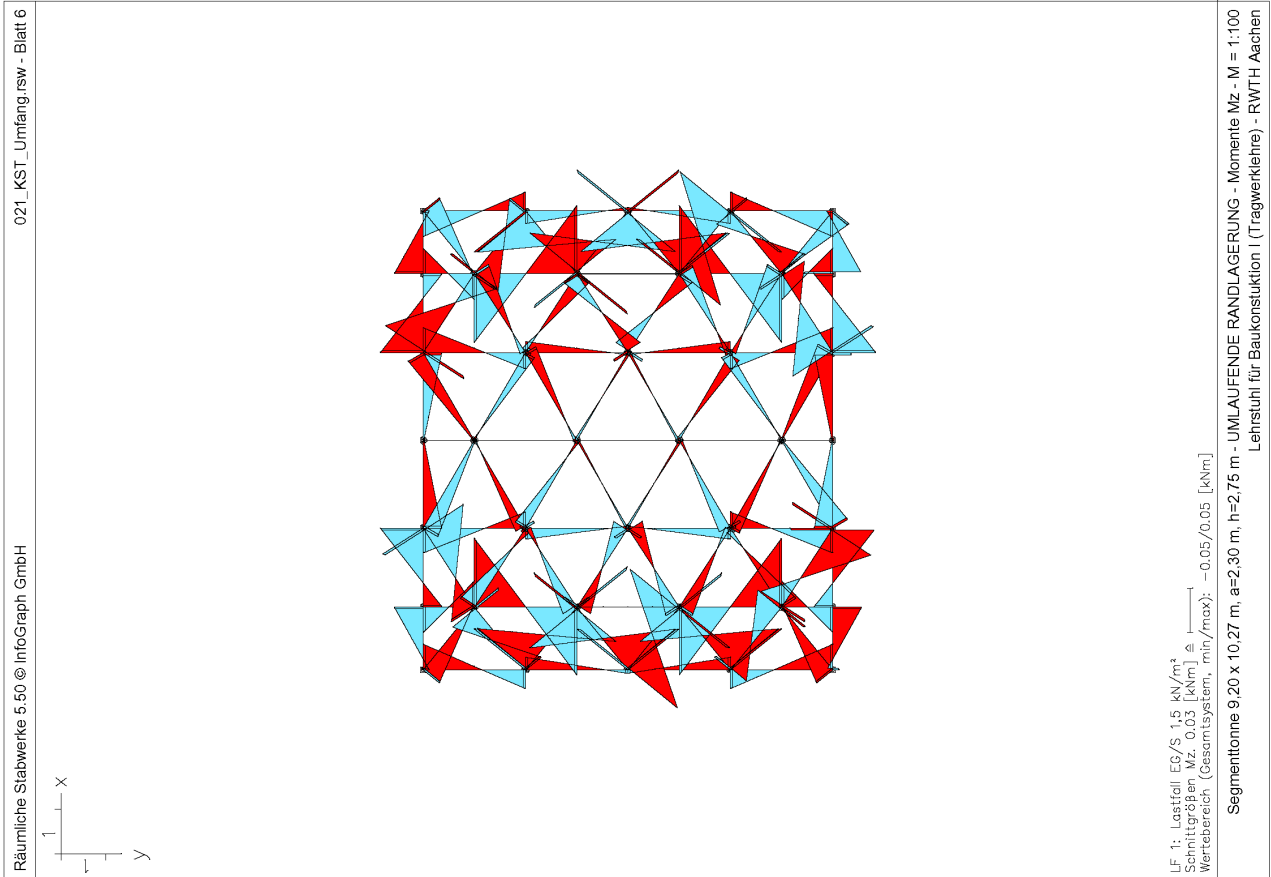
Kurze Segmenttonne, Umfanglagerung, Auflagerreaktionen



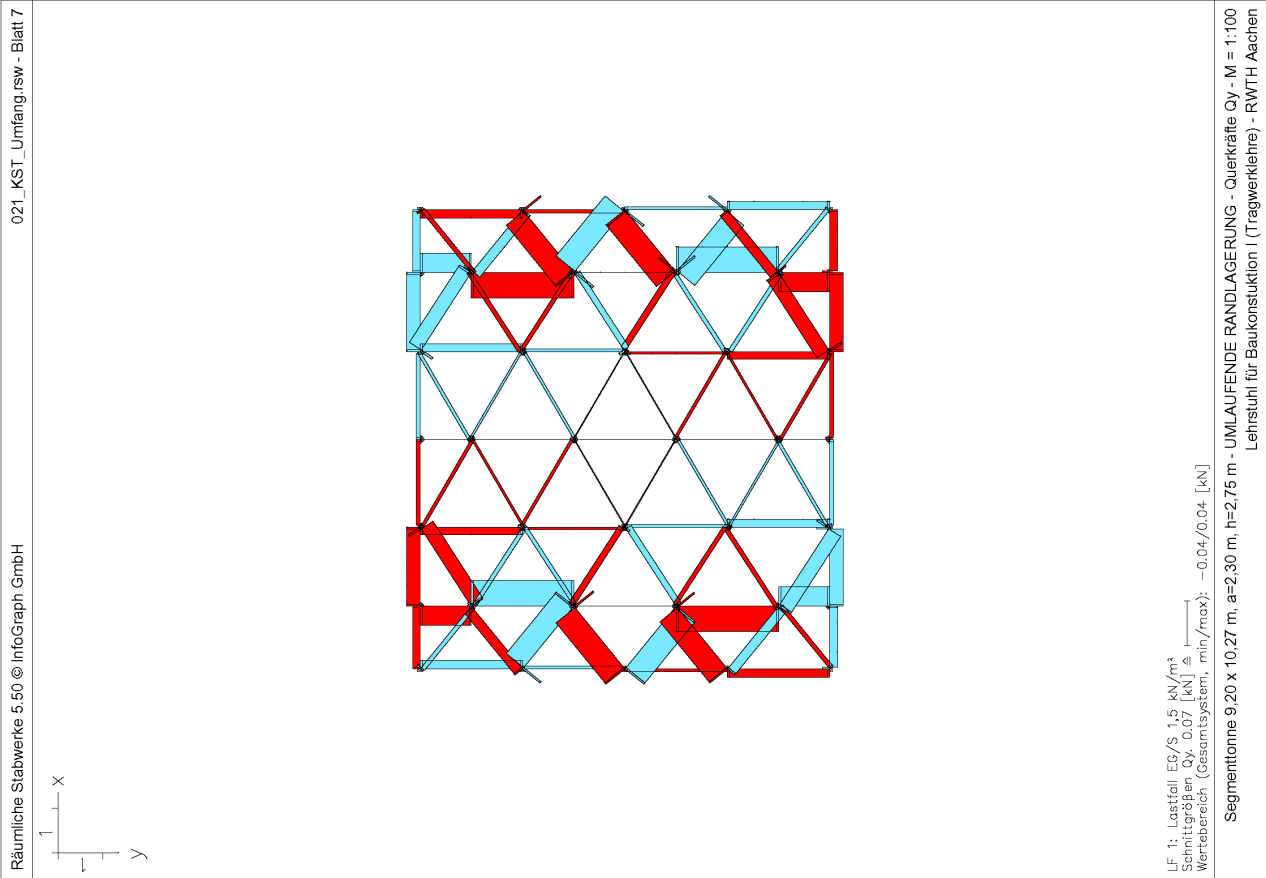
Kurze Segmenttonne, Umfanglagerung, Normalkräfte Nx



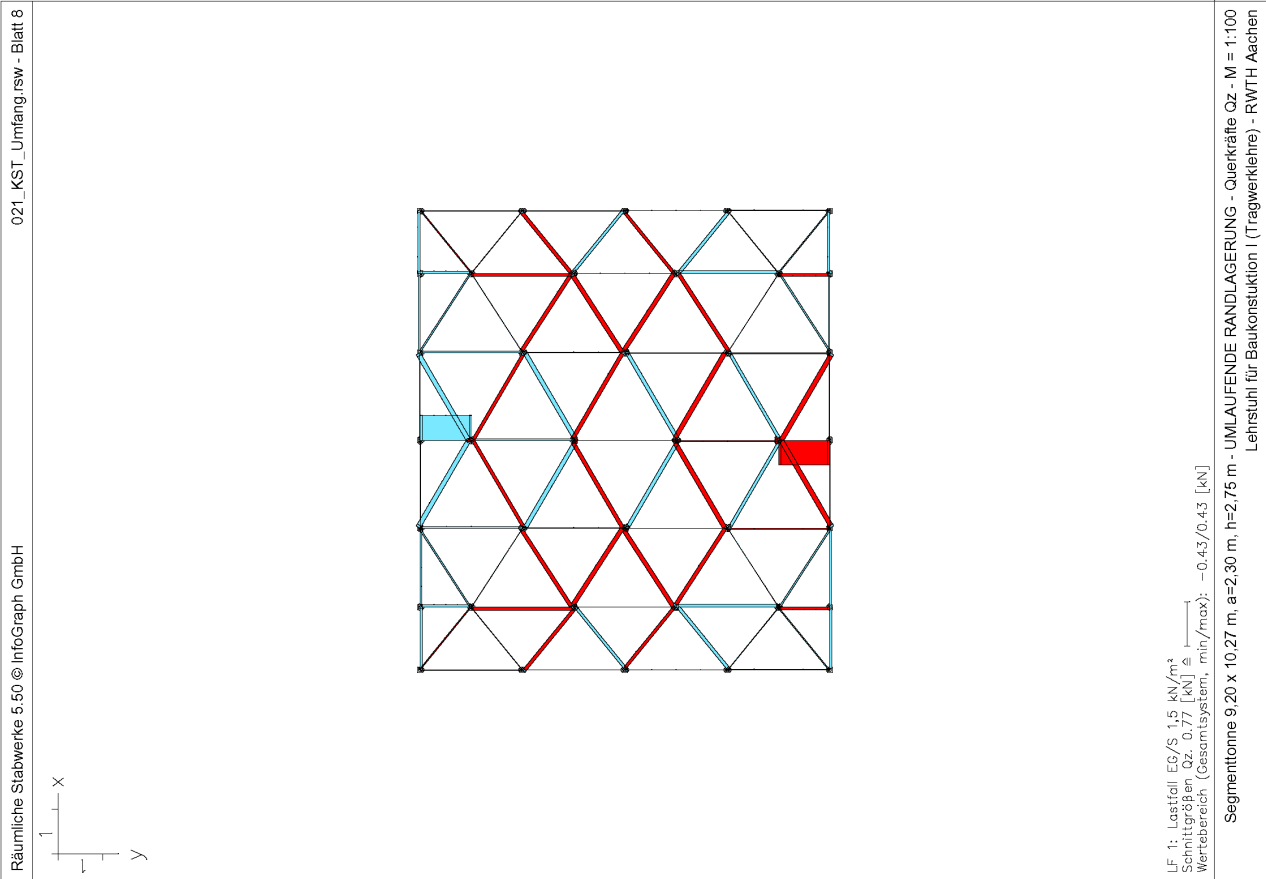
Kurze Segmenttonne, Umfanglagerung, Momente My



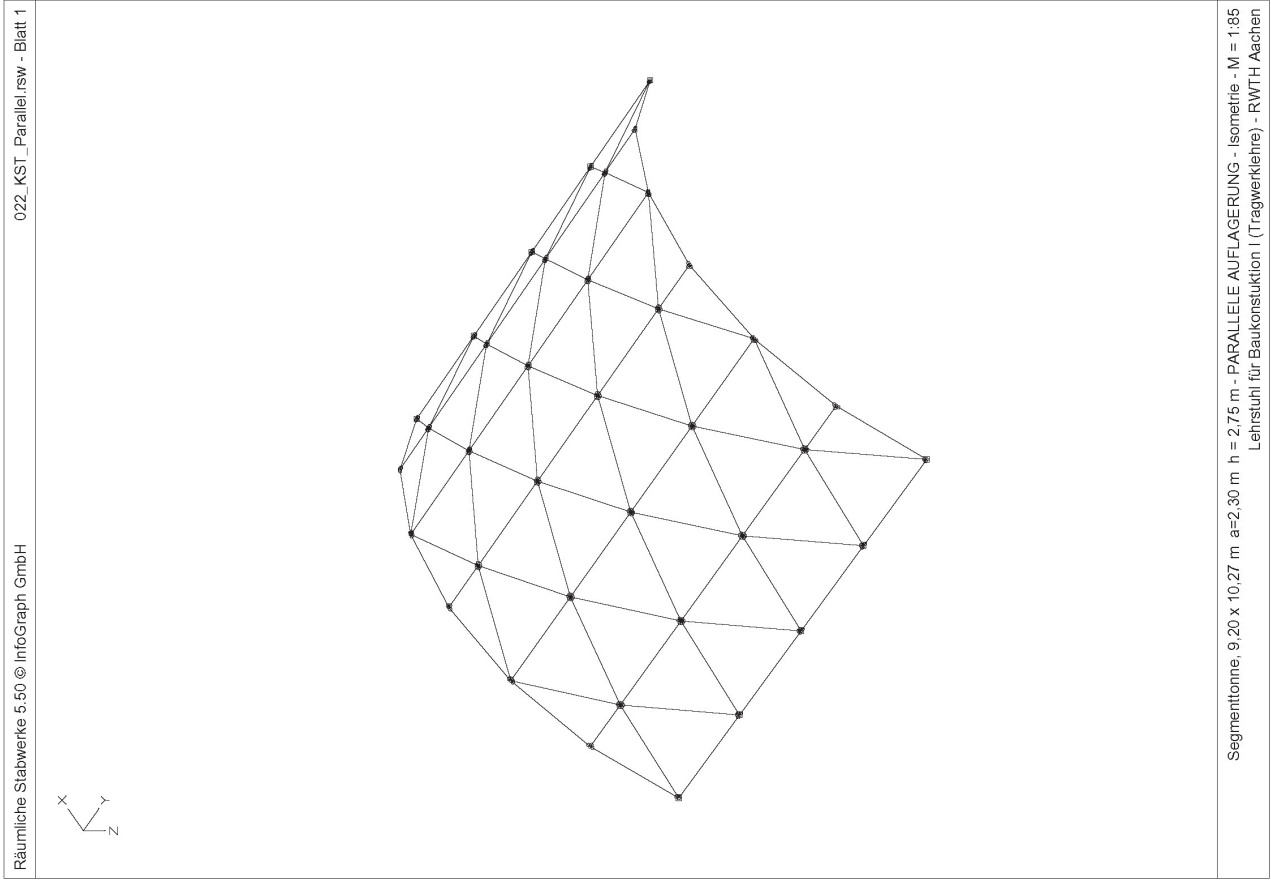
Kurze Segmenttonne, Umfanglagerung, Momente Mz



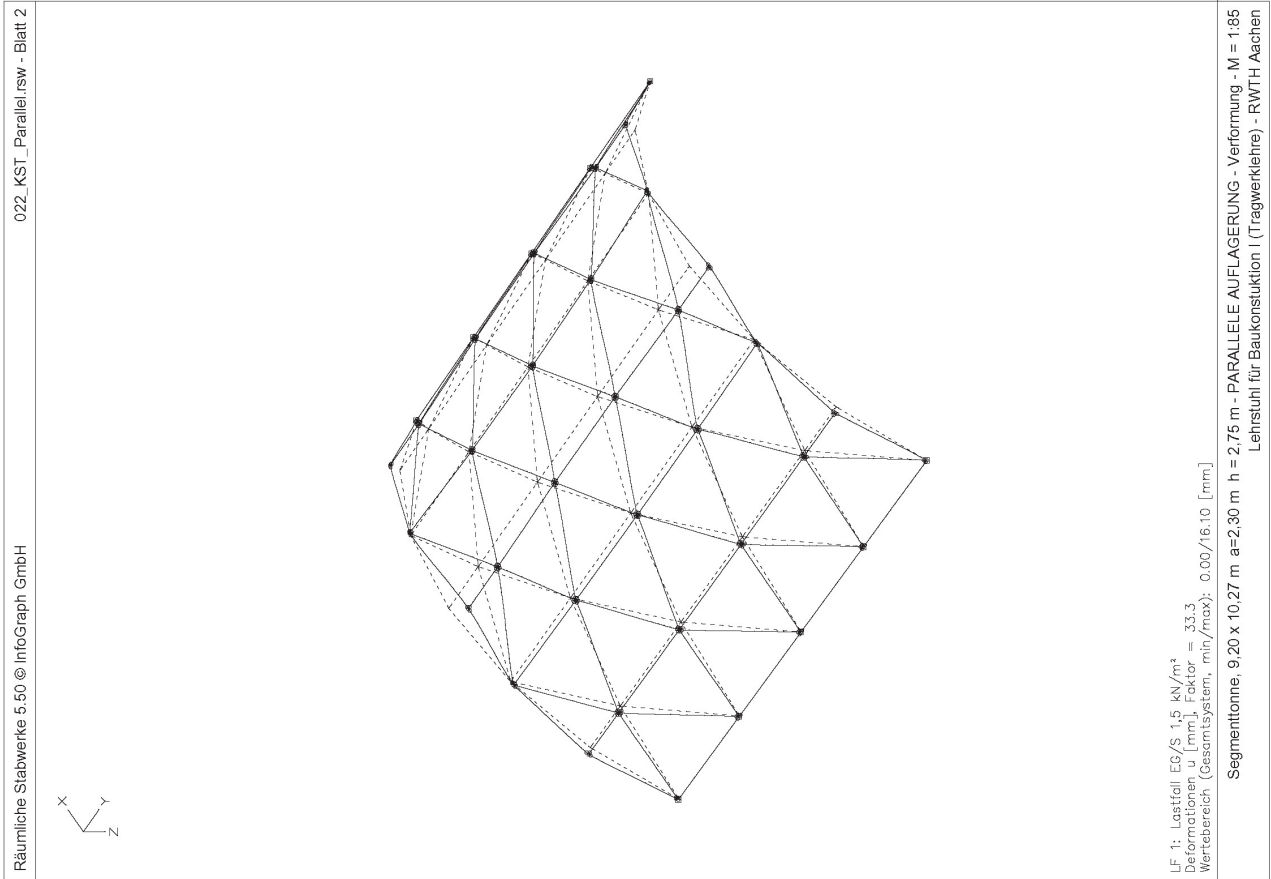
Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qy



Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qz

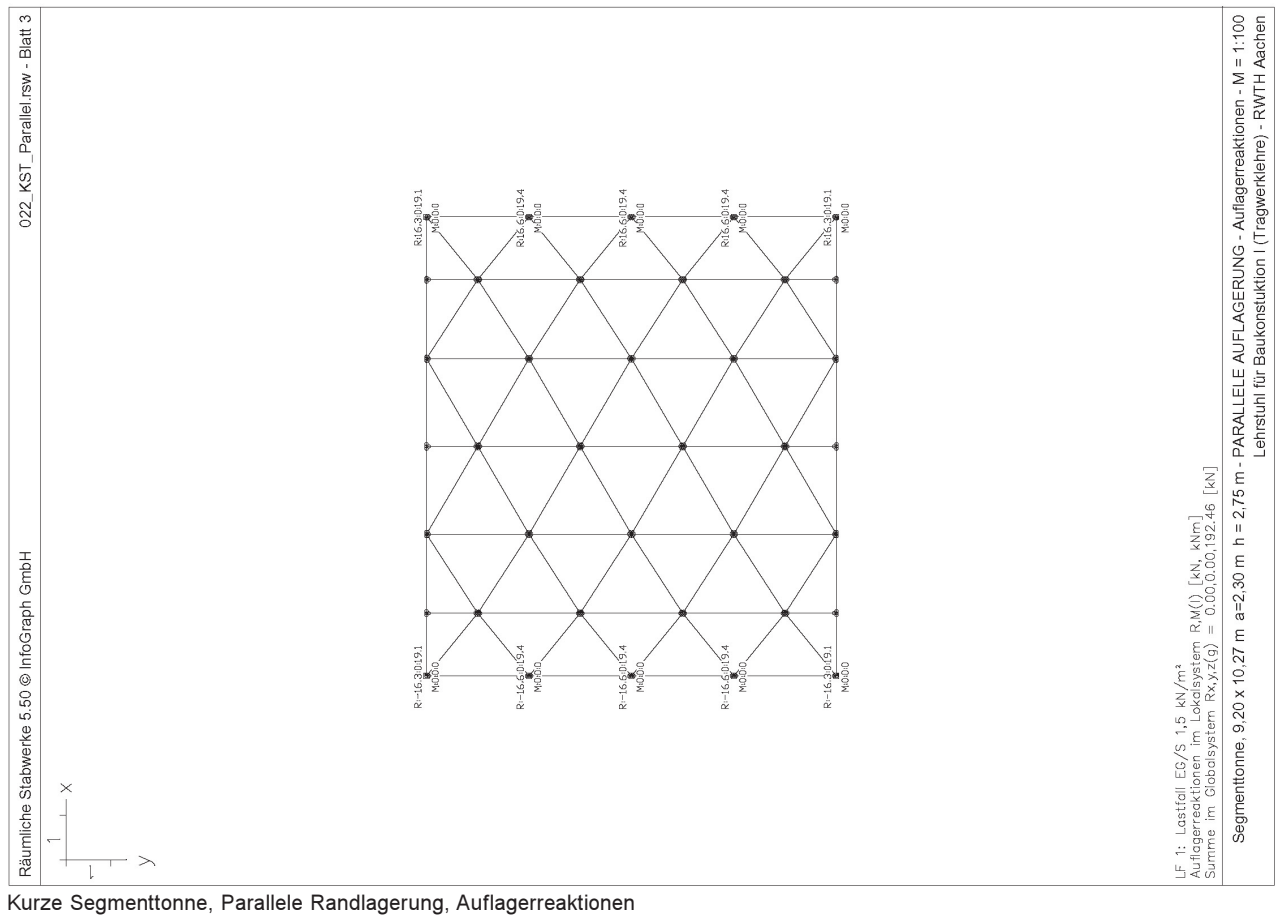


Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Isometrie

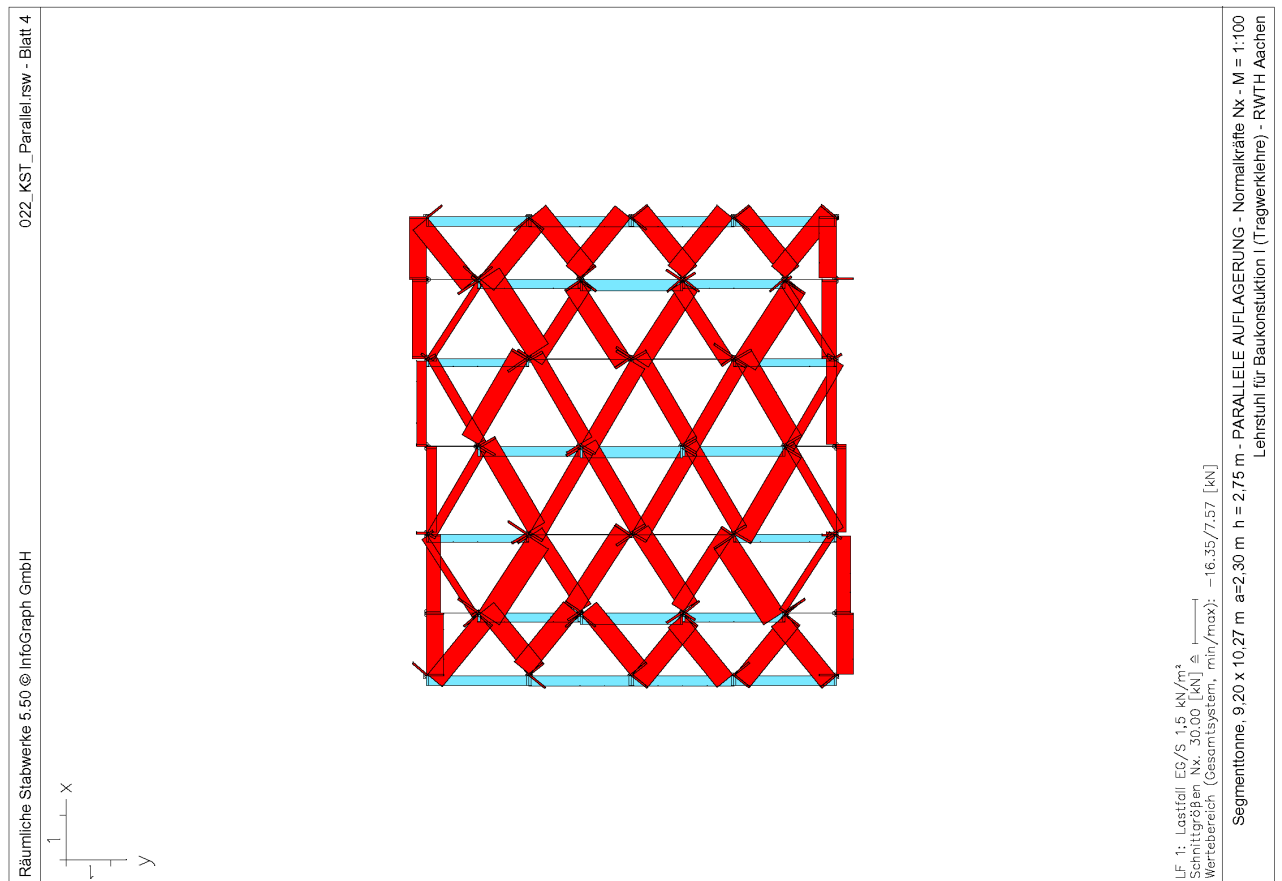


Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Verformung

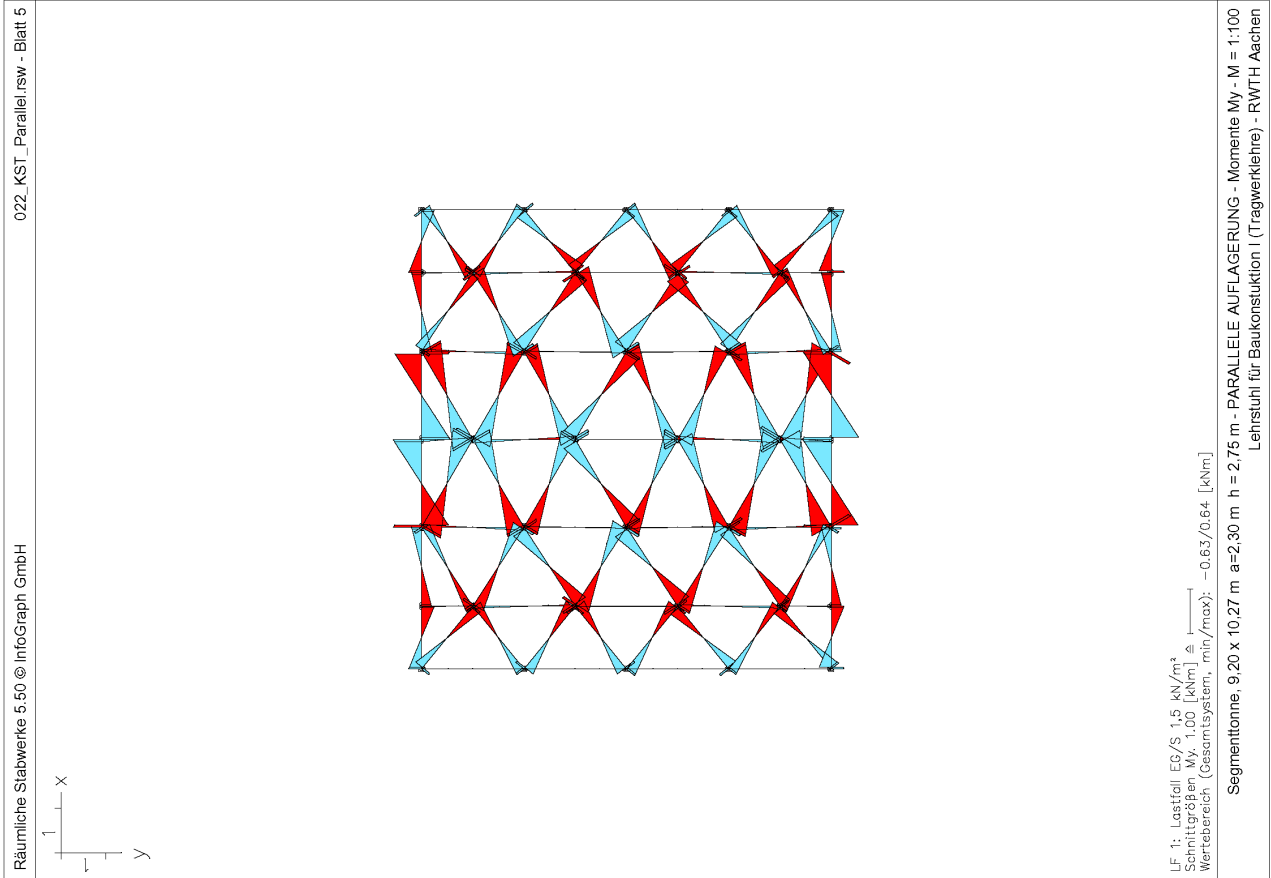
10.3.2 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - Kurze **Segmenttonne**, Parallele Randlagerung



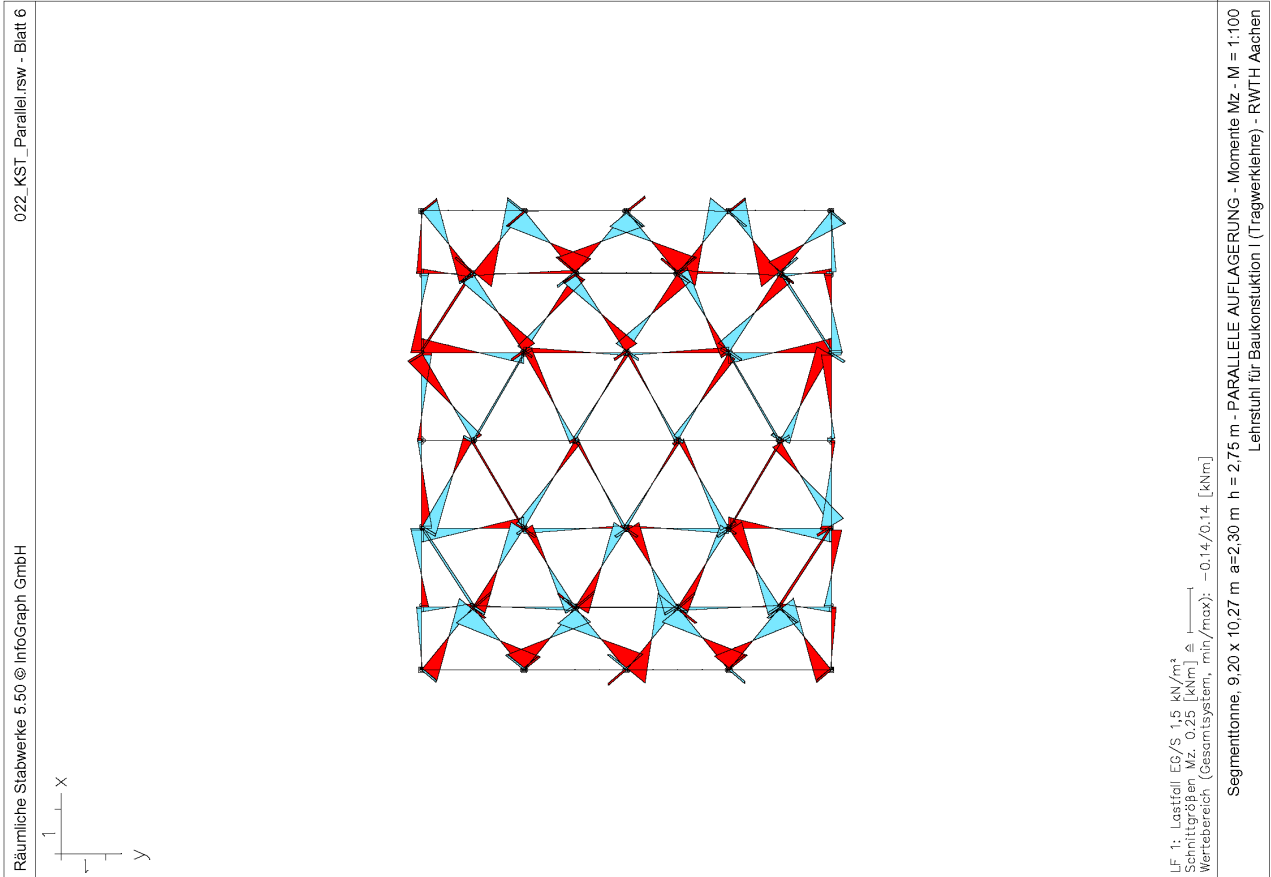
Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Auflagerreaktionen



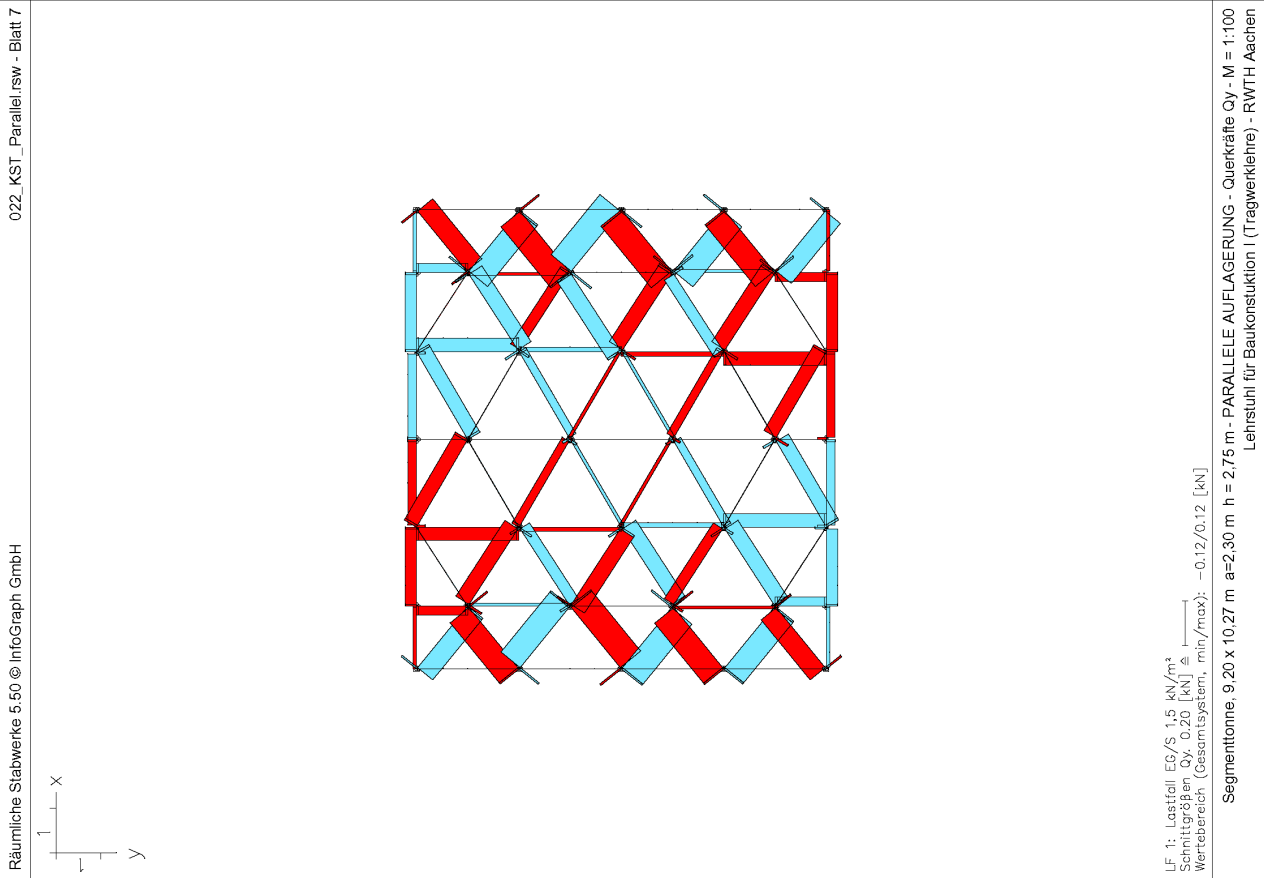
Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Normalkräfte Nx



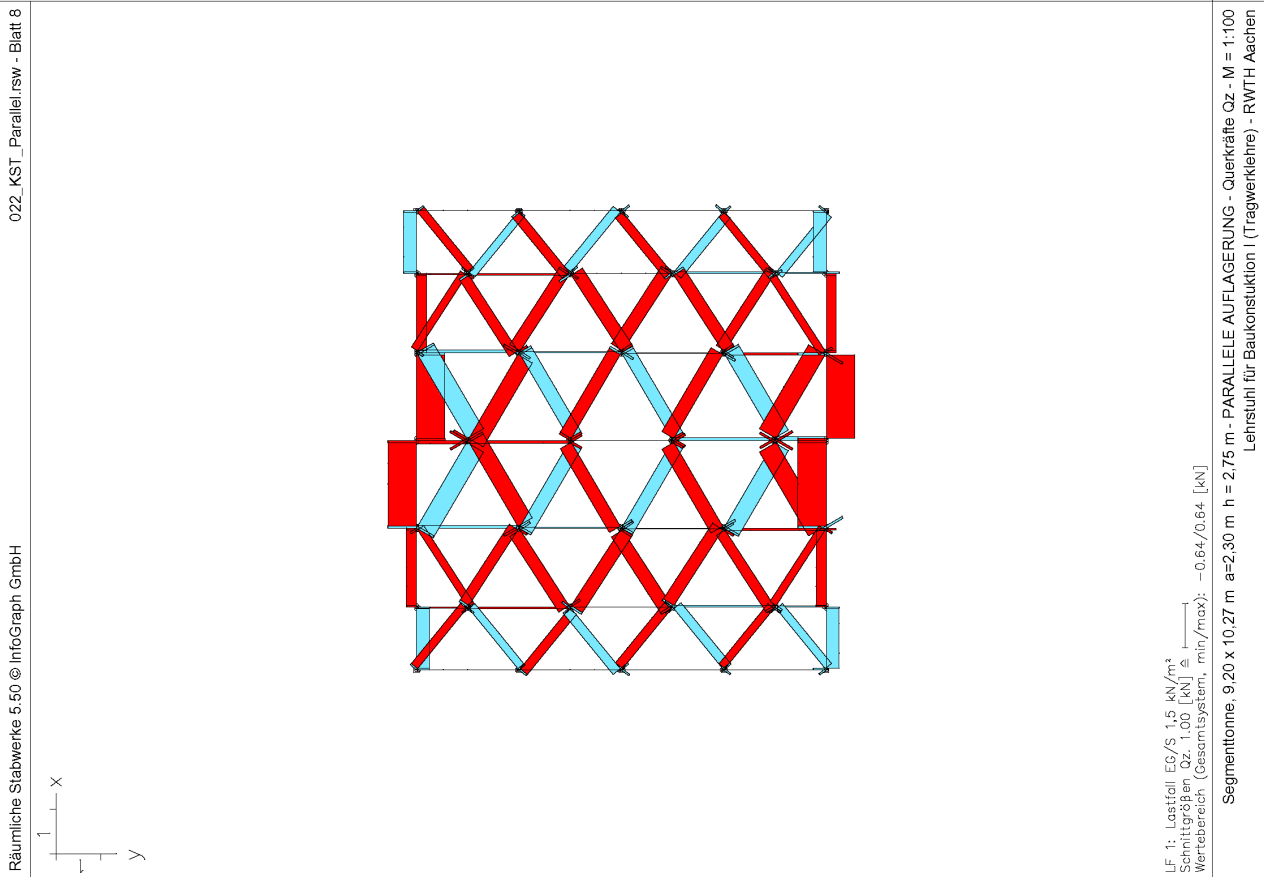
Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Momente My



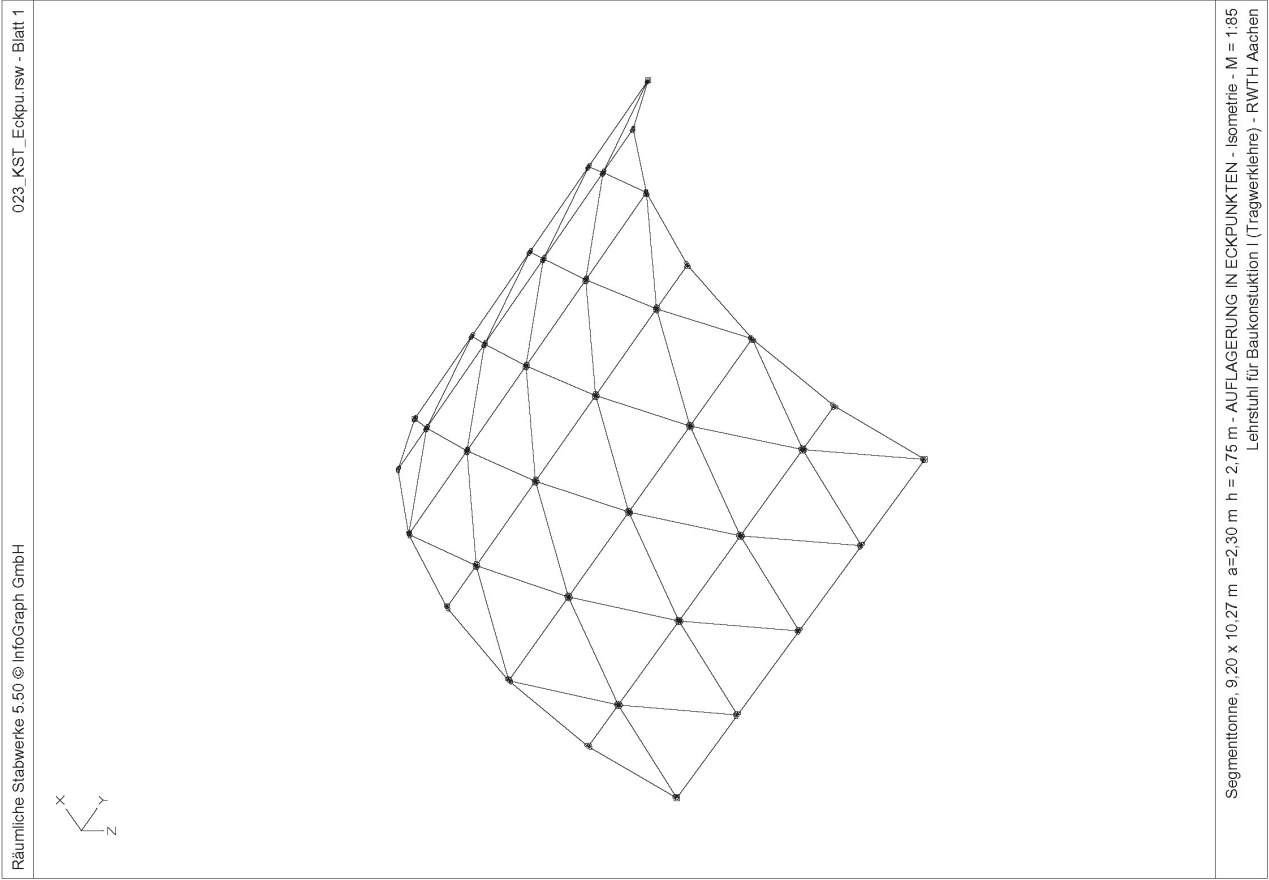
Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Momente Mz



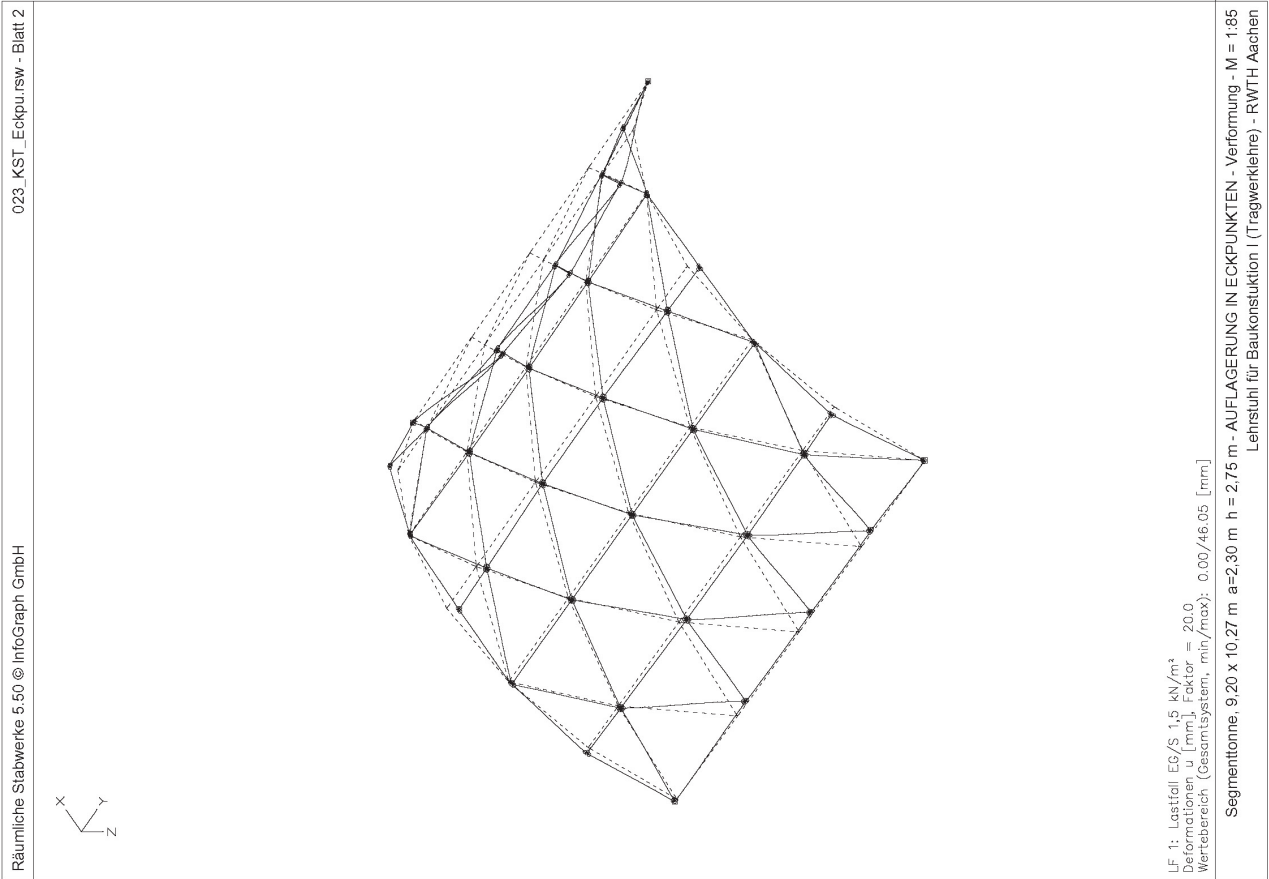
Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Querkräfte Qy



Kurze Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Querkräfte Qz

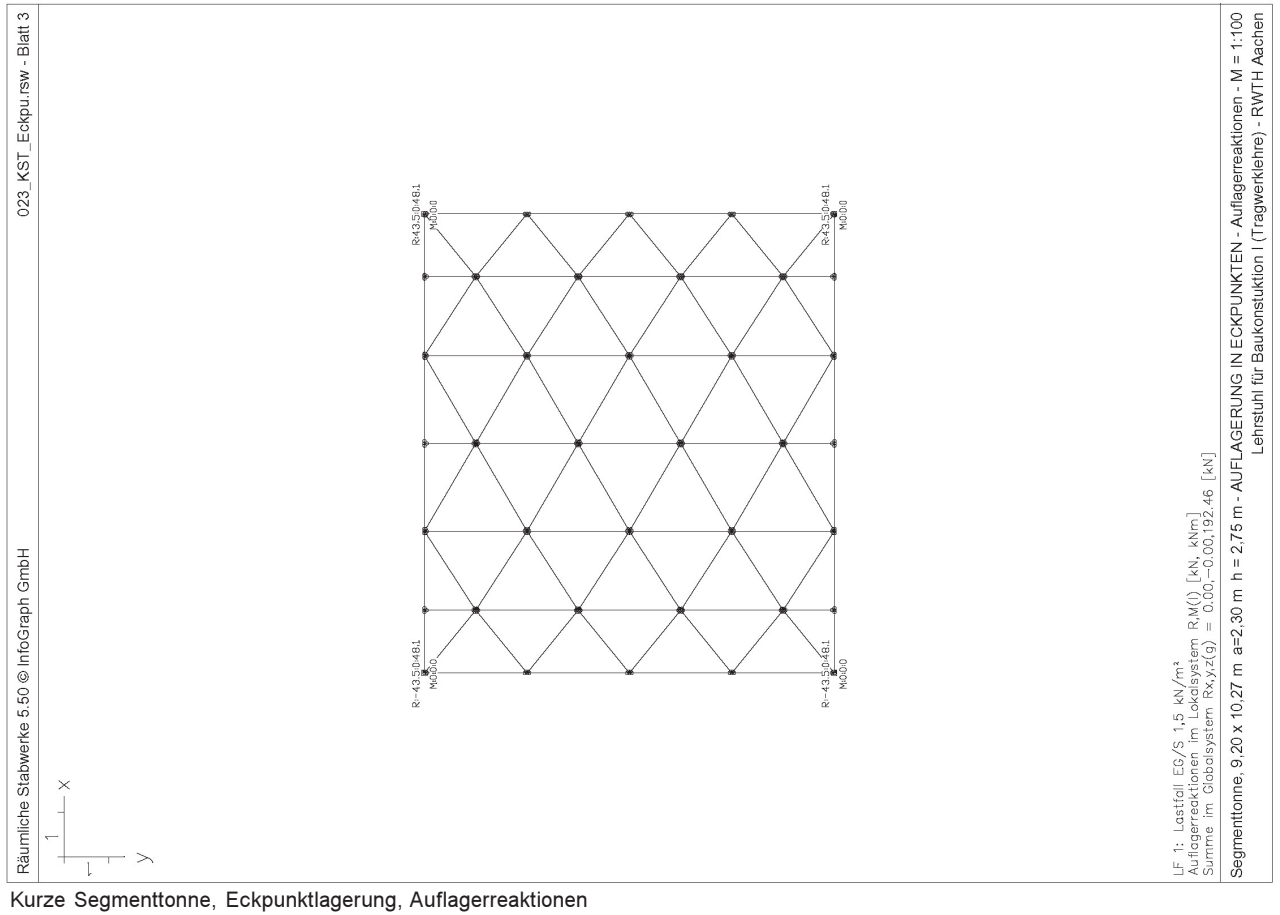


Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Isometrie

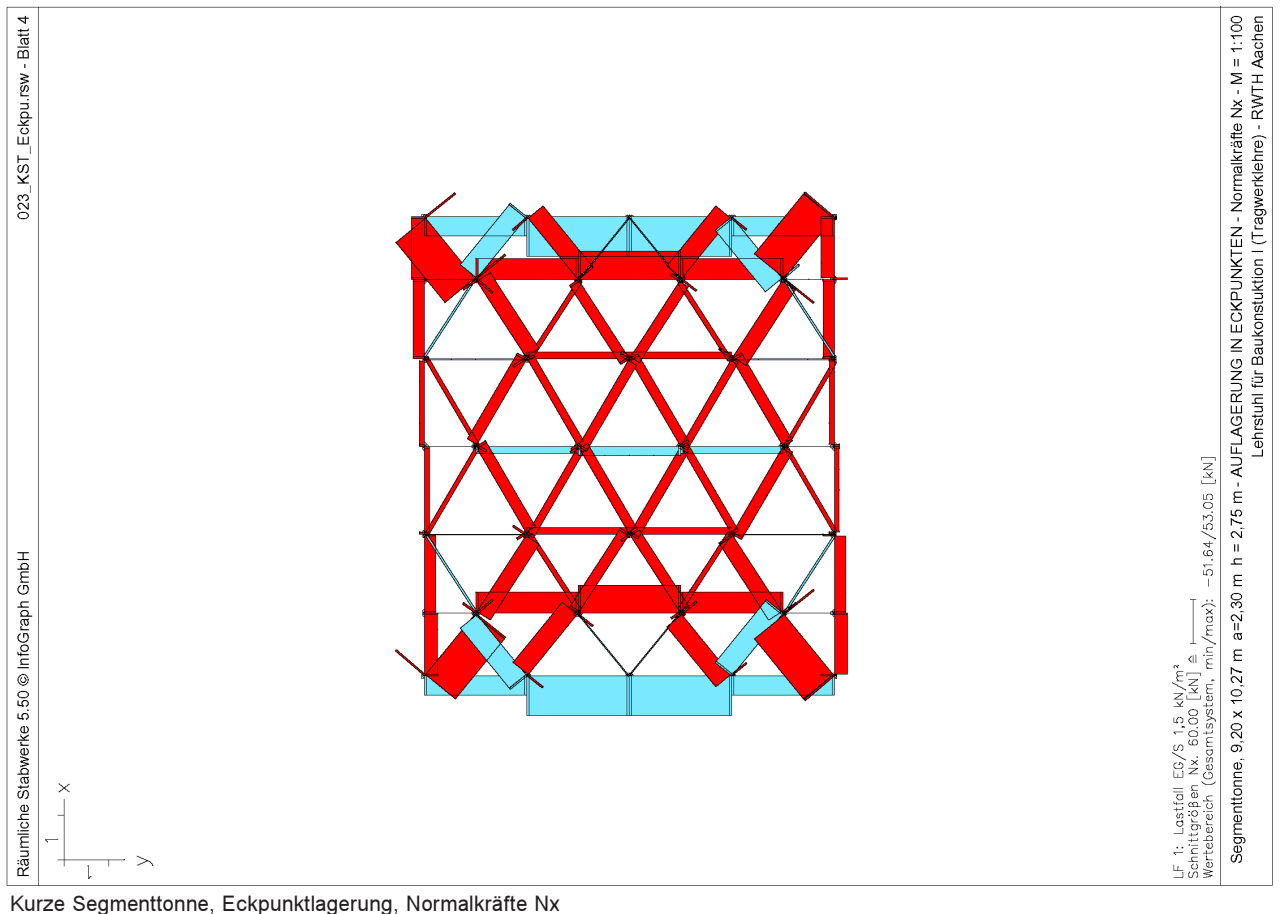


Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Verformung

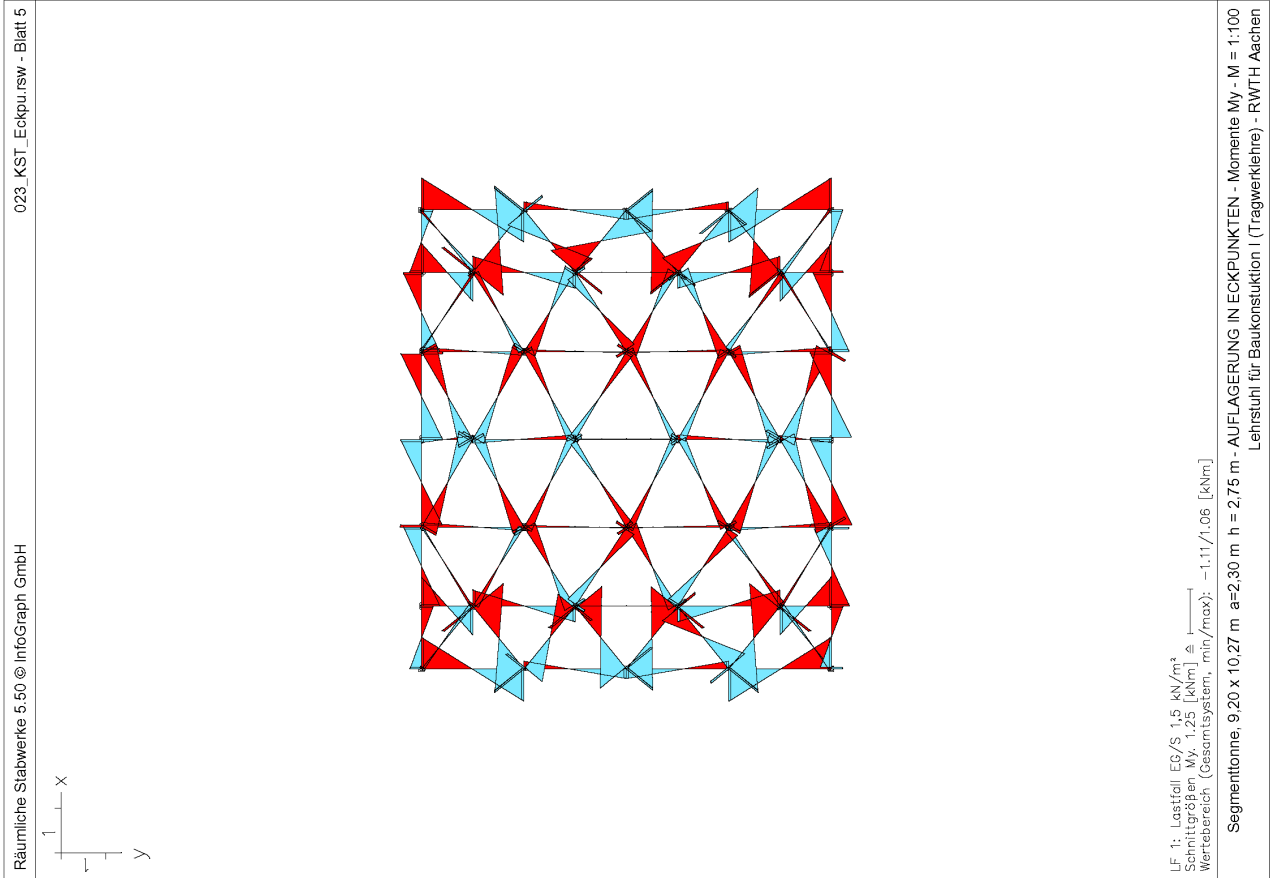
10.3.2 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - Kurze **Segmenttonne**, Eckpunktlagerung



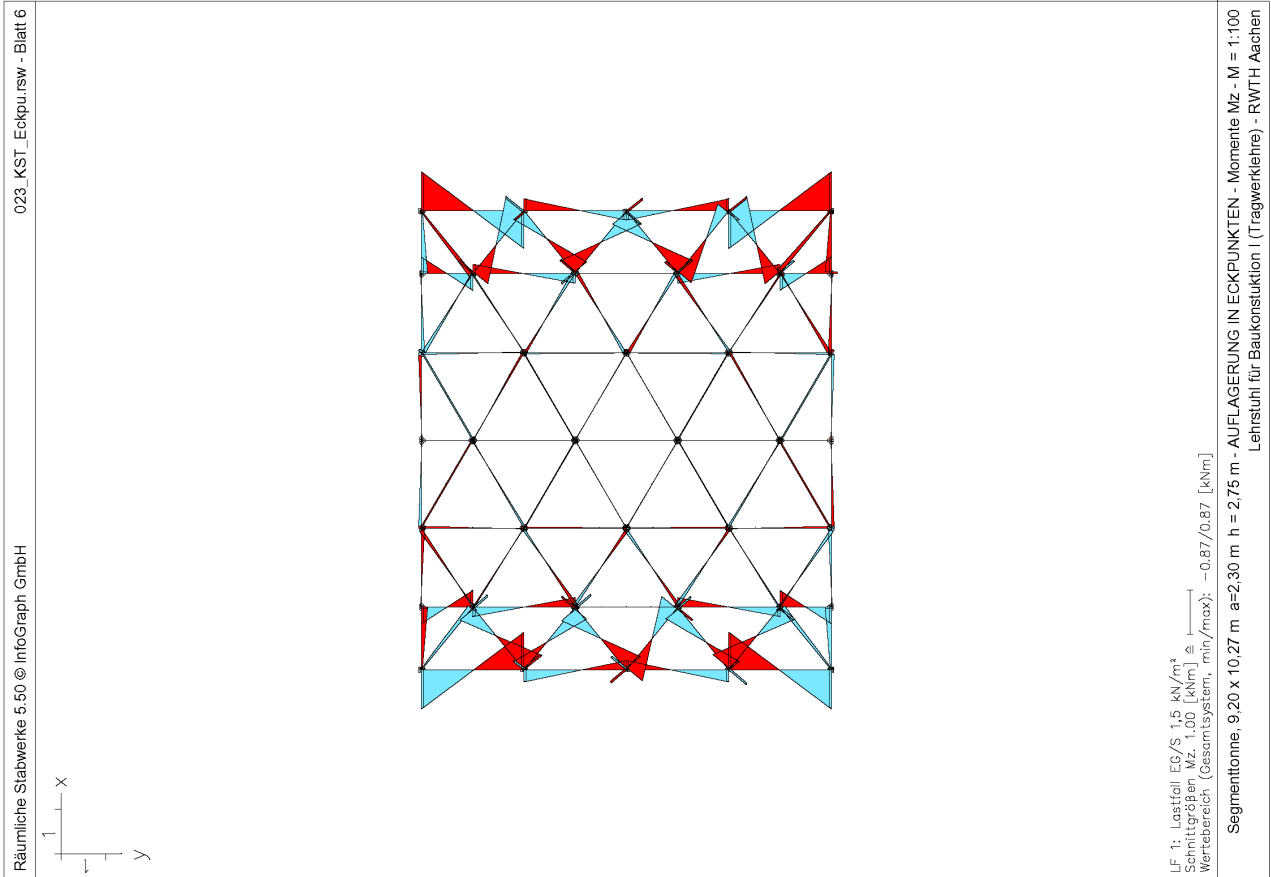
Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Auflagerreaktionen



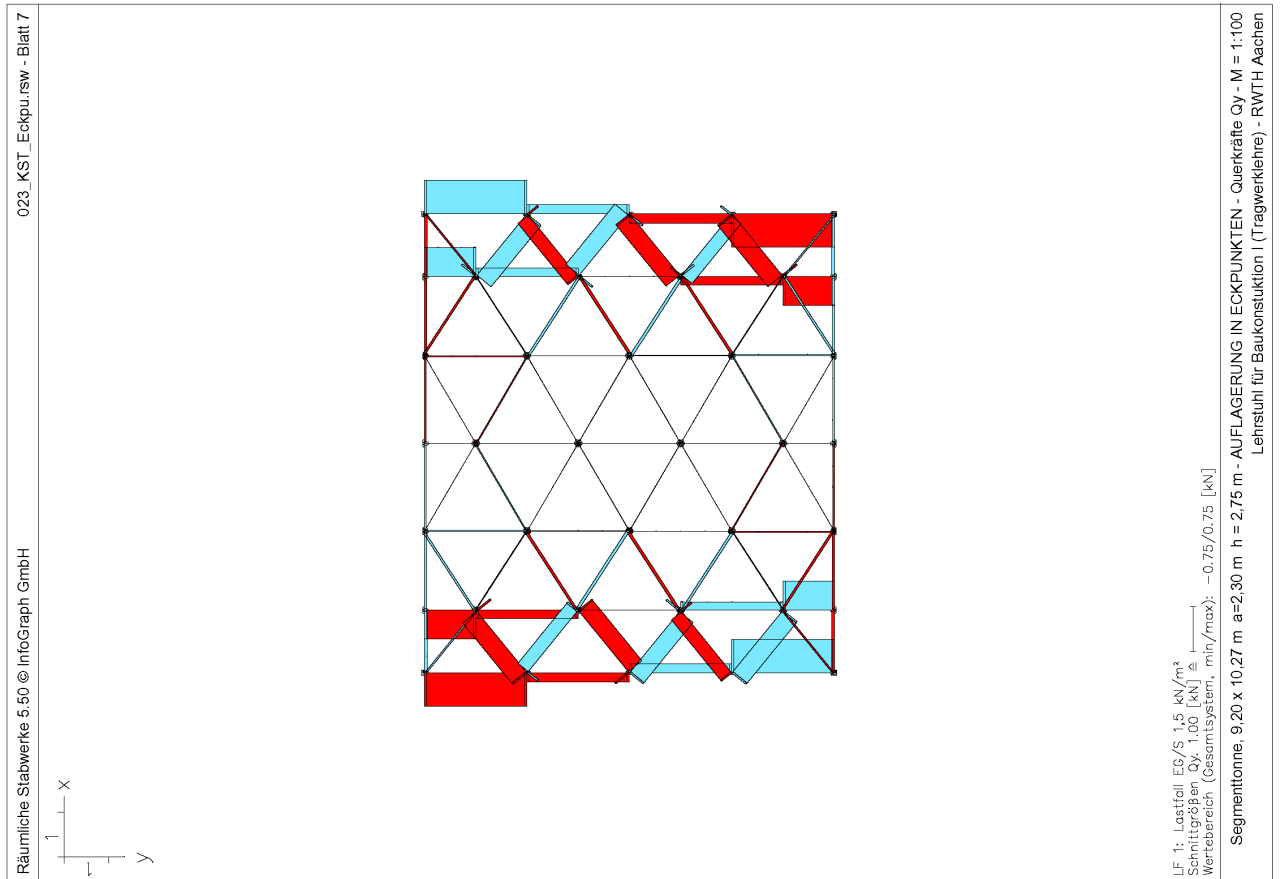
Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Normalkräfte Nx



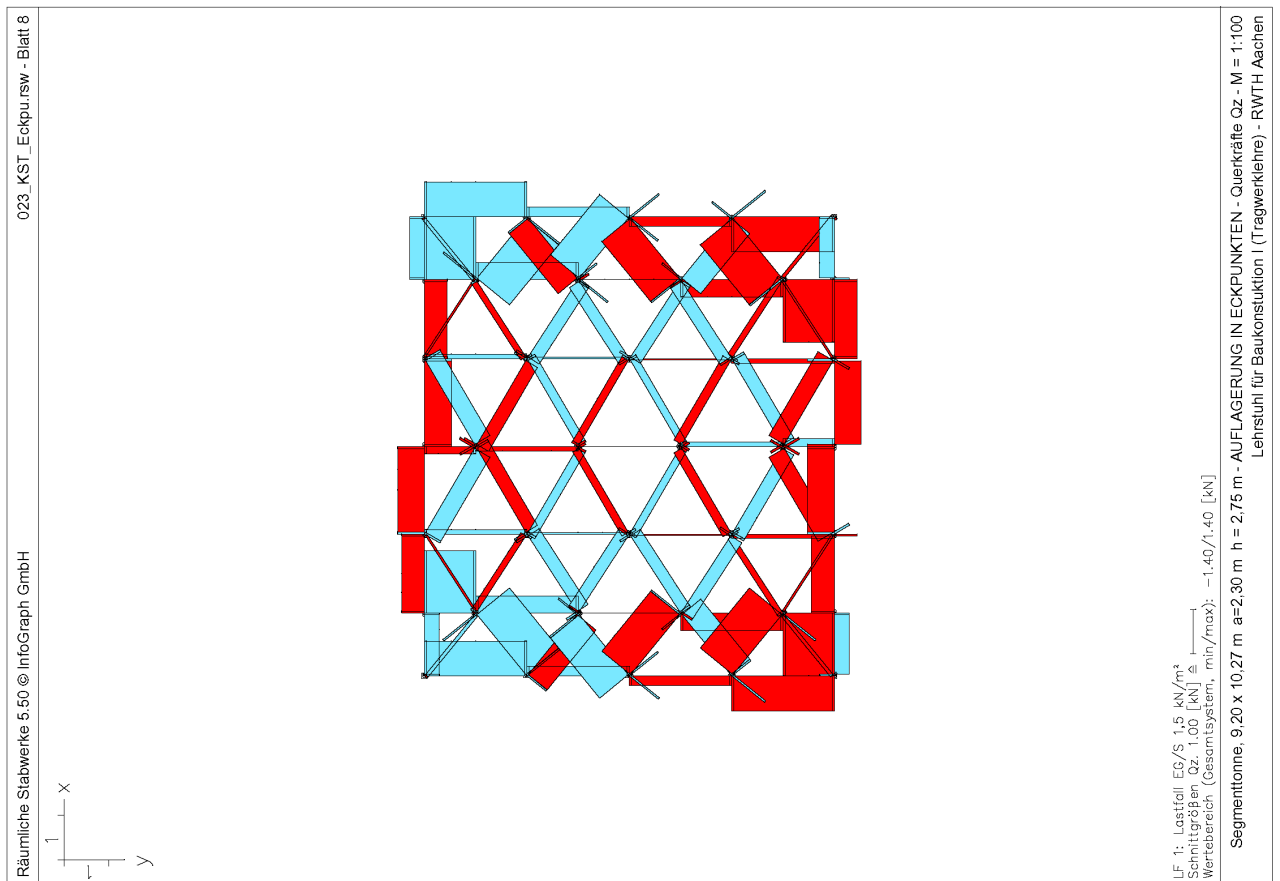
Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Momente My



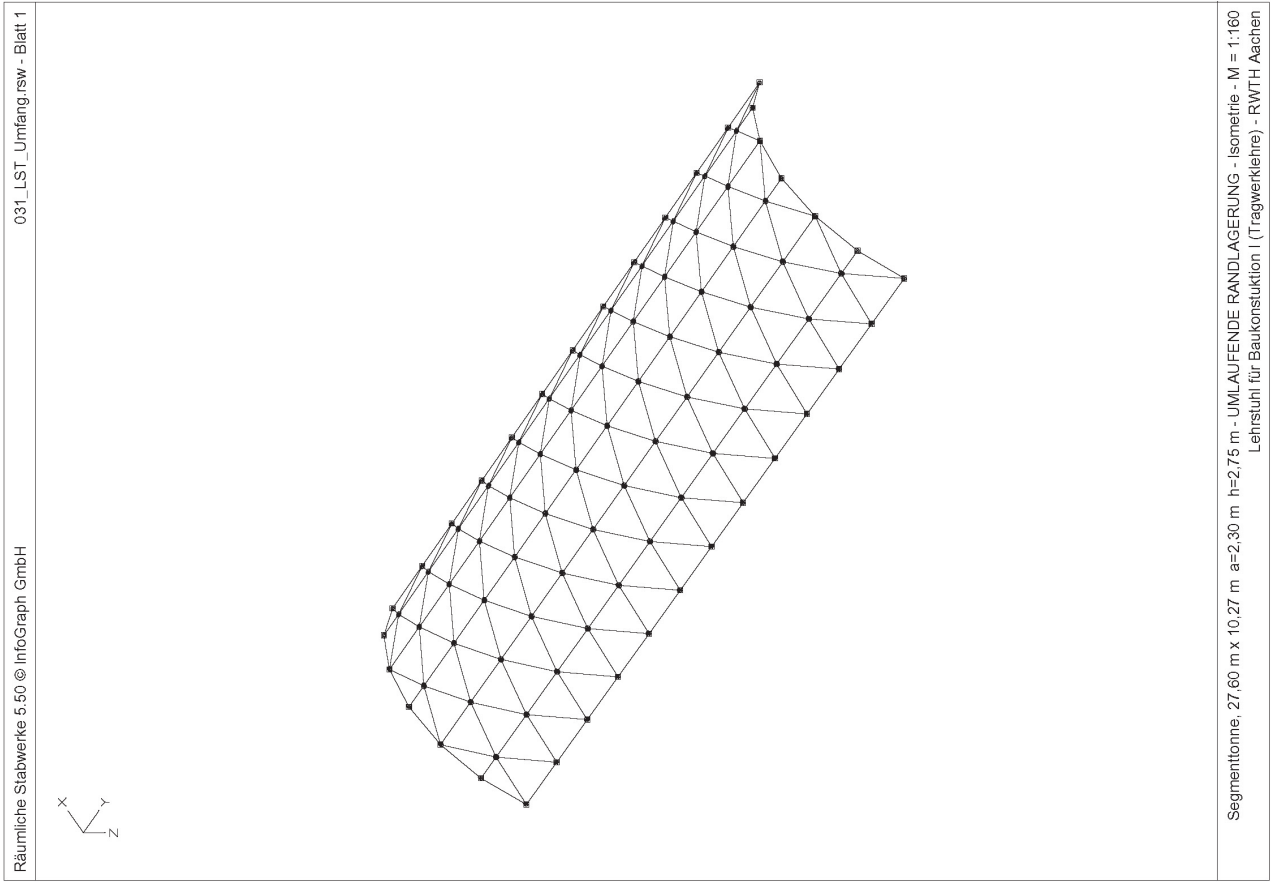
Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Momente Mz



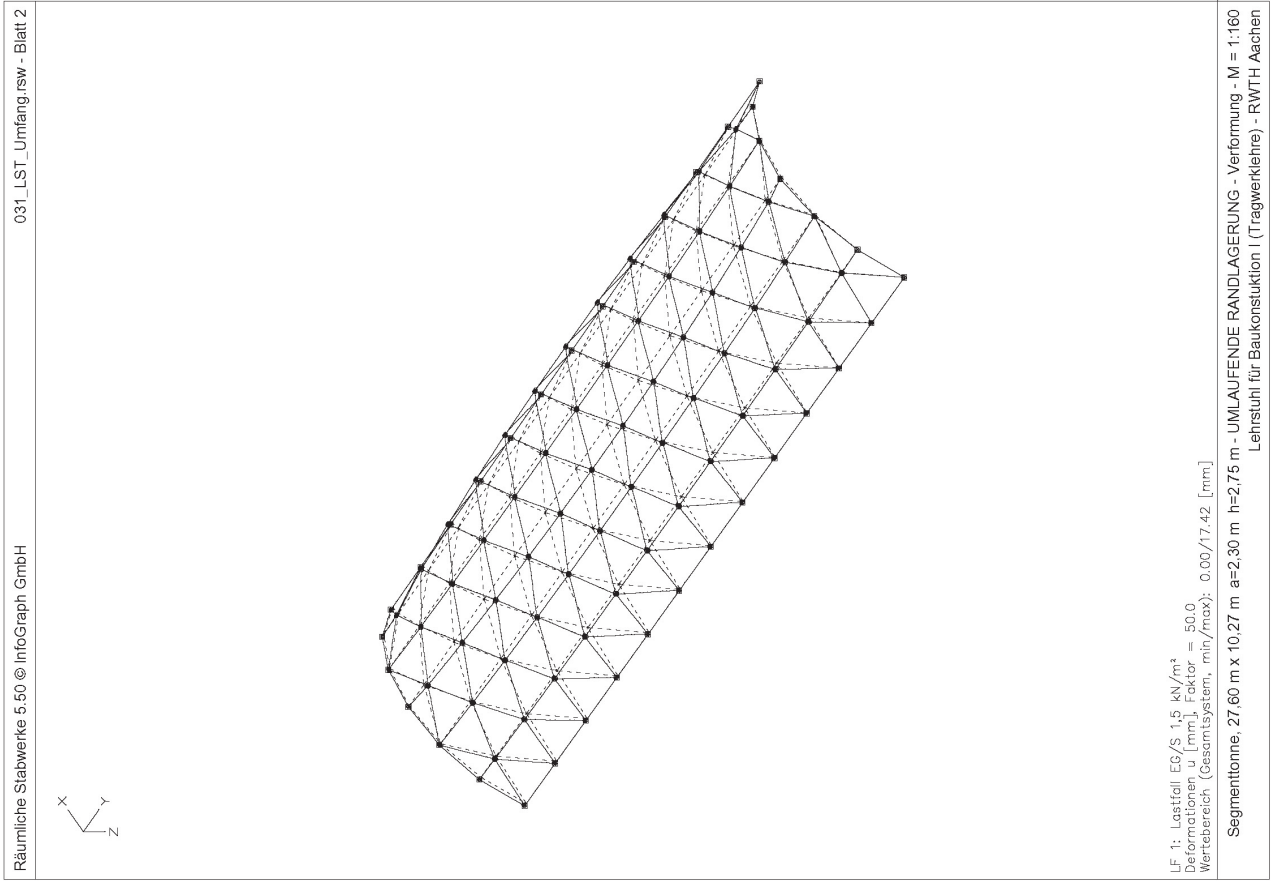
Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qy



Kurze Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qz

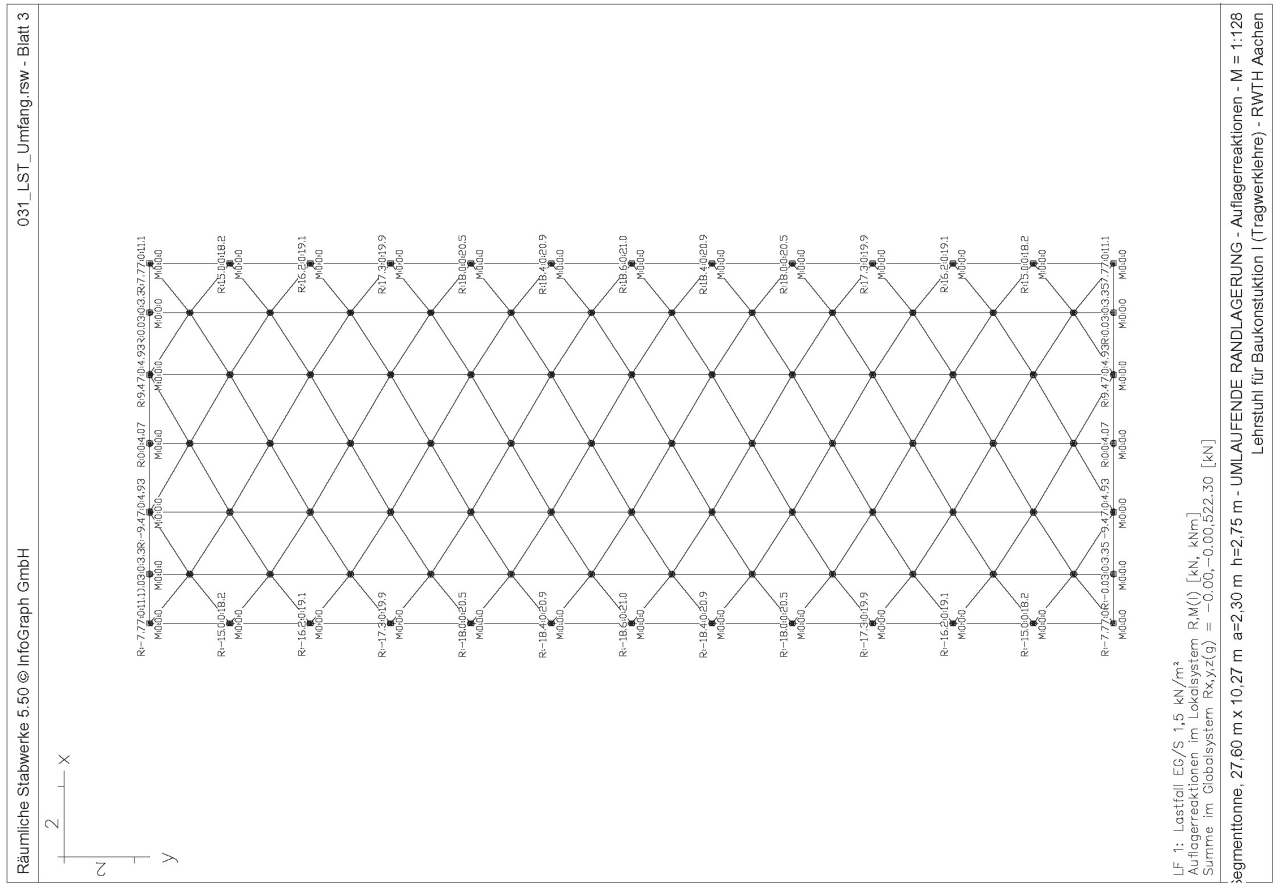


Lange Segmenttonne, Umfanglagerung, Isometrie

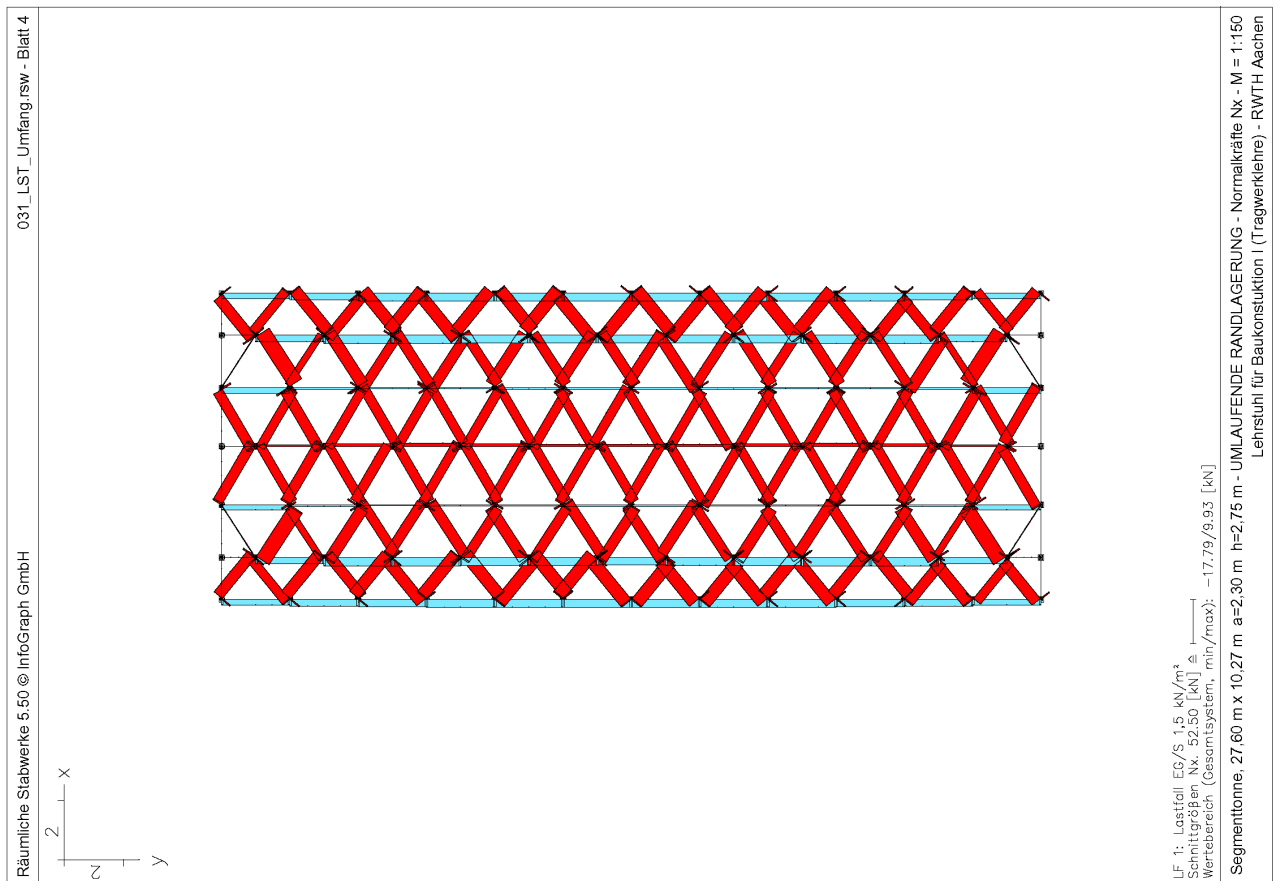


Lange Segmenttonne, Umfanglagerung, Verformung

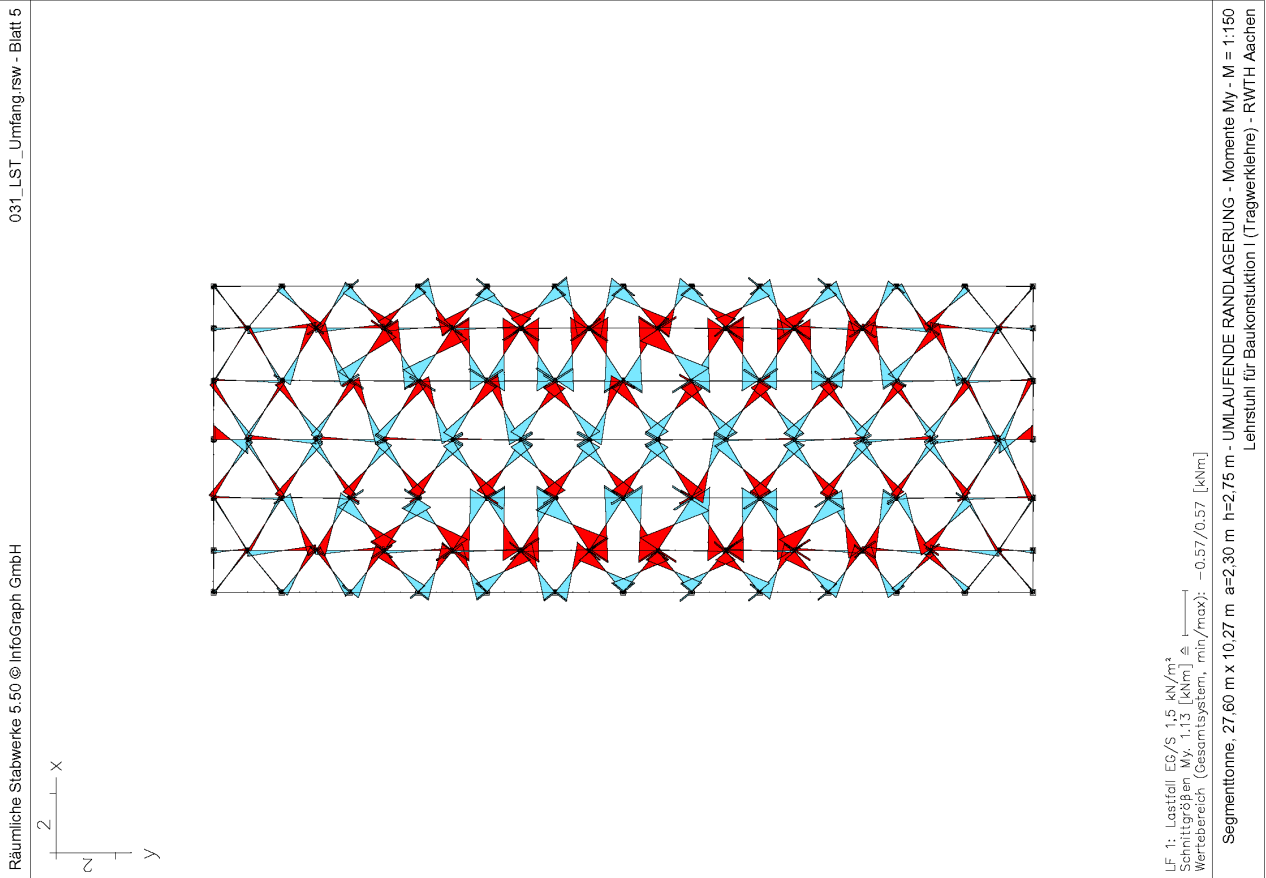
10.3.3 Gekrümmte Knotenstabtragwerke - Lange **Segmenttonne**, Umfanglagerungslagerung



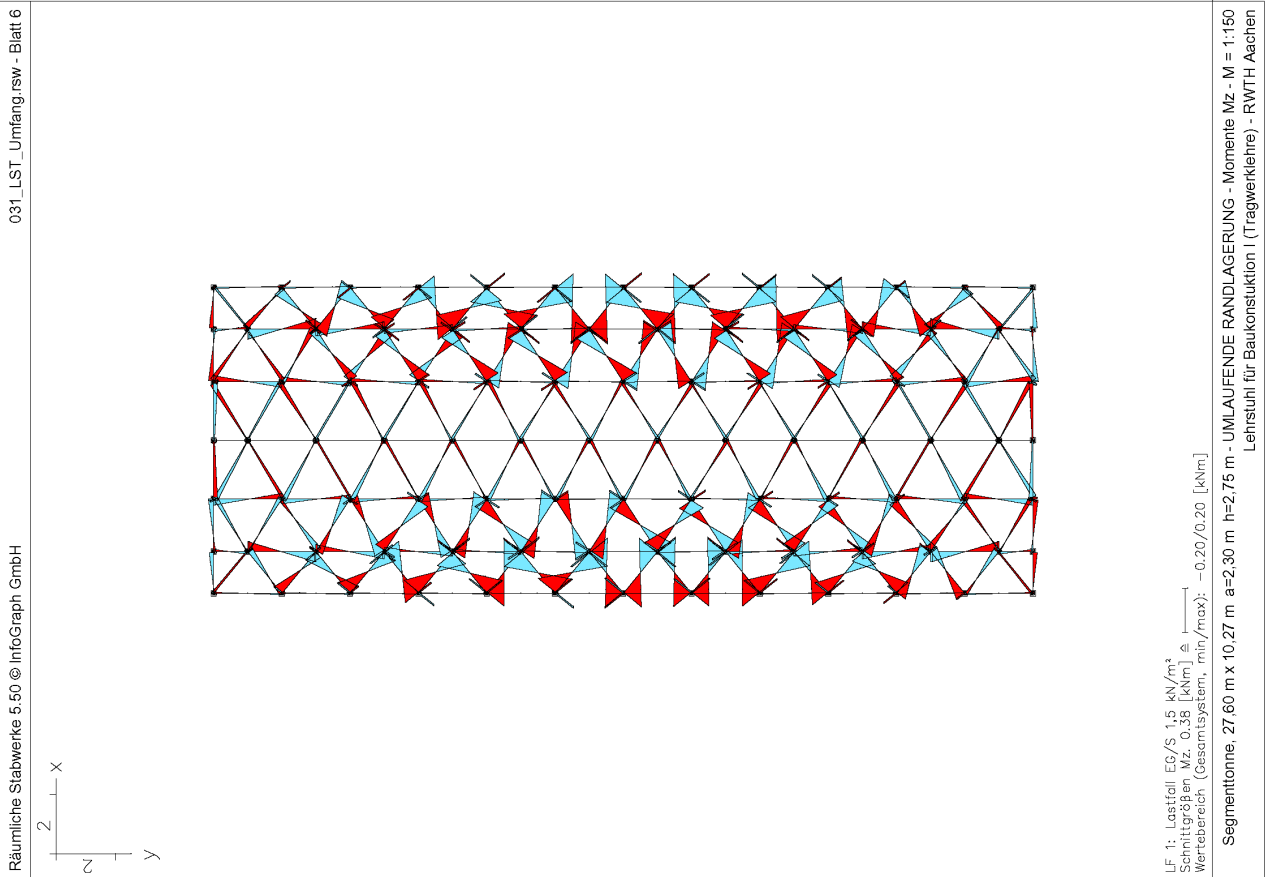
Lange Segmenttonne, Umfanglagerung, Auflagerreaktionen



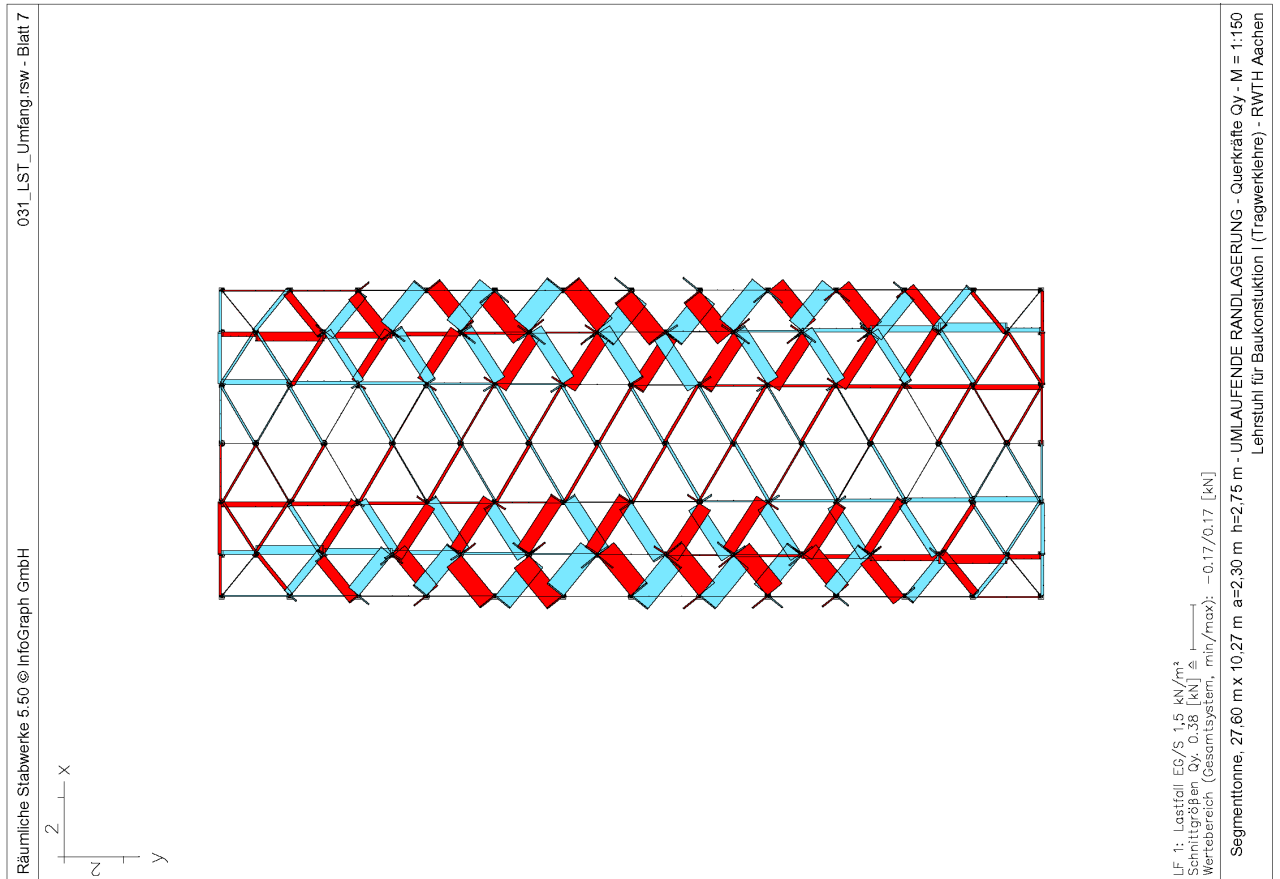
Lange Segmenttonne, Umfanglagerung, Normalkräfte Nx



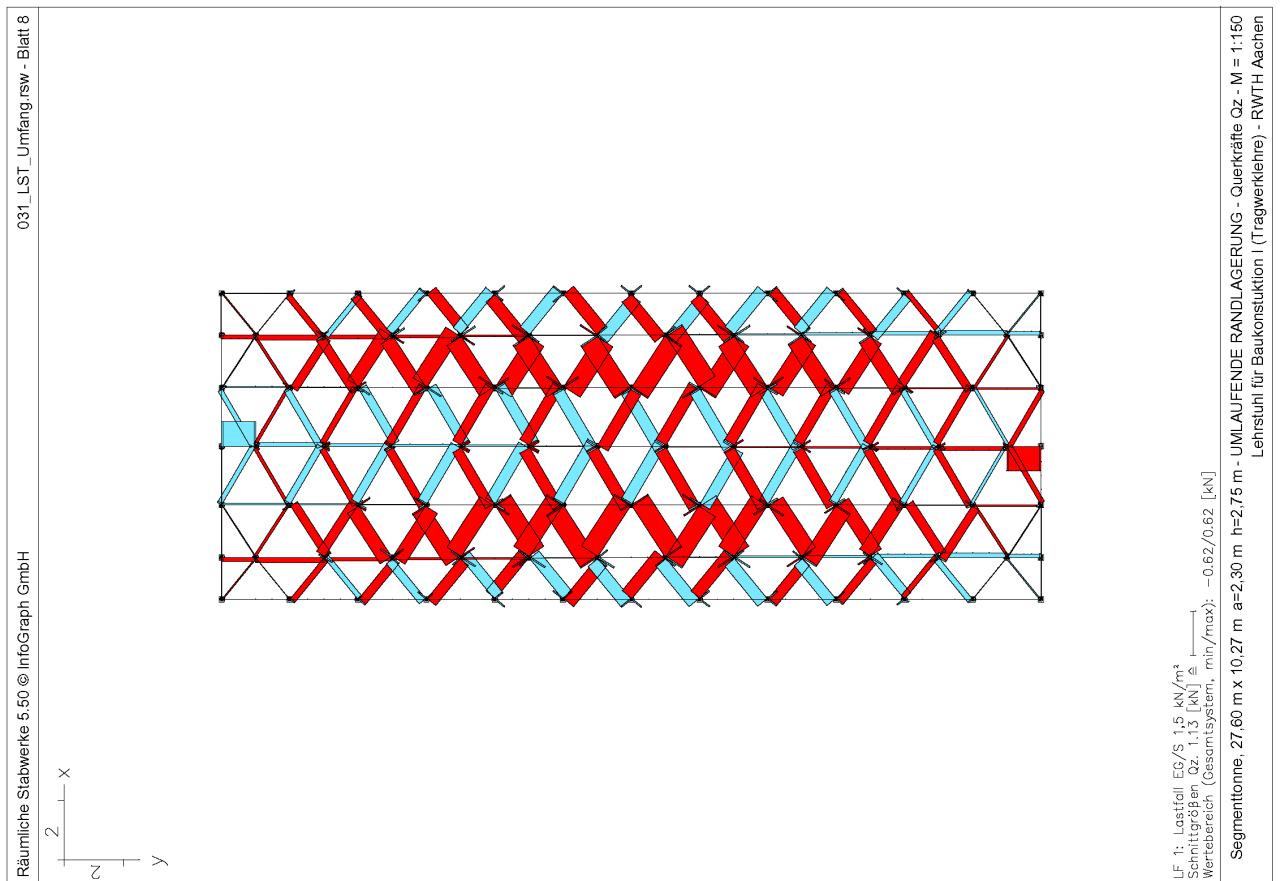
Lange Segmenttonne, Umfanglagerung, Momente My



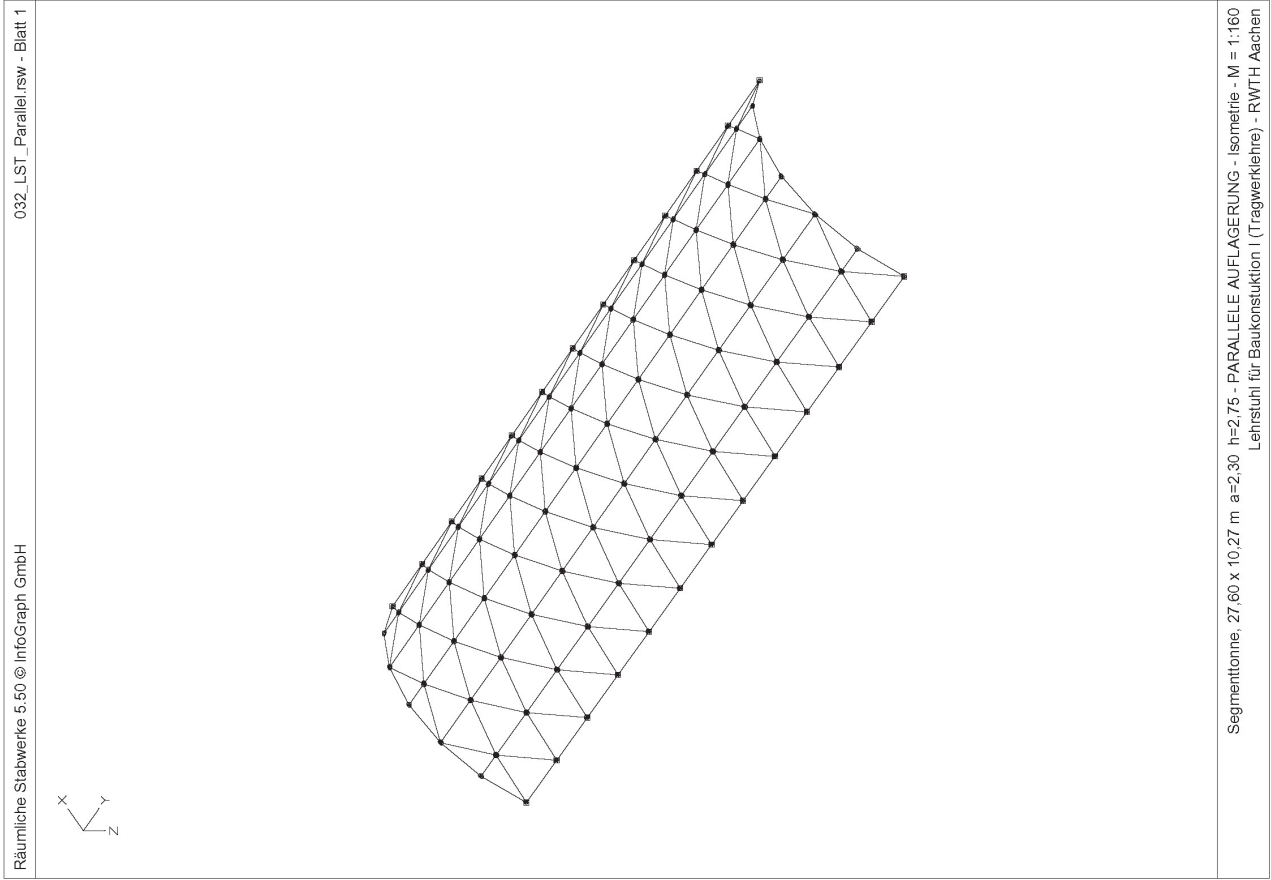
Lange Segmenttonne, Umfanglagerung, Momente Mz



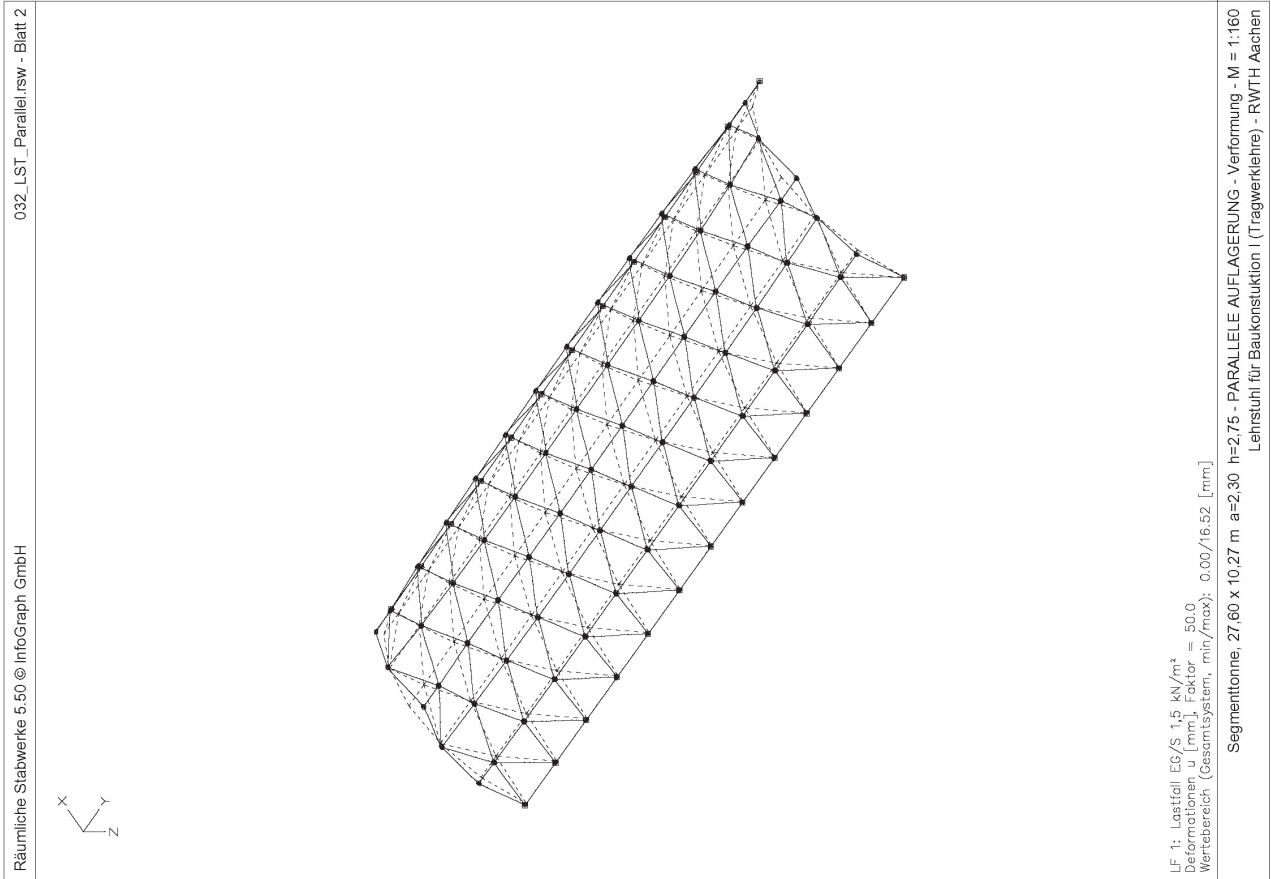
Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qy



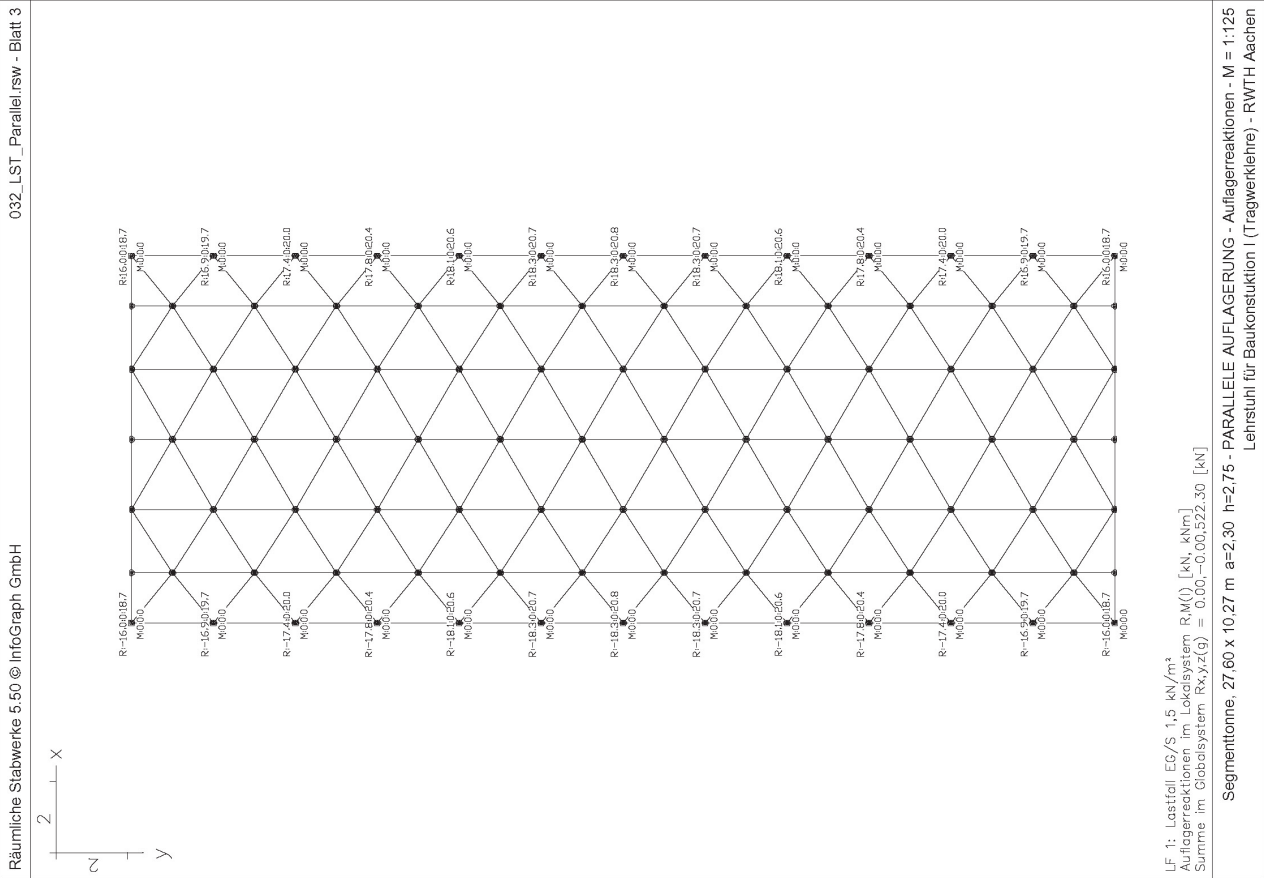
Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qz



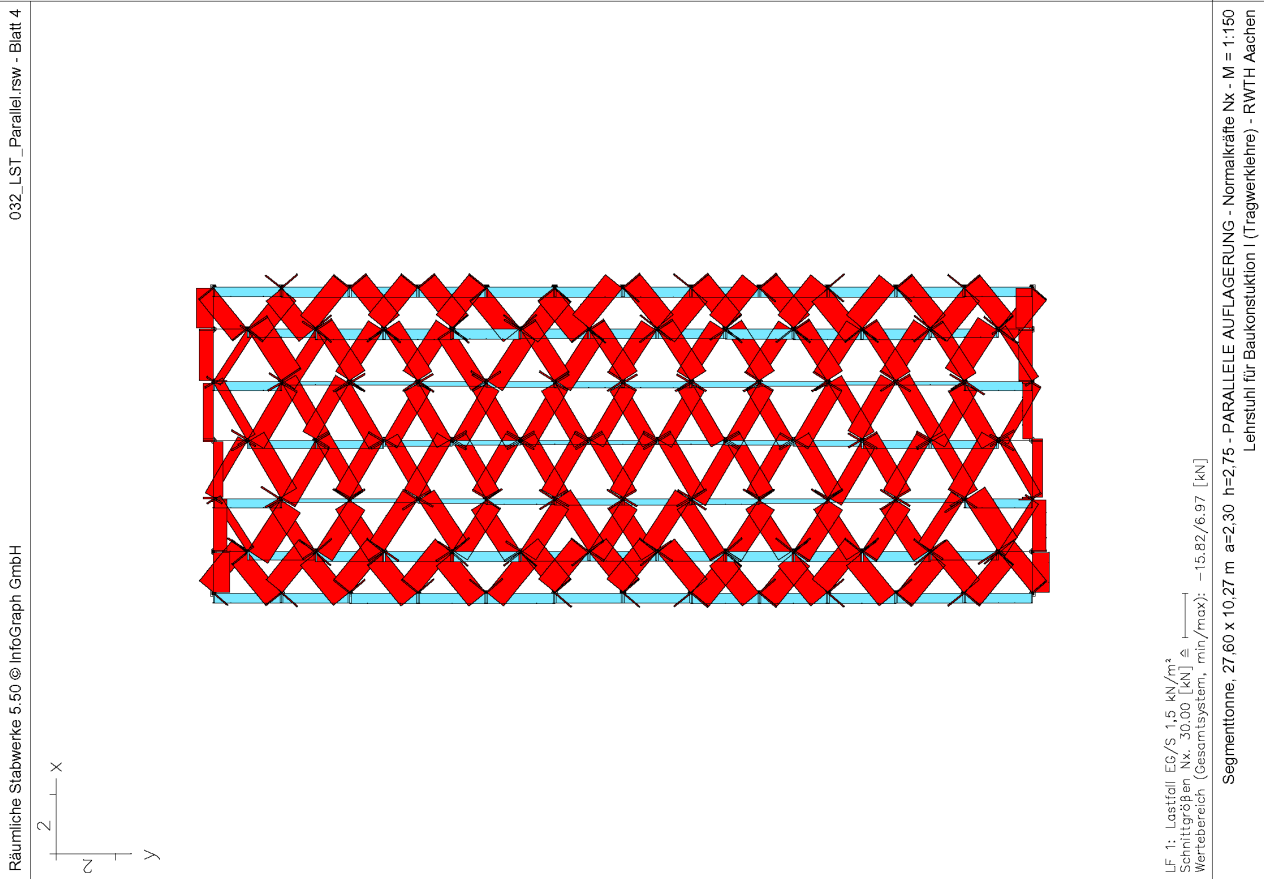
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Isometrie



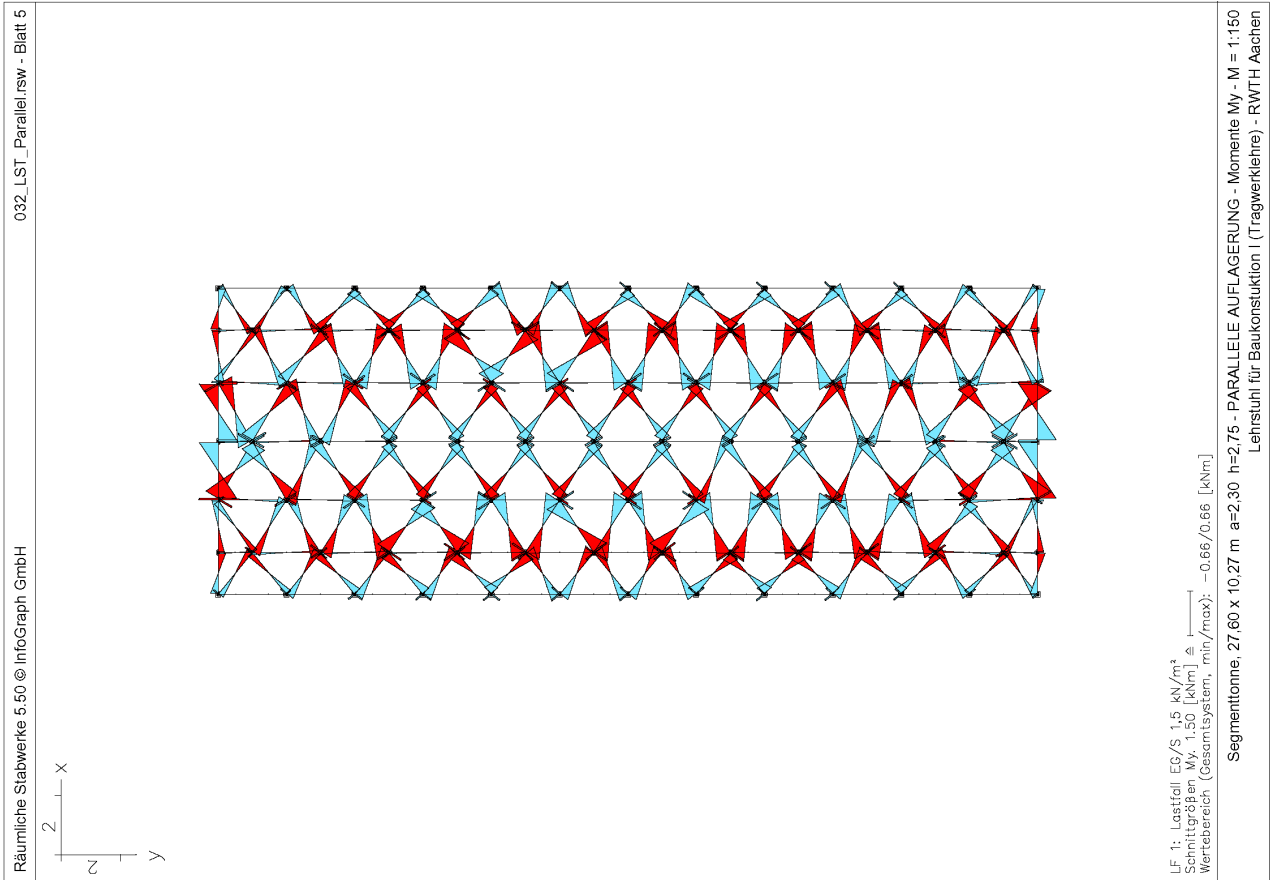
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Verformung



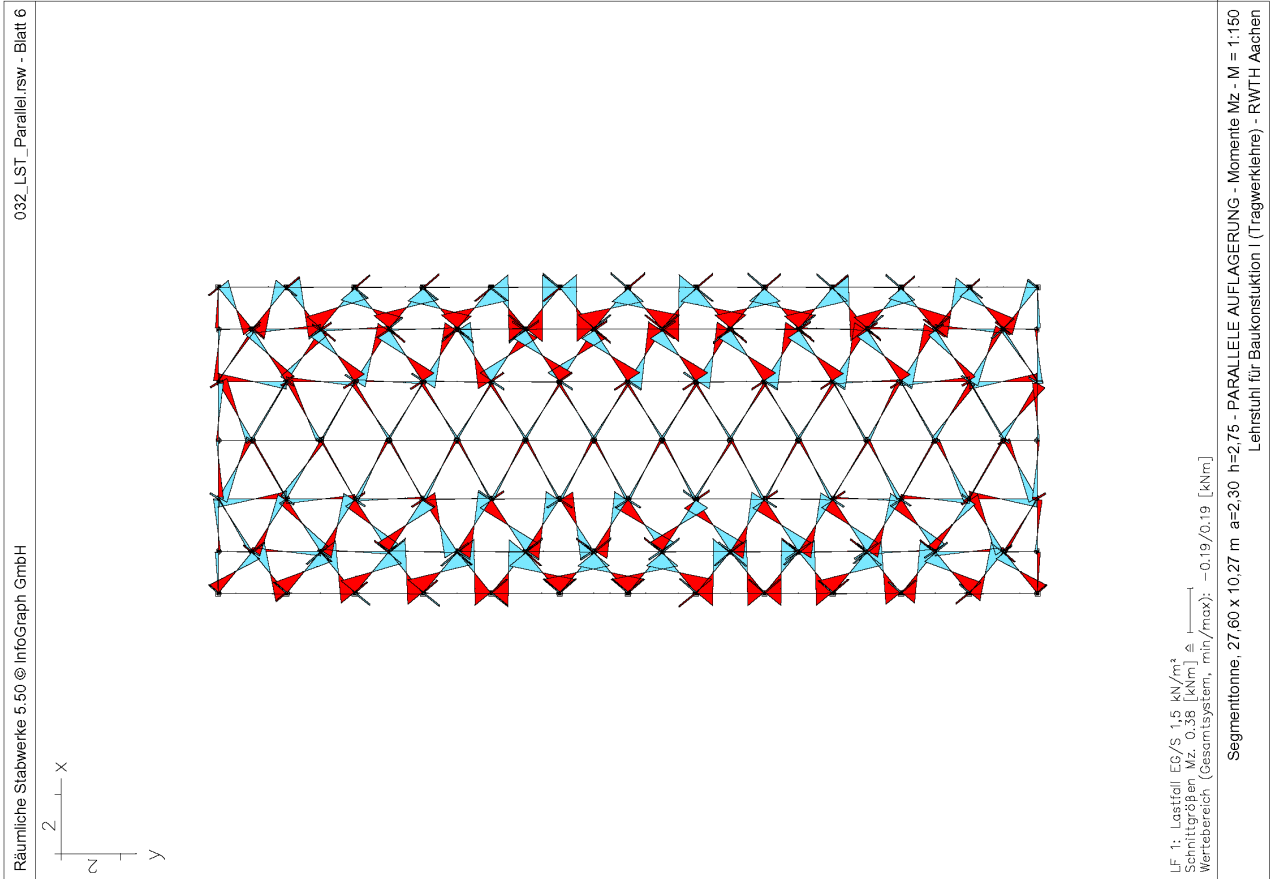
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Auflagerreaktionen



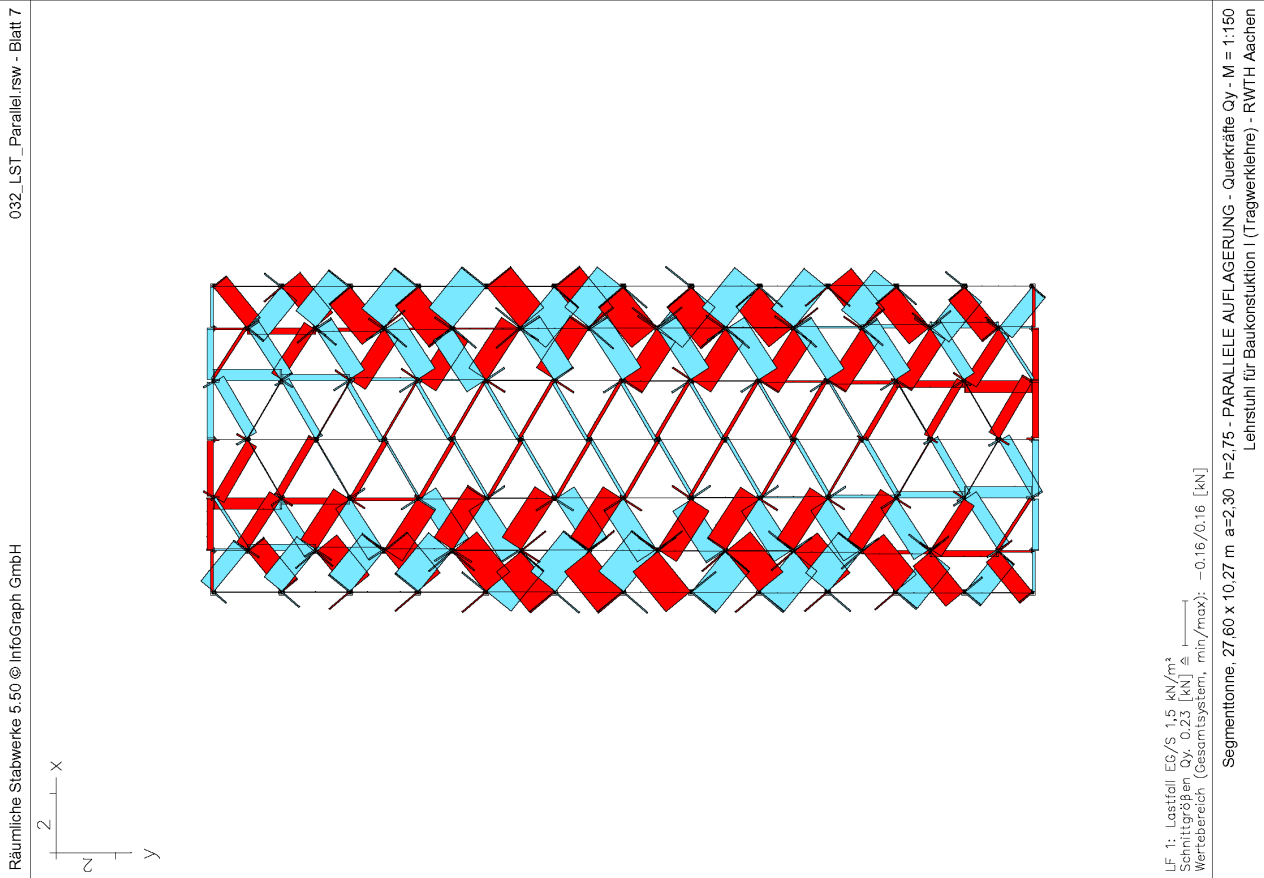
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Normalkräfte Nx



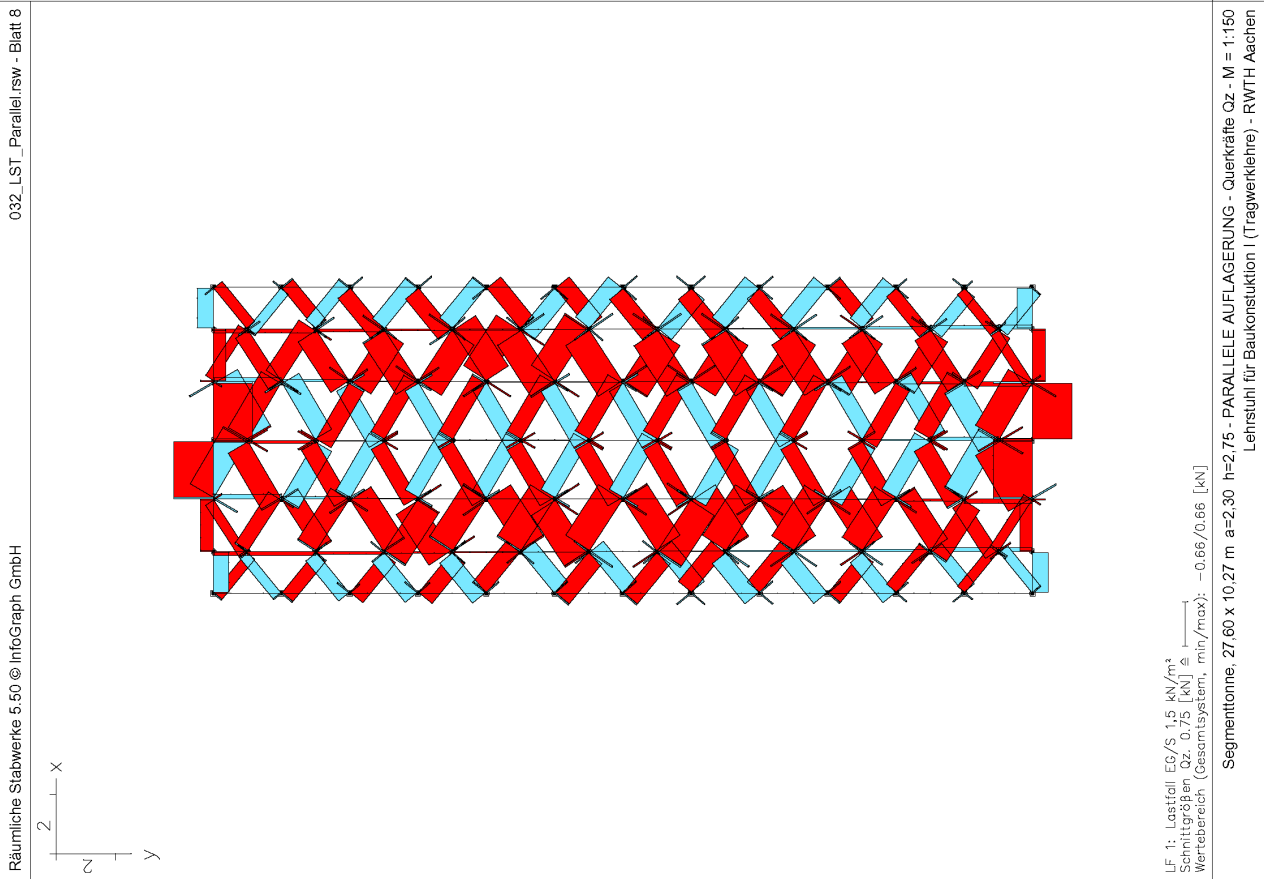
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Momente My



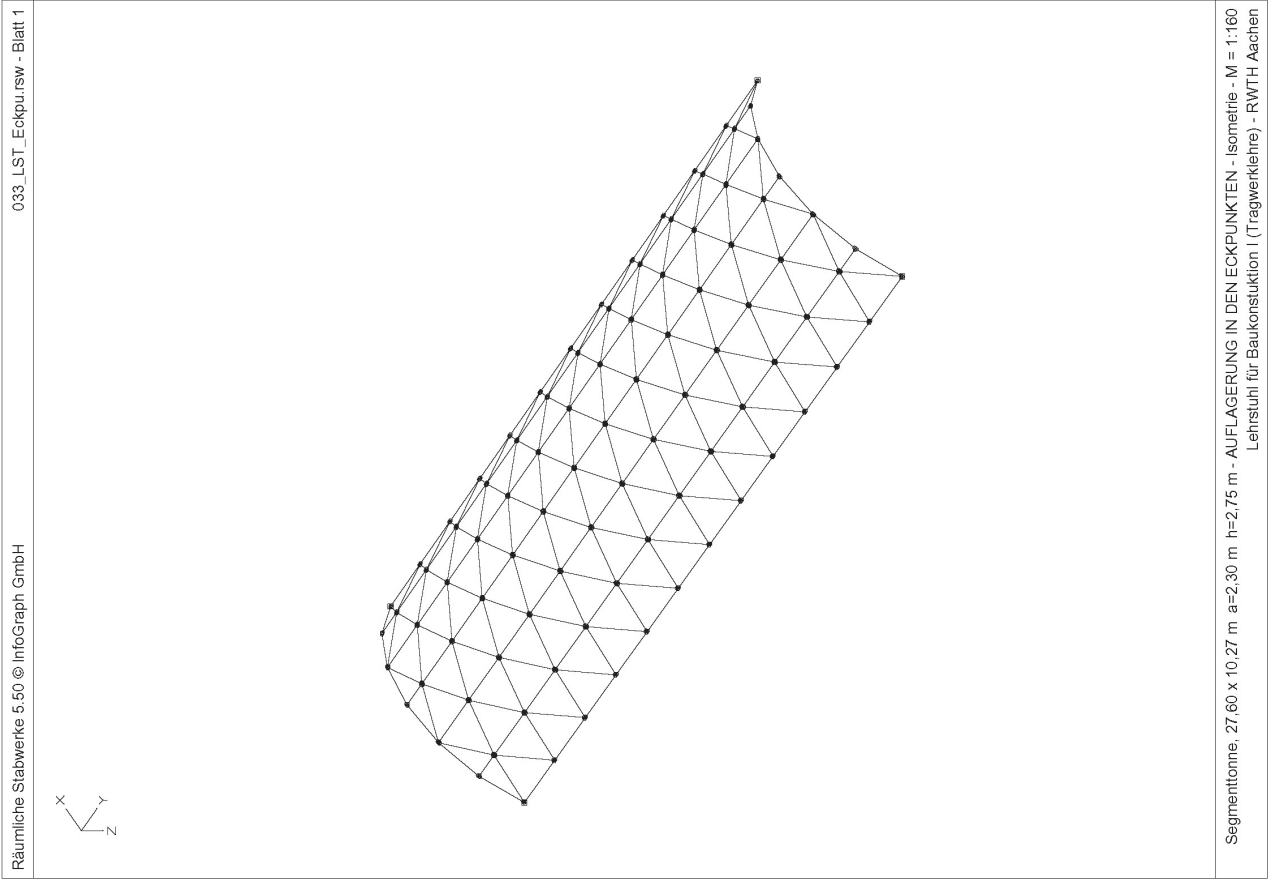
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Momente Mz



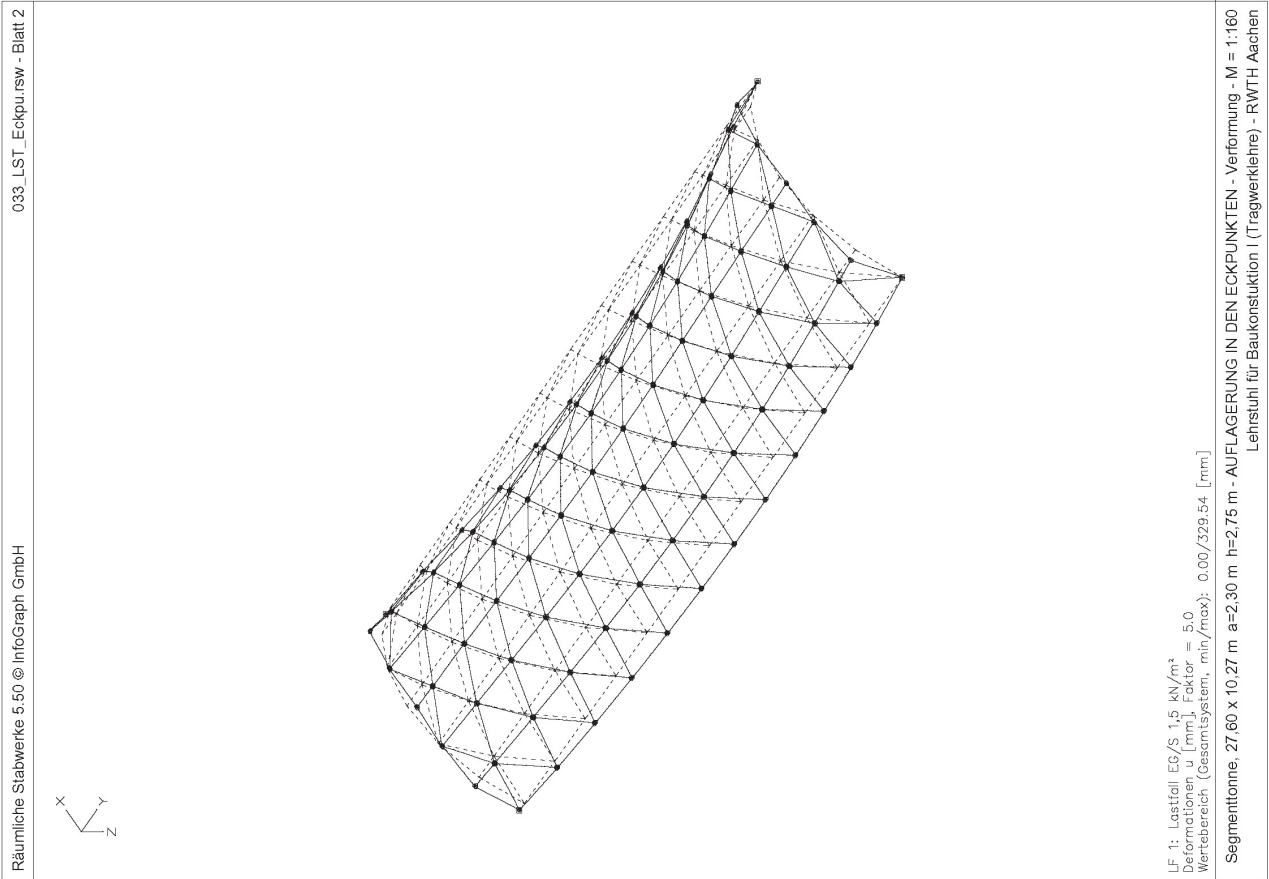
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Querkräfte Qy



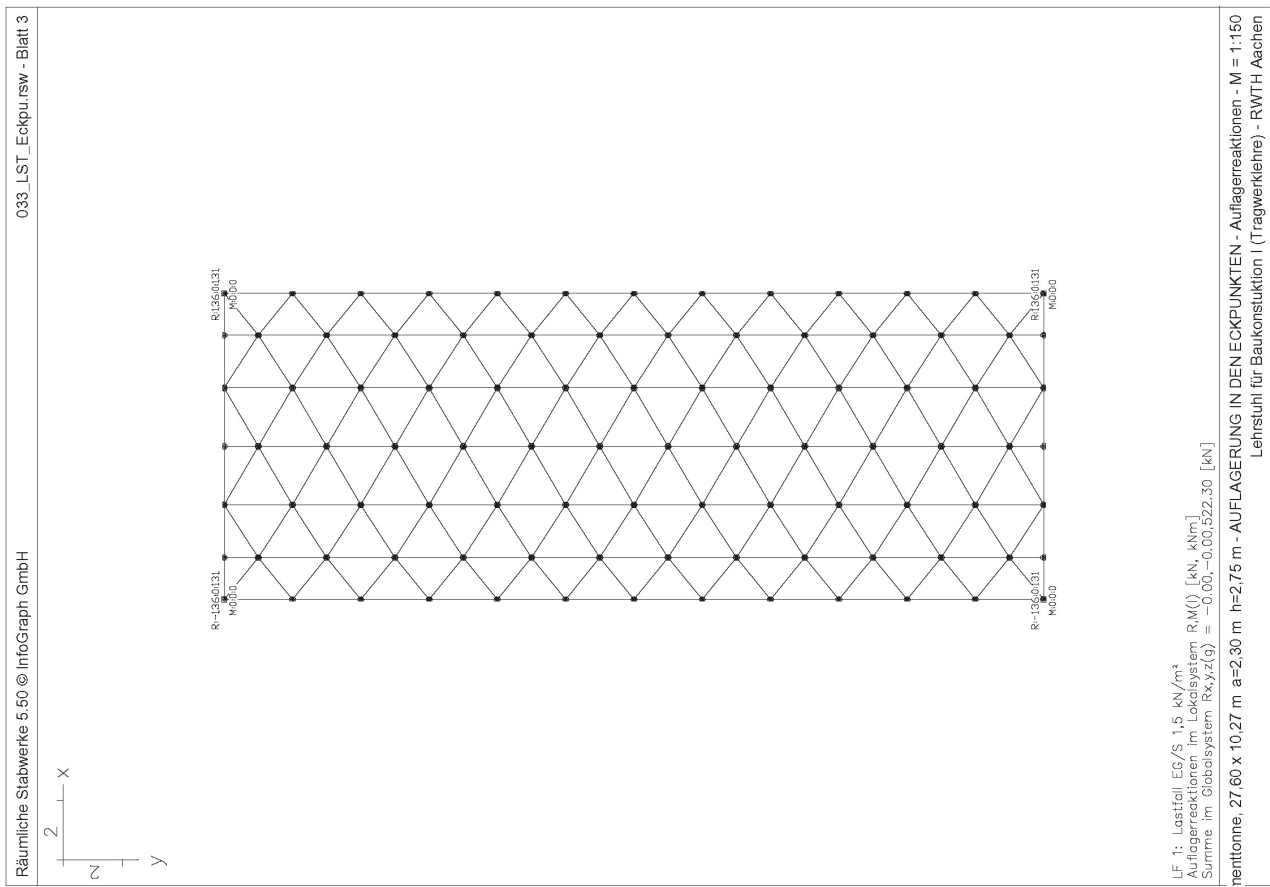
Lange Segmenttonne, Parallele Randlagerung, Querkräfte Qz



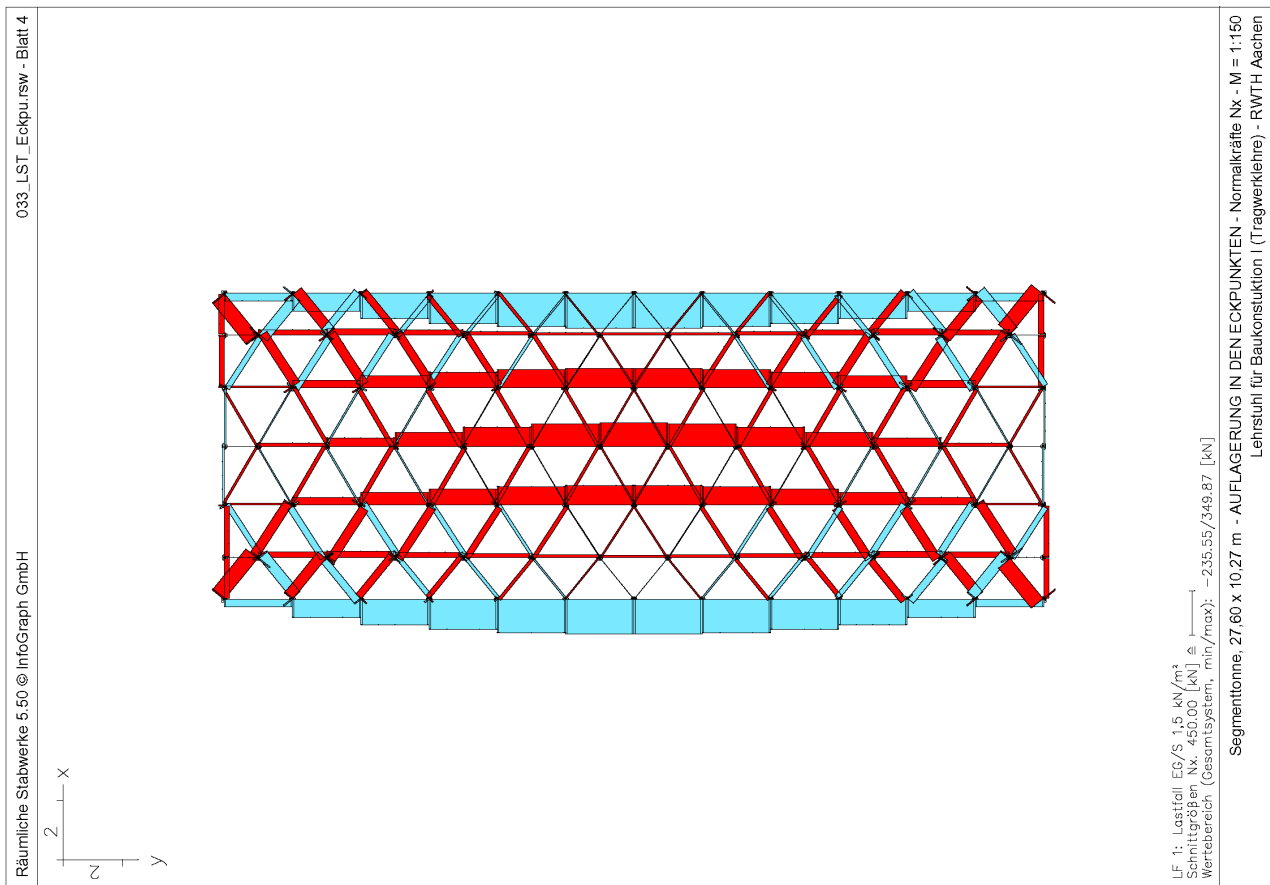
Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Isometrie



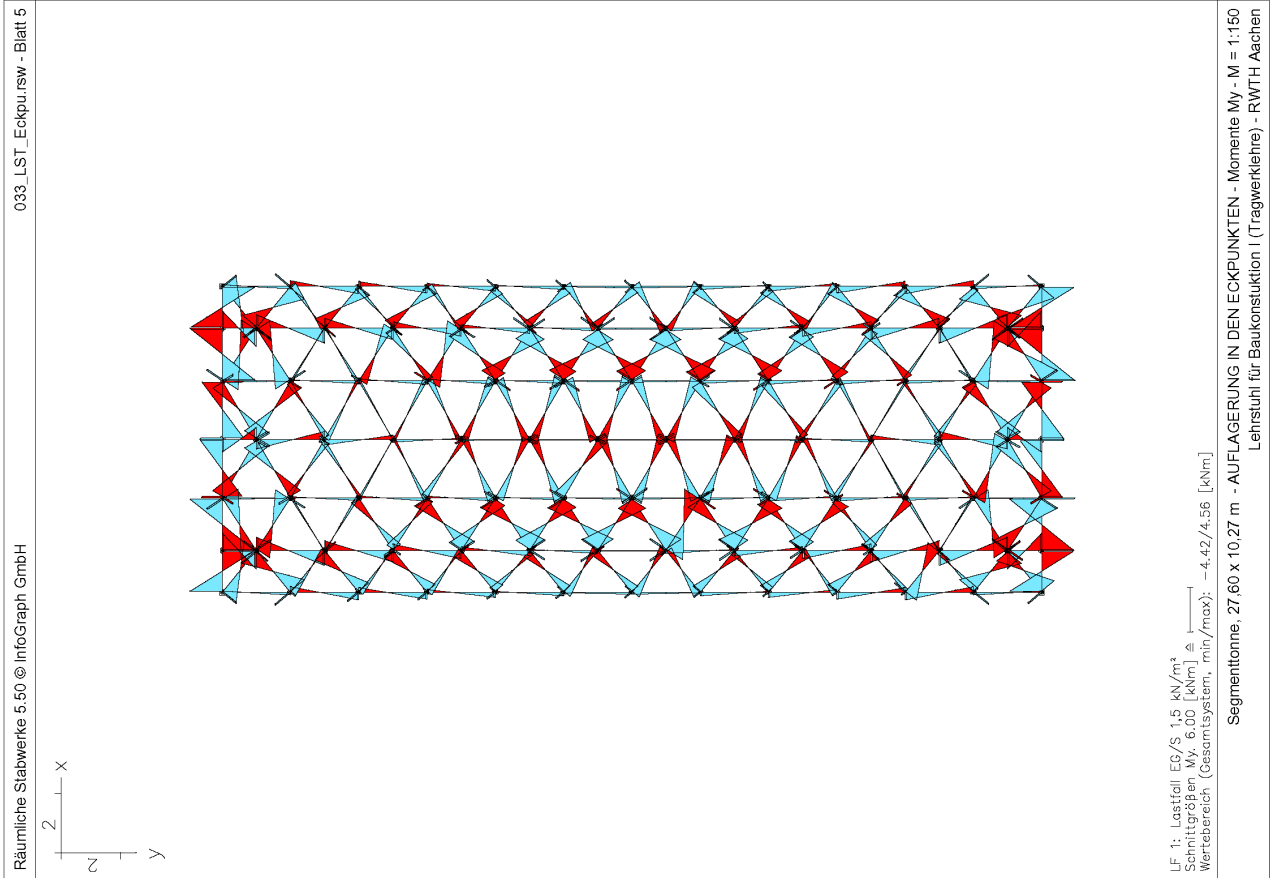
Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Verformung



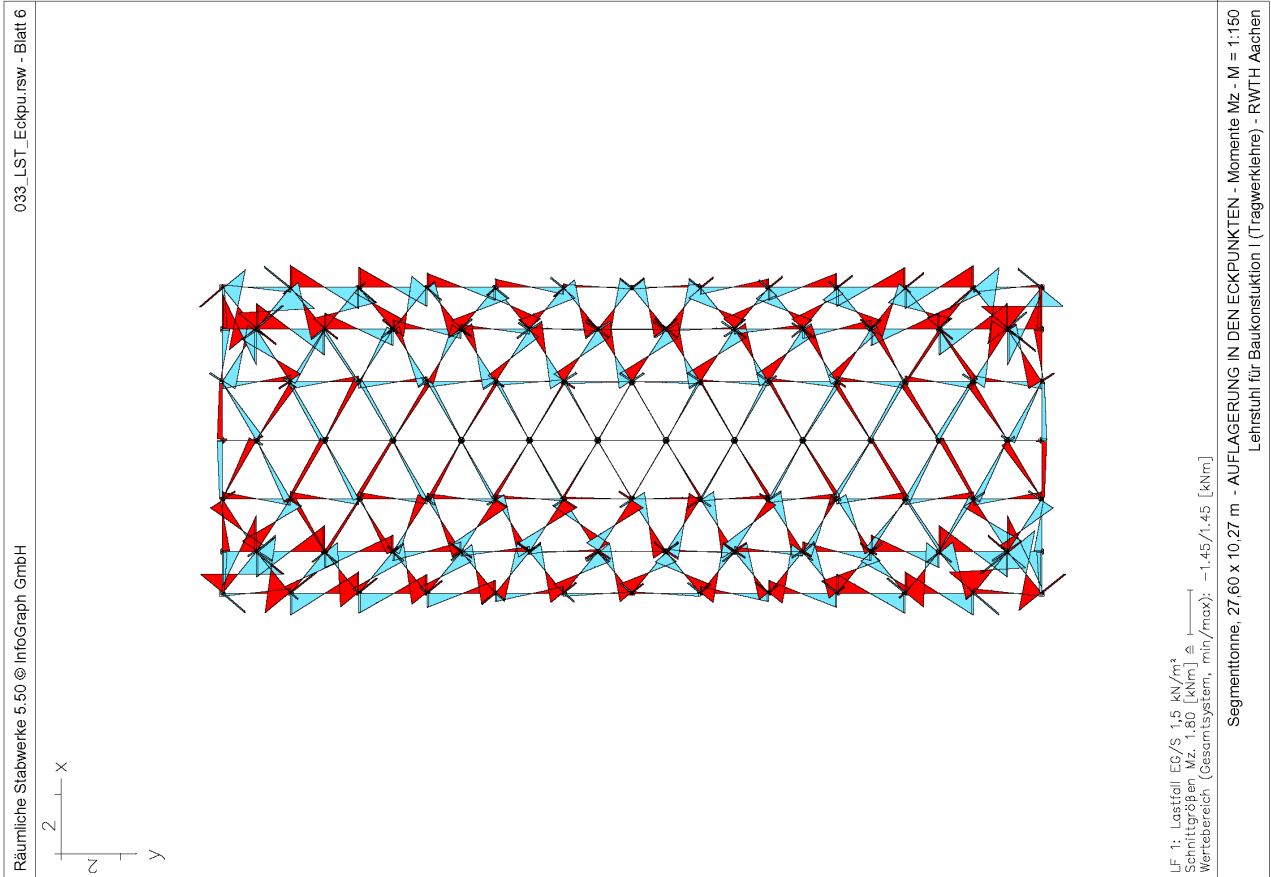
Lange Segmenttonne, Eckpunkt Lagerung, Auflagerreaktionen



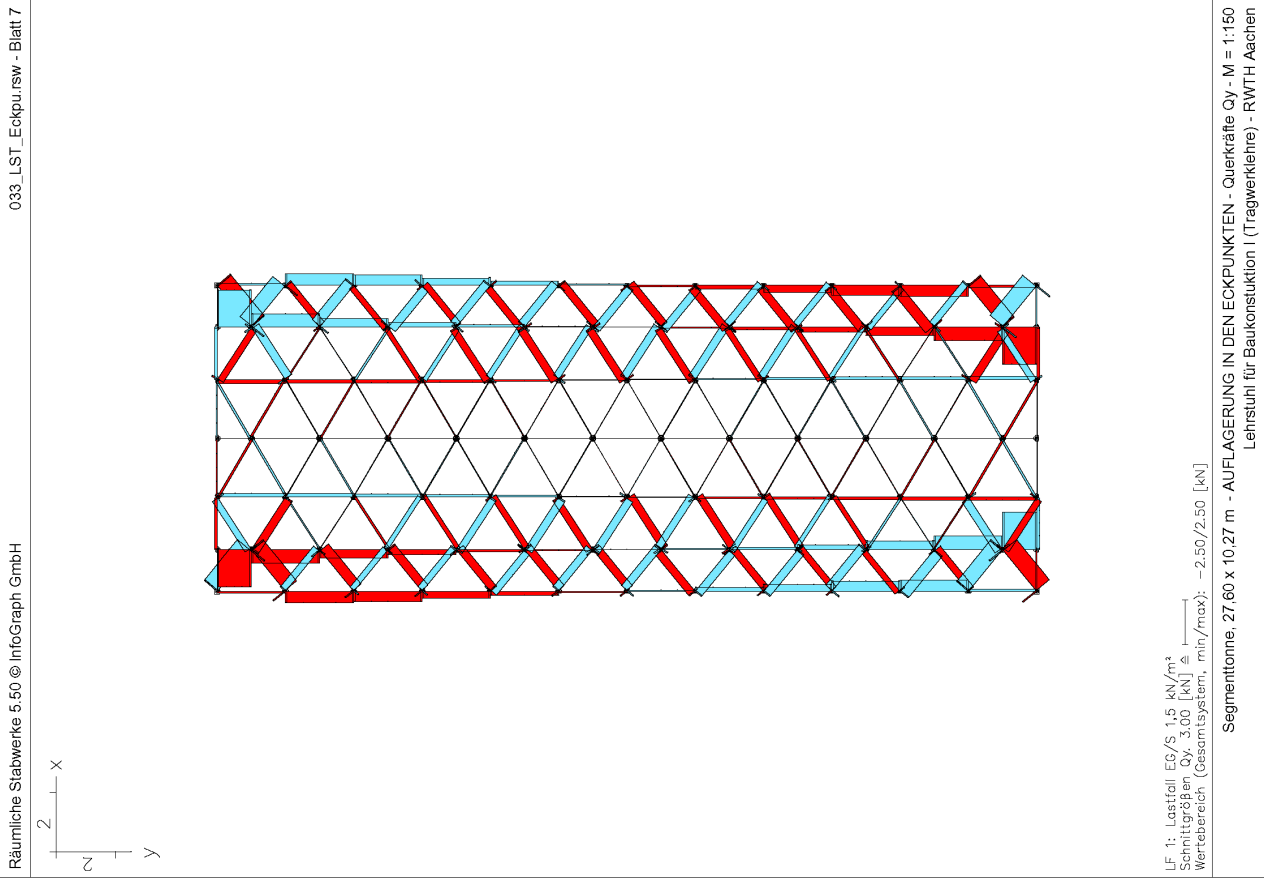
Lange Segmenttonne, Eckpunkt Lagerung, Normalkräfte Nx



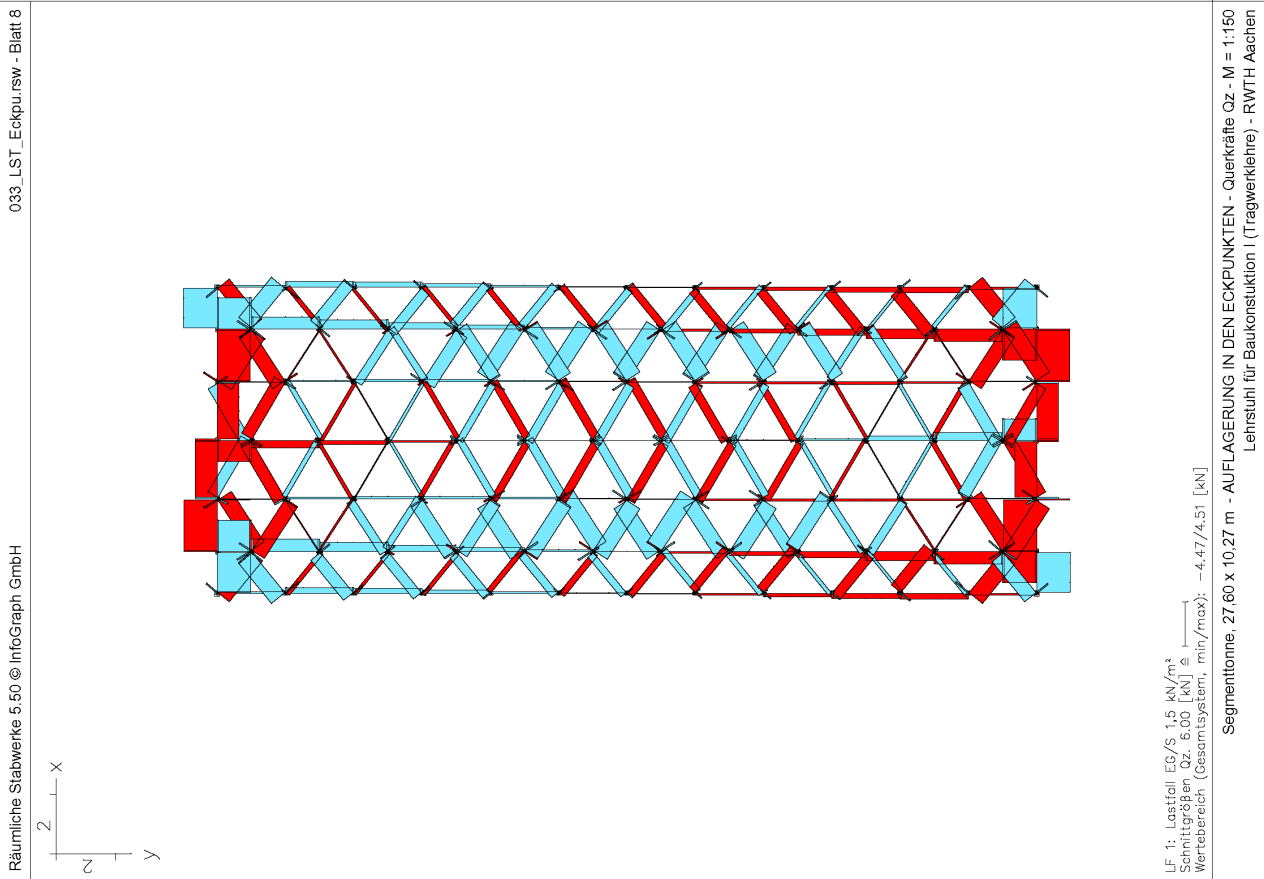
Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Momente My



Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Momente Mz



Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qy



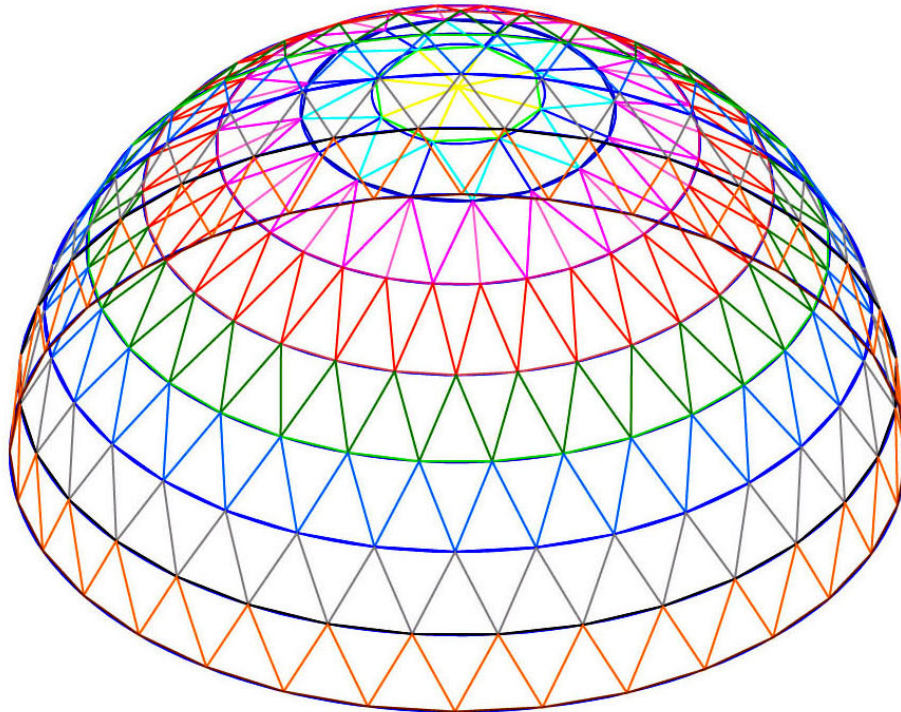
Lange Segmenttonne, Eckpunktlagerung, Querkräfte Qz

Knoten-Stab-Tragwerk:

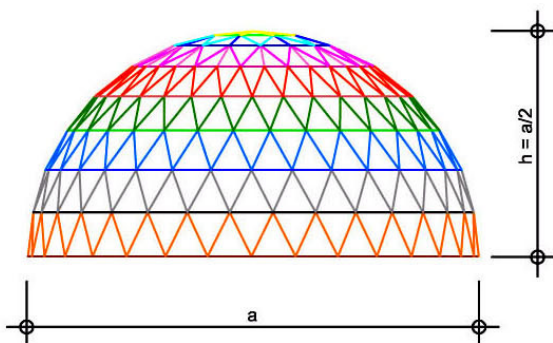
TYP: Zonennetzkuppel
 Teilungsfrequenz (Pol) : 8
 Zahl der Ringe auf der Polzone: 3
 Zahl der Ringe in der Breitenzone: 5
 Gesamtzahl der Zonenringe: 8
 Zahl der Stablängen: 18
 Zahl der Trägerlagen: 1
 Kuppelhöhe: $1/2$ Durchmesser
 Max. Stablänge: 21,9 % vom Kuppelradius

Isometrie:

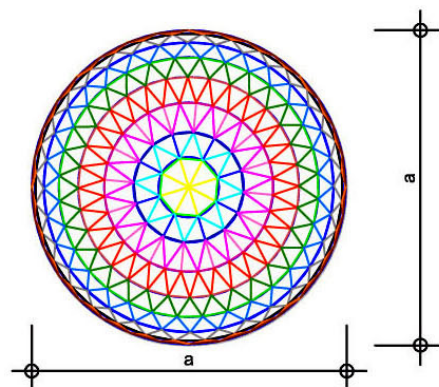
Farbige Ordnung der Stäbe nach Stablängen



Ansicht:



Aufsicht:

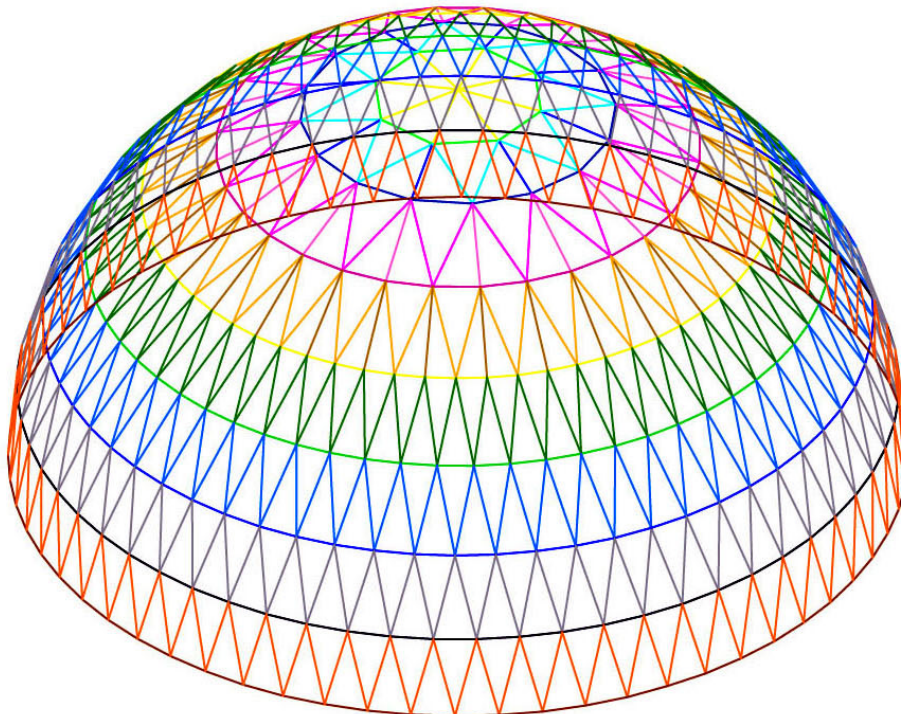


Knoten-Stab-Tragwerk:

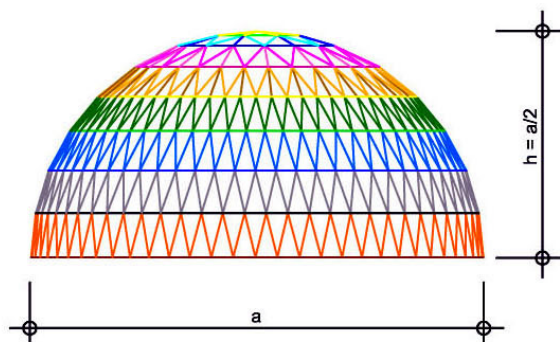
TYP: Zonnennetzkuppel
 Teilungsfrequenz (Pol) : 8
 Zahl der Ringe auf der Polzone: 4
 Zahl der Ringe in der Breitenzone: 4
 Gesamtzahl der Zonenringe: 8
 Zahl der Stablängen: 19
 Zahl der Trägerlagen: 1
 Kuppelhöhe: $\frac{1}{2}$ Durchmesser
 Max. Stablänge: 22,6 % vom Kuppelradius

Isometrie:

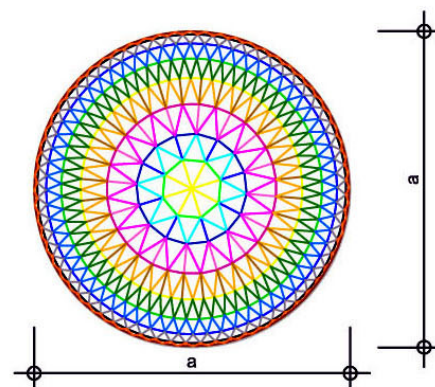
Farbige Ordnung der Stäbe nach Stablängen

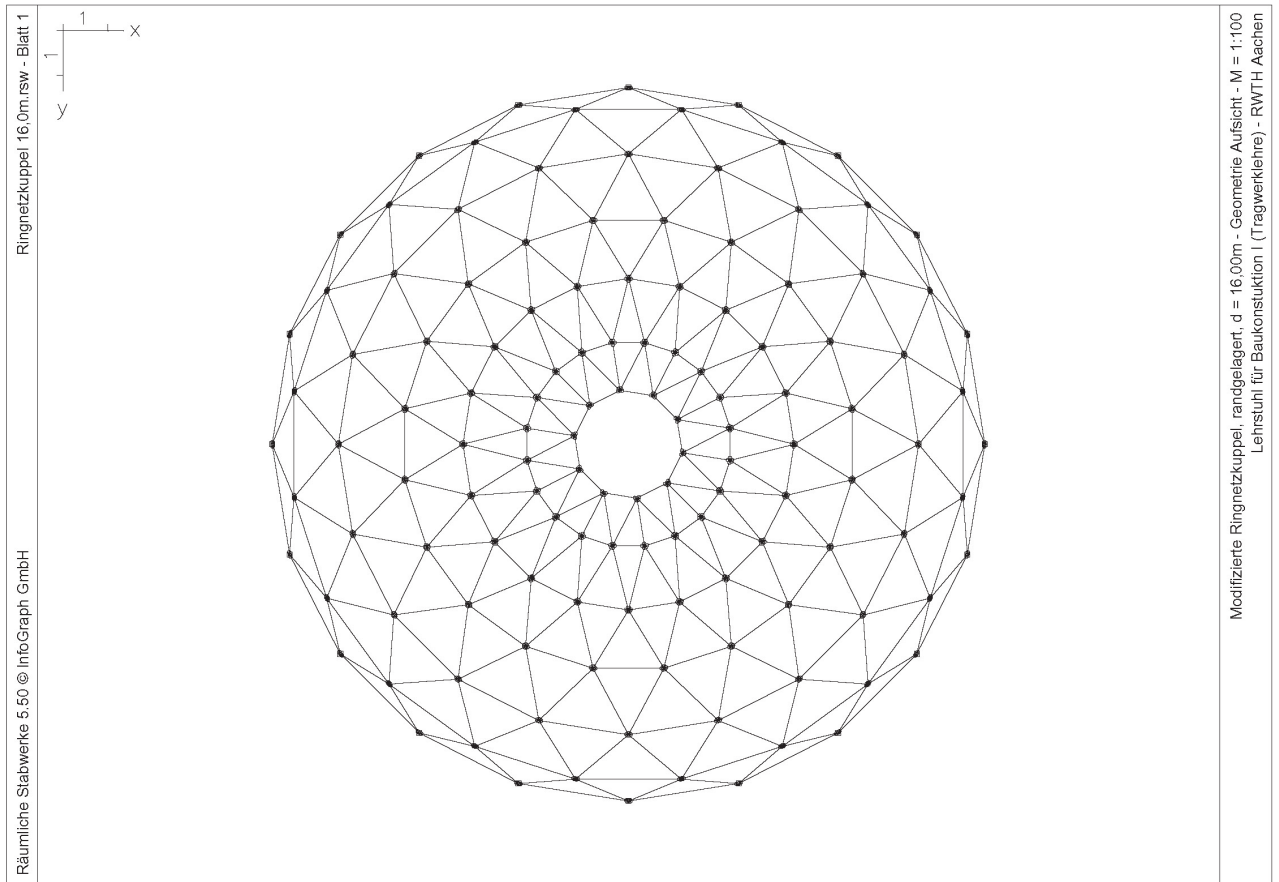


Ansicht:

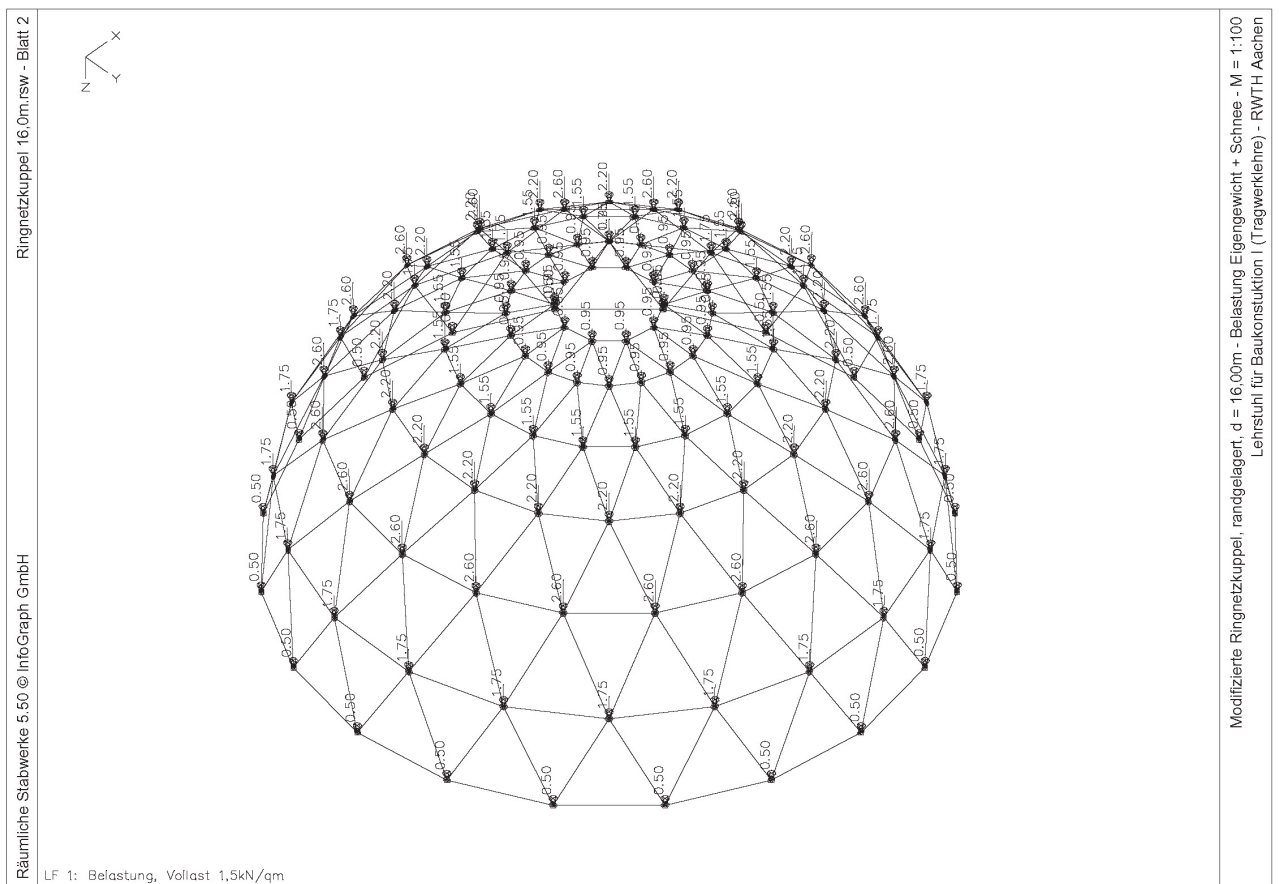


Aufsicht:

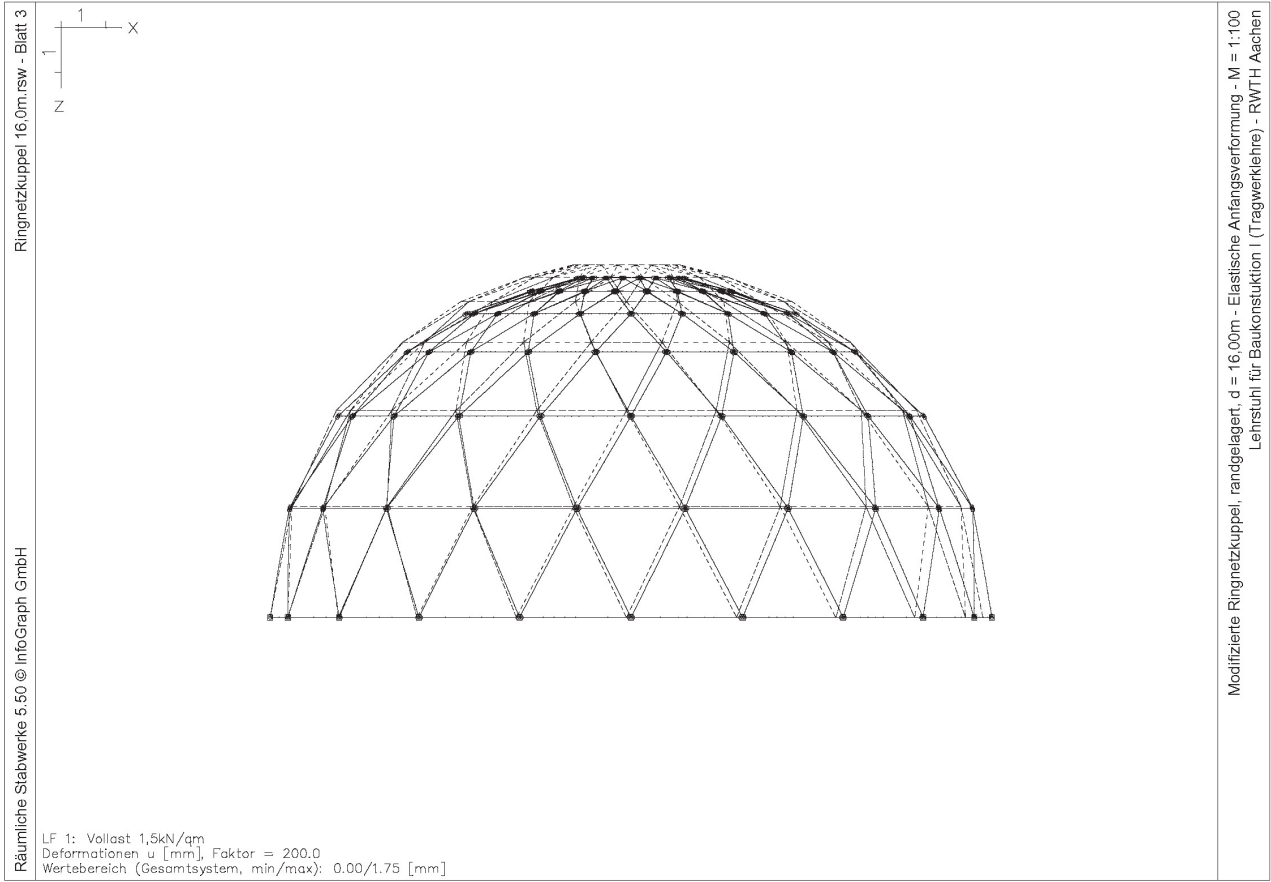




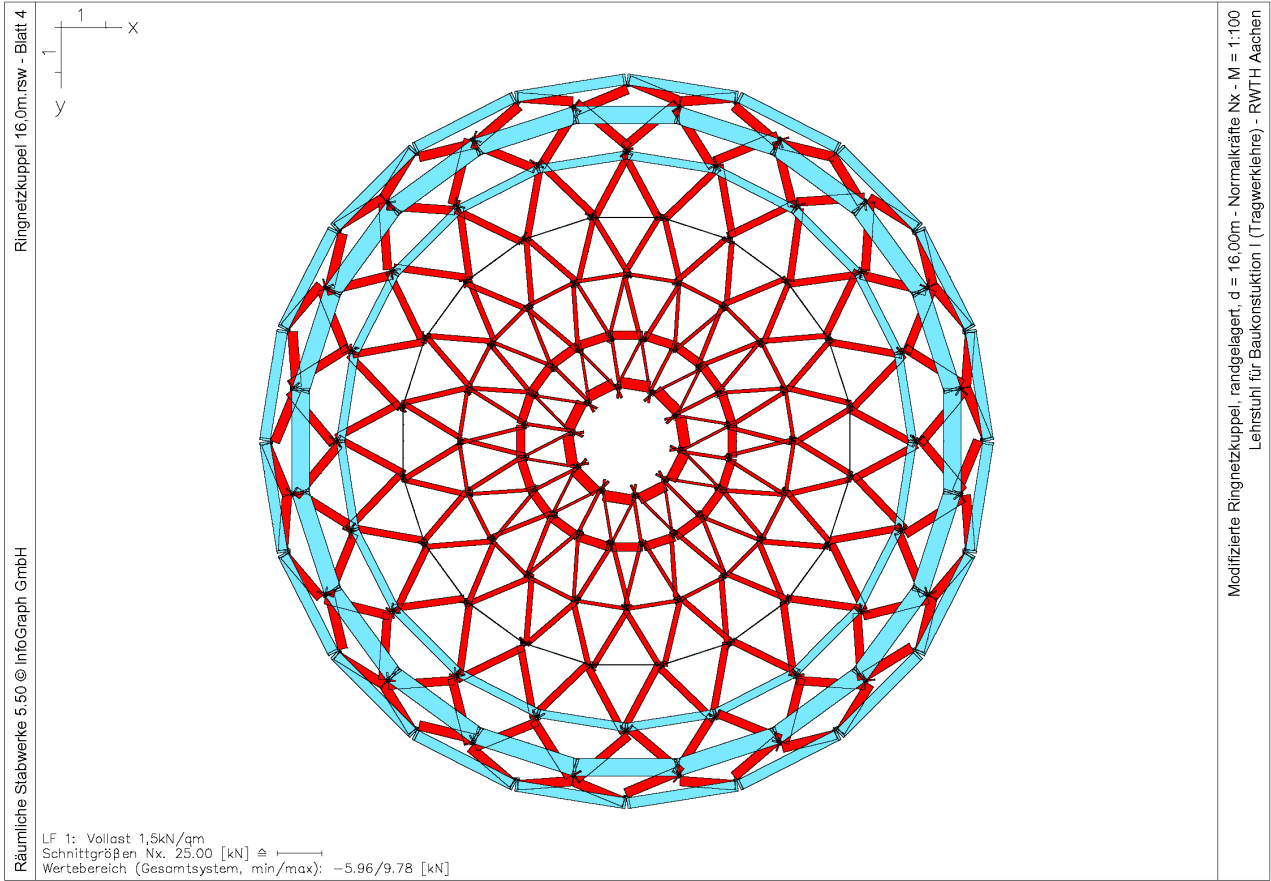
Modifizierte Ringnetzkuppel, Aufsicht



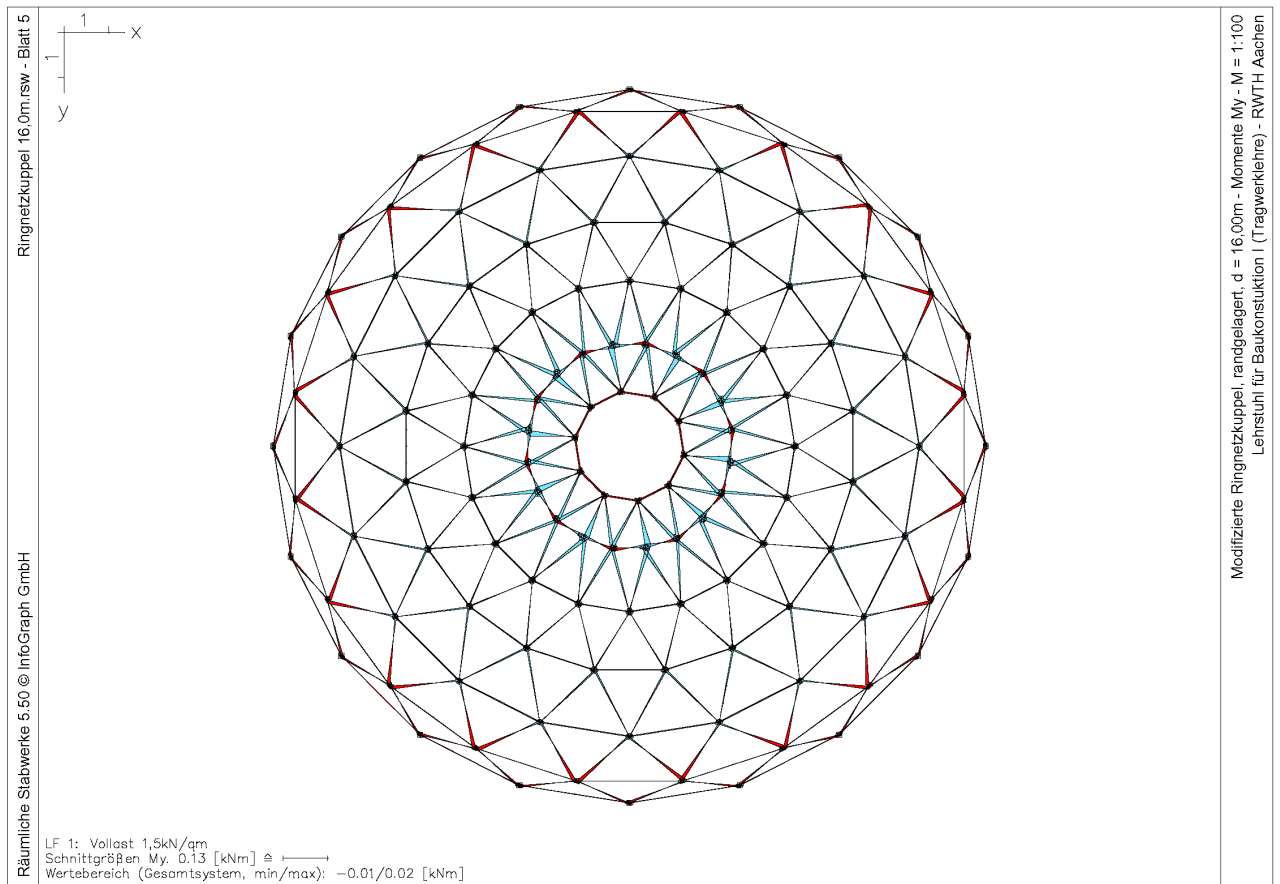
Modifizierte Ringnetzkuppel, Belastung Eigengewicht + Schnee



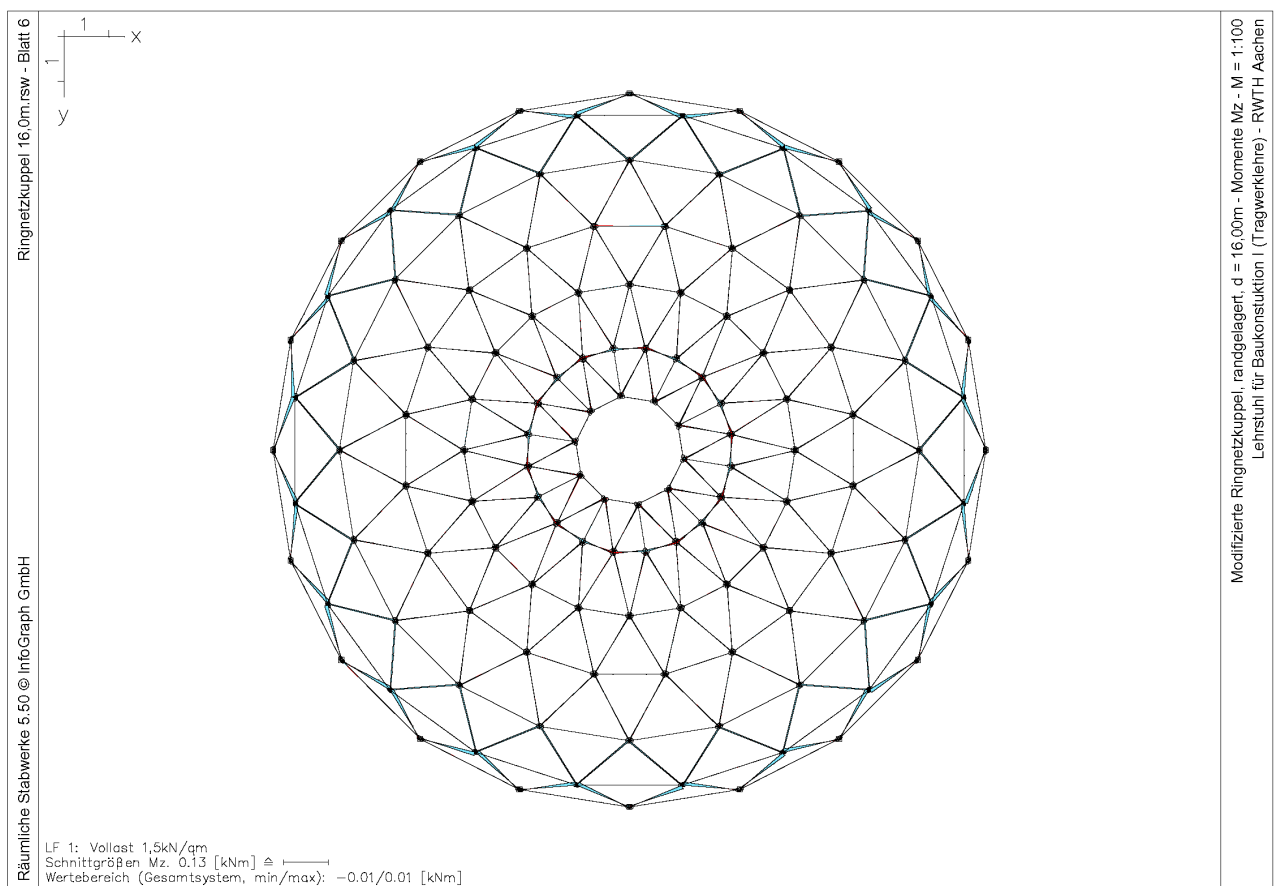
Modifizierte Ringnetzkuppel, Elastische Anfangsverformung



Modifizierte Ringnetzkuppel, Normalkräfte Nx



Modifizierte Ringnetzkugpel, Momente My



Modifizierte Ringnetzkugpel, Momente Mz

Knoten-Stab-Tragwerk:

TYP: Geodätische Kuppel

Teilungsfrequenz: 2

1 Teilungspunkt auf jeder Ikosaederkante

2-fach Teilung der Ikosaederkante

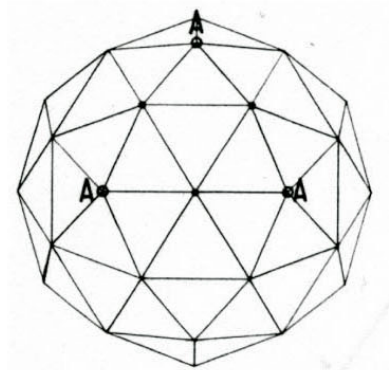
4-fach Teilung der Ikosaederfläche

Zahl der Stablängen: 2

Zahl der Trägerlagen: 1

Kuppelhöhe: $1/2$ Durchmesser

Max. Stablänge: 61,8 % vom Kuppelradius

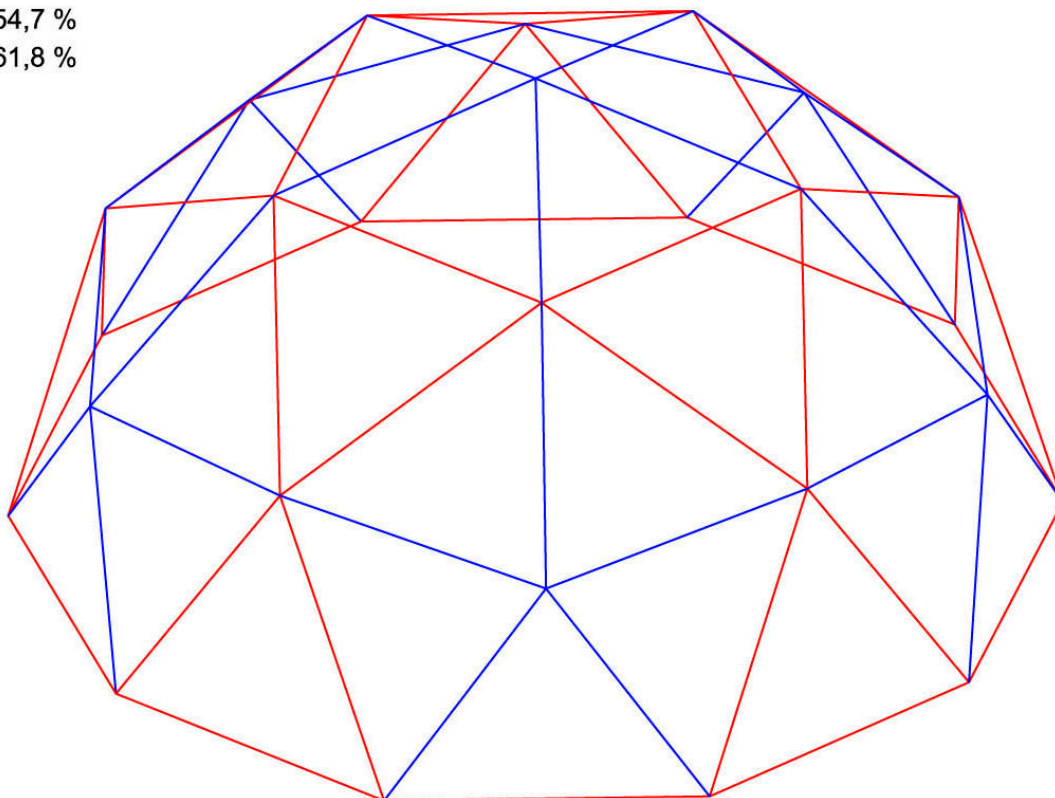


Isometrie:

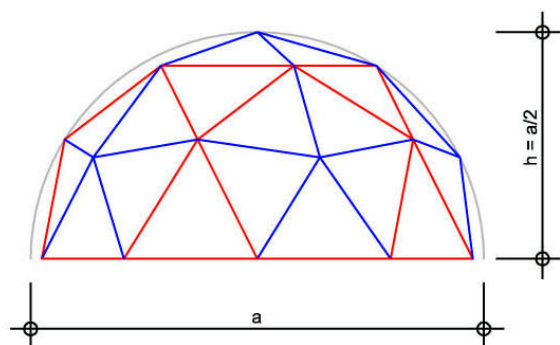
Länge der Stäbe (in % vom Kuppelradius):

■ 54,7 %

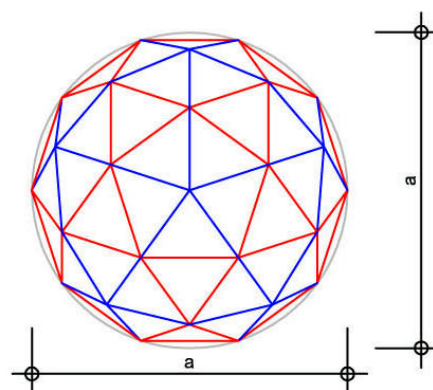
■ 61,8 %



Ansicht:



Aufsicht:



Knoten-Stab-Tragwerk:

TYP: Geodätische Kuppel

Teilungsfrequenz: 4

3 Teilungspunkte auf jeder Ikosaederkante

4-fach Teilung der Ikosaederkante

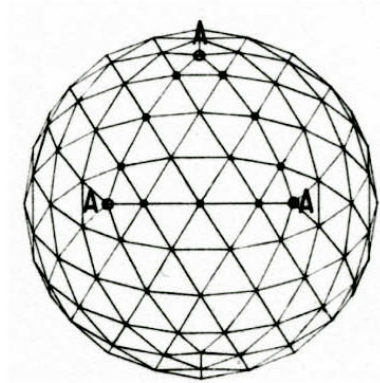
16-fach Teilung der Ikosaederfläche

Zahl der Stablängen: 6

Zahl der Trägerlagen: 1

Kuppelhöhe: 1/2 Durchmesser

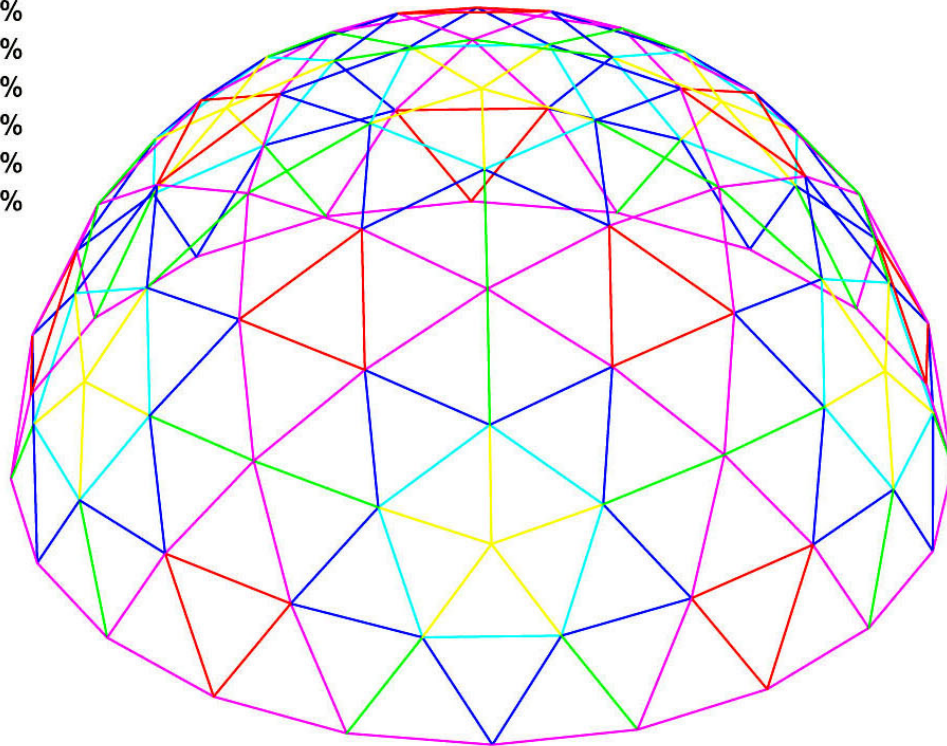
Max. Stablänge: 32,5 % vom Kuppelradius



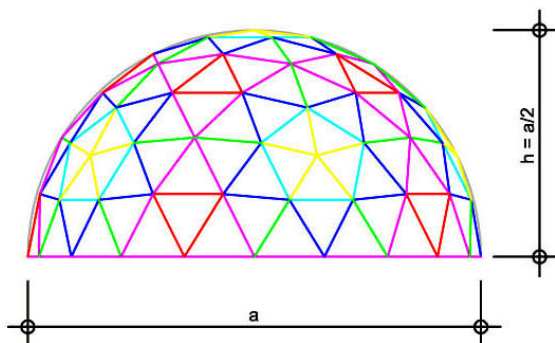
Isometrie:

Länge der Stäbe (in % vom Kuppelradius):

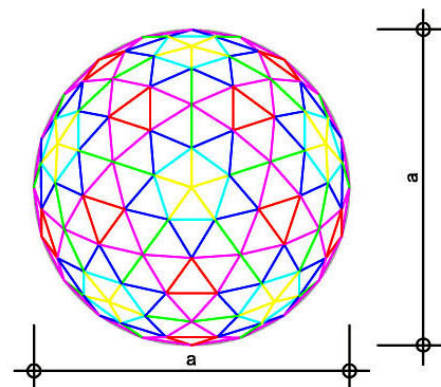
- 25,3 %
- 29,9 %
- 32,5 %
- 29,5 %
- 29,6 %
- 31,3 %

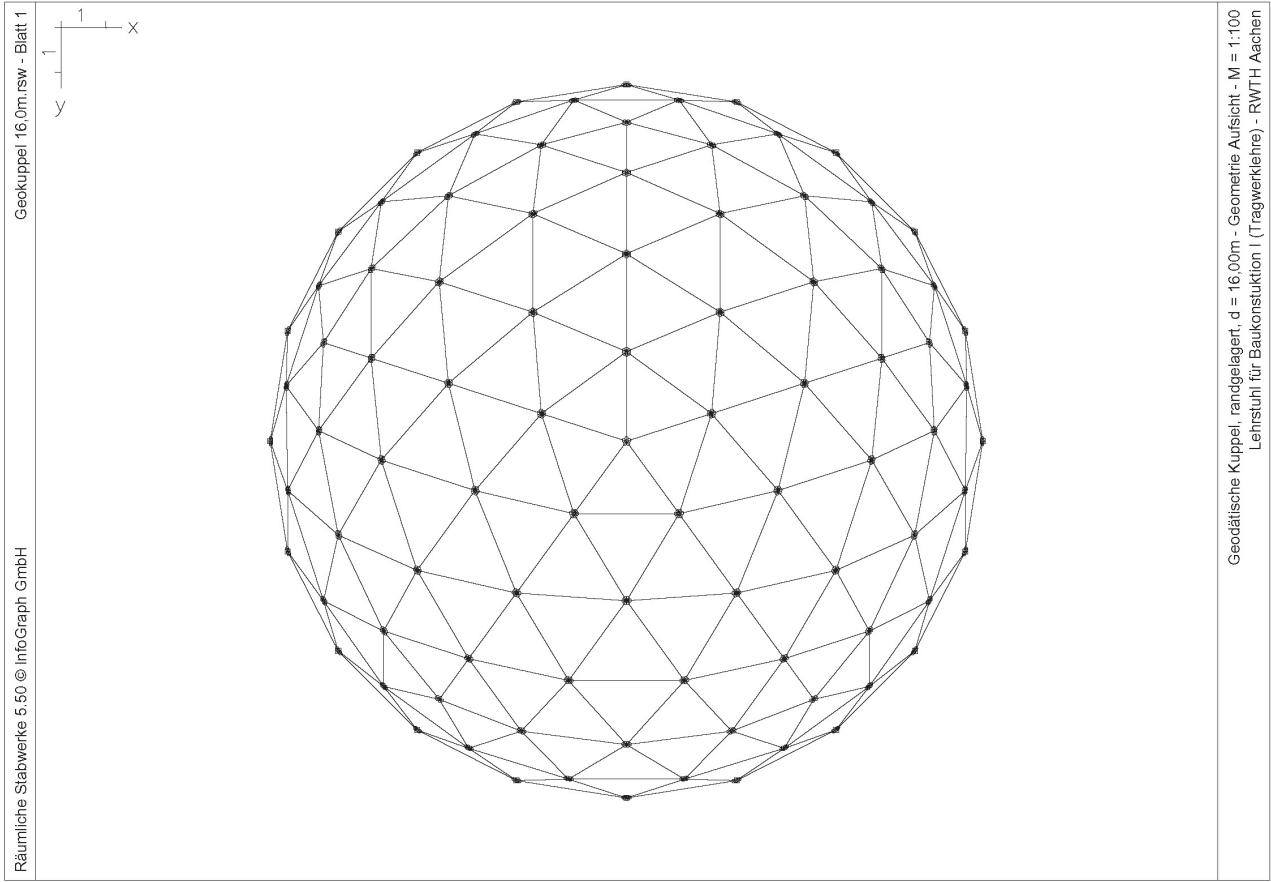


Ansicht:

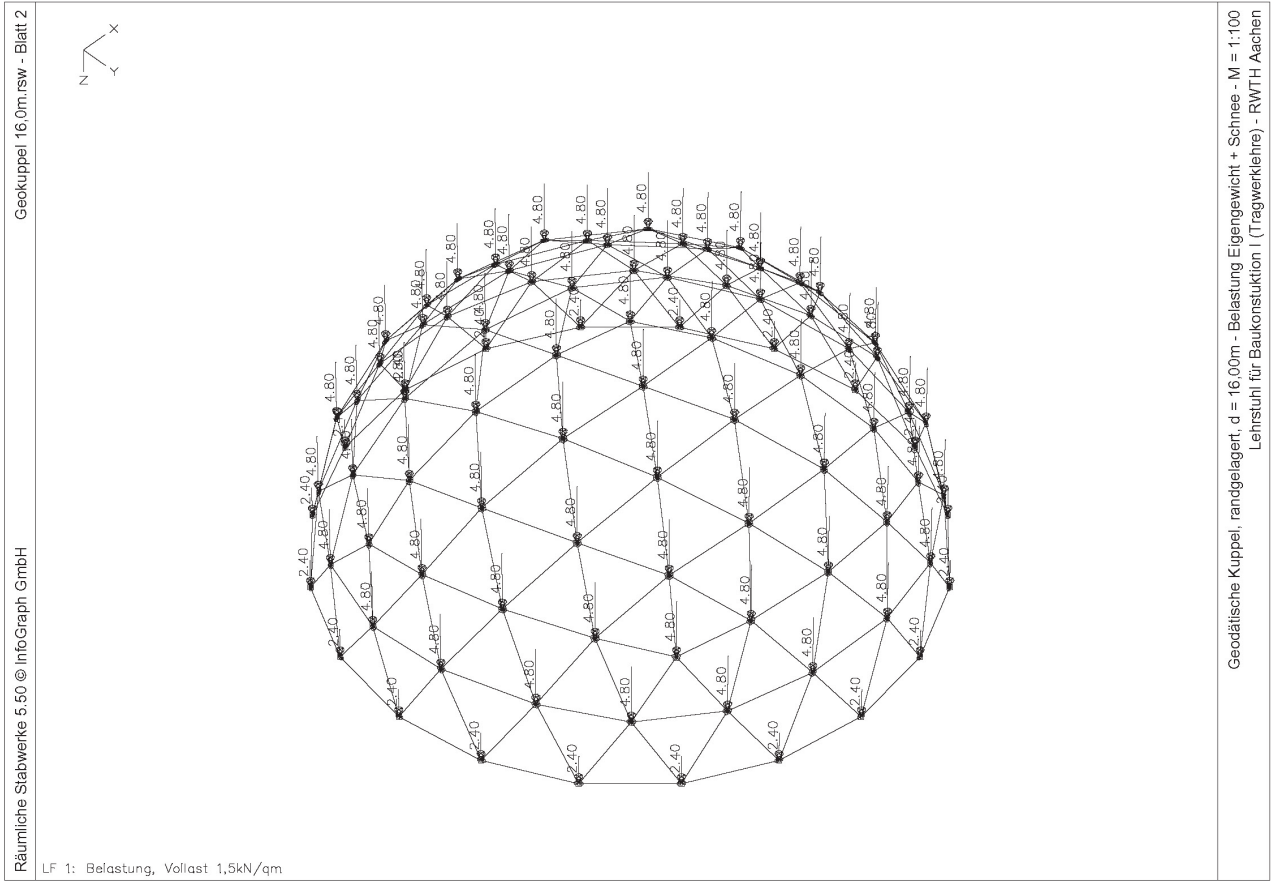


Aufsicht:

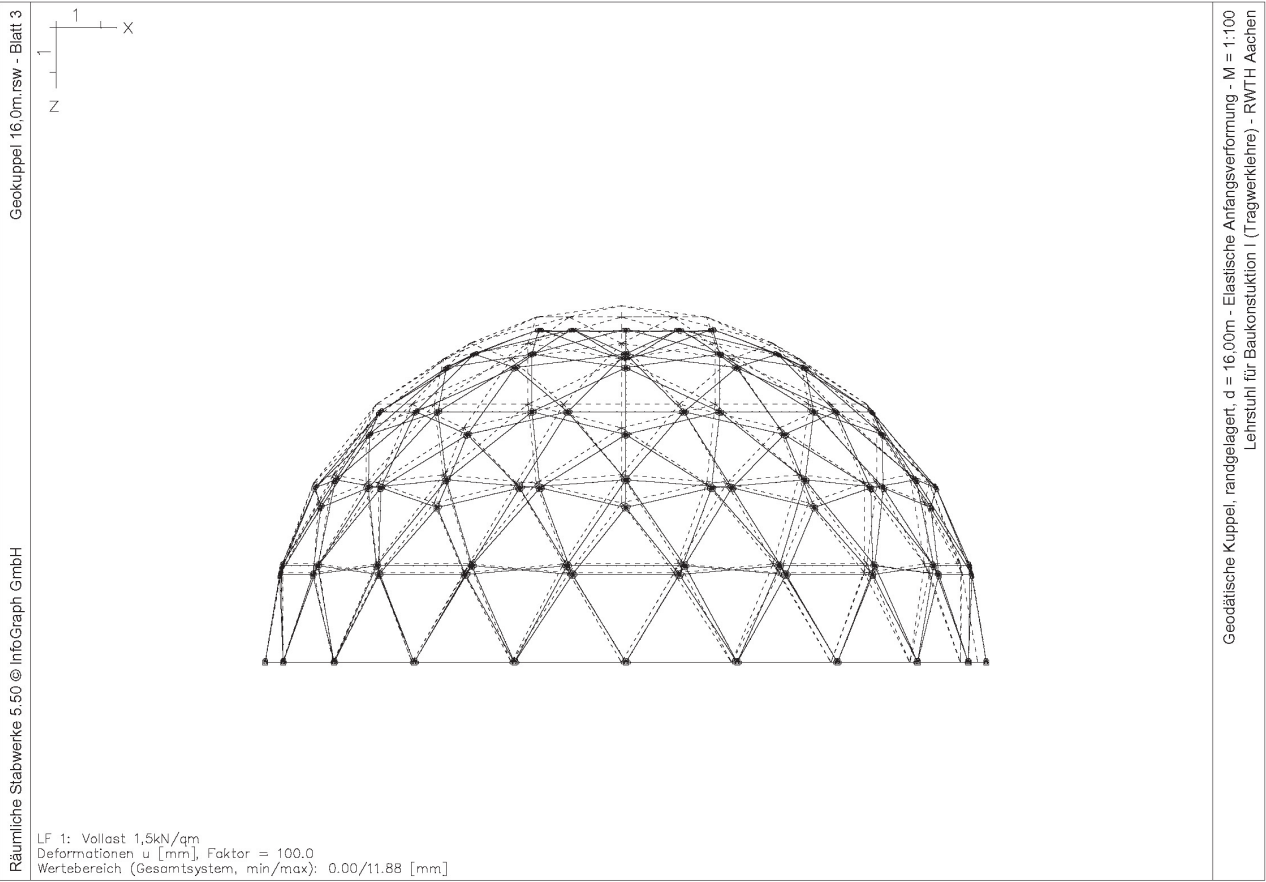




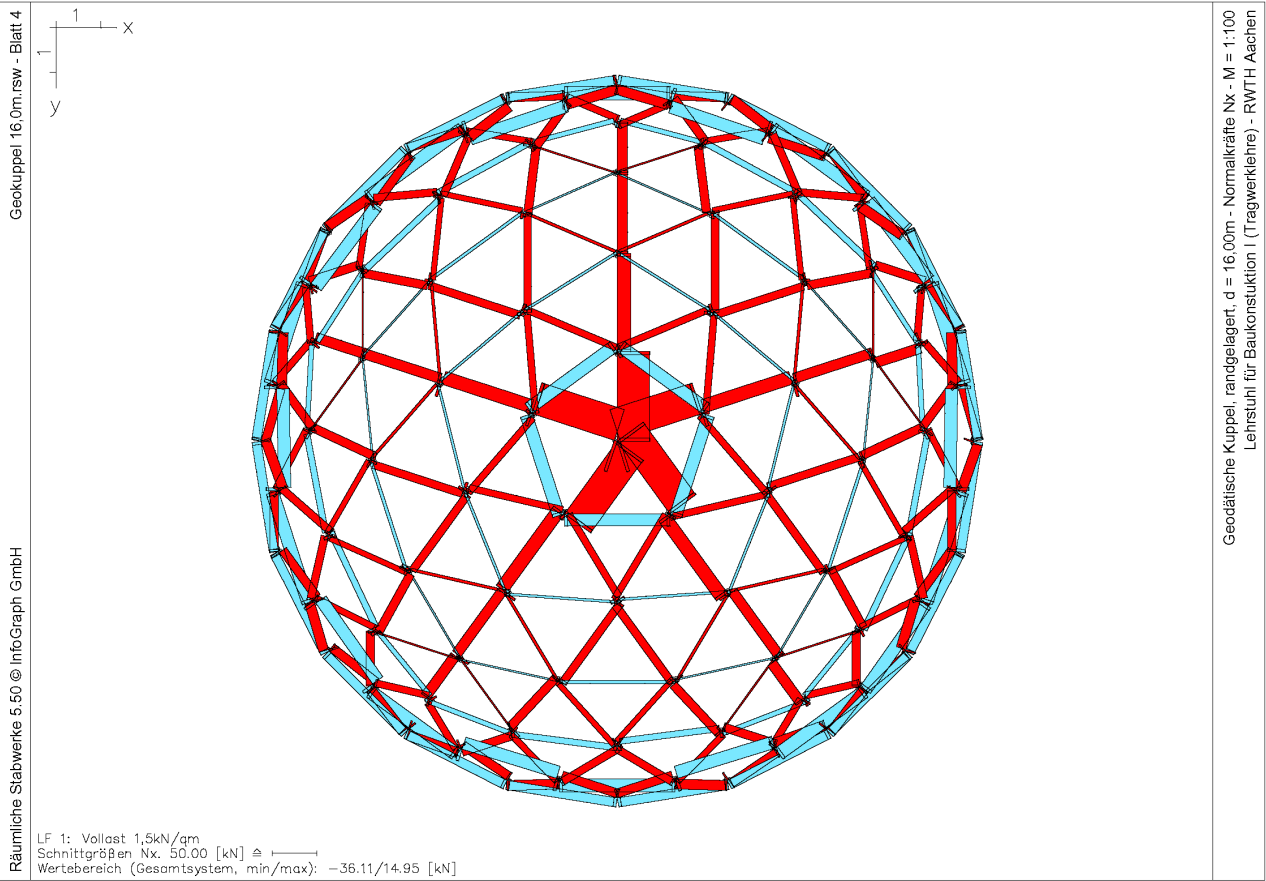
Geodätische Kuppel, Aufsicht



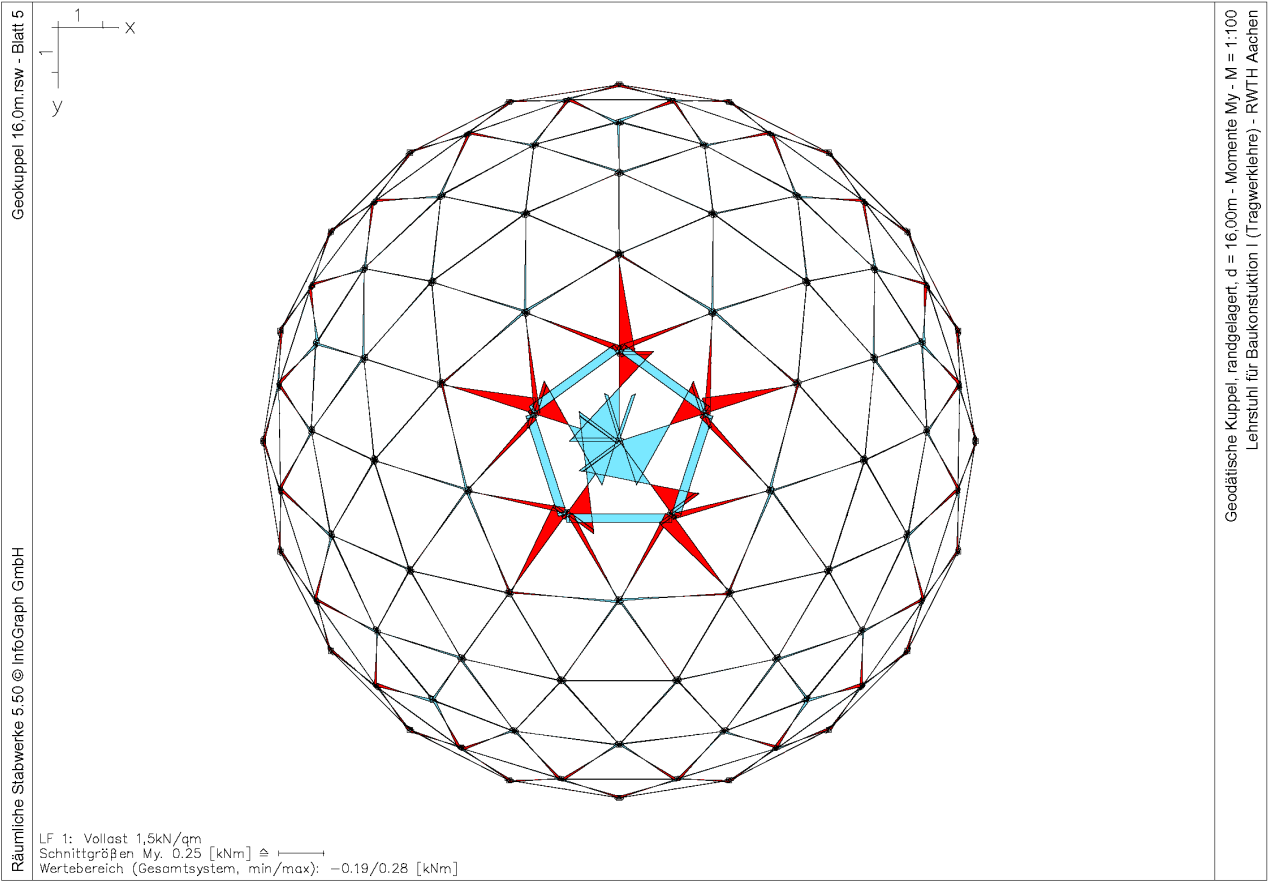
Geodätische Kuppel, Belastung Eigengewicht + Schnee



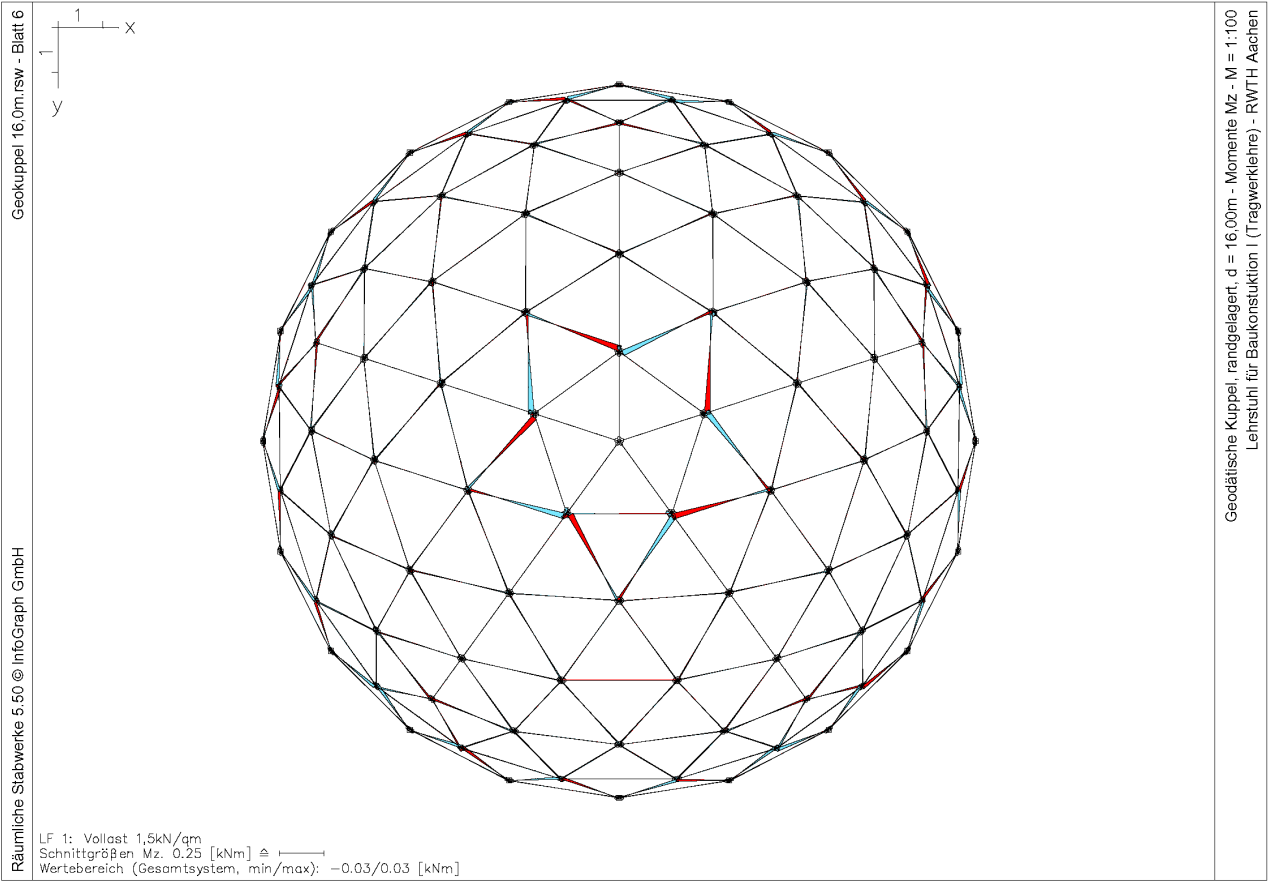
Geodätische Kuppel, Elastische Anfangsverformung



Geodätische Kuppel, Normalkräfte Nx



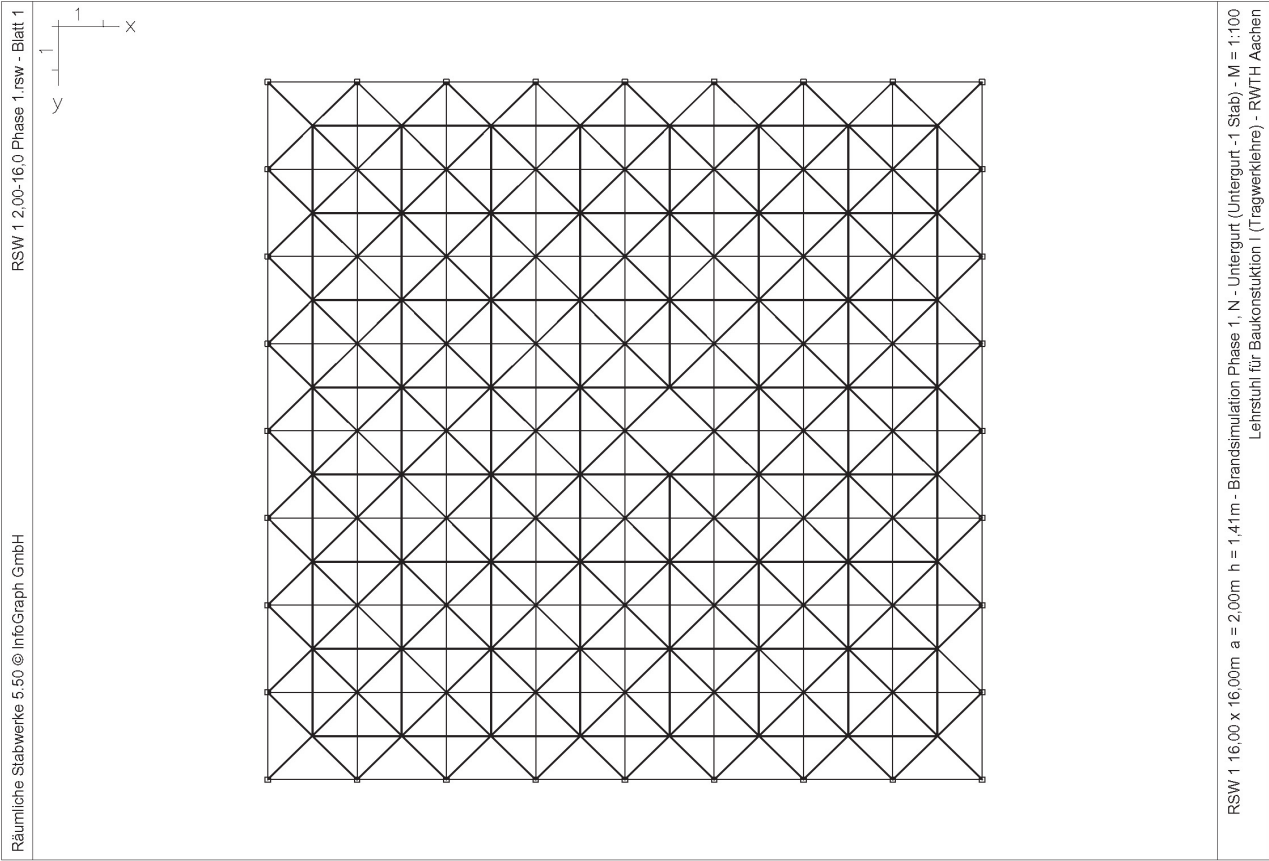
Geodätische Kuppel, Momente My



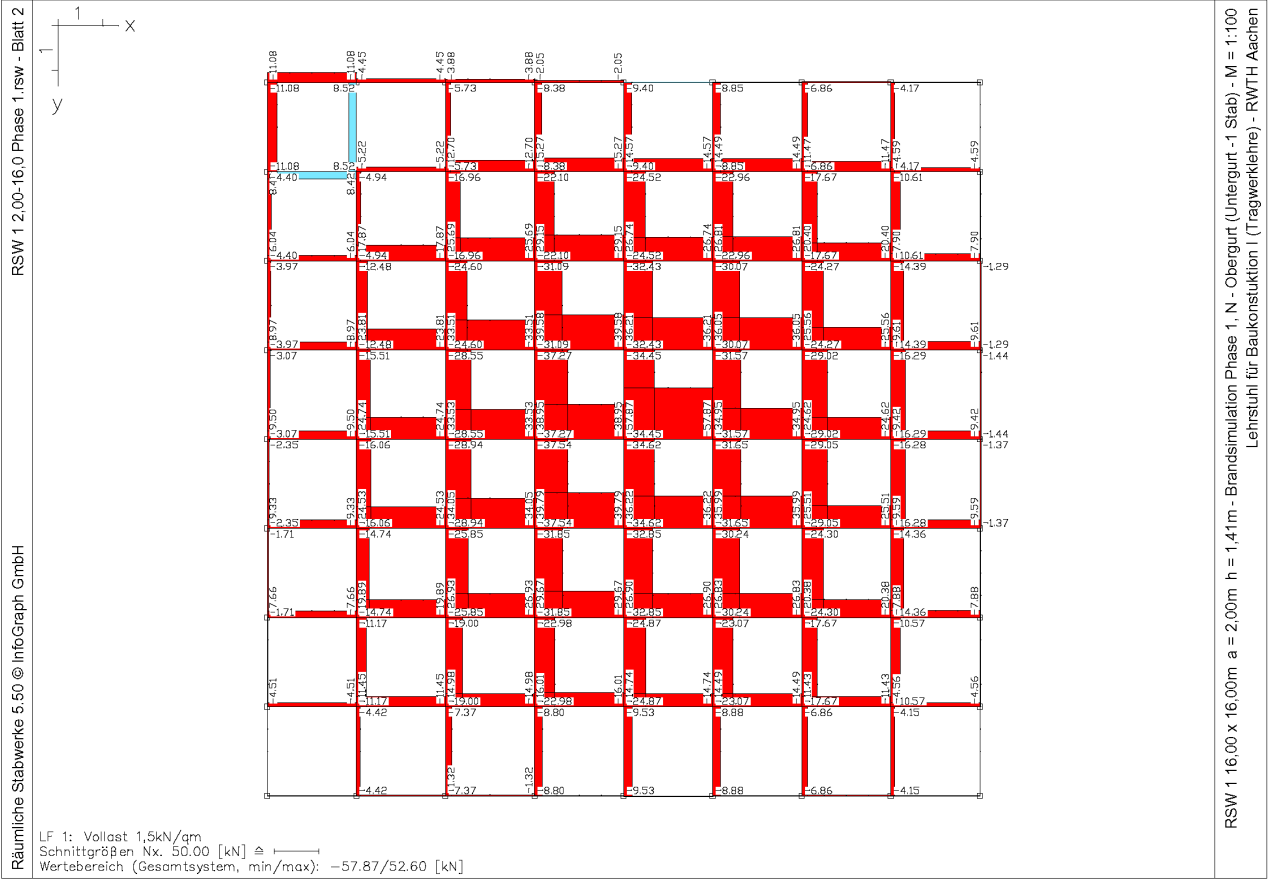
Geodätische Kuppel, Momente Mz

10.4 Brandsimulation

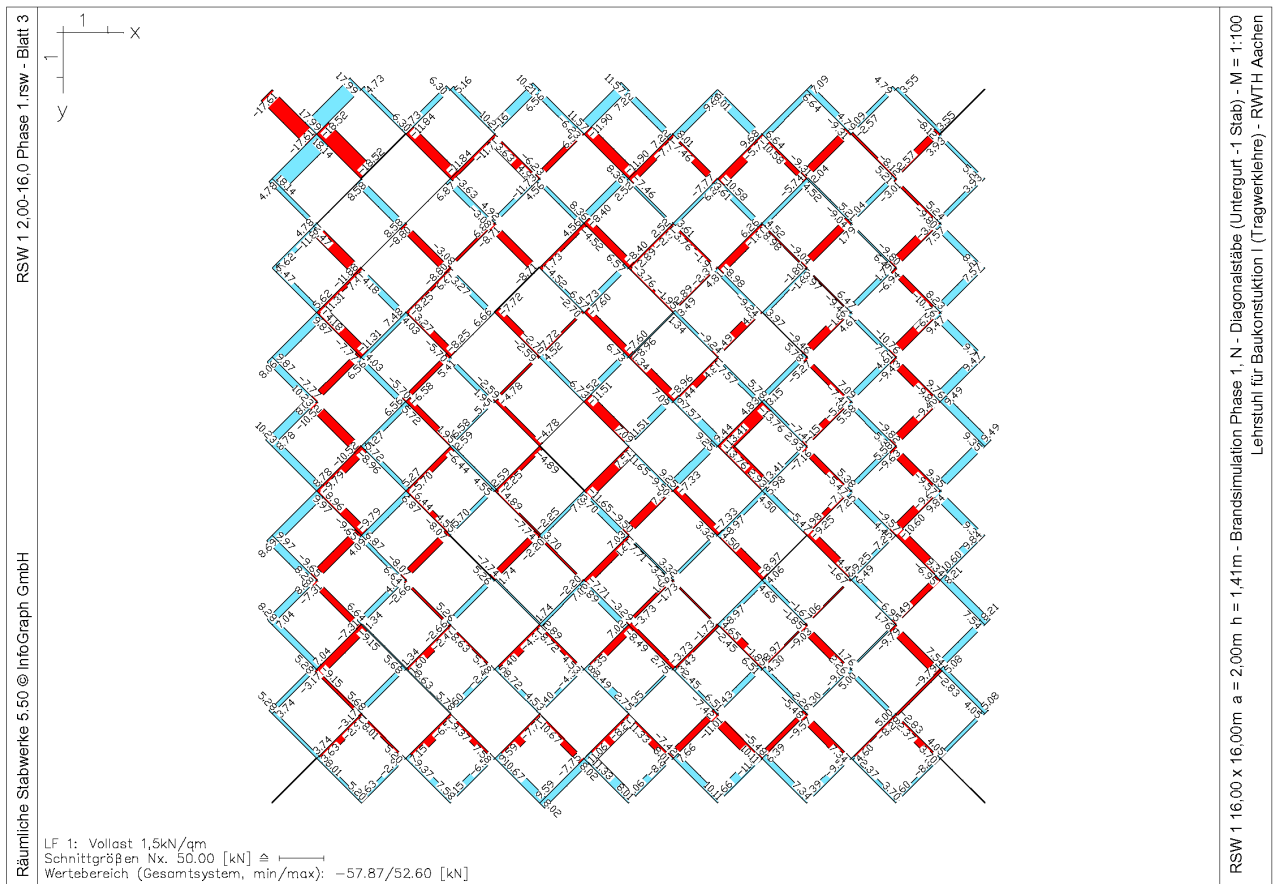
Ergebnisse der Berechnung



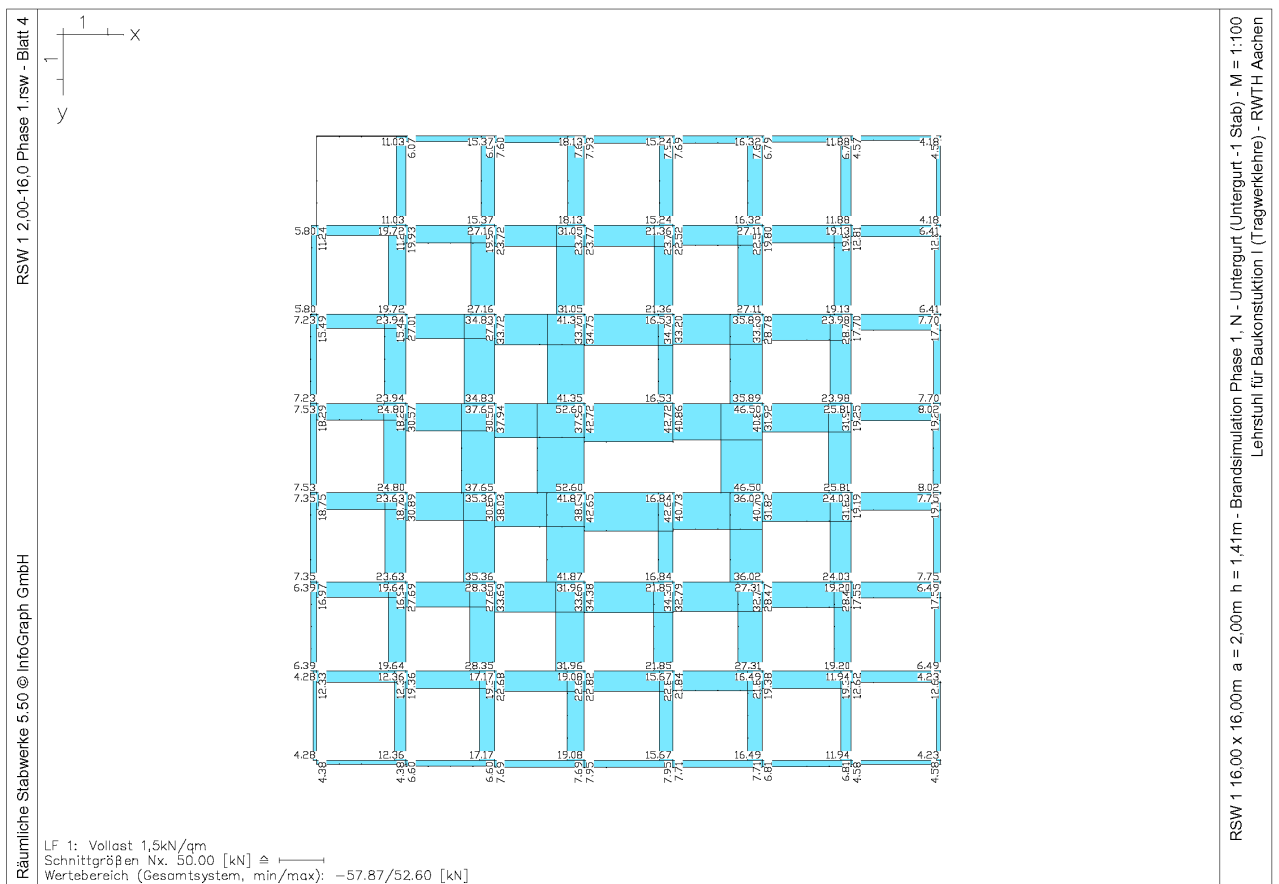
Brandsimulation, Phase 1 (Untergurt -1 Stab), Aufsicht



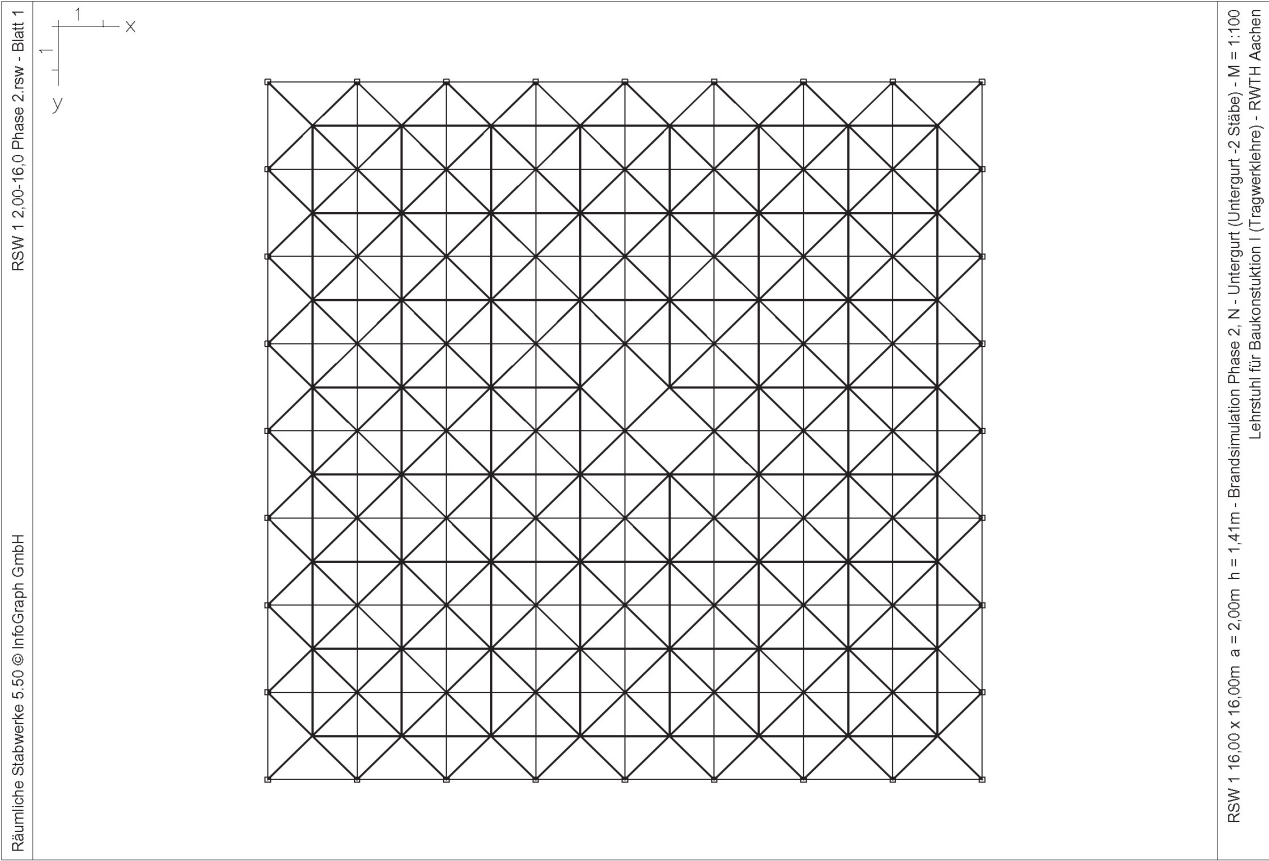
Brandsimulation, Phase 1 (Untergurt -1 Stab), Normalkräfte Obergurt



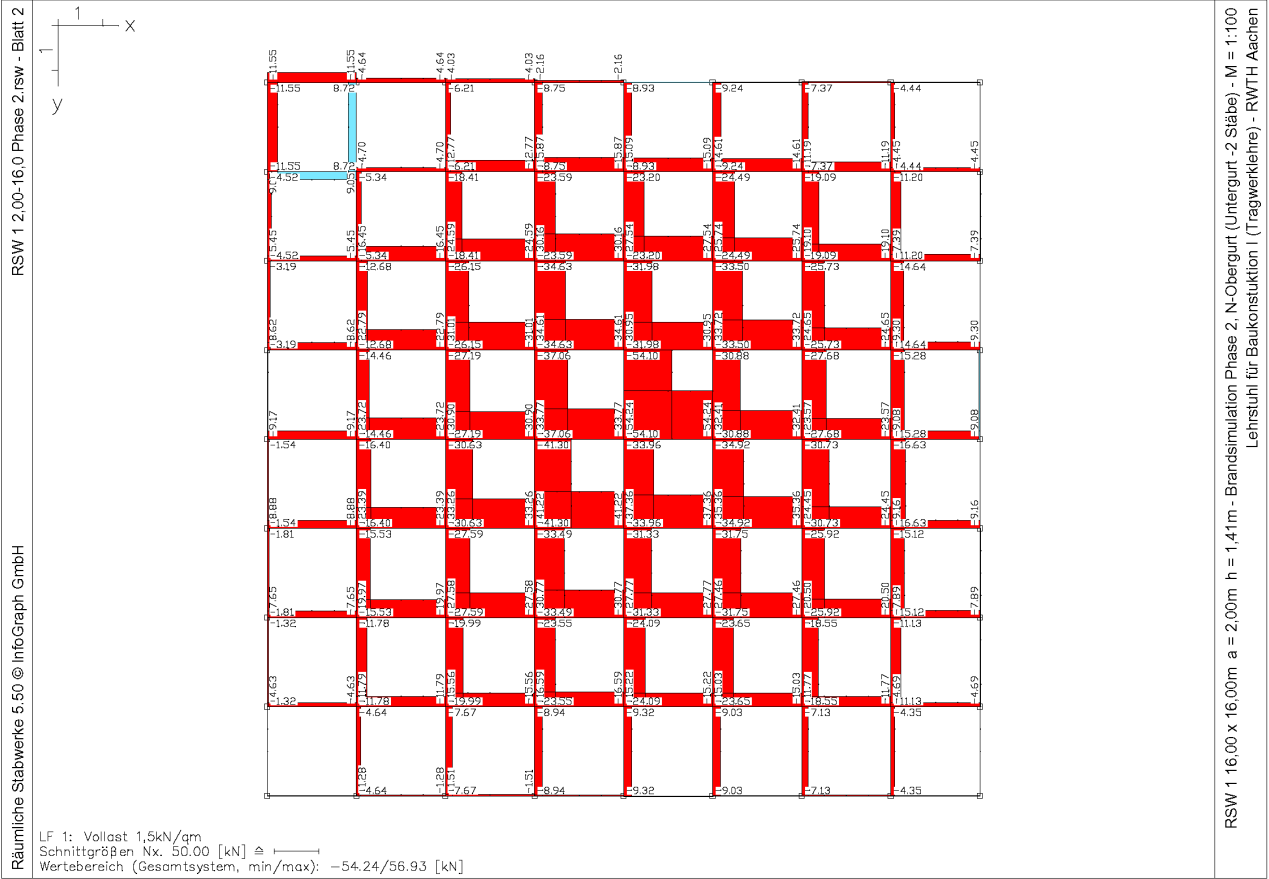
Brandsimulation, Phase 1 (Untergurt -1 Stab), Normalkräfte Diagonalstäbe



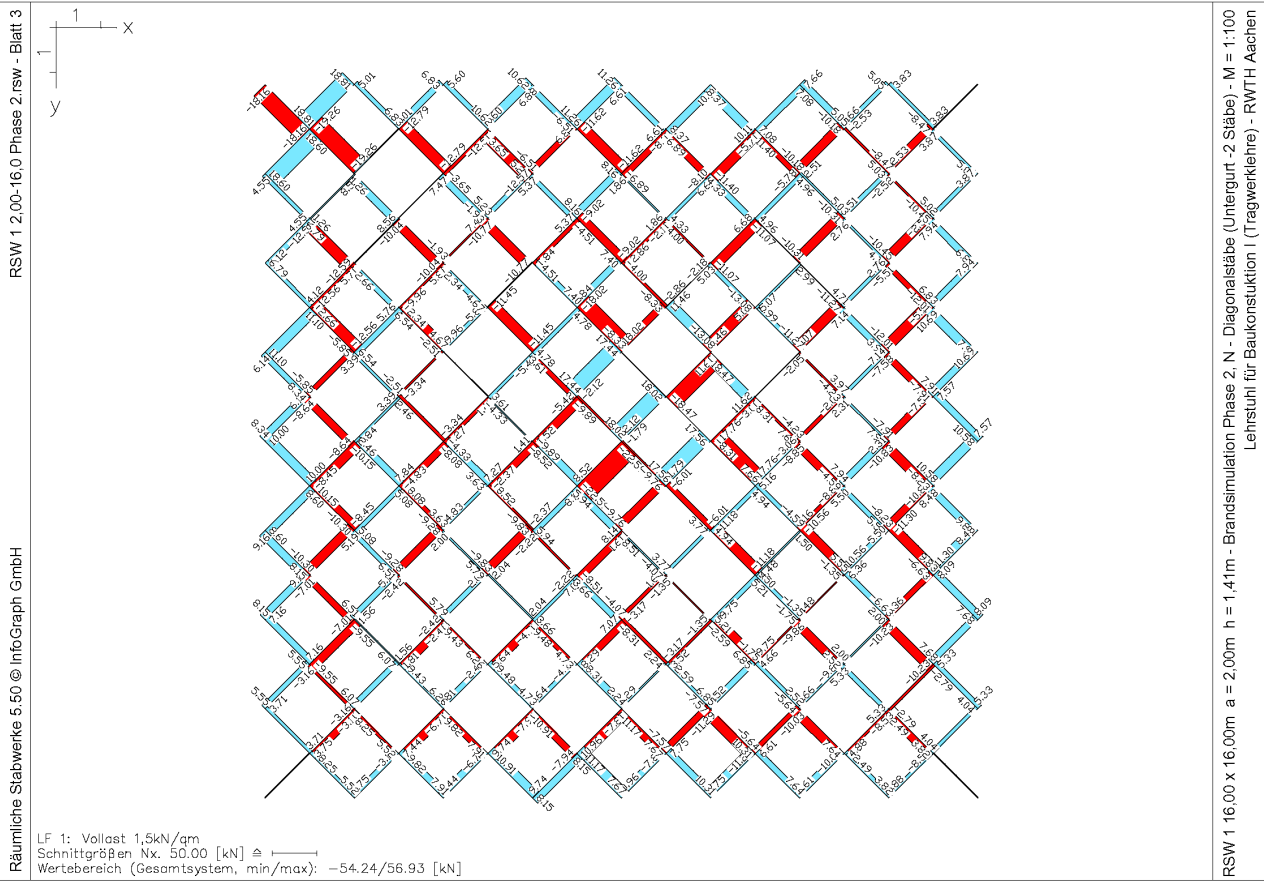
Brandsimulation, Phase 1 (Untergurt -1 Stab), Normalkräfte Untergurt

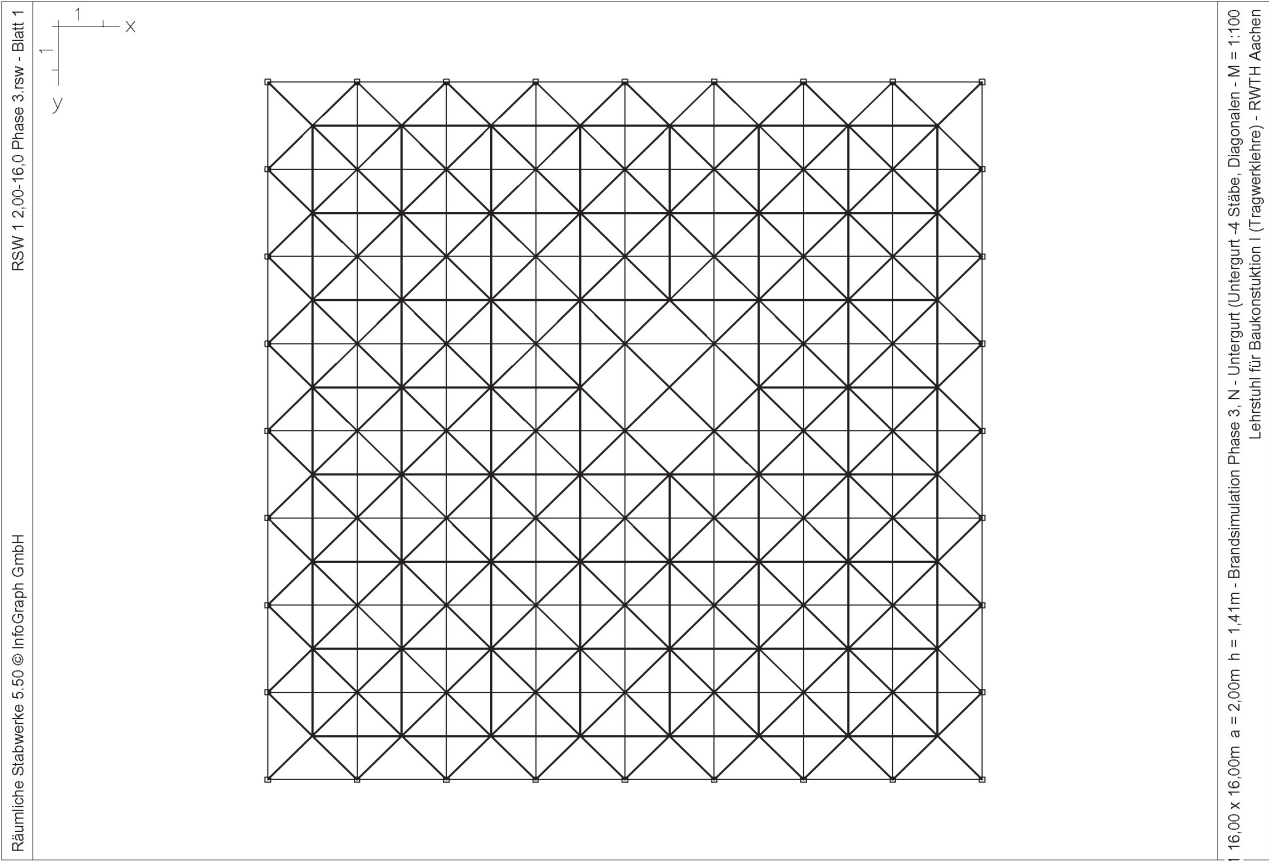


Brandsimulation, Phase 2 (Untergurt -2 Stäbe), Aufsicht

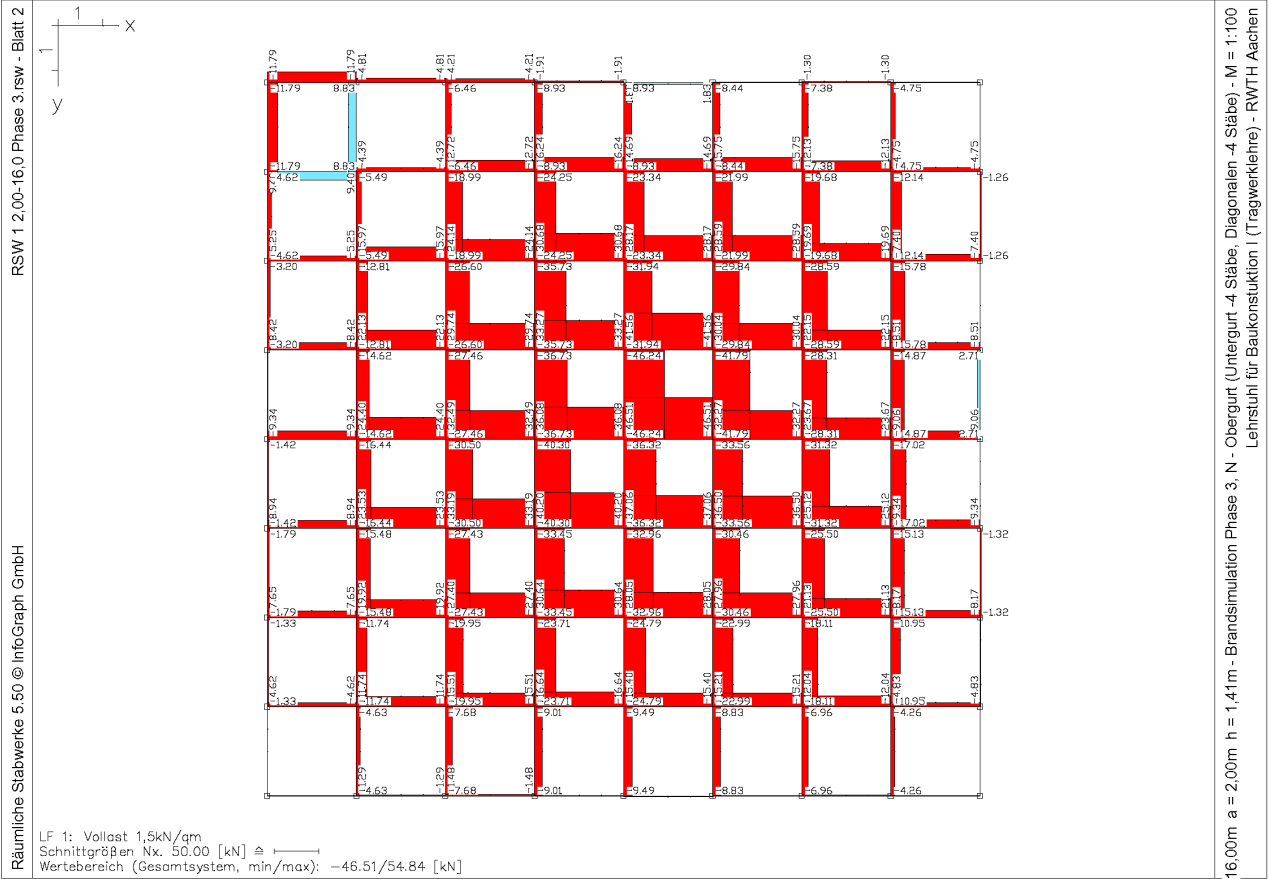


Brandsimulation, Phase 2 (Untergurt -2 Stäbe), Normalkräfte Obergurt





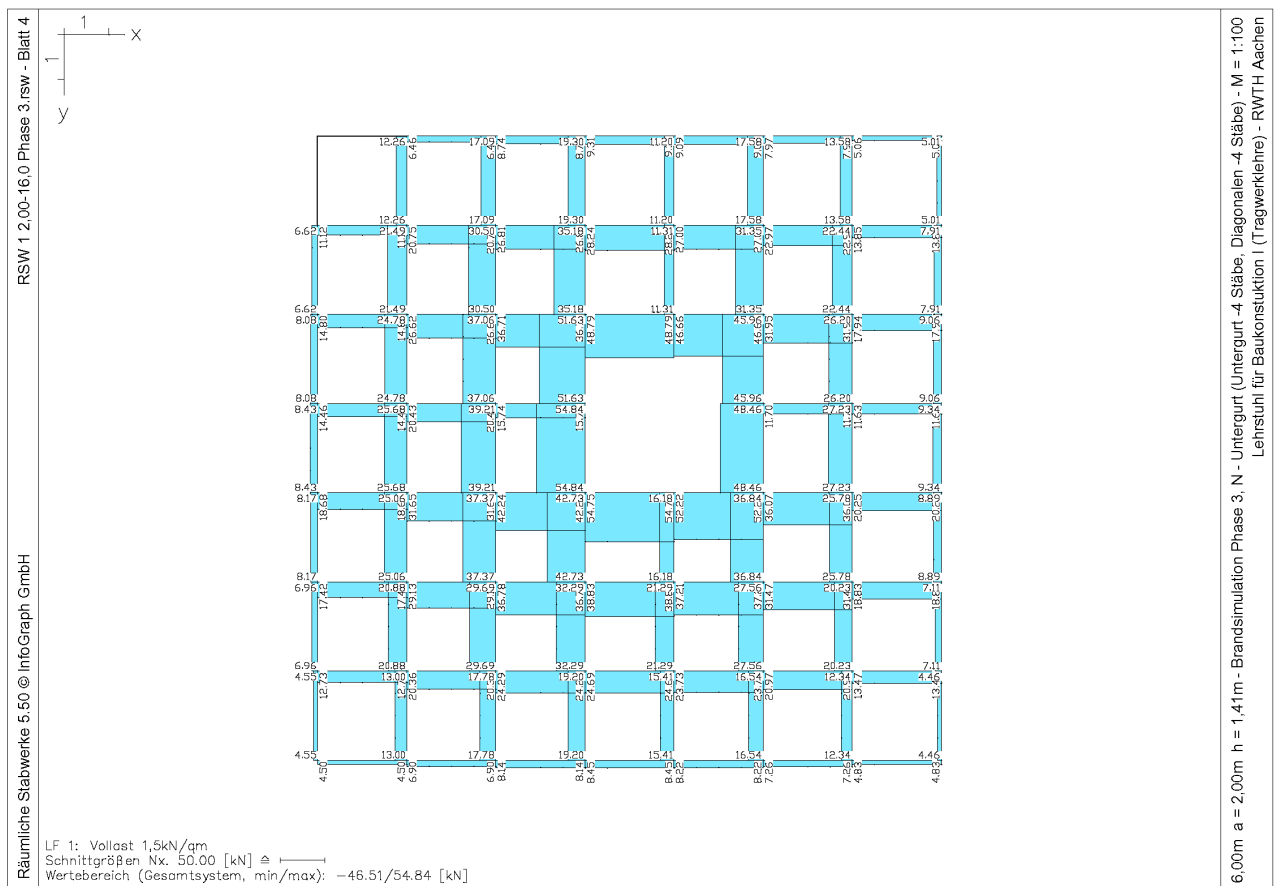
Brandsimulation, Phase 3 (Untergurt -4 Stäbe, Diagonallage -4 Stäbe), Aufsicht



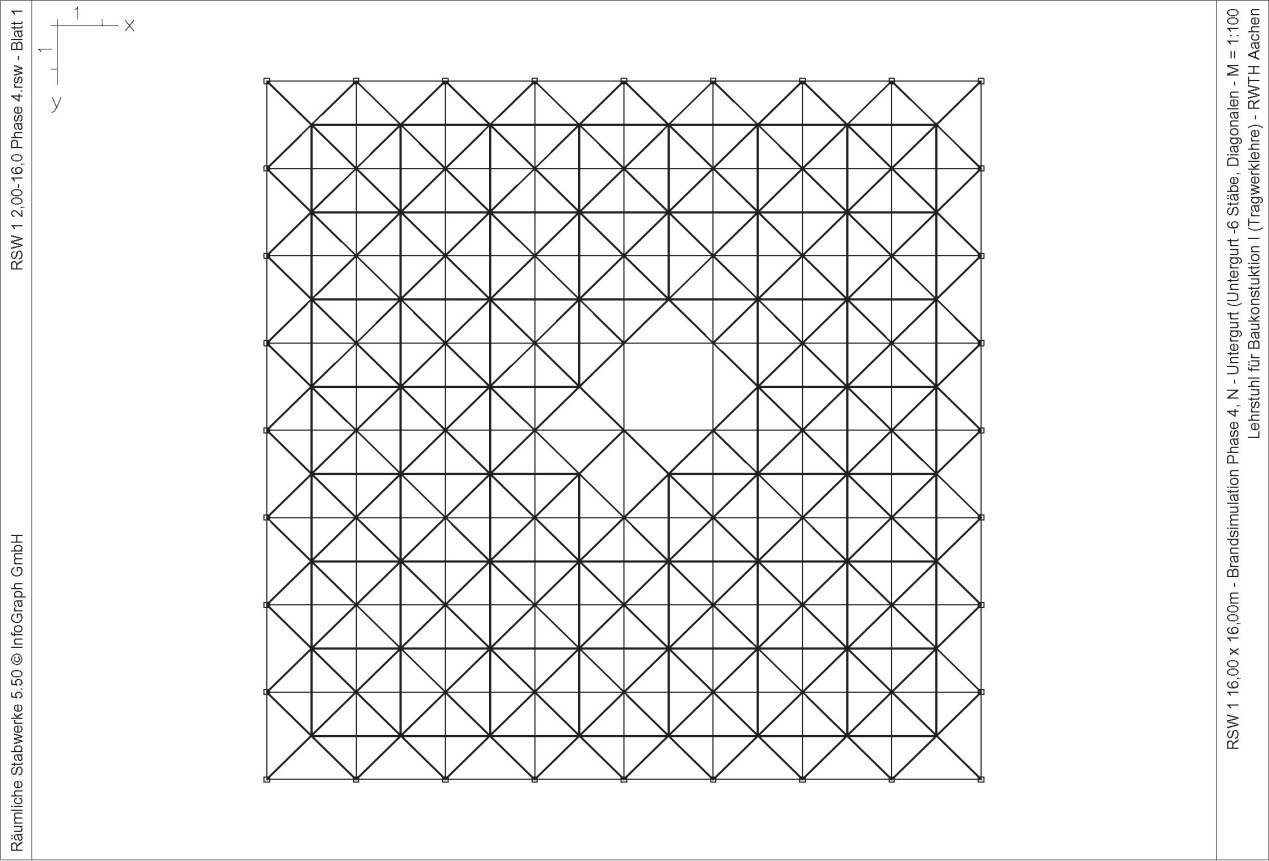
Brandsimulation, Phase 3 (Untergurt -4 Stäbe, Diagonallage -4 Stäbe), Normalkräfte Obergurt



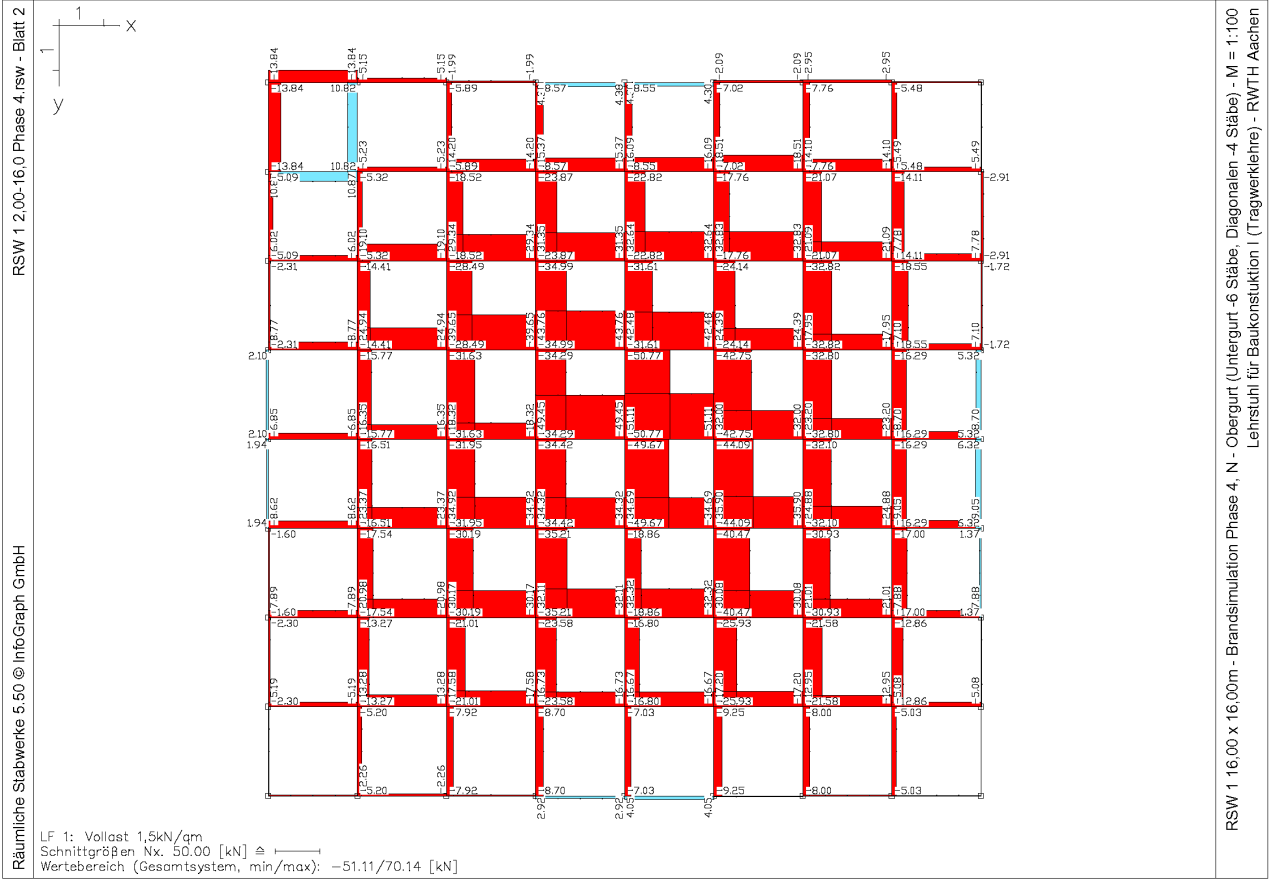
Brandsimulation, Phase 3 (Untergurt -4 Stäbe, Diagonalage -4 Stäbe), Normalkräfte Diagonalstäbe



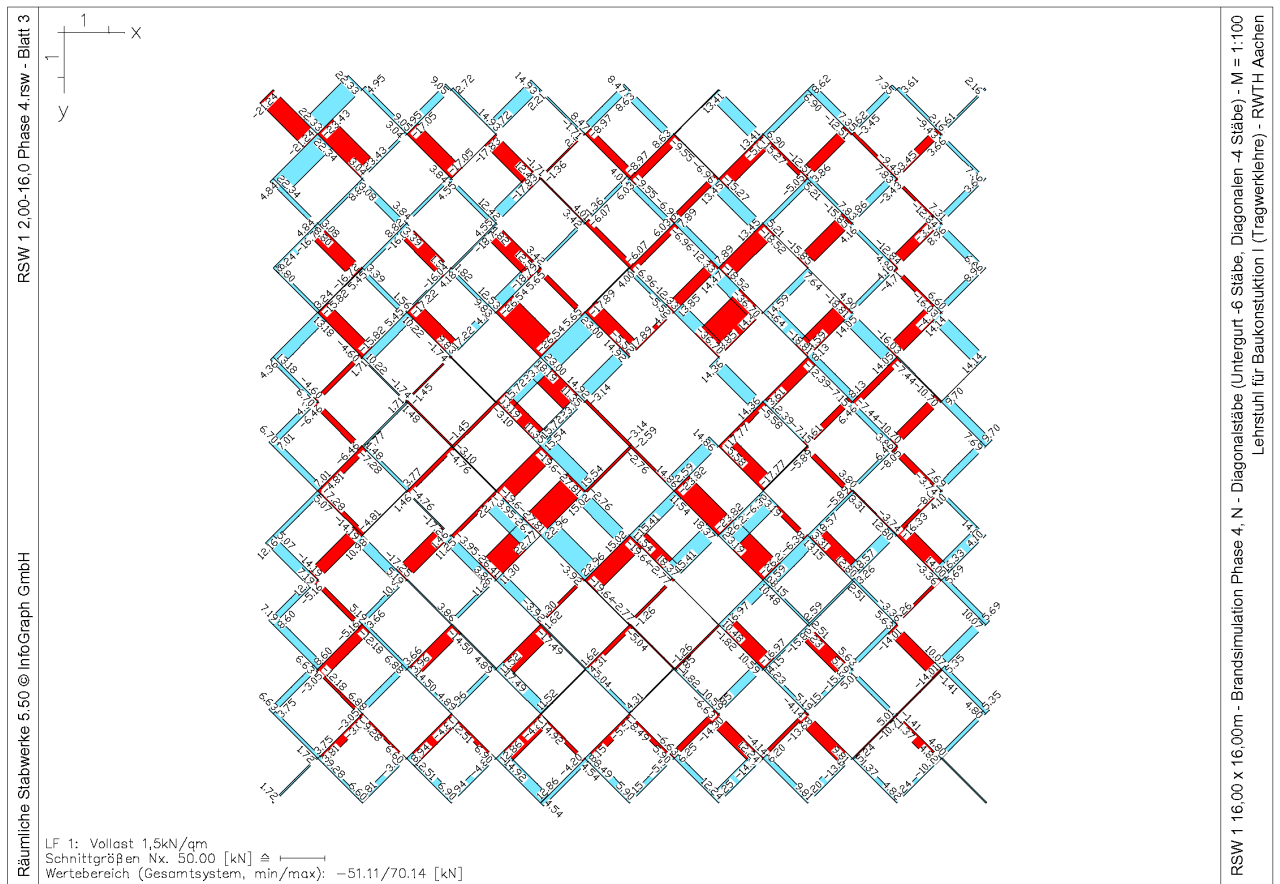
Brandsimulation, Phase 3 (Untergurt -4 Stäbe, Diagonalage -4 Stäbe), Normalkräfte Untergurt



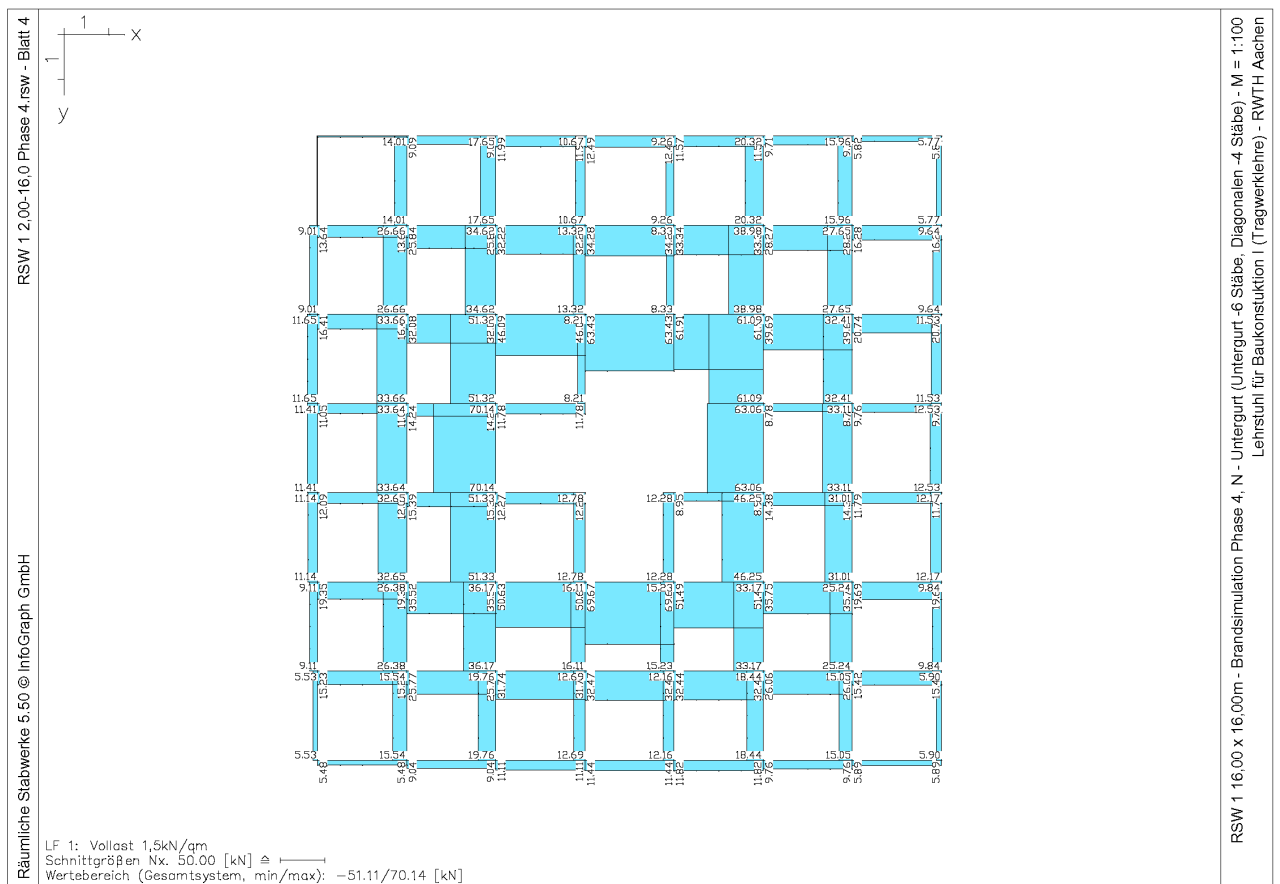
Brandsimulation, Phase 4 (Untergurt -6 Stäbe, Diagonallage -4 Stäbe), Aufsicht



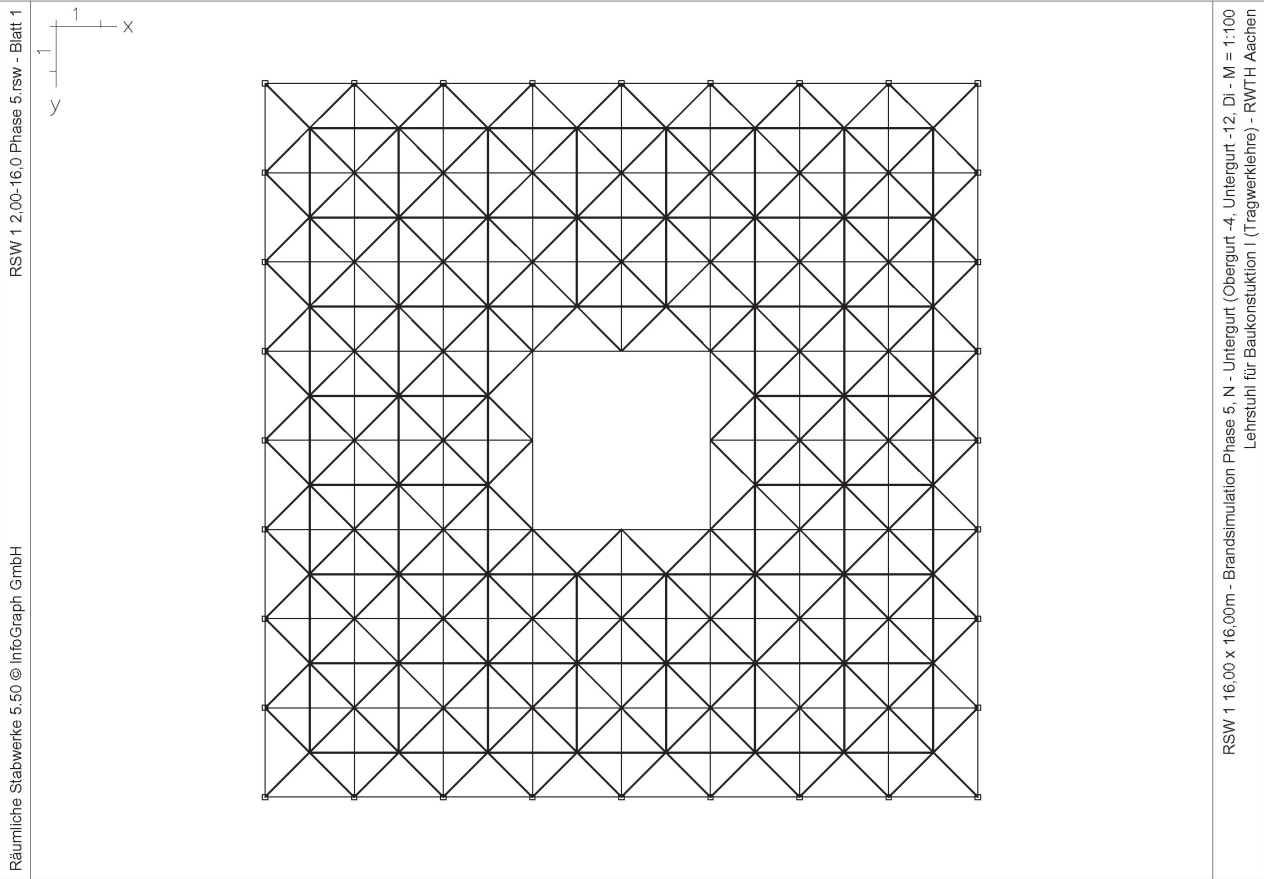
Brandsimulation, Phase 4 (Untergurt -6 Stäbe, Diagonallage -4 Stäbe), Normalkräfte Obergurt



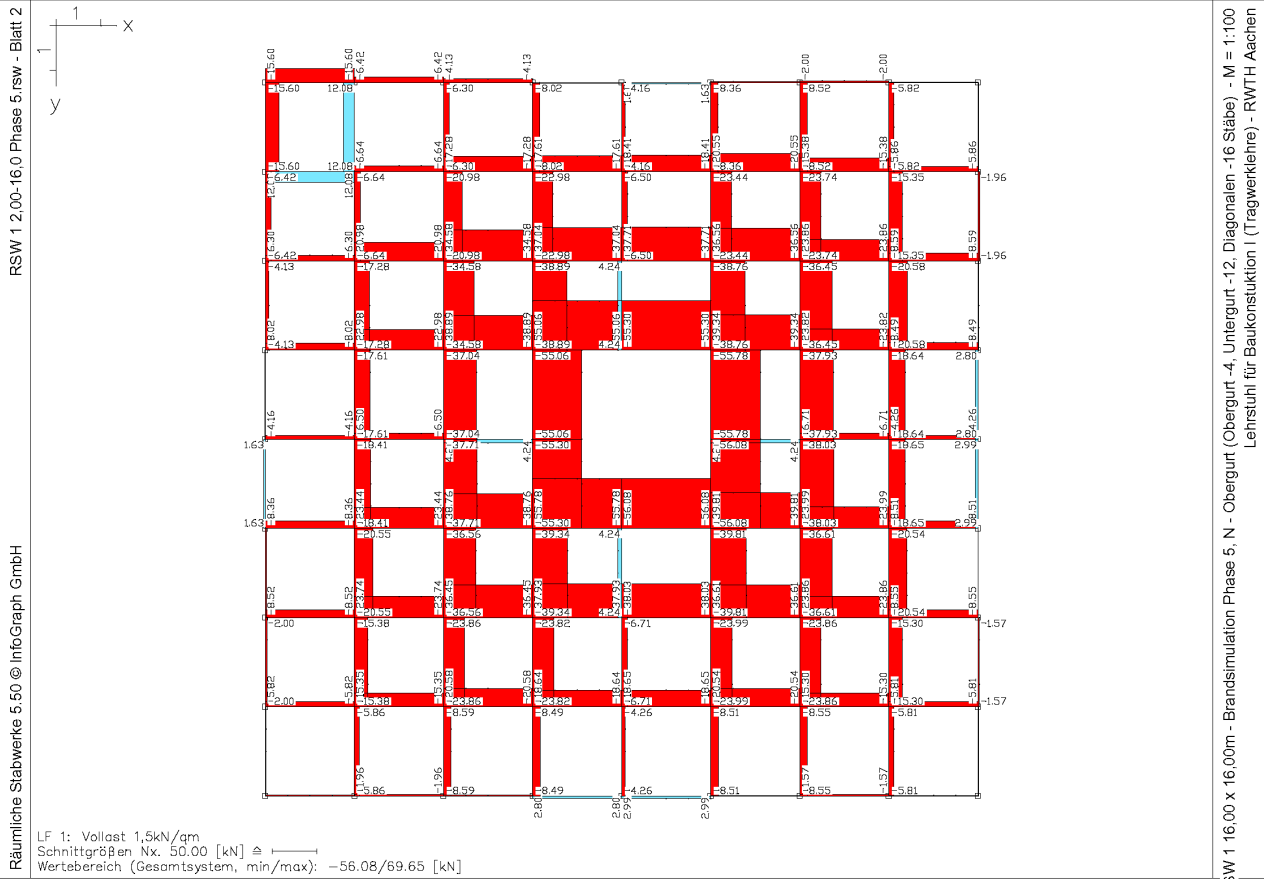
Brandsimulation, Phase 4 (Untergurt -6 Stäbe, Diagonalen -4 Stäbe), Normalkräfte Diagonalstäbe



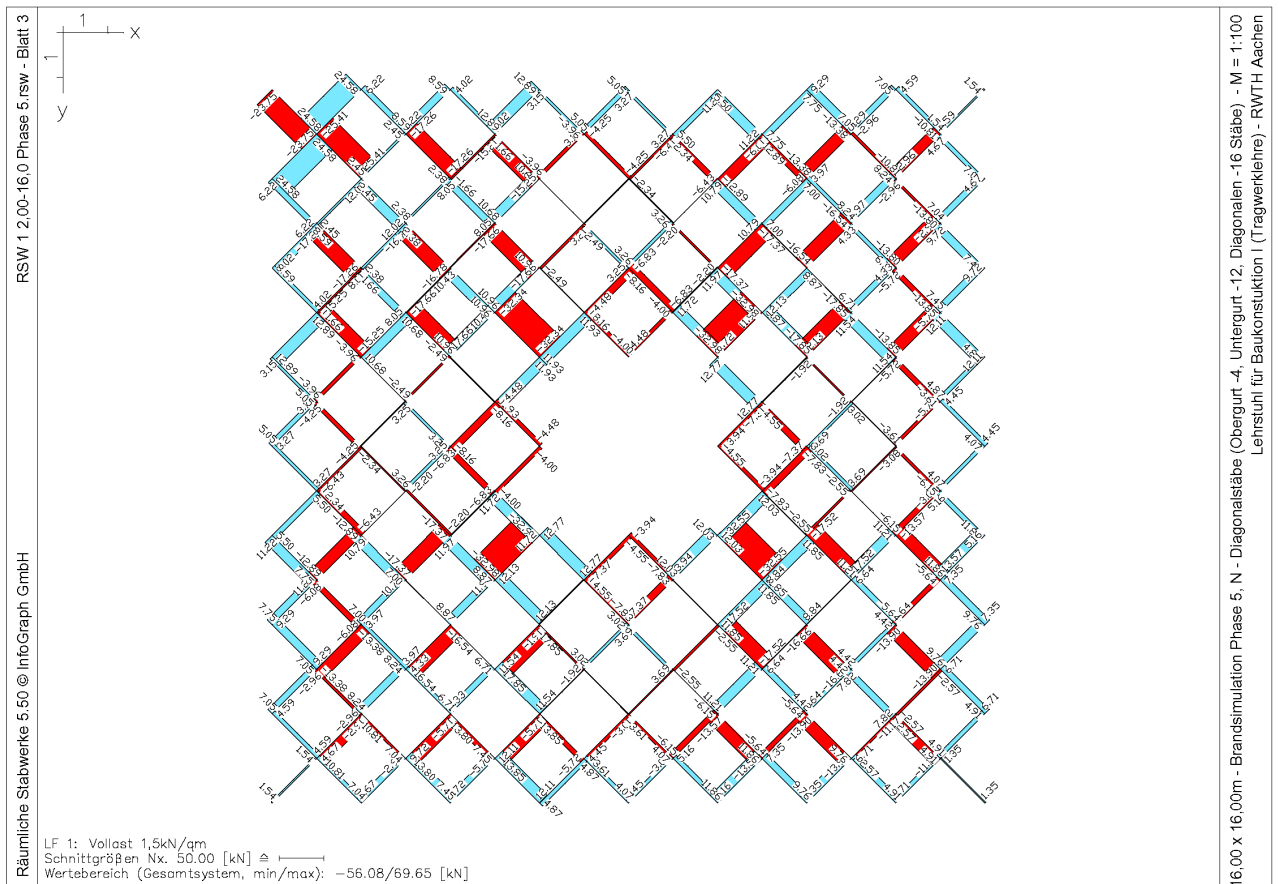
Brandsimulation, Phase 4 (Untergurt -6 Stäbe, Diagonalen -4 Stäbe), Normalkräfte Untergurt



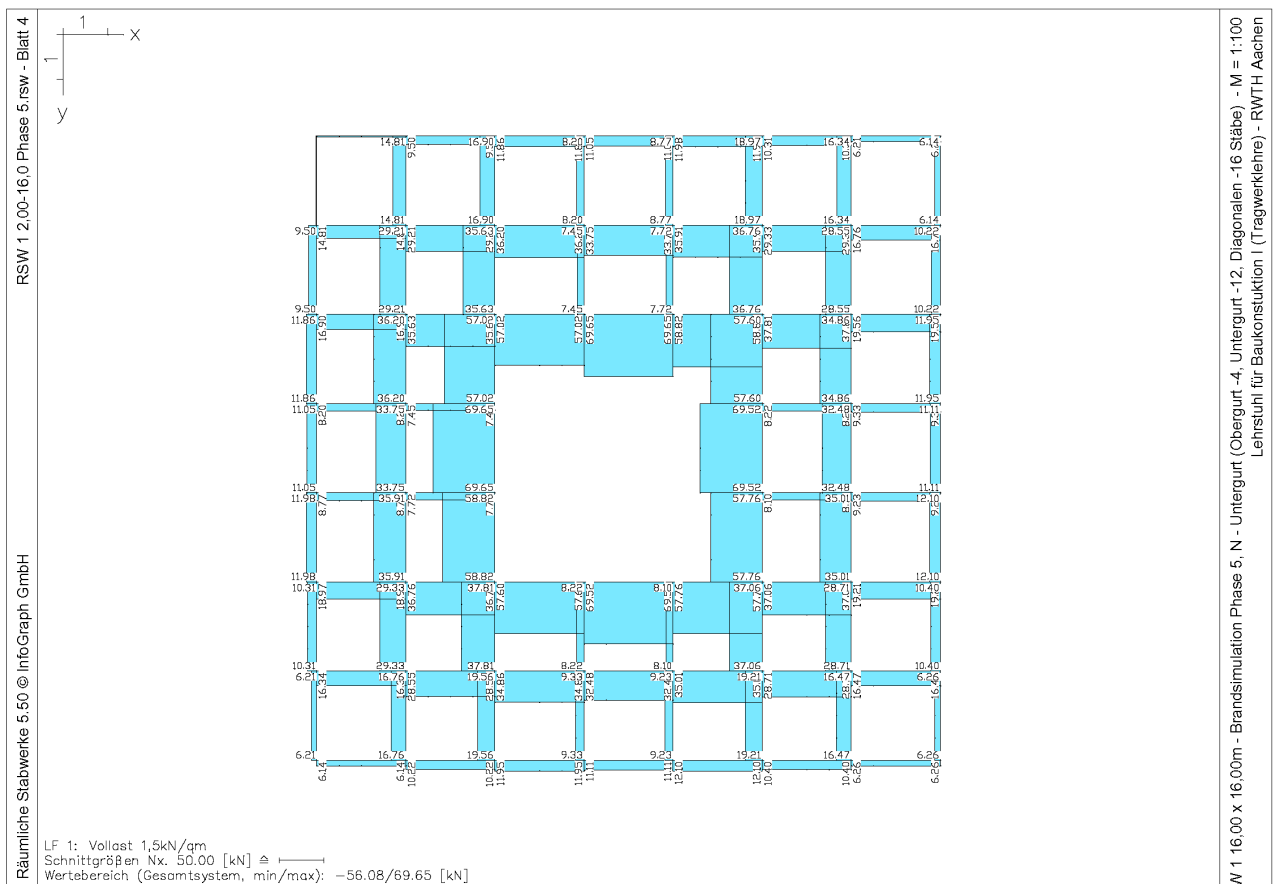
Brandsimulation, Phase 5 (Untergurt -12 Stäbe, Diagonallage -16 Stäbe, Obergurt -4 Stäbe), Aufsicht



Brandsimulation, Phase 5 (Untergurt -12 Stäbe, Diagonallage -16 Stäbe, Obergurt -4 Stäbe), Aufsicht, Normalkräfte Obergurt



Brandsimulation, Phase 5 (Untergurt -12 Stäbe, Diagonalanlage -16 Stäbe, Obergurt -4 Stäbe), Aufsicht, Normalkräfte Diagonalstäbe



Brandsimulation, Phase 5 (Untergurt -12 Stäbe, Diagonalanlage -16 Stäbe, Obergurt -4 Stäbe), Aufsicht, Normalkräfte Untergurt

11 Literaturverzeichnis

- Blaß, H. J.; Eberhart, O.: Optimierung des Induo – Verbundankers, insbesondere zum Einsatz in Induo Zug- und Druckstäben für Raumtragwerke, Gutachten; Karlsruhe 15.03.2000
- Büren, Charles von: Neuer Holzbau in der Schweiz, Baufachverlag, Zürich 1985
- Büttner, Oskar; Hampe, Erhard: Bauwerk, Tragwerk, Tragstruktur, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin - Stuttgart 1985
- Büttner, Oskar; Stenker, Horst: Metalleichtbauten, Band 1 - Ebene Raumstabwerke, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1971
- Deutscher Stahlbauverband (Hrsg.): Stahlbauten im Rheinland Köln – Koblenz, Bauen mit Stahl, Heft 76, Verlag Wiederspahn, Wiesbaden 1994
- Deutsches Institut für Normung: DIN 4102 - 4 (Teil 4), Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, in: DIN 4102, Brandschutz, Beuth Verlag, Berlin 1994
- Doernach, R.: Sphärische Raumfachwerke, in: Stahlbau, Heft 4/1960, S. 97-104, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1960
- Emde, Helmut: Geometrie der Knoten-Stab-Tragwerke, Strukturforschungszentrum, Würzburg 1979
- Eva Jiricna Architects (Architekt): Greenhouse in Prague, in: Detail, Heft 3/2000, S. 372-377, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, München 2000
- Fink, Josef: Die Kuppel über dem Viereck – Ursprung und Gestalt, Alber - Verlag, Freiburg - München 1958
- Föppl, August: Das Fachwerk im Raum, Druck und Verlag von B. G. Teubner, Leipzig 1892
- Führer, Wilfried; Gerhardt, Rolf: Tragkonstruktionen in Natur und Technik, Seminarreader, 3. überarb. Auflage, RWTH Aachen 2000
- Fuller, R. Buckminster: Inventions - the patented works of R. Buckminster Fuller, St. Martin's Press, New York 1983
- Häring, Christoph Hermann: Großkuppelbauten als Holznetzschalen, in Bauen mit Holz, Heft 9/1983, S. 547-549, Bruderverlag, Karlsruhe 1983
- Heinle, Erwin; Schlaich, Jörg: Kuppeln aller Zeiten - aller Kulturen, Deutsche Verlags - Anstalt, Stuttgart 1996
- Heyden, Wilhelm; Knaack, Ulrich: Experimentelles Bauen, Festschrift Wilfried Führer, RWTH Aachen 1998
- Hochbauamt Augsburg, (Architekt): Glasdach im Maximilianmuseum in Augsburg; in: Glas, Heft 2/2000, S. 20-25 Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart 2000
- Idelberger, Klaus: Umhüllter Garten Eden - Das größte Pflanzenschau- und Gewächshaus der Welt in Cornwall, in Baukultur, Heft 2/2000, S. 14-17, Verlag Wiederspahn, Wiesbaden 2000
- Informationsdienst Holz (Hrsg.): Überdachungen mit großen Spannweiten, Düsseldorf 1983
- Informationsdienst Holz (Hrsg.): Holzbau - Handbuch, Reihe 3 T4, Düsseldorf 1996
- Joedicke, Jürgen: Dokumente der modernen Architektur, Bd. 2 Schalenbau, K. Krämer - Verlag, Stuttgart 1962

- Kircher, Frieder: Brandschutz im Bild,
WEKA Baufachverlage, Kissing 2001
- Klimke, H.; Kemmer, W.; Rennon, N.: Die Stabwerkskuppel der Stockholm Globe Arena, in:
Stahlbau, Heft 1/1989, S. 1-8,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1989
- Klimke, H.: Entwurfsoptimierung räumlicher Stabwerkstrukturen durch CAD-Einsatz, in:
Bauingenieur, Jahrgang 61, S. 481-489,
Springer - Verlag, Berlin 1986
- Klimke, H.: Zum Stand der Entwicklung der Stabwerkskuppeln, in: Stahlbau, Heft 9/1983, S. 257-262,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1983
- Klotz, Heinrich: Vision der Moderne - Das Prinzip Konstruktion,
Prestel-Verlag, München 1986
- Knippers, Jan: Zum Stabilitätsverhalten tonnenförmiger Stabschalen, in:
Stahlbau, Jahrgang 67, Heft 4/98, S. 298-306,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1998
- Knippers, Jan; Bulenda, Thomas; Stein, Michael: Zum Entwurf und zur Berechnung von Stabschalen, in:
Stahlbau, Jahrgang 66, Heft 1/1997, S. 31-37,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1997
- Koepf, Hans: Bildwörterbuch der Architektur,
Kröner - Verlag, Stuttgart 1968
- Kollár, Lajos: Buckling of shells for engineers,
Verlag Wiley, Chichester - Budapest 1984
- Köppel, K.; Schardt, R.: Zur Berechnung von Netzwerkkuppeln, in: Stahlbau, Heft 5/1962, S. 129-131,
Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1962
- Krauss, Franz: Tragwerklehre V-VI - Seminar Schalenbau, Seilnetze und Zelte - ,
Seminarreader, RWTH Aachen, o.J.
- Krauss, Franz; Führer, Wilfried; Jürges, Thomas: Tabellen zur Tragwerklehre, 6. vollst. überarb. Auflage,
Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln 1996
- Krausse, Joachim; Lichtenstein, Claude (Hrsg.): Your Private Sky, - R. Buckminster Fuller, Design als Kunst einer
Wissenschaft,
Müller - Verlag, Baden/Schweiz, Zürich 1999
- Lips-Ambs, Franz-Josef: Holzbau heute,
DRW - Verlag Weinbrenner, Leinfelden - Echterdingen 1999
- Makowski, Z. S.: Räumliche Tragwerke aus Stahl,
Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1963
- Mayers Lexikonred. (Hrsg.) Digel, Werner (Red.): Mayers Großes Taschenlexikon in 24 Bänden, 3. Auflage,
Bibliographisches Institut, Mannheim - Wien - Zürich 1990
- Mengeringhausen, Max: Komposition im Raum - Raumfachwerke aus Stäben und Knoten -, 7. Auflage,
Bauverlag, Wiesbaden 1975
- Mengeringhausen, Max: Kompositionen im Raum, die Kunst individueller Baugestaltung mit Serienelementen,
Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh - Würzburg 1983
- Mero (Hrsg.): Mero Triagonal – System,
Würzburg 1965
- Fa. MERO: Produktdokumentation und -information,
Mero Systeme, Würzburg
- Meschke, Hans-Jürgen: Baukunst und -technik der hölzernen Wölbkonstruktionen - Vom Bogentragwerk zum
Stabnetzwerk - ,
Dissertation, RWTH Aachen 1989
- Mimar Sinan Üniversitesi (Hrsg.): Domes from antiquity to the present – proceeding of the IASS – MSU
International Symposium, Istanbul, Turkey, May 30 – June 3, 1988,
Mimar Sinan Üniversitesi, Istanbul 1988
- Müller, Werner; Vogel, Gunter: Dtv – Atlas zur Baukunst, Bd. 13. Aufl.,
Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1979

- Rickenstorff, Günter unter Mitarbeit eines Autorenkollektivs: Tragwerke für Hochbauten,
Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1972
- Rühle, Herrmann: Räumliche Dachtragwerke - Konstruktion und Ausführung-, Band 1 und 2,
Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln 1970
- Ruske, Wolfgang (Hrsg.): Holz - Glas - Architektur,
WEKA Baufachverlage, Kissing 1988
- Scheer, J.; Koep, H.: Zur Optimierung von Raumfachwerken, in: Bauingenieur, Jahrgang 57, S. 27 – 33,
Springer - Verlag, Berlin 1982
- Schlaich, Jörg; Schober, Hans: Verglast Netzkuppeln, in: Bautechnik, Jahrgang 69, Heft 1/92, S. 3-10,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1992
- Schlaich, Bergemann und Partner (Ing.): An goldenen Ketten... Hofüberdachung des Museums für hamburgische
Geschichte in: Deutsche Bauzeitung, db, Jahrgang 124, Heft 7/90, S. 32-39,
Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart 1990
- Schleich, Jean-Baptiste: Globales Brandsicherheitskonzept, in: Stahlbau, Jahrgang 67, Heft 2/98, S. 81-96,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1998
- Schmiedel, Karlheinz: Konstruktion und Gestalt,
Ernst & Sohn Verlag für Architektur, Berlin 1994
- Schmiedel, Karlheinz und 11 Mitautoren: Bauen und Gestalten mit Stahl, 3. Auflage,
expert - Verlag, Renningen - Malsheim 1995
- Schober, Hans: Die Masche mit der Glas-Kuppel, in:
Deutsche Bauzeitung, db, Jahrgang 128, Heft 10/94, S. 152-163,
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1994
- Schweizer Holzbau: Internet-Dokumentation für Holzbauprojekte in www.lignum.ch,
HWK LIGNUM, Schweizerische Holzwirtschaftskonferenz, 2000
- Siegel, Curt: Strukturformen der modernen Architektur, 2. Auflage,
Verlag Calway, München 1965
- SYMA: Produktinformationen
SYMA-SYSTEM GmbH, Hilden 2000
- Wachsmann, Konrad: Vom Sinn des Details – zum Gesamtwerk von Konrad Wachsmann,
Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln 1988
- Wendehorst, Reinhard: Bautechnische Zahlentafeln, 26. Auflage
Beuth Verlag Berlin und Köln, B.G. Teubner, Stuttgart 1994

Johann-Wilhelm Heyden
Erlenweg 6 - 52074 Aachen

06. Juni 1956	geboren in Birkesdorf jetzt Düren
1967 - 1976	Stiftisches Gymnasium Düren, Abitur
1976 - 1977	Grundwehrdienst
1977 – 1979	Rhein.- Westf. Technische Hochschule Aachen, Fachrichtung Bauingenieurwesen
1979 - 1980	Technische Universität München, Fachrichtung Architektur
1980	Studentischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baukonstruktion, Prof. Dr.-Ing. T. Hugues
1980 - 1987	Rhein.- Westf. Technische Hochschule Aachen, Fachrichtung Architektur Abschluß als Diplom-Ingenieur
1982 - 1986 1987 - 1988	Studentischer Mitarbeiter, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre) der RWTH Aachen Prof. Dr.-Ing. W. Führer
1988 - 1994	Angestellter Architekt im BAUTURM, Architekturbüro Busmann & Haberer, Köln (Büroleitung 1993 – 94)
seit 1991	Mitglied der Architektenkammer Nordrheinwestfalen
seit 1994	Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Baukonstruktion I (Tragwerklehre) der RWTH Aachen Prof. Dr.-Ing. W. Führer

