

Tragwerksentwurf I

Structural Design I

Philippe Block · Joseph Schwartz

Tragwerksentwurf I

Structural Design I



Curriculum

Curriculum

Lernziele

Learning Goals

Semesterübersicht

Semester overview

eQUILIBRIUM

eQUILIBRIUM

Unterrichtsmaterial

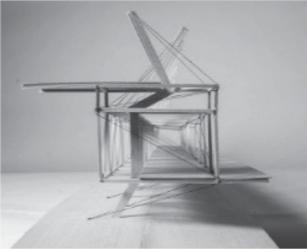
Course material

Teaching Team

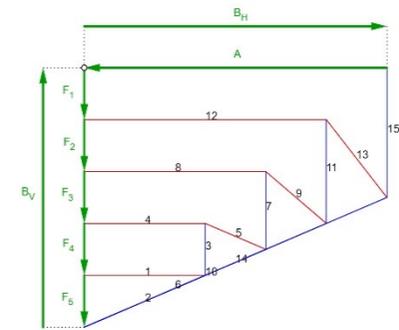
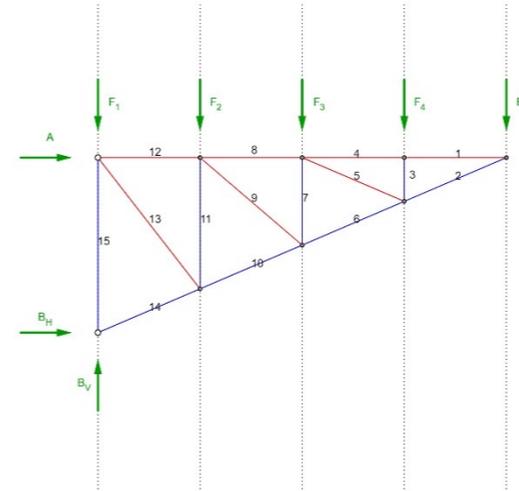
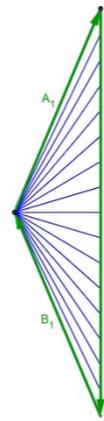
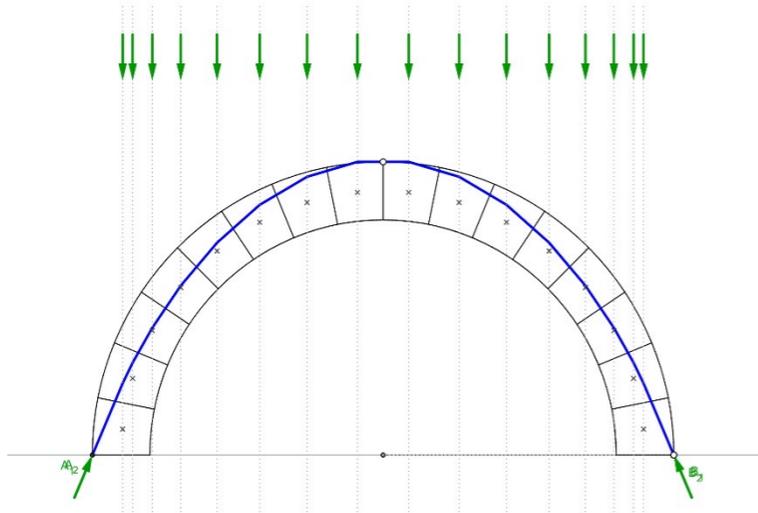
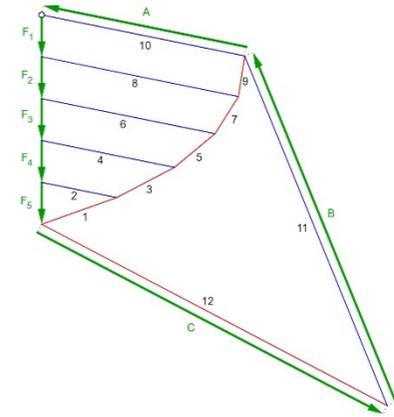
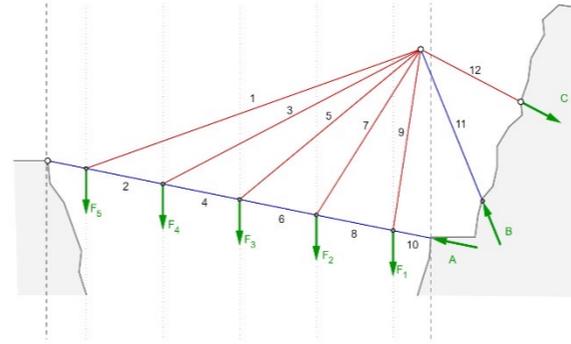
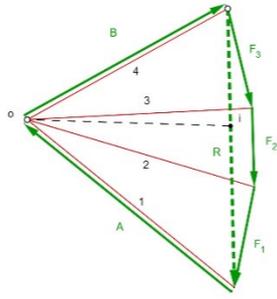
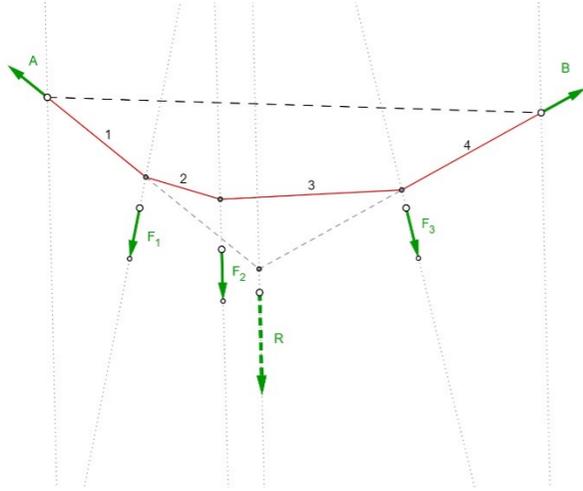
Teaching team

BACHELOR				MASTER			
Structural Design I	Structural Design II	Structural Design III	Structural Design IV	Computational Structural Design I	Computational Structural Design II	Architecture and Structure	Force Material Form
Form and Force	Material	Design Project	Design Project	Computational Graphic Statics	Form-finding and Fabrication	Design	History and Theory
							

BACHELOR

Structural Design I	Structural Design II	Structural Design III	Structural Design IV
Form and Force	Material		Design Project
			

TEI-TEIII: Understand how structures function

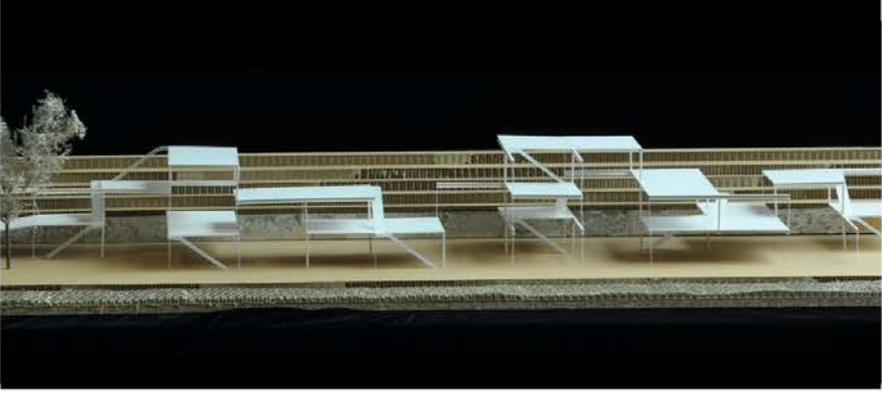
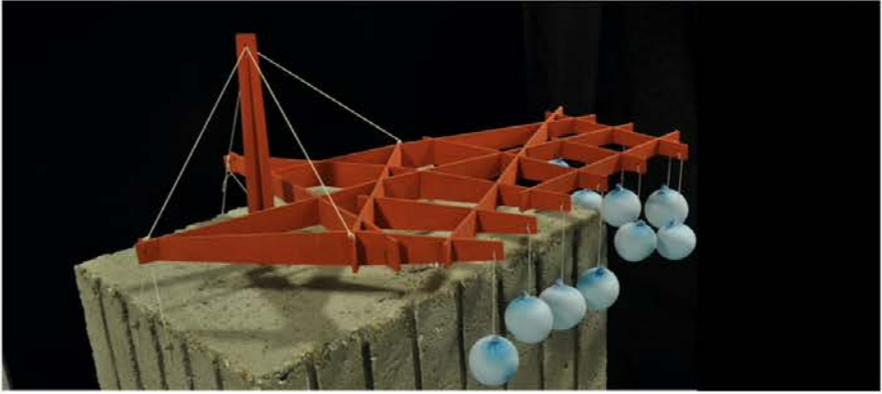
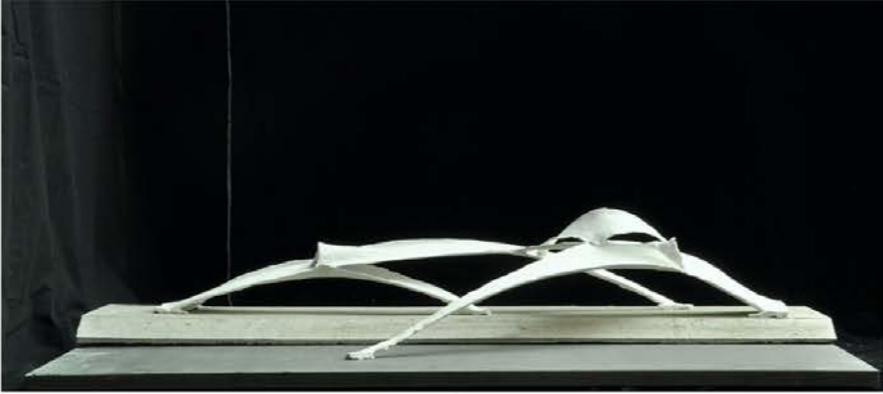
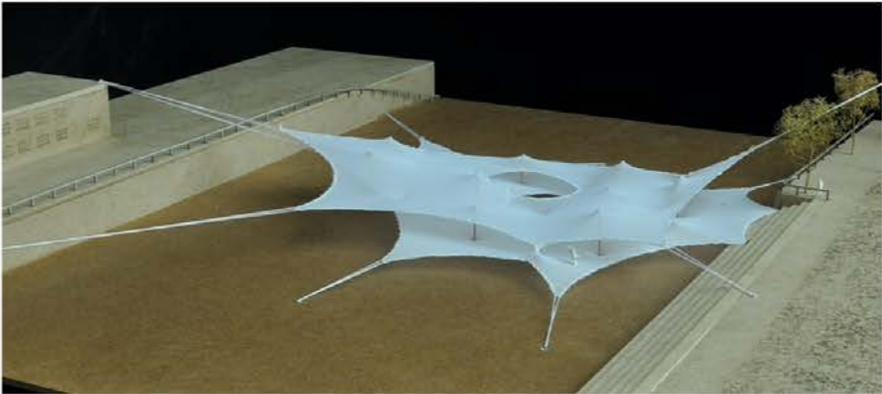


BACHELOR

Structural Design I	Structural Design II	Structural Design III	Structural Design IV
<p>Form and Force</p>	<p>Material</p>	<p>Design Project</p>	
			

TEI-TEIII: Understand how structures function

TEI-TEIV: Design structures

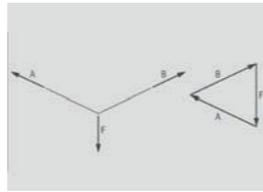




Tragwerksentwurf
Structural Design



1. Gleichgewicht
1. Equilibrium



2. Graphische Statik
2. Graphic statics



3. Seile
3. Cables



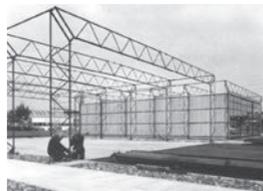
4. Bogen
4. Arches



5. Bogen-Seil
5. Arch-cables

Tragwerksentwurf I *Structural Design I*

Tragwerksentwurf II *Structural Design II*



6. Fachwerke
6. Trusses



7. Balken
7. Beams



8. Rahmen
8. Frames



9. Platten
9. Plates



10. Stützen
10. Columns



11. Nachhaltigkeit
11. Sustainability

Tragwerksentwurf I

Structural Design I

Curriculum

Curriculum

>>

Lernziele

Learning Goals

Semesterübersicht

Semester overview

eQUILIBRIUM

eQUILIBRIUM

Unterrichtsmaterial

Course material

Teaching Team

Teaching team

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

2. den Zusammenhang zwischen der Form eines Tragwerks und den darin wirkenden Kräften zu verstehen.

2. understand the relationship between the form of a structure and the internal forces within it.

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

2. den Zusammenhang zwischen der Form eines Tragwerks und den darin wirkenden Kräften zu verstehen.

2. understand the relationship between the form of a structure and the internal forces within it.

3. den Tragwerksentwurf zu modifizieren, um ihn zu verbessern.

3. modify the design of a structure in order to improve it.

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

2. den Zusammenhang zwischen der Form eines Tragwerks und den darin wirkenden Kräften zu verstehen.

2. understand the relationship between the form of a structure and the internal forces within it.

3. den Tragwerksentwurf zu modifizieren, um ihn zu verbessern.

3. modify the design of a structure in order to improve it.

4. die wichtigsten strukturellen Typologien zu identifizieren.

4. identify the most important structural typologies.

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

2. den Zusammenhang zwischen der Form eines Tragwerks und den darin wirkenden Kräften zu verstehen.

2. understand the relationship between the form of a structure and the internal forces within it.

3. den Tragwerksentwurf zu modifizieren, um ihn zu verbessern.

3. modify the design of a structure in order to improve it.

4. die wichtigsten strukturellen Typologien zu identifizieren.

4. identify the most important structural typologies.

5. graphische Statik für die Formfindung und Analyse von Strukturen zu verwenden.

5. use graphic statics for the form-finding and analysis of structures.

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

2. den Zusammenhang zwischen der Form eines Tragwerks und den darin wirkenden Kräften zu verstehen.

2. understand the relationship between the form of a structure and the internal forces within it.

3. den Tragwerksentwurf zu modifizieren, um ihn zu verbessern.

3. modify the design of a structure in order to improve it.

4. die wichtigsten strukturellen Typologien zu identifizieren.

4. identify the most important structural typologies.

5. graphische Statik für die Formfindung und Analyse von Strukturen zu verwenden.

5. use graphic statics for the form-finding and analysis of structures.

6. eine Dimensionierung von Tragwerkselementen durchzuführen.

6. carry out basic dimensioning of structural elements.

Am Ende der Kurse Tragwerksentwurf I und II werden die Studierenden dazu in der Lage sein:

At the end of the courses Structural Design I and II, students will be able to:

1. die inneren Kräfte in strukturellen Elementen zu visualisieren.

1. visualize the internal forces within structural elements.

2. den Zusammenhang zwischen der Form eines Tragwerks und den darin wirkenden Kräften zu verstehen.

2. understand the relationship between the form of a structure and the internal forces within it.

3. den Tragwerksentwurf zu modifizieren, um ihn zu verbessern.

3. modify the design of a structure in order to improve it.

4. die wichtigsten strukturellen Typologien zu identifizieren.

4. identify the most important structural typologies.

5. graphische Statik für die Formfindung und Analyse von Strukturen zu verwenden.

5. use graphic statics for the form-finding and analysis of structures.

6. eine Dimensionierung von Tragwerkselementen durchzuführen.

6. carry out basic dimensioning of structural elements.

7. auf Probleme struktureller Art kreativ zu reagieren

7. respond to structural problems in a creative manner

Tragwerksentwurf I

Structural Design I

Curriculum

Curriculum

Lernziele

Learning Goals

>>

Semesterübersicht

Semester overview

eQUILIBRIUM

eQUILIBRIUM

Unterrichtsmaterial

Course material

Teaching Team

Teaching team

Woche Week	Datum Date	Vorlesung Lecture	Übung Exercise
		Do. 12:45 - 15:30 HCI G3	Do. 12:45 - 15:30 HIL G 41/ 61
1	22.09.22	L 0: Einführung Tragwerksentwurf L 0: Introduction to Structural Design	
2	29.09.22	L 1: Gleichgewicht und Graphische Statik L 1: Equilibrium and Graphic Statics	
3	06.10.22		UE 1:Einführung Gleichgewicht EX 1: Introduction Equilibrium
4	13.10.22	L 2: Graphische Statik und Dimensionierung L 2: Graphic Statics and Dimensioning	
5	20.10.22		UE 2: Graphische Statik und Dimensionierung EX 2: Graphic Statics and Dimensioning
6	27.10.22	Seminarwoche Seminar Week	
7	03.11.22	L 3: Seile L 3: Cables	
8	10.11.22		UE 3: Seile EX 3: Cables
9	17.11.22	L 4: Bögen L 4: Arches	
10	14.11.22		UE 4: Bögen EX 4: Arches
11	01.12.22	L 5: Bogen-Seil L 5: Arch-Cables	
12	08.12.22		UE 5: Bogen-Seil EX 5: Arch-Cables
13	15.12.22	Kein Unterricht No classes	Kein Unterricht No classes
14	22.12.22	Kein Unterricht No classes	Kein Unterricht No classes

Vorlesungswoche*Lecture week*

12:45 - 15:30	Vorlesung <i>Lecture</i>	HCI G3
---------------	-----------------------------	--------

Übungswoche*Exercise week*

12:40 - 12:45	Versammlung in den Kojen <i>Gathering in the units</i>	HIL G 41 / 61
12:45 - 13:00	Einführung mit den Hilfsassistierenden <i>Intro to the exercise with the student assistants</i>	
13:00 - 15:30	Übung & Diskussion mit den Hilfsassistierenden <i>Exercise & discussion with the student assistants</i>	
15:30	Übungsabgabe <i>Submission exercise</i>	HIL G 41 / 61
Folgewoche <i>a week later</i>	Späteste Abgabe "Creative Task" <i>Latest Submission of creative task</i>	

Tragwerksentwurf I

Structural Design I

Curriculum

Curriculum

Lernziele

Learning Goals

Semesterübersicht

Semester overview

>>

eQUILIBRIUM

eQUILIBRIUM

Unterrichtsmaterial

Course material

Teaching Team

Teaching team

<http://block.arch.ethz.ch/eq>

Tragwerksentwurf I

Structural Design I

Curriculum

Curriculum

Lernziele

Learning Goals

Semesterübersicht

Semester overview

eQUILIBRIUM

eQUILIBRIUM

>> Unterrichtsmaterial

Course material

Teaching Team

Teaching team



Bild 7.1: Modell für die Kuppel von San Pietro in Rom, 1706, von P. S. Rossi, J. P. Rossi & C. Rossi

New 'Natura'. Diese Kuppelgewölbe werden generell durch die Kombination von drei gleichartigen Tonnengewölben. In diesem Fall ist für jedes Tonnengewölbe nur ein Kinnstein vorhanden und die resultierende Überdeckung ist ein Quadrat durchschiffend und weist daher nur drei Auflagereihen und drei Gänge auf.

7.3 Kuppelgewölbe

Einziges Gewölbe, welche bei der geometrischen Konstruktion des Kuppelgewölbes entstehen werden, ergeben eine weitere Gewölbeart, welche als Kuppelgewölbe bezeichnet wird und aus vier Elementen von Tonnengewölben und von Gängen im Bereich ihrer Überdeckung besteht (Bild 7.13a).

Die in der Hauptkuppelkonstruktion der 'Tonnung'...

willkürlicheren Begleitenden Begleitern sind den Auflagern ein zentrales Gewölbe, so dass wir bei den Tonnengewölben, im Gegensatz zu den Kuppelgewölben, die Auflagerung kreuzförmig über das gesamte Umfang erfolgen muss. Im oberen Bereich sind die Rippen durch die Gänge verbunden. Die Rippenbildung verläuft hier teilweise durch Überlagerung der Rippen der benachbarten Flächenkomponenten und schließt in die Gänge ein (Bild 7.12b). Im Gegensatz zu den Kuppelgewölben, bei welchen die Gänge durch die Rippen nach unten hinuntergeführt werden, werden diese bei den Kuppelgewölben nach oben hinuntergeführt. Ihre Beanspruchung ist maßgebend auf der Höhe der Auflagern und nimmt nach oben durch die Einwirkung der Begleitkräfte progressiv zu, bis die maximale Druckbeanspruchung im Scheitel erreicht wird.

Kuppelgewölbe können auf einfache Art mit Tonnengewölben kombiniert werden, so dass mehrstufige Grundrisse überdeckt werden können. In diesem Fall können mehrere Druckknoten in den Gängen, welche von benachbarten der Maximalen in den Scheiteln entstehen, von einem im Scheitel des Tonnengewölbes in Längsrichtung verlaufenden Druckknoten aufgenommen werden (Bild 7.13b).

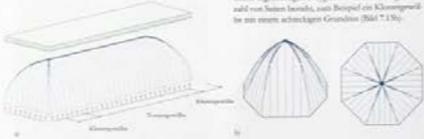


Bild 7.13: Systematische Kombination von Kuppel- und Tonnengewölben (a) und Kuppelgewölbe aus schiefem Grundriss (b).

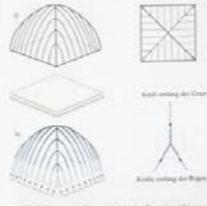


Bild 7.12: Systematische Kombination (a) und Überlagerung (b) von Kuppelgewölben

Wie die Kuppelgewölbe können auch die Kuppelgewölbe durch die Überdeckung von einer beliebigen Anzahl von Tonnengewölben zusammengesetzt werden. Auf diese Art entstehen Kuppelgewölbe, deren Umfang aus einem n-eckigen Polygon mit einer beliebigen Anzahl von Seiten besteht, zum Beispiel ein Kuppelgewölbe mit einem achteckigen Grundriss (Bild 7.13c).

Die „Kuppel“ von Santa Maria del Fiore in Florenz von Filippo Brunelleschi (1377-1446) ist das bekannteste Beispiel eines Kuppelgewölbes aus einem schiefen achteckigen Grundriss (Bild 7.14). Das Tragwerk besteht aus zwei Gewölben aus Mauerwerk von innen, welches nur 0,38 m hoch ist, und ein äußeres mit einer variablen Stärke zwischen 2,40 m unten und 2,10 m oben. Die zwei Gewölbe sind durch 8 vertikal verlaufende Rippen im Bereich der Kuppel, und aus weiteren 16 dazwischen liegenden und zusätzlich horizontalen Rippen miteinander verbunden. Die Gesamthöhe der Gewölbe beträgt ca. 4 m.



Bild 7.14: „Kuppel“ der Santa Maria del Fiore, Florenz, 1418-36, von Filipp Brunelleschi

7.4 Kuppeln mit auf die äusseren Laisten abgestimmten radialen Rippen

Von Hauptpunkt des Tragebaus aus betrachtet, sind die Rippen der Kuppel des Oberbaus mit horizontalen und radialen Grundriss orientiert. Ein solches Tragewerk kann konstruiert werden als ein Kuppelgewölbe, das aus einer unendlichen Zahl von Oberflächen und Gängen besteht. Die Rippen der Oberfläche sind dann schiefenartig, so dass die Tragekräfte immer zu einer unendlichen Reihe von radial angestellten...



Bild 7.15: Kuppel mit Rippenstruktur

von Rippen entstehen. Kuppeln sind also Kuppelgewölben mit Radialrippen als strukturelle Laisten und horizontalen oder diagonalen Hauptauflagen. Um die Überlagerung von Kuppeln besser zu verstehen, können wir diese durch eine unendliche Anzahl von Rippen und Kuppeln darstellen (Bild 7.15).

Die strukturellen Rippen tragen das äussere Laisten ab, welche auf ihre Oberfläche wirken. Die Innenstruktur der äusseren Rippen verbindet mehrere Kuppeln radial mit Hilfe der gegenseitigen Stützstruktur. Zur Ermittlung der Beanspruchung des Materials, die der Druckbeanspruchung oder der Kraft des Charakteristischer ist, wird die innere Druckkraft stärker durch die Querschnittsfläche, bestimmt aus dem Abstand einer unendlichen Reihe unendlicher von der Spitze der Kuppel (vgl. Kapitel 5).

Die Querschnittsfläche nimmt nach oben hin zu, und auch im Bereich der Rippenstruktur, die auf dem Scheitel der Kuppel, gegen null. Das bedeutet, dass die Spannung im Material gegen unendlich steigt. Ein...

1.1 Kompendium Tragwerksentwurf I&II – HS20/FS21 Resultierende zweier nicht-paralleler Kräfte

Gegeben sind zwei nicht parallele Kräfte F_1 und F_2 . Gesucht ist die Grösse der Resultierenden sowie deren Position im Lageplan.

Bei der Resultierenden handelt es sich um die Vektoraddition aller auf das System einwirkenden Kräfte. In der grafischen Statik werden dabei die Eigenschaften der Vektoren (Kräfte) in zwei unterschiedlichen Zeichnungen grafisch festgehalten. Im Lageplan ist die Position und die Richtung der angreifenden Kräfte sowie die Geometrie des Tragwerks massstäblich verkleinert dargestellt. Im Kräfteplan wird hingegen die Richtung und die Grösse der Kraft aufgezeichnet.



Die beiden angreifenden Kräfte werden der Reihe nach (im Uhrzeigersinn) im Kräfteplan aufgezeichnet. Die Richtung der Kräfte wird beibehalten, deren Länge im Kräfteplan entspricht der Grösse der Kraft. Diese Länge wird durch den Massstab des Kräfteplans bestimmt, wobei ein Zentimeter [cm] jeweils einer bestimmten Anzahl Kilonewton [kN] entspricht. Mit dem vorgegebenen Massstab ist der Vektor der Kraft F_1 im Kräfteplan 3cm lang. An dessen Ende beginnt F_2 , ebenfalls mit einer Länge von 3cm. Zusammen bilden sie die sogenannte Belastungslinie, also die Summe aller angreifenden Kräfte. Die Verbindung vom Anfang der ersten Kraft mit dem Ende der letzten Kraft der Belastungslinie entspricht der Resultierenden R . Der Kräfteplan gibt die Richtung sowie die Grösse der Resultierenden an.



Um die Position der Resultierenden im Lageplan zu finden, werden die Wirkungslinien der angreifenden Kräfte eingezeichnet. Durch deren Schnittpunkt verläuft die Wirkungslinie der Resultierenden. Die Richtung der Resultierenden kann nun aus dem Kräfteplan parallel in den im Lageplan gefundenen Schnittpunkt verschoben werden. Die Position von R auf der Wirkungslinie ist dabei, genau wie die Länge des Vektors, frei wählbar, da im Lageplan lediglich die Lage und Richtung der Kraft, nicht aber deren Grösse grafisch festgehalten wird.

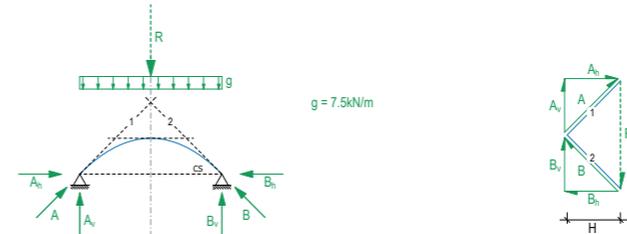


Lagepläne 1:100

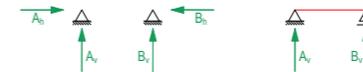
Kräftepläne 1cm $\hat{=}$ 10kN

5.2 Kompendium Tragwerksentwurf I&II – HS20/FS21 Bogen-Seil-Tragwerke

Im Folgenden wird ein einfaches Bogentragwerk betrachtet, das eine konstante Linienlast in die beiden festen Auflager A und B abträgt. Die Auflagerkräfte können in ihre Horizontal- und Vertikalkomponenten aufgeteilt werden. A_h und B_h nehmen dabei den horizontalen Schub auf, den der Bogen, in Abhängigkeit seiner Stichthöhe, verursacht.



Oftmals wird in einem Tragwerk aber ein Roillager verwendet, welches nur vertikale Kräfte aufnehmen kann. Daher muss der horizontale Schub innerhalb des Tragwerks aufgenommen werden. Dafür wird zwischen den beiden Auflagern ein Zuelement eingeführt. Dadurch werden beide Auflagerkräfte vertikal.



Anstatt, dass eine horizontale Auflagerkraft von aussen auf das System wirkt, zieht nun die innere Kraft den Bogen zusammen und verhindert dass das Auflager B zur Seite „wegrollt“. Die Kraft im Seil entspricht dabei derjenigen der Horizontalanteile der Auflagerkräfte. Die Kombination von druckbeanspruchtem Bogen und zugbeanspruchtem Seil nennt sich Bogen-Seil-Tragwerk.



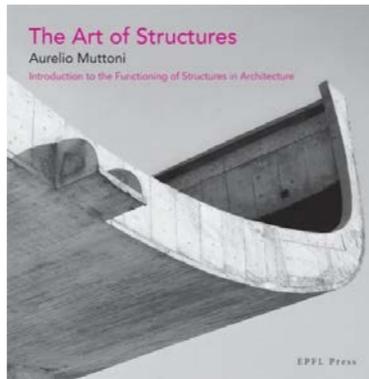
Lagepläne 1:100

Kräftepläne 1cm $\hat{=}$ 10kN



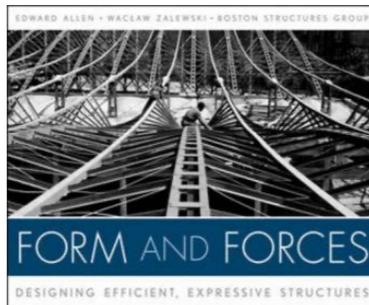
Faustformel Tragwerksentwurf

Philippe Block, Christoph Gengnagel, Stefan Peters, DVA Deutsche Verlags-Anstalt 2013, ISBN: 978-3-421-03904-0



The Art of Structures: Introduction to the Functioning of Structures in Architecture

Aurelio Muttoni, EPFL Press, 2011, ISBN-13: 978-0415610292, ISBN-10: 041561029X



Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures

Edward Allen, Waclaw Zalewski, October 2009, ISBN: 978-0-470-17465-4

Tragwerksentwurf I

Structural Design I

Curriculum

Curriculum

Lernziele

Learning Goals

Semesterübersicht

Semester overview

eQUILIBRIUM

eQUILIBRIUM

Unterrichtsmaterial

Course material

>>

Teaching Team

Teaching team



Prof. Dr. Philippe Block



Prof. Dr. Joseph Schwartz



Michele Capelli
Coordination Structural Design I&II



Dr. Lluís Enrique
Head of Teaching

Student Teaching Assistants Structural Design I&II



Matteo Chiabotti



Damaris Eschbach



Nadine Fankhauser



Sébastien Fischer



Carmen Franc



Leonie Füssler



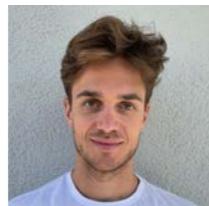
Nora Heeb



Rolf Imseng



Joel Keller



Ludwig Kissling



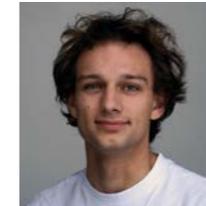
Antoine Liehti



Yvonne Ly



Vanessa Magloire



Florin Meier



Eva Schneuwly