

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

DIPLOMARBEIT

„Der Turm am schwarzen Felsen“

Eine begehbare Struktur basierend auf dem Prinzip „Tensegrity“

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

Manfred Berthold
Prof Arch DI Dr
E253
Architektur und Entwerfen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Fabian Gasser
0226034
Goldschlagstrasse 28/15
1150 Wien

Wien, am

.....

Danke an

meine Eltern

meine Großeltern

meine Geschwister



Auf diesen Mauern stand einst der hölzerne Maiernigger

„Weiße Turm am Schwarzen Felsen“

erbaut 1928 von Dr. Viktor Ohmacht. Mit seiner Sternwarte war er die Krönung der „Erholungsstätte Maiernigg“, die zu einer „Lebensschule“, zur Erholung für Körper, Geist und Seele, mit Sport, Vorträgen, Lebens und Eheberatung, ausgebaut werden sollte.

Die damalige Wirtschaftskrise machte diese Pläne zunichte.

Der Turm verfiel. 1960 brannte er ab. (Infotafel im Wald)

INHALTSVERZEICHNIS

THEMA	05
DER BAUPLATZ	06
<i>Geschichtlicher Einblick</i>	07
HERANGEHENSWEISE/ZIELE	10
<i>Die Geometrie der Natur</i>	11
<i>Entwurfsideen</i>	13
<i>Themenfindung</i>	15
TENSEGRITY	16
<i>Begriffsbestimmung/Grundlagen</i>	16
<i>Geschichtliche Entwicklung</i>	17
<i>Grundformen</i>	18
<i>Beispiele</i>	19
ENTWURF	25
<i>Arbeitsmodelle/ Entwurfsprozess</i>	25
<i>Bauweise</i>	31
<i>Details</i>	43
<i>Statik</i>	49
PLANMATERIAL	53
<i>Grundrisse</i>	54
<i>Schnitte</i>	58
<i>Ansichten</i>	62
<i>3D Bilder/Perspektive</i>	67
MODELL	80
QUELLEN	90

THEMA



Abb. 1-5: Alte Fundamente

Als ich letzten Frühling durch ein Waldstück am Südufer des Wörthersees spazierte, stieß ich auf gut erhaltene Grundmauern eines Gebäudes. Der Ort übte sofort eine Faszination auf mich aus. Die Ruinen befinden sich auf dem höchsten Punkt eines Felsens. Weitere Nachforschungen ergaben, dass an diesem Ort ein 1928 erbauter Holzturm stand, der 1960 einem Feuer zum Opfer fiel. Es handelte sich um einen Aussichtsturm mit Sternwarte, einer kleinen Gaststube und Übernachtungsmöglichkeiten. Der sogenannte „Schwarze Felsen“, auf dem die Fundamente liegen, befindet sich unweit vom Freibad Maiernigg, einem beliebten Badeort an der Südseite des Wörthersees. Ein Ort mitten im Wald, jedoch trotzdem nur wenige Minuten entfernt vom Badetrubel, mit ausreichenden Parkmöglichkeiten und sonstiger Infrastruktur. Um 1930 sollte das ganze Gebiet inklusive des Turms ein Erholungsgebiet mit vielerlei Möglichkeiten für Aktivitäten werden. Leider ging dem Investor damals aufgrund der Wirtschaftskrise das Geld aus. Mir war klar, dass meine Diplomarbeit darin bestehen würde, diesen Ort mit all seiner Mystik und Faszination neu zu beleben, indem ich auf den Grundmauern des abgebrannten „Weißen Turmes am Schwarzen Felsen“ etwas Neues entstehen lasse. Die Funktionen Sternwarte/Verpflegung werden verworfen. Es sollte sich lediglich um einen Aussichtsturm handeln. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf dieser außerordentlichen Aufgabe. Bei der Überlegung zur Vorgehensweise stieß ich auf das Thema „Tensegrity“ als Bauform. Mein Entwurf basiert auf diesem Prinzip. Diese Arbeit beschreibt die Grundlagen des Themas „Tensegrity“ in der Architektur anhand einer konkreten Entwurfsaufgabe.



Abb. 6: Kärnten



Abb. 7: Bezirk Klagenfurt Land

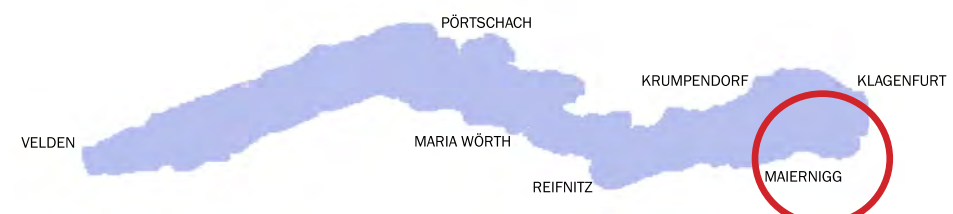


Abb. 8: Wörthersee

Abb. 9: Lageplan M 1:5000

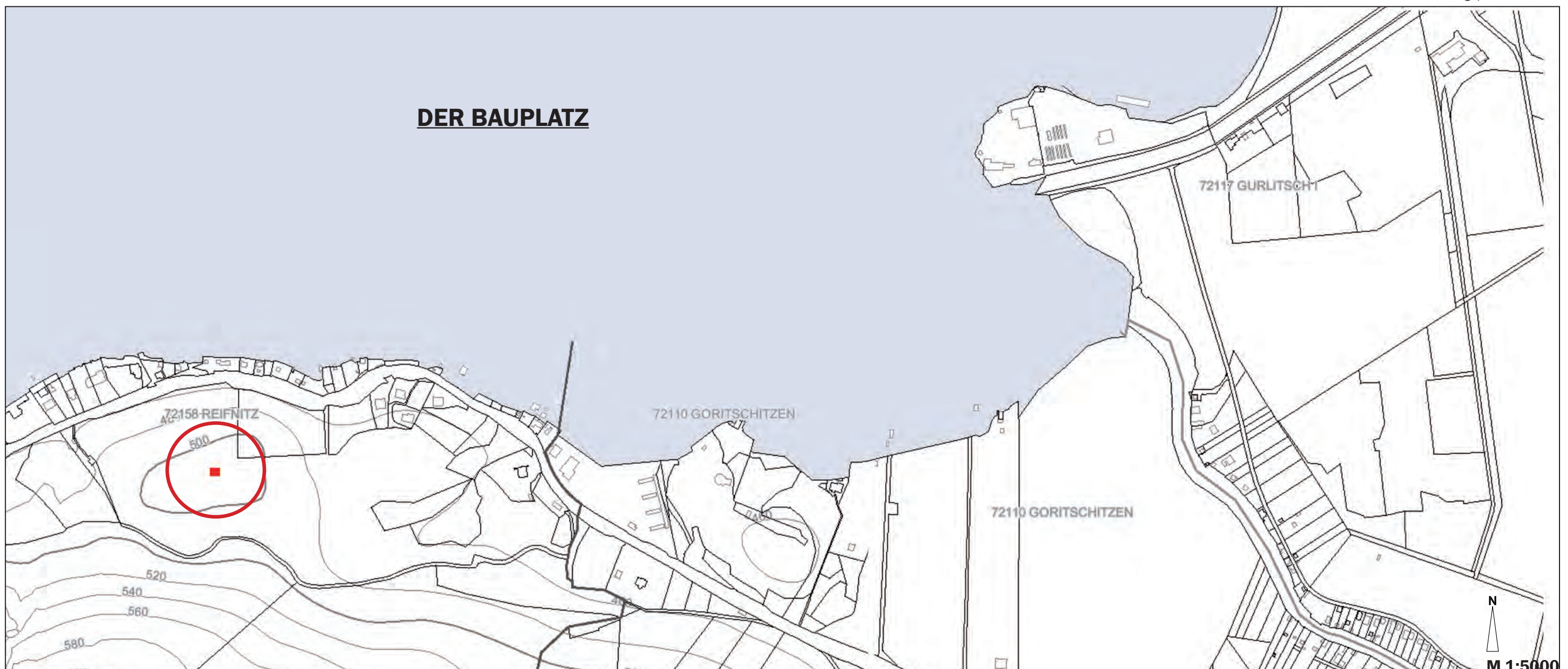




Abb. 10: Werbegrafik 1930

Geschichtlicher Einblick

Strand Etablissement Maiernigg

„Wie drängt es uns doch aus der Alltagsschwüle nach würziger Luft, auf befreiende Höhn! Wie lechzt unser Körper nach schattiger Kühle! Wie dünkt uns ein Bad in den Wellen so schön!

Wie lockt uns zu alldem ein molliger Sand, so sonnen-durchwärmt und vom Wasser umschäumt! dazu noch ein duftiges Badegewand und blauender Himmel in Wölken gesäumt! Wo grüßen uns Berge, erquickt uns das Tal, wo lacht uns die Sonne, flieht all unser Weh? So Bunt es auf einmal erlebt man zumal nur am Wärmsten der Seen, am Wörthersee. Blühende Gärten, verschwiegene Haine, trauliche Hütten, moderne Palais, felsige Wände und Schluchten, geheime Strandland und Promenadekais.

Was immer daher auch des Menschen Herz in sprudelndster [sic] Laune ersehnt, wird hier ihm Erfüllung: vom flüchtigsten Scherz bis zum Glück, das uns endlos verwöhnt.

Und lacht einem suchenden Herzen gar ein besonders gutes Geschick, so wird es der leisesten Sorgen bar in der Strandbucht von MAIERNIGG.

Das in der windstillen Südostbucht des Sees gelegene Maiernigg ist übrigens auch der Lieblingsaufenthalt Koschats und Gustav Mahlers gewesen. Der gänzliche Mangel der Luft an Staub und Keimen bietet hier vom hygienischen Standpunkt aus die besten Verbindungen gesunder Erholung.

Als Oase aller Ungebundenheit und Ungeniertheit ist es zu jeder Jahreszeit eine beliebte Zufluchtsstätte der vom hastenden Alltag erschöpften oder sonst irgendwie rast – erholungs – [sic] und zerstreungsbedürftigen Menschen.



Abb. 11-14: Fotos vom Erholungsgebiet Maiernigg 1930

Vom Zimmer direkt im Badekostüm ins Bad! Luft und Sonnenbäder! Vom weiten, sonnigen und buntbelebten Strand über warme, grüne Matten in den ozongesättigten Wald! Über blühende Heide hinauf zur Aussichtswarte! (Alles Eigenland). Im Motor-, Ruder- oder Seegelboot weit hinaus auf den 16 km langen See! Mit der Angel an die einsamen Uferbuchten oder auf den See hinaus zum Fischfang! In froher Gesellschaft per Auto nach dem nur 5 km entfernten Klagenfurt! Eigene Dampferlandungsstelle! Heurigenarten! Ein unerschöpfliches Programm neben Spiel, Konzert, Tanz und sonstigen Vergnüglichkeiten, vorzüglichster und reichlichster Wiener Küche und einer paradiesischen Natur! Ein einfacher aber gediegener Komfort! Dem Einsamen ist Abgeschiedenheit und Ruhe, dem Anschlusssuchenden familiäre Geselligkeit geboten. Für die Jugend ist Maiernigg mit seinen Spiel- und Tummelplätzen, Sandhaufen, seichten Kinderbasins, Turngeräten.... Außer anderen kleinen Wohngebäuden bietet auch der neue Aussichtsturm auf der „Schwarzen Felsen“ (5)–Höhe reizvolle Wohnmöglichkeiten (Speiseaufzug). Der Turm ist bequem in wenigen Minuten vom Strand aus zu Fuß oder per Wagen zu erreichen. Ständige erstklassige Musik.“ (Werbeprospekt 1930)

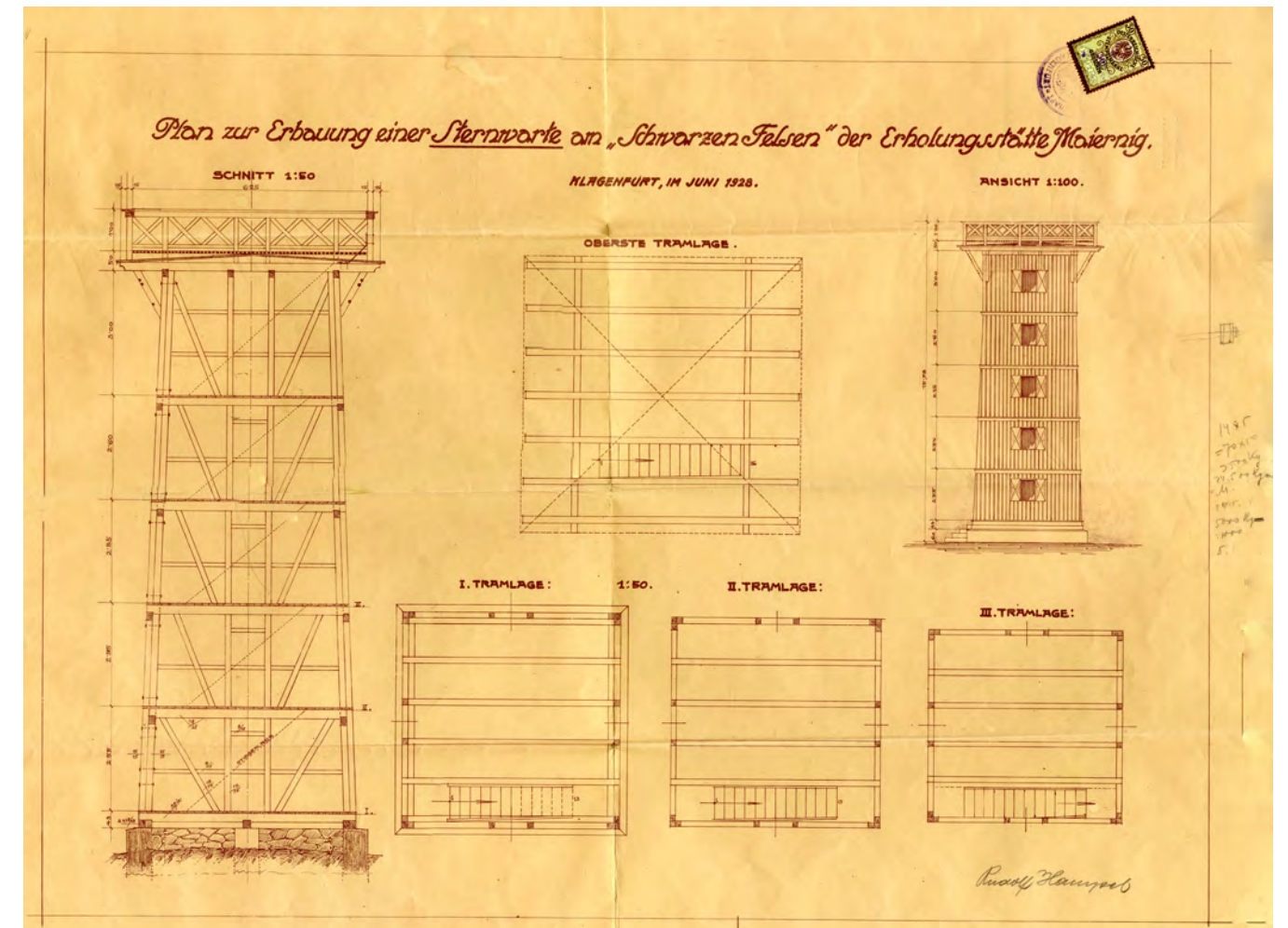


Abb. 15: Einreichplan alter Turm

Der Text aus der Werbebroschüre von 1930 beschreibt recht blumig die Absichten, aus dem „Maiernigg“-Gebiet ein Erholungsparadies zu machen, zu dem auch der Turm am Schwarzen Felsen gehören sollte. Die Broschüre gehört zu den wenigen Dokumenten, die den Turm erwähnen oder beinhalten. Im Landesarchiv scheint kein Bauakt auf und auch im Gemeindearchiv der Gemeinde Reifnitz scheinen aufgrund von Kriegswirren und Umzügen von Bauvorhaben aus diesem Zeitraum keine Unterlagen mehr auf. Gefunden wurde ein Einreichplan (Abb. oben), zwei Ansichtskarten von 1929, wo der Turm deutlich zu erkennen ist (Abb. rechts) und zwei Zeitungsberichte von 1960, als der Turm den Flammen zum Opfer viel. Aus den Plänen geht hervor, dass es sich bei der früheren Sternwarte um eine einfache, ca. 15 m hohe, sich nach oben hin verjüngende Holzkonstruktion handelt. Die unteren Zimmer konnte man mieten, das Oberste war eine Gaststube und ganz oben auf der Aussichtsplattform befand sich noch ein Teleskop, um Sterne zu beobachten. Wie lange der Turm genau bewohnt und bespielt worden ist, konnte nicht eruiert werden. Aber aus dem folgenden Zeitungsartikel vom 4. 2. 1960 geht hervor, dass das Bauwerk eine ganze Weile leer stand und dem Verfall ausgeliefert war. Zum Schluss kümmerte sich niemand um die Instandhaltung. Ein Ort, an dem sich Obdachlose einquartierten und jugendliche Paare ein Liebesnest fanden.

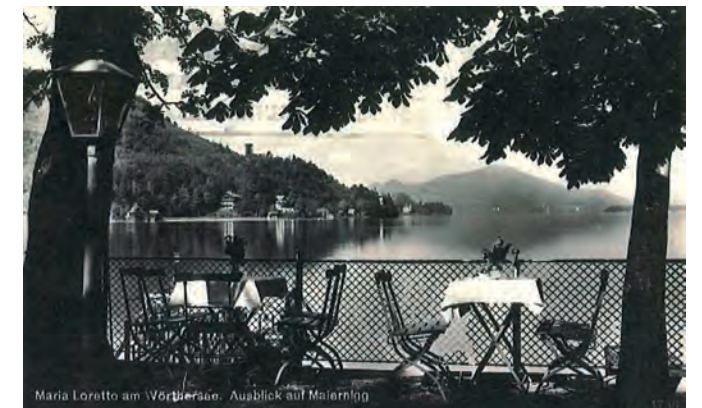


Abb. 16: Postkarte von 1929



Abb. 17: Kalenderbild

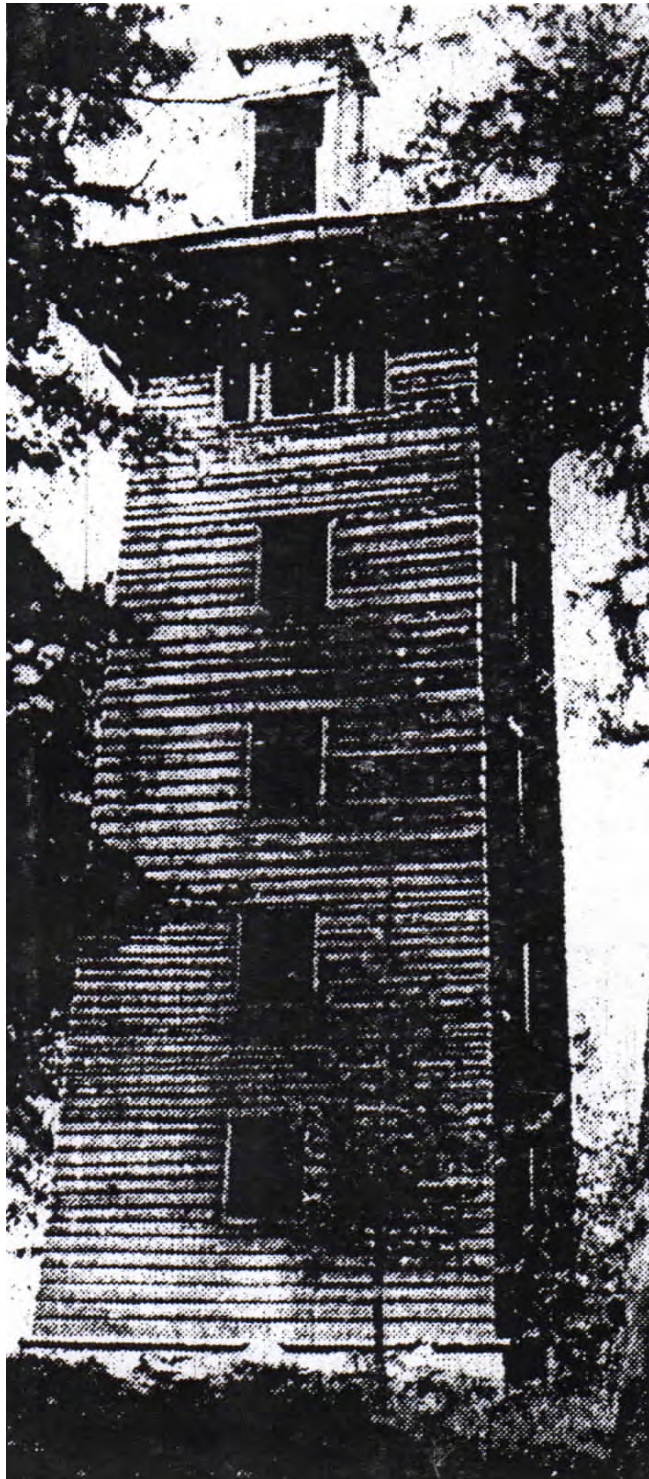


Abb. 18: Foto aus der NZ (Neue Zeit), Zeitungsartikel vom 4.2.1960

Aussichtsturm - Liebesnest - Brandruine

„Als wir schon vor langer Zeit den zuständigen Klagenfurter Stadtrat aufsuchten, war der Grund dazu der Verfall des der Stadtgemeinde gehörenden, aus Holz erbauten Aussichtsturmes oberhalb des Schwarzen Felsens bei Maiernigg am Wörthersee. Uns tat der alte, einst viel besuchte und wirklich hübsch gelegene Aussichtsturm leid, weil sich niemand mehr um seine Erhaltung kümmerte. In den zwanziger Jahren hatte Dr. Ohmacht die Idee, den Kogel, der zum Schwarzen Felsen abfällt, mit einem Aussichtsturm zu krönen, von dem aus man den ganzen Wörthersee bis hinauf nach Saag und fast das ganze Klagenfurter Becken überblicken konnte. Konditormeister Musil ließ den Turm tatsächlich bauen und die Firma Lerchbaumer stellte ihn auf. Das damals gut gehende Hotel Maiernigg pachtete das Objekt. Diesen Aussichtsturm kann man heute ruhig als den ersten Vorläufer des nunmehr ausgezeichnet ausgebauten Campingwesens rund um den See bezeichnen, und er war der Vorgänger des Aussichtsturmes am Pyramidenkogel. Viele Jahre lang machte er sich durchaus bezahlt. Viele Klagenfurter werden sich noch erinnern, wie damals eine Fiakerfahrt am Sonntag zum „Weißen Turm am schwarzen Felsen“ zu einem besonderen Klagenfurter Vergnügen gehörte. Im Turm waren in den Etagen sauber eingerichtete Zimmer untergebracht, die von Sommergästen gerne gemietet wurden: sie klagten nur darüber, dass man jedes Geräusch des Nachbarn von oben und von unten hören konnte. Musste im dritten Stock jemand nießen, wackelten in der Küche im Parterre die Kaffeehäuferl in der Kredenz. Während des Krieges geriet der Aussichtsturm in Vergessenheit, nach dem Kriege wurde er geplündert. Was nicht niet- und nagelfest war, wurde fortgeschleppt. Und gleich darauf wurde der Turm wiederentdeckt; diesmal von Liebespärchen. Dabei blieb es. Des Nachts gesellte sich unterstandsloses Volk hinzu und rund um den Turm gab es im Wald beinahe kein einziges Farnkraut mehr. Die „Ernte“ von Jahren hatte sich am Boden in den einzelnen Zimmern angesammelt und gab ein weiches Lager ab. Immer baufälliger wurde der Turm. Seit zwei Jahren trug sich die Stadtgemeinde mit dem Gedanken, den Turm abreißen zu lassen, doch jede Baufirma verlangte Geld dafür. Der kleinste Betrag war jedoch zu hoch. Für private Interessenten war der Abriss zu gefährlich. Also blieb der Turm stehen. Er war ja sowieso nichts wert. Auch mit dem Gedanken spielte der Feuerwehrreferent von Klagenfurt, ihn im Rahmen einer großen Feuerwehrrübung anzuzünden, was jedoch wegen der Nähe des Waldes viel zu gefährlich schien. Nun ist der ehemalige Aussichtsturm am Dienstag trotzdem abgebrannt.“ (Zeitungsartikel, Neue Zeit (NZ) 1960)

Das Gebiet um Maiernigg heute

Das Maiernigger Strandbad ist auch heute noch immer ein beliebtes Ausflugsziel. Die Lage in unmittelbarer Nähe zu Klagenfurt ist günstig. Viele Leute aus der Stadt kommen per Fahrrad oder zu Fuß. Das Bad ist aber trotzdem nicht überlaufen. Es ist die Alternative zum Klagenfurter Strandbad, das als eines der größten Binnenseebäder Europas gilt. Wer es gerne etwas ruhiger hat, findet sich in Maiernigg ein. Auf der Südseite des Bades führt der Gustav Mahler Weg auf den Berg. Der Weg führt direkt an den Überresten des „Schwarzen Turmes“ vorbei zum Komponierhäuschen von Gustav Mahler. Ein kleines Häuschen mitten im Wald, das als Gustav Mahler Museum im Sommer geöffnet hat. Der Komponist wohnte von 1901 bis 1907 dort. Es gibt auch einen Fußweg, der unter dem Schwarzen Felsen vorbei führt. Also ein doch frequentiertes Gebiet.

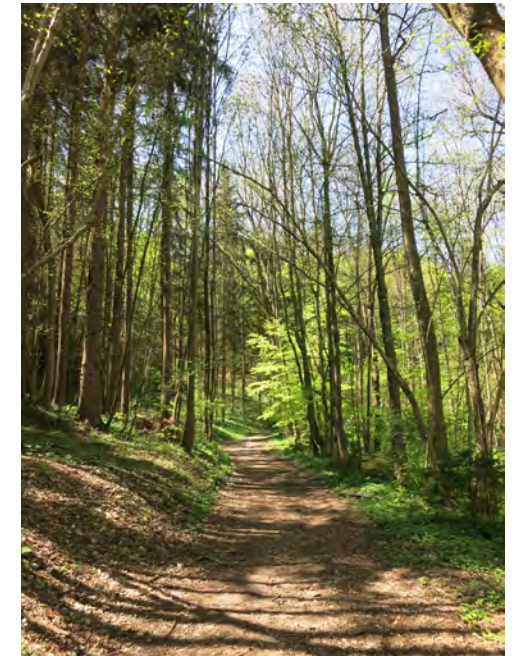
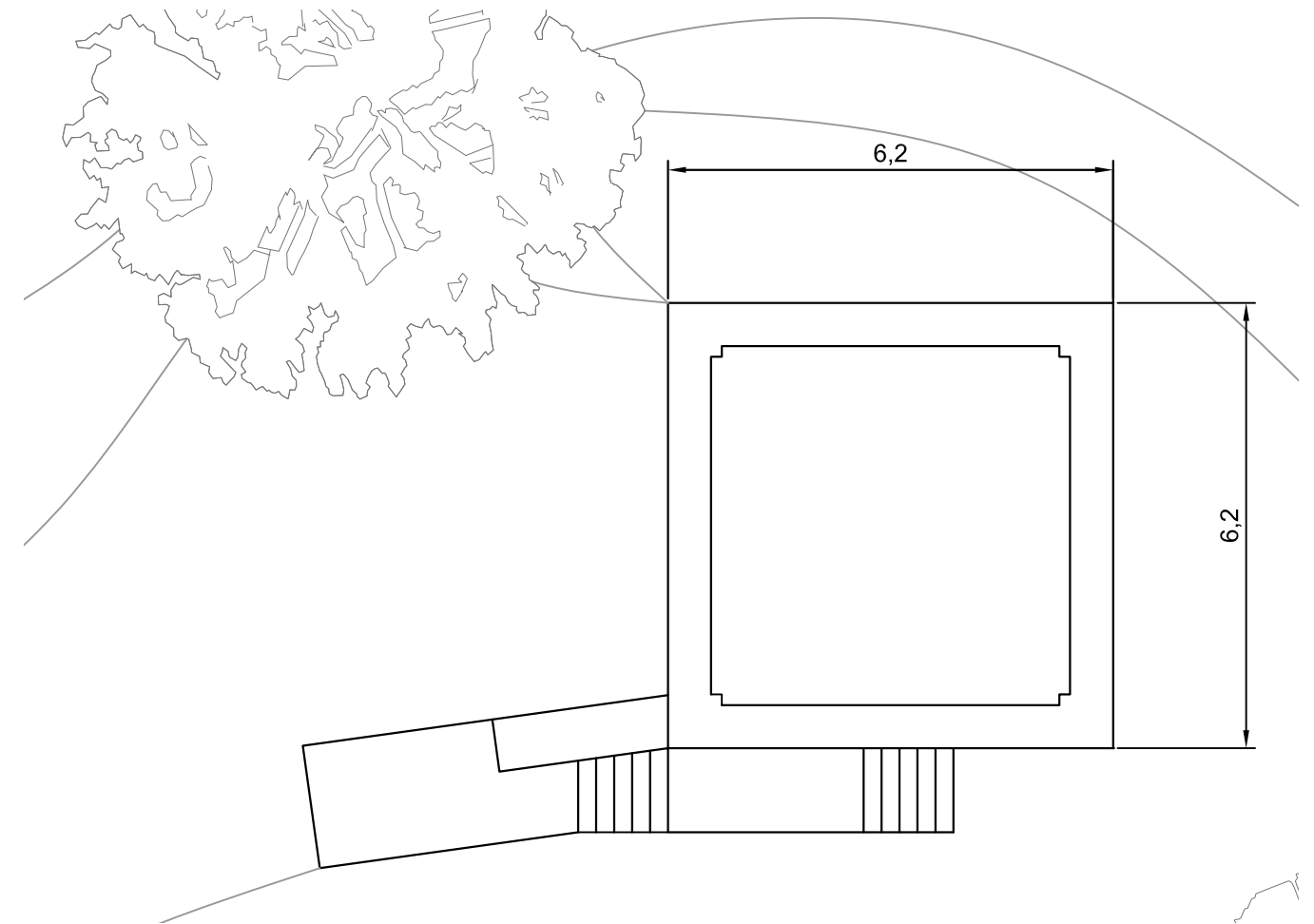


Abb. 19 - 23: Waldgebiet rund um den Bauplatz. Es führt sowohl ein Fußweg als auch ein Waldweg an den Ruinen vorbei.

HERANGEHENSWEISE/ZIELE



Die Abmessungen der Bestands- Fundamente sind mit 6,2 x 6.2 m Außenmaß und ca. 5 x 5 m Innenmaß eine relativ kleine Grundfläche. Außen dran ist noch ein betonierter Treppenaufgang. Ich wollte diese Abmessungen beibehalten, so dass meine Konstruktion tatsächlich genau dort steht, wo der frühere Turm stand. Die ersten **Ziele**, die ich mir auferlegte, waren:
kleine Grundfläche -> große Aussichtsfläche. Um die 100 Menschen sollte die Konstruktion gleichzeitig tragen können. Wichtig war mir aber auch, wie sich das Bauwerk an diesem speziellen Bauplatz in die Umgebung einfügt. Rund herum ist Wald. Nach Norden geht es den Felsen bergab Richtung See. Der Bauplatz liegt mitten auf einem Kogel.

Als erstes dachte ich natürlich an eine **Struktur, angelehnt an die des Baumes**. Der Durchmesser des Stammes ist um ein Vielfaches kleiner als jener der Baumkrone. Es sollte also um **weit auskragende Bauteile** gehen. Da auch der alte Turm komplett aus Holz war, und dieses „lebende Material“ auch schön zu diesem Bauplatz mitten in der Natur passt, sollte auch meine Konstruktion aus Holz sein. Um eine möglichst filigrane Form zu finden, sollten die **Querschnitte der auskragenden Bauteile möglichst gering** gehalten werden. Nach den ersten Arbeitsmodellen war das grundlegende Thema das **Gleichgewicht**. Was auf der einen Seite auskragt, muss auch auf der Anderen auskragen. Die Konstruktion sollte den **Charakter einer gewachsenen Struktur** haben.

Abb. 24: Abmessungen des bestehenden Fundaments
M 1:100

Die Geometrie der Natur

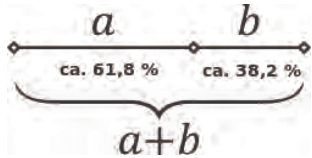
Goldener Schnitt - Fibonacci - Fraktale

Mein Ziel war es, meinen Entwurf an diesem speziellen Bauplatz dem Wald rundherum best möglich anzupassen. Ich fand meine erste Inspiration in Formen, die in der Natur vorkommen. Wie wächst ein Baum? Wie schafft er es, so weit auszukragen? Gibt es ein System dahinter? Ich fand ein paar interessante Antworten im Bereich der Geometrie. Es scheint eine merkwürdige Symmetrie zu herrschen, die in vielerlei Bereichen des Lebens vorkommt.

Der Goldene Schnitt

Er kommt in der Natur sowie in der Geometrie nach genauen Regeln vor. Beim Goldenen Schnitt handelt es sich um ein bestimmtes Teilungsverhältnis zweier Längen zueinander. Das Verhältnis der ganzen Länge zur größeren entspricht dem der größeren zur kleineren. Mathematisch beschrieben durch folgende Formel:

a : b = (a + b) : a



Interessant wird es, wenn man eine Division dieser Größen durchführt. Die Zahl, die dabei heraus kommt nennt man eine „irrationale Zahl“. Eine Zahl, die nicht als Bruch beschrieben werden kann. In der Mathematik bekannt als die Zahl Phi. 1.68...

Eine Zahl mit scheinbar unendlich vielen Kommastellen. Sie wird auch als „Goldene Zahl“ bezeichnet. (Internetquelle 1)

Jetzt kommt Fibonacci ins Spiel. Leonardo Fibonacci beschrieb 1212 mit seiner „Fibonacci Folge“ das Wachstum einer Kaninchenpopulation. Die Zahlenreihe funktioniert nach einem einfachen Prinzip. Die Addition von zwei Zahlen ergibt die dritte, also:

1 + 1 = 2
1 + 2 = 3
2 + 3 = 5
3 + 5 = 8
5 + 8 = 13
8 + 13.....usw

Dividiert man diese Zahlen, so erhält man jeweils eine Annäherung an die Zahl Phi. Interessanterweise kommt diese Zahlenfolge häufig in der Natur vor. Die Verästelung von Bäumen und Blumen beispielsweise hält sich in den meisten Fällen daran. (Abb. 25). Noch häufiger kommt in der Natur aber die „Goldene Spirale“ vor. Durch die grafische Darstellung dieser Spirale wird auch der Zusammenhang mit dem „Goldenen Schnitt“ und Fibonacci deutlich.

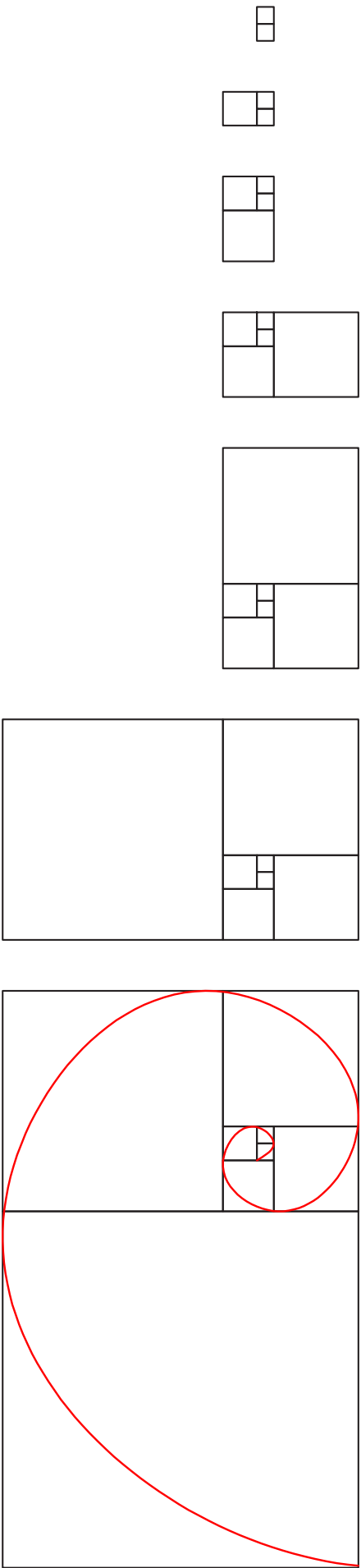


Abb. 25: Annäherung an ein goldenes Rechteck mit Fibonacci Spirale

Zuerst setzt man zwei gleich große Quadrate, sagen wir mit der Seitenlänge 1, nebeneinander. Darauf folgt das nächste mit 2, dann 3 und dann 5 usw. Die Seitenlänge der Rechtecke folgt genau den „Fibonacci“- Zahlen. Das Verhältnis von langer zu kurzer Strecke nähert sich bei jedem Schritt an den Goldenen Schnitt, also an die Zahl Phi an. (Abb. 38). Mit jedem Schritt entstehen perfekte goldene Rechtecke. Wenn man dann die Eckpunkte verbindet, ergibt sich eine „Fibonacci Spirale“ oder Goldene Spirale, die in der Natur häufig genau so vorkommt. Der Mathematiker Jacob Bernoulli nannte sie vor lauter Begeisterung „spira mirabilis“ - Wunderspirale. Aber nicht nur, dass sie vorkommt, sondern in welcher Zahl sie auftritt, ist interessant. Die Spiralform tritt bei Pflanzen immer einmal linksdrehend und einmal rechtsdrehend auf. Zählt man die Spiralen bei einem Tannenzapfen, oder bei einer Ananas wird man bemerken, dass auf der einen Seite beispielsweise acht, auf der anderen 13 Spiralen zählbar sind. Oder fünf und acht. Bei Sonnenblumen sind es einige mehr. Zum Beispiel 34 und 55. Alles Zahlen aus der Fibonacci - Reihe. In der Geometrie findet sich alles im sogenannten „goldenen Dreieck“ wieder. Dieses ist die Grundlage für das Pentagramm, in dem jede Linie im goldenen Schnitt gekreuzt wird. Scheinbar folgt die Natur gewissen Regeln, die in der Mathematik und der Geometrie ebenfalls vorkommen. . (vgl. Internetquelle 2, Beutelspacher; Petri 1996:57-66)

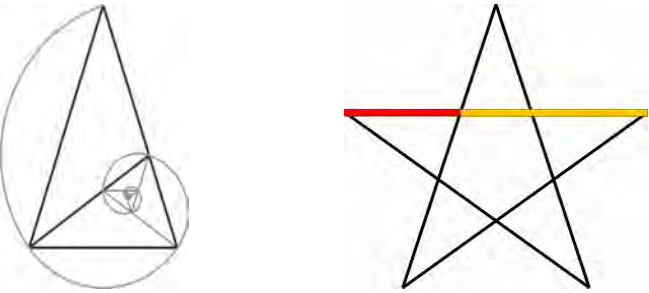


Abb. 40, 41: Goldenes Dreieck, Pentagramm

Ich begann mit gleichseitigen Fünfecken und Pentagrammen zu experimentieren, ohne genau zu wissen, in welche Richtung mich das Ganze führen sollte. Als ich die Spitzen der Dreiecke im Pentagramm verbunden hatte, fiel mir erst das Offensichtliche auf. Es ergab sich natürlich wieder ein Fünfeck, aus dem man wieder ein größeres Pentagramm machen konnte. Auch im kleineren Fünfeck konnte wieder ein Pentagramm entstehen, das noch ein kleineres Fünfeck in sich hatte und so weiter. So konnte man ins Größere und ins Kleinere theoretisch ewig weiter machen. Solche Formen werden Fraktale genannt. Im folgenden Absatz will ich ganz kurz auf Fraktale und ihr Vorkommen in der Natur eingehen.

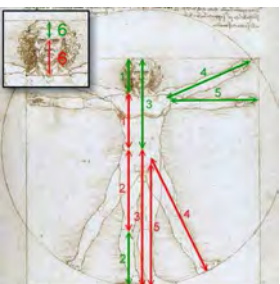


Abb. 26: Der goldene Schnitt im menschlichen Körper



Abb. 29: Goldener Schnitt Insekten

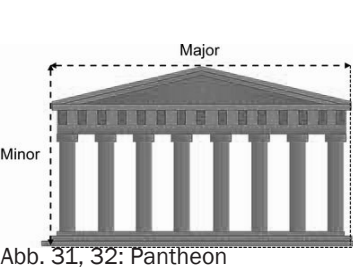
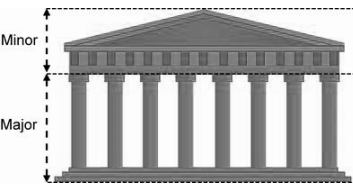


Abb. 31, 32: Pantheon

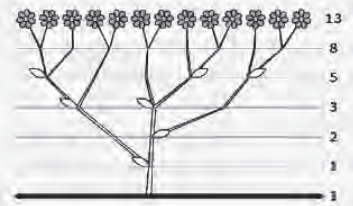


Abb. 34: Wachstum nach Fibonacci

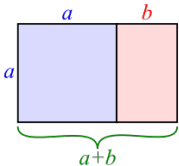


Abb. 35: Goldenes Rechteck



Abb. 37: Tannenzapfen

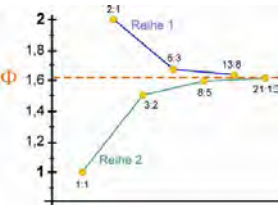


Abb. 38: Annäherung an Phi

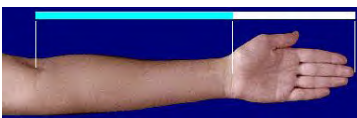


Abb. 27: Goldener Schnitt im Arm



Abb. 28: Goldener Schnitt Finger

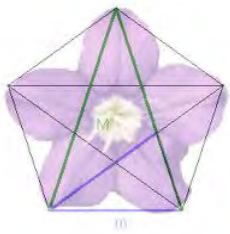


Abb. 30: Geometrie Blume

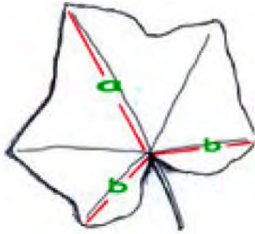


Abb. 33: Ahornblatt



Abb. 36: Schneckenhaus

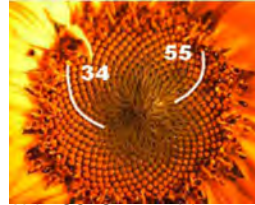


Abb. 39: Sonnenblume

Die fraktale Geometrie der Natur

Fraktale gibt es überall in der Biologie. Es sind Lösungen, welche die natürliche Selektion immer wieder hervor gebracht hat. Man findet sie im menschlichen Körper, in unseren Lungen, Nieren, und Blutgefäßen. Bäumen, Blumen, Pflanzen, Wetterphänomenen, ja sogar im Herzrhythmus. Diese sich unregelmäßig wiederholen- den Gebilde sind überall zu finden. Ein Name, der in Zusammenhang mit diesem Phänomen genannt werden muss, ist Benoît B. Mandelbrot (* 20. November 1924 in Warschau; † 14. Oktober 2010). Ein französisch- ameri- kanischer Mathematiker.

Mandelbrot sagte, dass man bei der Betrachtung einer Oberfläche nicht jenes sehen soll, was man sieht, son- dern das was nötig war, um das Sichtbare zu produzieren. Nötig sind endlose Wiederholungen vom Kleinen ins Gro- ße und umgekehrt. Das entscheidende Charakteristikum eines Fraktals. Mathematiker nennen es Selbstähnlich- keit. Das Fraktal als Ganzes sieht genau gleich aus, wie ein Teil davon. Der Teil wiederum sieht genauso aus, wie der nächst kleinere Teil und so weiter. Das bekannteste Beispiel für Selbstähnlichkeit ist der Baum. Das Ver- zweigungsmuster eines Baumes wiederholt sich von der Basis bis zu den kleinsten Ästen und geht sogar im Blatt weiter. Der Baum folgt wie wir schon wissen auch der „Fibonacci“-Zahlenreihe.

Diese ungleichmäßig aussehenden Formen brachten Mandelbrot auf Kollisionskurs mit den gängigen Regeln der Mathematik, in denen es nur um glatte Formen geht. Bestimmte Muster gehorchen den Gesetzen der Mathe- matik. So auch in der Architektur, wo es vordergründig um perfekte geometrische Formen geht. Alles ist sehr gleichmäßig, reduziert auf gerade Linien, Rechtecke, Kreise, Dreiecke, glatte Flächen, Pyramiden, Tetraeder, glatte Kanten. In der Natur vorkommende Formen waren mit der Mathematik nicht zu beschreiben. Mandelbrot aber war überzeugt, dass es eine Ordnung hinter dem scheinbaren Chaos gibt. Eine Errungenschaft von Mandelbrot war die Beschrei- bung von Küstenlinien als Fraktale. Das Prinzip basiert auf der „Kochkurve“, entwickelt vom schwedischen Mathematiker Helge von Koch. Eine sogenannte Monster- kurve. Man startet mit einem gleichseitigen Dreieck. Dann ent- fernt man auf jeder Seite ein Stück und ersetzt es durch zwei Stücke die insgesamt länger sind usw. So entsteht eine fürs Auge zwar endliche, aber in Wirklichkeit un- endliche Linie. Ein Paradoxon. Mandelbrot verglich die „Kochkurve“ mit Küstenlinien. Sie sind für ihn ebenfalls Fraktale. Ihre Länge variiert nach Größe des Zollstocks, der sie abmisst.



Abb. 42: Fraktale Form der Lungen. gleicher Aufbau wie bei Bäumen

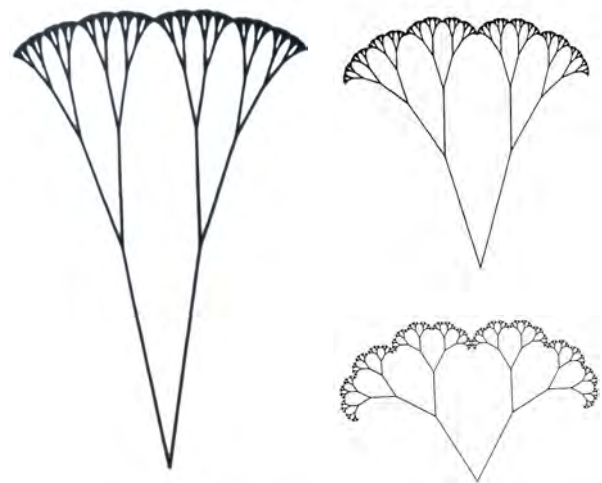


Abb. 43-44: Fraktale Form von Bäumen

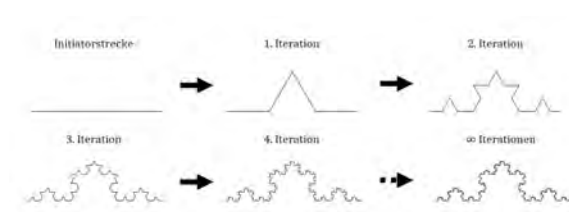


Abb. 45: Kochkurve

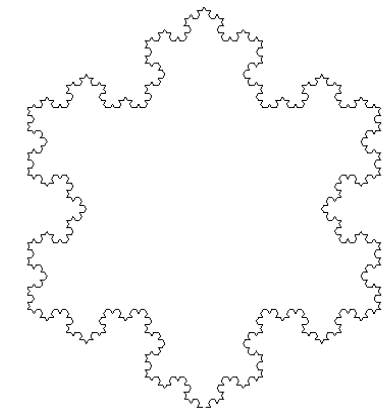


Abb. 46: Kochkurve, für das Auge end- lich, eigentlich unendlich

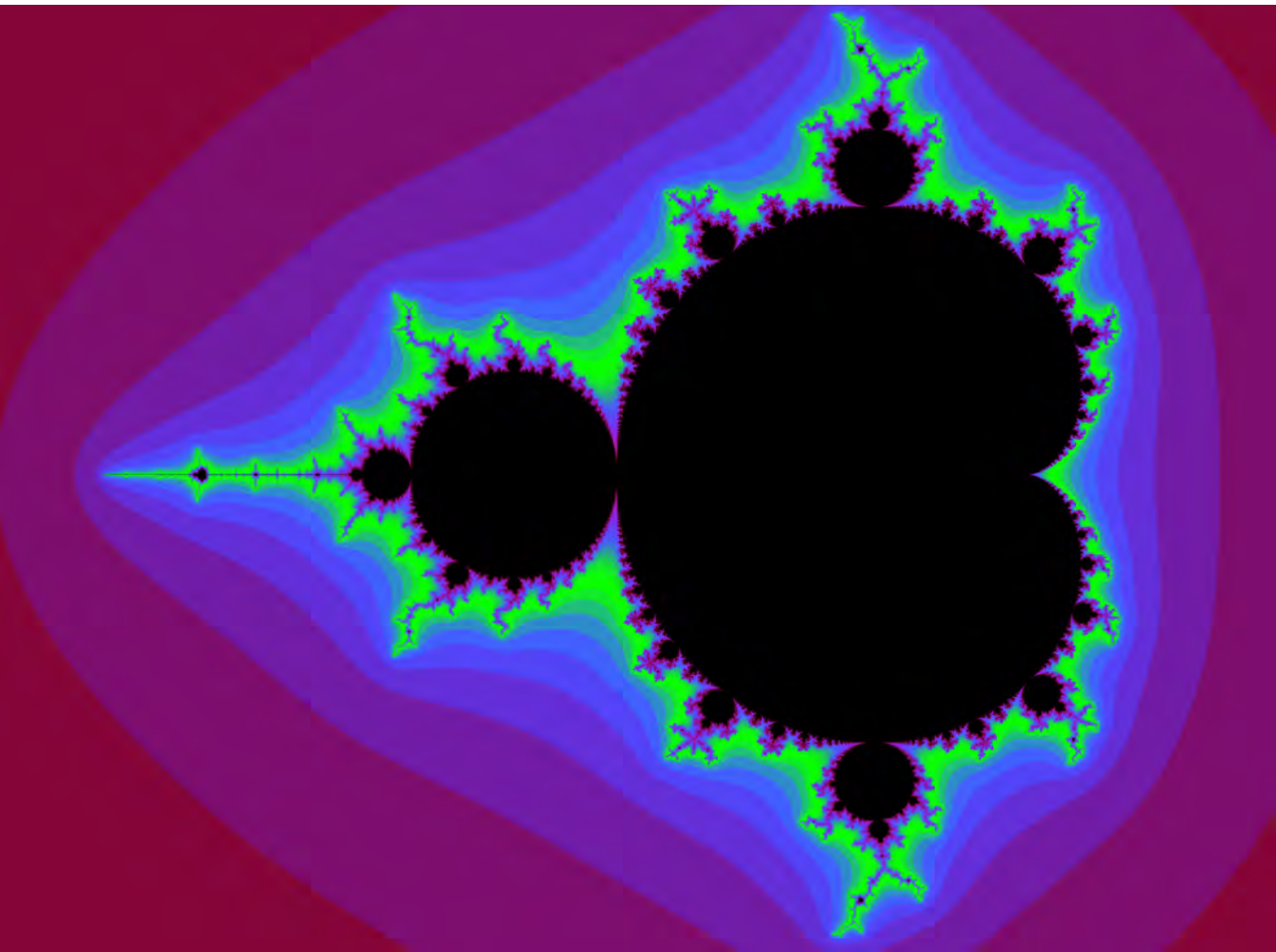


Abb. 47: Die Mandelbrot Menge

Die Mandelbrot-Menge

Mandelbrot arbeitete zu Beginn des Computerzeitalters für IBM und war fasziniert von der neuen Technologie. Sie ermöglichte ihm die Iterationen, sich unendlich wiederholende Rechenzyklen, die für seine Denkansätze notwendig waren. Er beschäftigte sich mit einem Prob- lem, das im 1. Weltkrieg von dem jungen Mathematiker Gaston Julia vorgestellt wurde. Die Frage war, was mit einer simplen Gleichung passiert, wenn man sie durch Rückkoppelung iteriert. Man setzt eine Zahl in eine For- mel ein und erhält eine neue Zahl. Dann geht man zurück und setzt diese Zahl in die Abbildung ein. Dieser Vorgang wird immer und immer wiederholt. Die Frage war, was nach unzähligen Iterationen passieren würde. Man erhält eine Zahlenreihe. Man bezeichnet sie als Julia-Menge. Bei IBM benutzte Mandelbrot einen Computer und ließ die Gleichung millionenmal laufen. Die Zahlen verwandel- te er in Punkte einer grafischen Darstellung. Die Bilder, die dabei heraus kamen, brachten ihm den Durchbruch. Er schuf eine eigene Menge, die alle Julia-Mengen in einem einzigen Bild zusammenführte. Das Bild wurde zum Symbol für fraktale Geometrie. Egal, wo man hinein zoomt, das Bild schaut gleich aus, obwohl man ganz woanders ist. Das Bild, das dabei entstand, faszinierte mich insofern, als darin wieder die Fibonacci-Spirale vorkommt. (vgl. Internetquelle 3)

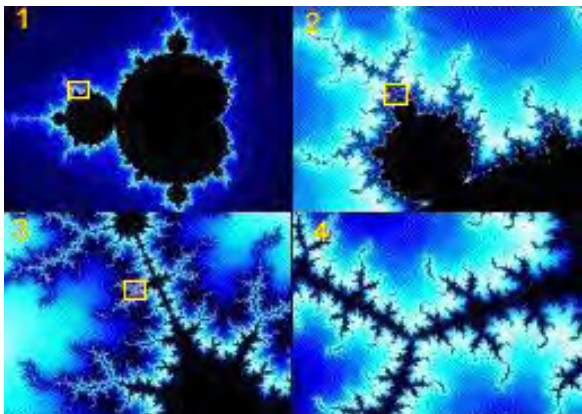


Abb. 48: Zoom

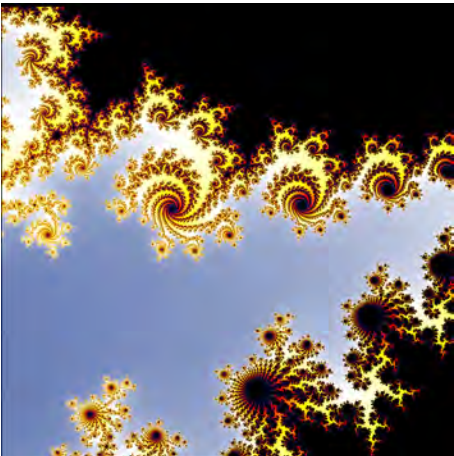


Abb. 49: Schnörkel

Entwurfsideen

Nach diesen Nachforschungen begann ich zu experimentieren. Meine ersten Modelle und Versuche gingen von einem mittleren Stamm aus, von dem alles auskragen sollte. Ich begann dann Fünfecke in fraktaler Form in den Grundriss zu zeichnen, um möglichst optimale Gleichgewichtsbedingungen zu schaffen. Ich verwarf diese erste Idee jedoch recht schnell, da mir der mittlere „Stamm“ zu statisch bestimmt und zu glatt wirkte. Es war nicht annähernd die gewachsene Struktur, die ich mir vorstellte. Ich blieb jedoch noch beim Fünfeck. Ich versuchte jetzt mit platonischen Körpern zu spielen. Zuerst mit einem Dodekaeder, dann mit einem Dodekaeder Stern.

Platonische Körper haben alle eine Oberfläche, die jeweils aus gleichmäßigen, regelmäßigen Vielecken besteht. Alle basieren ebenfalls auf dem Goldenen Schnitt. Beim Ikosaeder oder Dodekaeder schwer zu erkennen. Aber durch folgenden Satz zu verstehen.: „Die zwölf Ecken eines Ikosaeders sind die zwölf Ecken dreier goldener Rechtecke, die paarweise aufeinander senkrecht stehen.“ (Beutelspacher; Petri 1996: 51) Aufgrund der Dualität zwischen Dodekaeder und Ikosaeder, was bedeutet, dass die Ecken eines Ikosaeders genau die Mittelpunkte der Fünfecksoberflächen des Dodekaeders sind, kann man die goldenen Rechtecke auch dort finden. (vgl. Beutelspacher; Petri 1996: 50)

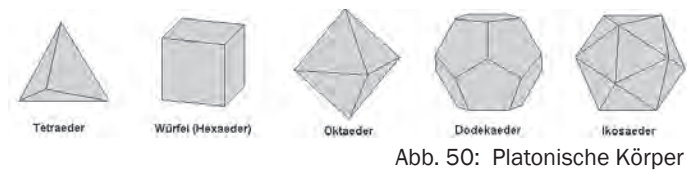


Abb. 50: Platonische Körper



Abb. 51: Dualität

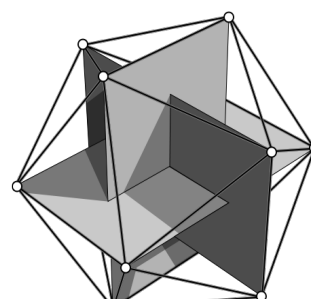


Abb. 52: Goldene Rechtecke

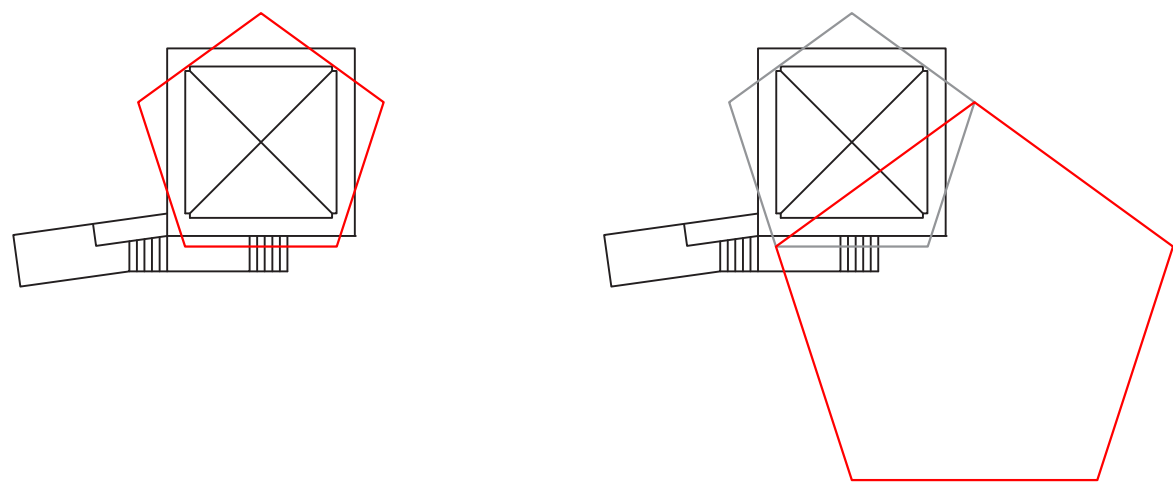
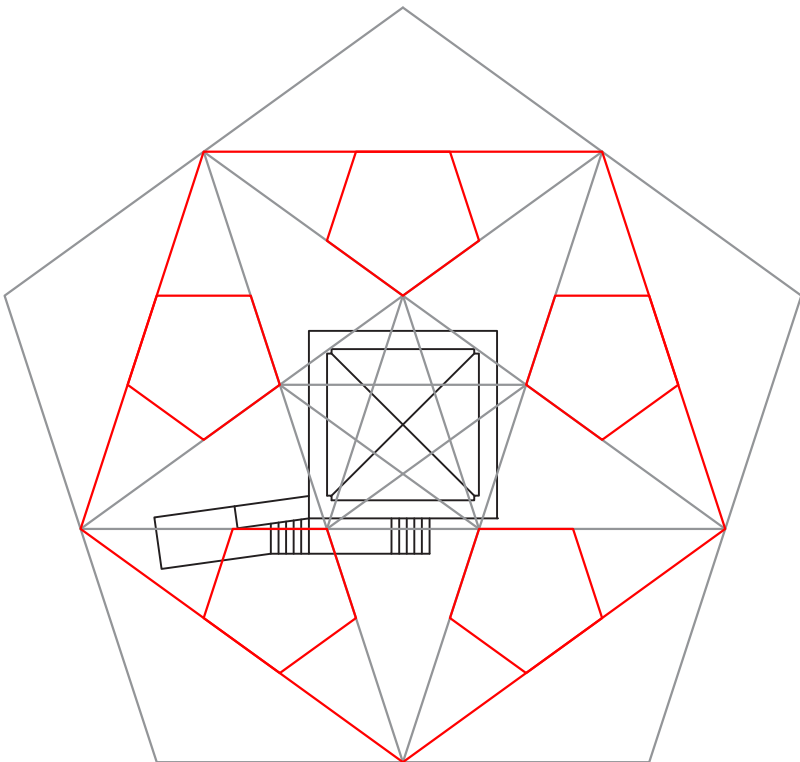
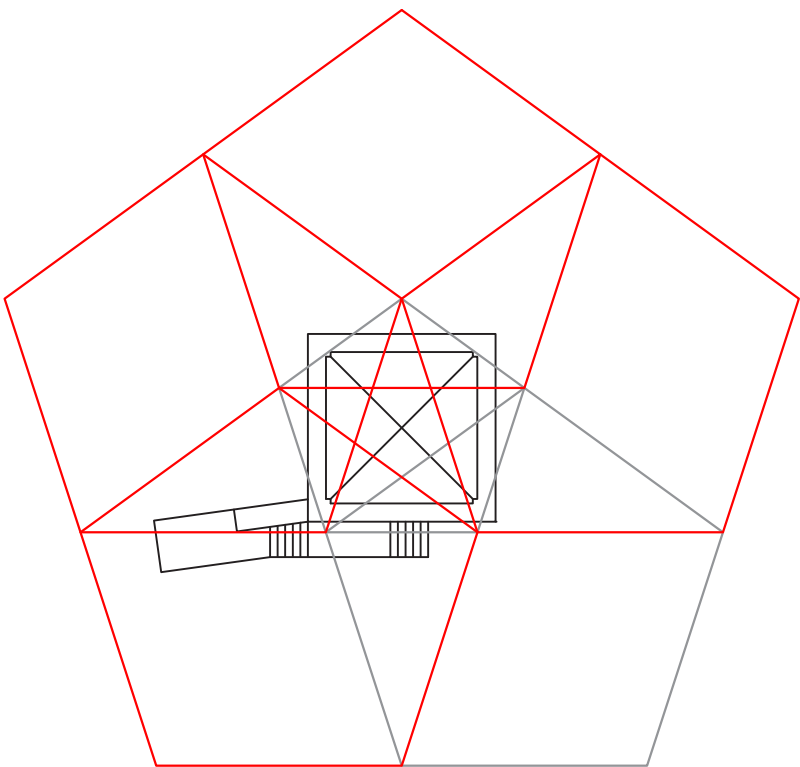


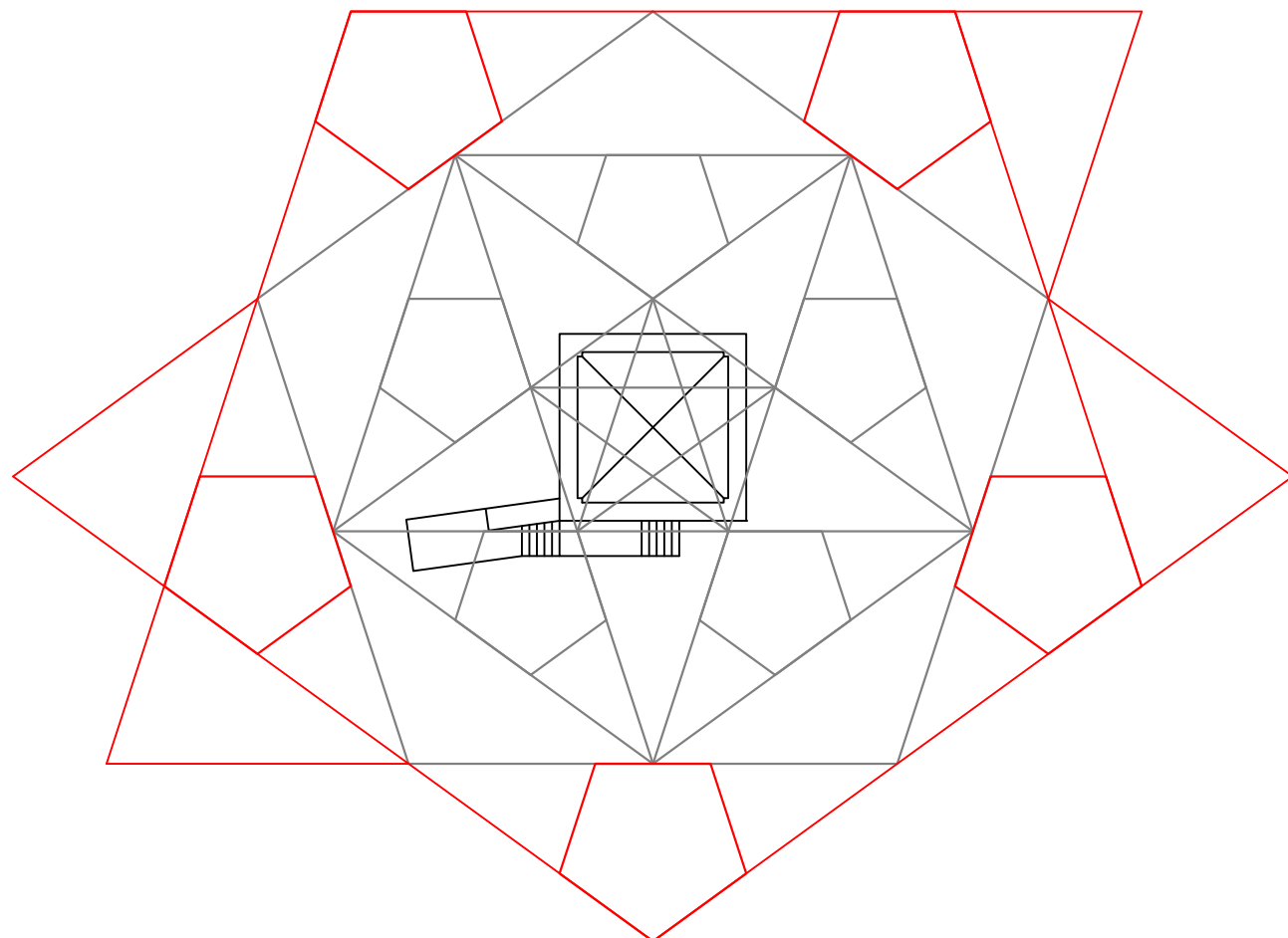
Abb. 53-56: Versuch über das Fünfeck auf einen fraktalen Grundriss zu kommen

Das Fünfeck lässt sich so kombinieren, dass wieder ein neues Fünfeck entsteht. In diesem verläuft dann noch ein kleineres, gegengleiches Fünfeck. Man kann die Form immer und immer wieder in ein und dem selben Bild wieder finden. Auf diese Art versuchte ich optimale Gleichgewichtsbedingungen zu schaffen. Die eine Seite hängt unmittelbar mit der anderen zusammen. So erhoffte ich mir, Achsen für möglichst effektive Auskragungen zu finden.



Das neue gegengleiche Fünfeck, hier in Rot, beinhaltet dann wieder fünf Fünfecke. So kann es vom Kleinsten ins Größte weiter gehen.

Der nächste Kreis rundherum sollte der letzte sein. So entstehen zwei übereinander liegende Parallelogramme. Jetzt werden Achsen gezogen, um optimale Gleichgewichtsbedingungen zu erreichen.



Diese Achsen werden dann in im Winkel richtig stehenden Stützen, die als Zangen ausgeführt sind, in der richtigen Höhe eingespannt.

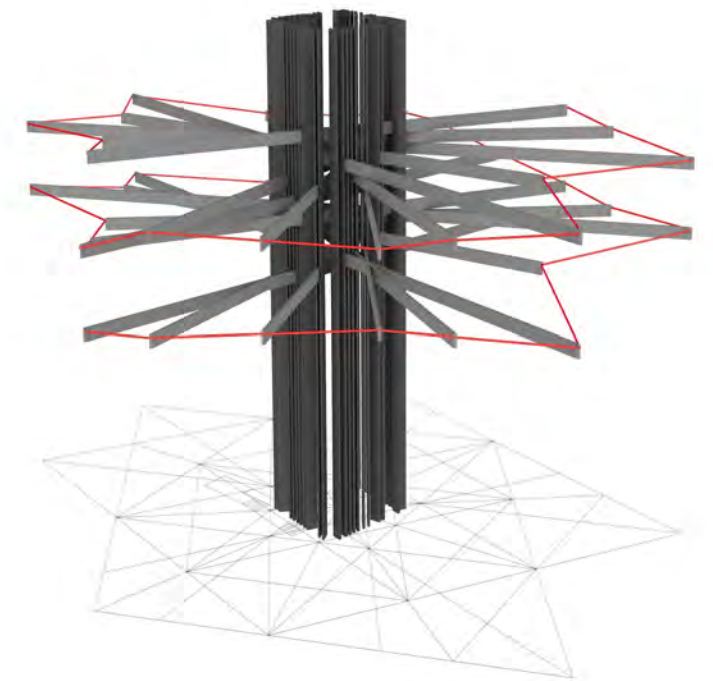
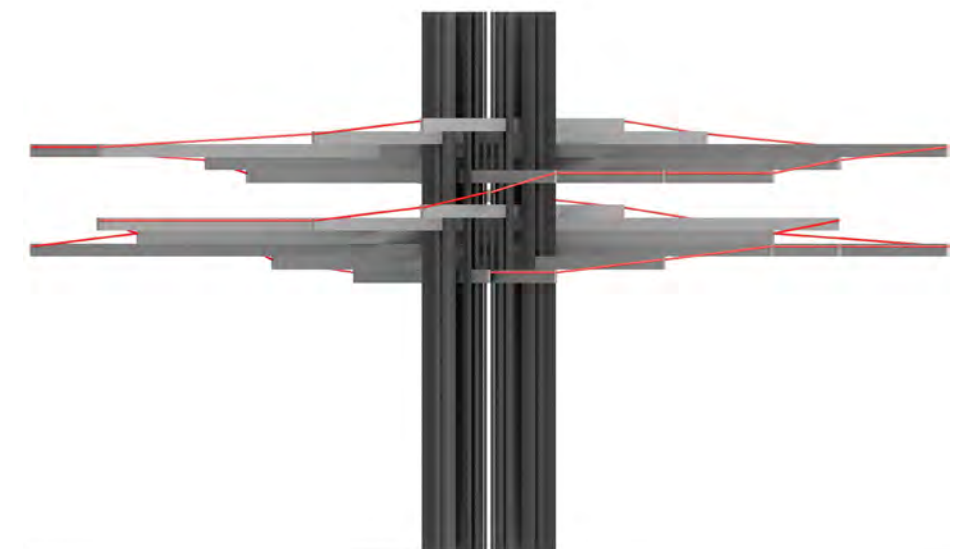
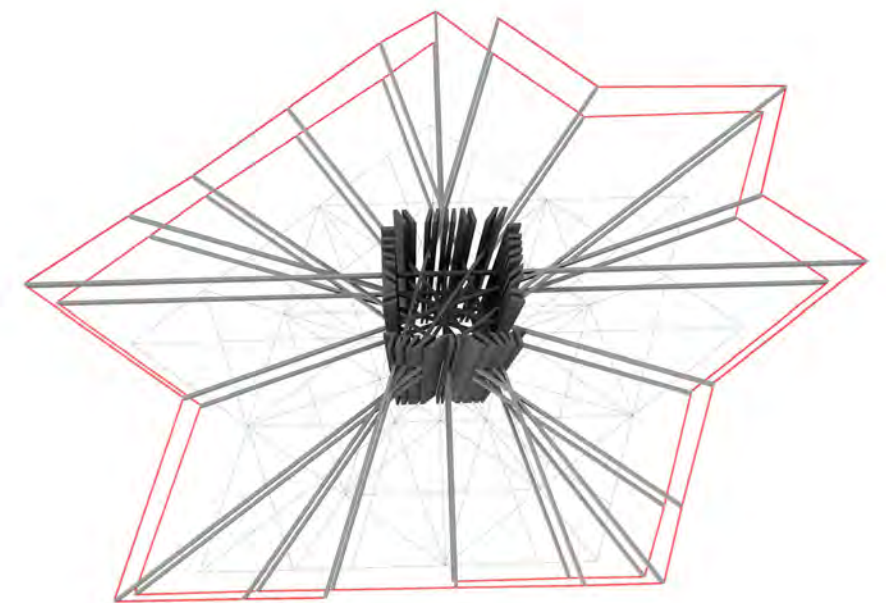


Abb. 57-59: Achsen mit optimalem Gleichgewicht

So kragt die eine Seite immer genauso weit aus wie die andere und damit entsteht ein Gleichgewicht.



Vom Stern zum Prinzip des Tensegrity

Der Dodekaederstern beschäftigte mich lange. Ein äußerst interessantes Gebilde, das alle meine bisherigen Nachforschungen in sich verband. Da ich von dem glatten Stamm in meinen vorigen Ideen weg wollte, versuchte ich den Dodekaederstern übereinander zu stapeln und ihn immer ein wenig größer zu machen. Mein Ziel war es, diese Struktur als zellenartiges Gebilde zu sehen, das erweiterbar und stapelbar ist. Dann extrahierte ich die äußeren, schrägen Linien. Einmal linksdrehend, einmal rechtsdrehend. Mir fielen wieder die Tannenzapfen und Sonnenblumen ein. Diese Linien musste man jetzt noch verbinden.

So kam ich auf das Prinzip „Tensegrity“. Ich hatte mein Thema gefunden. Bei Tensegrity geht es um genau diese Gleichgewichtsbedingungen, die ich für meine gewachsene Struktur haben wollte. Für mich waren es genau diese optimierten Zellen, die ich gesucht hatte.

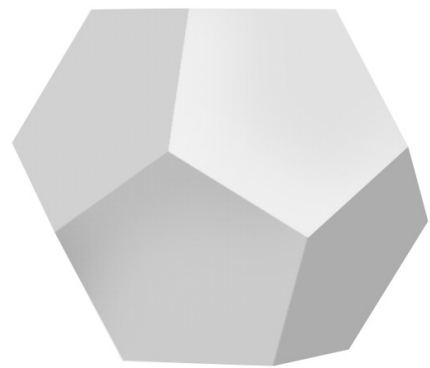


Abb. 60: Dodekaeder

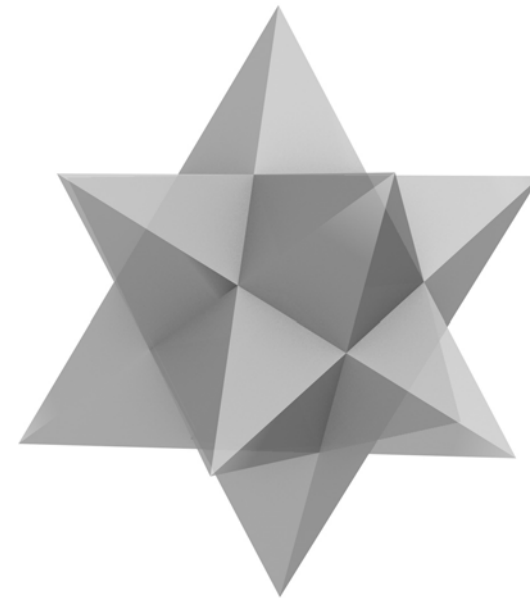


Abb. 61: Dodekaederstern

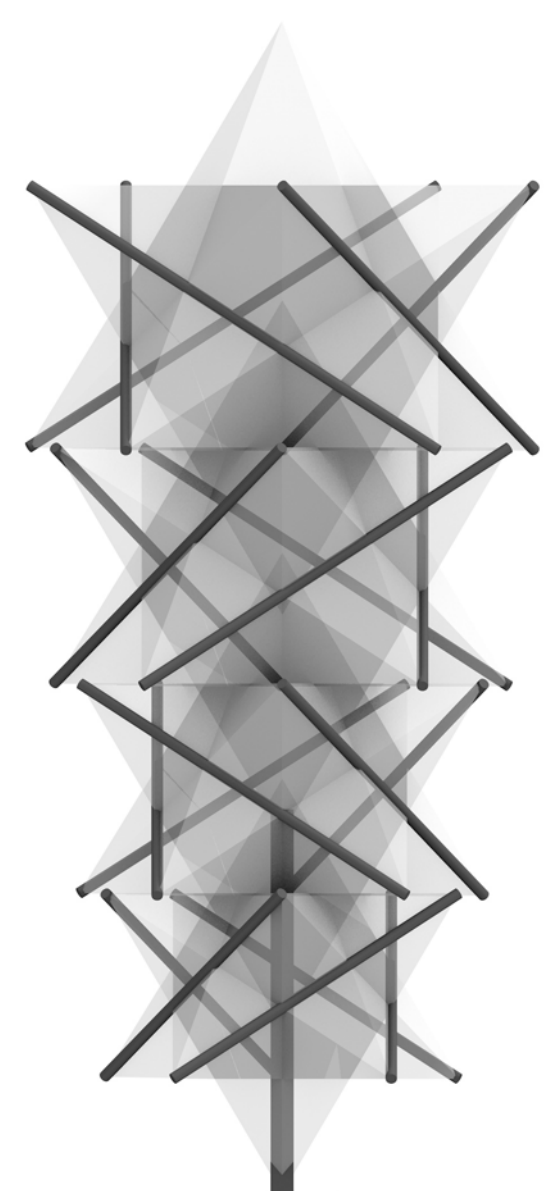
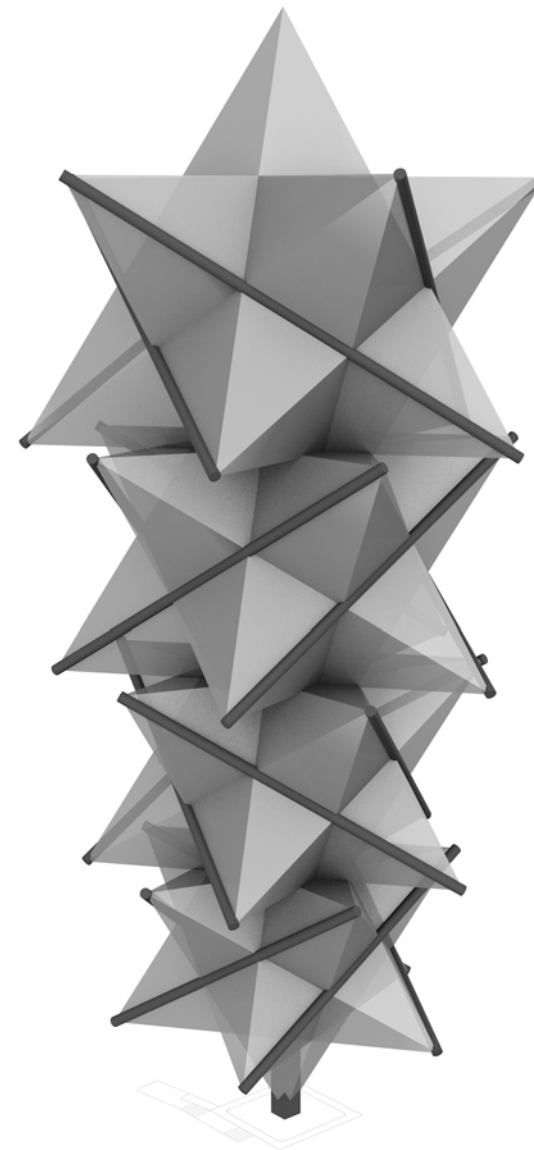
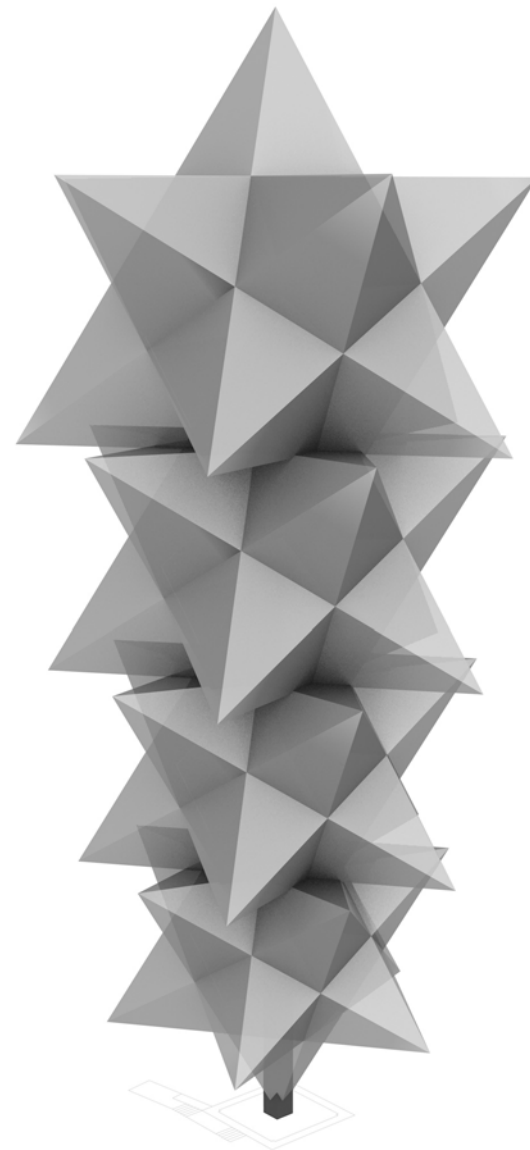


Abb. 62-64: Dodekaederstern gestapelt

„The world is a harmony of tensions“
(Heraclites of Ephesus)

TENSEGRITY

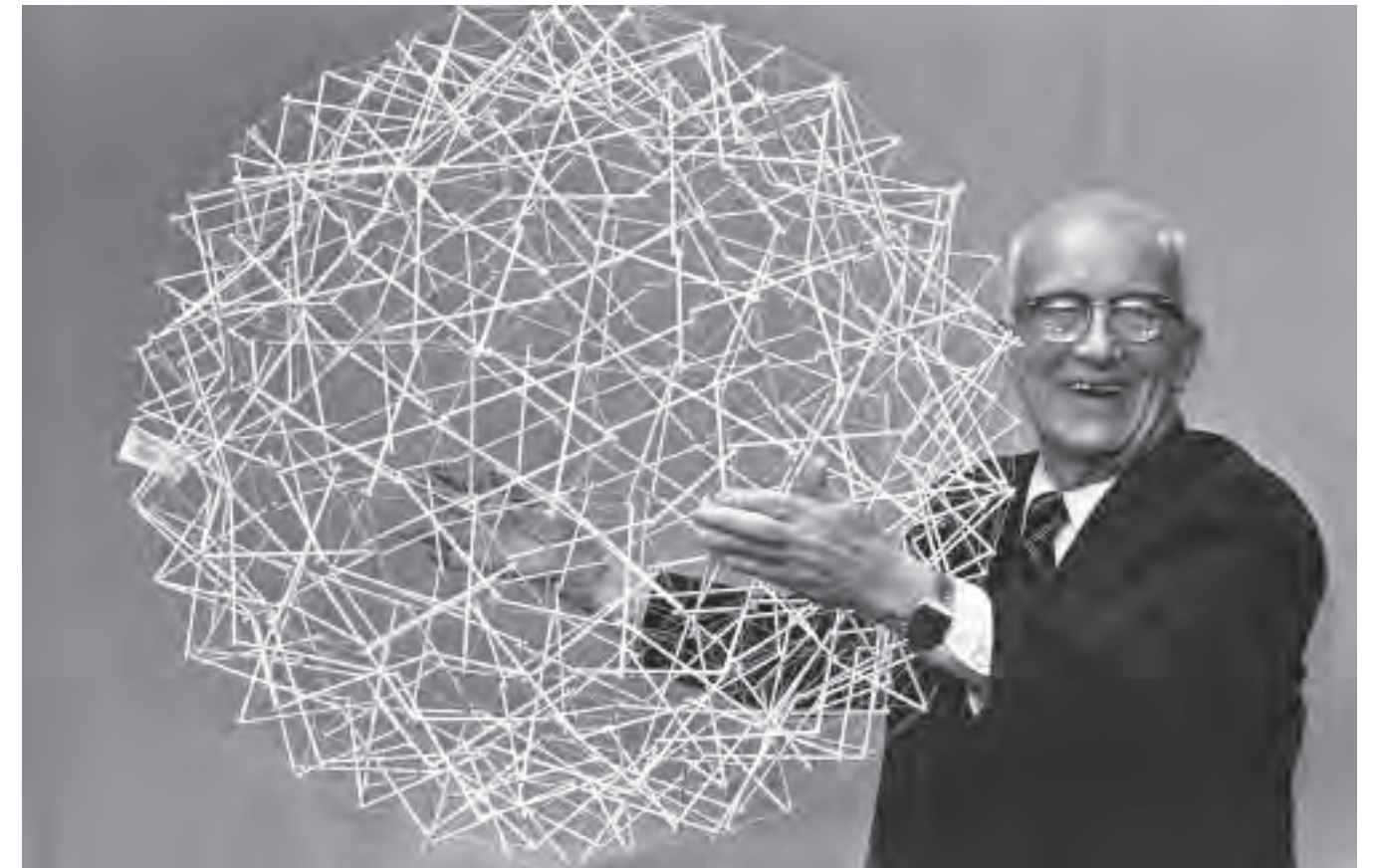


Abb. 65: Buckminster Fuller

Das Wort „Tensegrity“ setzt sich aus zwei anderen englischen Wörtern zusammen. Und zwar aus „tension“ und „integrity“. Erfunden hat es der Amerikaner R. Buckminster Fuller. Auf Deutsch: Spannung (tension) und Ganzheit, Vollkommenheit (integrity).

Beide Termini zusammen sollen „Zusammenhalt durch Spannung“ bedeuten.

„Tensile Integrity“. Die Bezeichnung eines Tragsystems, bei dem das Gleichgewicht zwischen den inneren und äußeren Kräften durch nicht verbundene, innere, reine Druckspannungen und durch verbundene, innere, reine Zugspannungen im restlichen System realisiert wird.

„*Druckinseln in einem Ozean von Zugspannungen*“. (Teresa Siegel, 2005:9) Sozusagen ein zusammenhängendes Netz aus Zugseilen, das durch das Einsetzen von Druckelementen eine stabile, raumbildende Form erhält. Das Ziel ist es, in der Struktur die Kompression nur auf die wesentlichen Punkte zu konzentrieren. Im System besteht kontinuierlich Zugspannung. Die Kompression ist ihr unterworfen. Deshalb werden die Kompressionselemente zu „*kleinen Inseln in einem Meer von Zugspannungen*“. (Teresa Siegel, 2005:9) Der Unterschied zu anderen zugbeanspruchten Konstruktionen, wie Hängebrücken oder Zelten, ist die Umkehrung von Zug und Druck. Geschlossene Tensegrity Systeme, bei denen die Druckspannung in den Stäben ausreicht um die Zugspannungen in den Kabeln auszugleichen, benötigen im Gegensatz zu konventionellen Seilkonstruktionen keine Gegengewichte oder Bodenverankerungen.

(vgl. Siegel Teresa, 2005:9)

Obwohl Tensegrity-Systeme schon seit den 20er Jahren unseres Jahrhunderts bekannt sind, gibt es wenige realisierte Bauwerke, die dieses Bauprinzip anwenden. Das Finden der richtigen, funktionierenden Geometrie ist sehr komplex. Zeichnerisch können Tensegrity-Systeme unmöglich verständlich dargestellt werden. Die Entwicklung funktioniert ausschließlich über den Modellbau. Die Berechnungen von Verformung und Vorspannung sind extrem aufwendig und lassen wenig Spielraum für Toleranzen. Die Montage erfordert äußerste Genauigkeit in der Abmessung und Ausführung. Ein sehr großer Nachteil ist, dass eine Tensegrity-Struktur kaum Redundanzen besitzt. Es ist ein geschlossenes System. Versagt ein Bauteil, wird das ganze System instabil. Vorteile hingegen sind die geringe Eigenlast bei hoher Tragfähigkeit und die daraus resultierenden Möglichkeiten. Reine Tensegrity-Strukturen haben bis heute in der Architektur nur skulpturalen Charakter. Wenn überhaupt, werden sie als raumbildende Elemente, Überdachungen, Zeltkonstruktionen oder etwa im Möbelbau verwendet. (vgl. Benisch Philipp, 2006:2) Ich konnte bei meiner Recherche kein einziges begehbares oder benutzbares Bauwerk finden, das auf dem Tensegrity-Prinzip basiert. Mein Ziel in dieser Arbeit war es, eine begehbare Raumstruktur zu entwickeln, die auf Tensegrity basiert.

Geschichtliche Entwicklung

Das erste bekannte Tensegrity-Modell entstand schon 1920 und wurde vom russischen Künstler **Karl logan-son** gebaut. Es besteht aus drei Druckstäben, die mit einem verbundenen Seilnetz ins Gleichgewicht gebracht wurden. Erst 30 Jahre später stieß der amerikanische Künstler und Architekt **Kenneth Snelson** wieder auf das gleiche Prinzip. Er hatte schon während seiner Studienzeit Modelle gebaut, die sich mit dem Thema auseinander setzten, noch bevor der Begriff Tensegrity überhaupt bekannt war. So entstanden Modelle wie das „x-piece“ oder das „one to another“. Snelson realisierte später eine Reihe von beeindruckenden Skulpturen, manche mehr als 30 m hoch, wie der „Needle Tower“. Im Abschnitt „Beispiele“ wird näher auf seine Skulpturen eingegangen. Snelson hatte einen berühmten Lehrer an der Universität, der auf seine Modelle aufmerksam wurde - **R. Buckminster Fuller**. Er war begeistert vom Potenzial dieser neuartigen Bauweise und begann sie weiterzuentwickeln. Er schuf dann auch die Bezeichnung Tensegrity. (vgl.Benisch Philipp,2006:2)

Das Drahtspeichenrad

Fuller entdeckte im Drahtspeichenrad das Tensegrity-System als bereits verwirklicht. „Die druckbeanspruchte Nabe des Drahtspeichenrades war eindeutig verinselt oder isoliert vom druckbeanspruchten „Atoll“ der Radfelge. Da diese Kompressionsinseln nur durch zugbeanspruchte Speichen in eine stabile Lagebezeichnung gebracht werden, folgerte Fuller, dass es sich hierbei eindeutig um eine tensionale Integrität handeln müsse, bei der Zugspannung primär und umfassend und Druck sekundär und lokal ist.“ (Siegel Teresa,2005:10)

Die Felge für sich ist völlig weich. Aber durch die Verbindung mit den vorgespannten dünnen Speichen wird sie steif. Die Speichen sind gegeneinander vorgespannt und können somit nicht schlaff werden. Das System stabilisiert sich selbst.

Die ersten Verwirklichungsmöglichkeiten für solche Systeme ließ sich Fuller 1964 mit dem von ihm entwickelten „Aspension Dome“ patentieren. Später griff David Geiger den Entwurf auf. Dieser wurde als „Cable Dome“ verwirklicht. Beim „Aspension Dome“ handelt es sich um eine Kuppel, die aus übereinander liegenden, sich immer um ein Stück verkleinernden Ringen (wobei die Unterseite jedes Ringes mit der Oberseite des darunter liegenden mit Zugseilen verbunden wird) besteht. So gewinnt der „Dome“ an Höhe. An der Unterseite schließt ein Druckring das System ab. (vgl.Siegel Teresa,2005:10)



Abb. 66: Karl loganson, „Study in Balance“ 1921

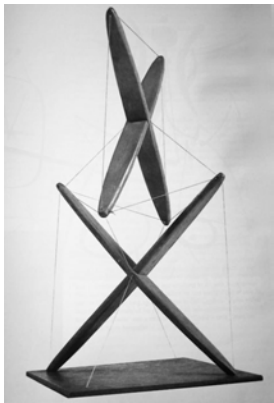


Abb. 67: Kenneth Snelson, „XPiece“ 1948



Abb. 68: Buckminster Fuller



Abb. 69: Das Drahtspeichenrad

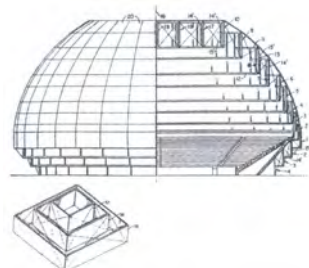


Abb. 70: Aspension Dome

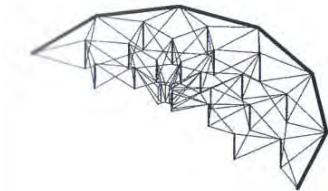


Abb. 71: Tragstruktur Aspension Dome

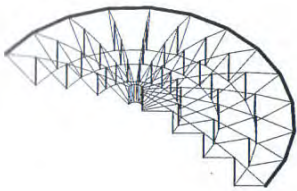


Abb. 72: Tragstruktur Cable Dome

Geodätische Kuppeln

Eine wesentliche Errungenschaft von Fuller während des zweiten Weltkrieges waren seine Forschungen zur sogenannten energetischen Geometrie. Mit dem Vorbild des Atomkerns und der Elektronenhülle ging es ihm um die Geometrie von Kern und Schale. Er versuchte ein Ikosaeder durch Zentralprojektion auf eine Kugel zu legen und erhielt somit ein Dreiecksnetz aus 20 Dreiecken. Die Knotenpunkte liegen auf der Kugeloberfläche. Zuerst baute er sogenannte Großkreismodelle, welche die Kugel in asymmetrische Dreiecke teilen. Die Bögen wurden durch Geraden ersetzt und so kam es zu geodätischen Kuppeln. Die Teilung kann immer mehr verkleinert werden und es entstehen immer kleinere Basiselemente eines geodätischen Netzes. Die Lastabtragung im System funktioniert ohne Hierarchie. Fuller bemerkte, dass diese Kuppeln auch als Tensegrity funktionieren. So entstanden die „Geodesic Tensegrity Domes.“

Außer **Fuller** sind noch einige Namen zu nennen, die die geschichtliche Entwicklung von Tensegrity-Systemen voran getragen haben. Die Wichtigsten werden hier kurz genannt.

David G. Emmerich beschäftigte sich mit sogenannten „Twist-Elementen“. Er war der Erste der die Möglichkeit erkannte aus diesen „Twist-Elementen“ zweilagige Tensegrity-Strukturen zu bauen. Er bemerkte, dass man aus den Tensegrity-Prismen erweiterbare Netze entstehen lassen kann. Außerdem führte er Versuche zur optimalen Lage der Druckstäbe und auch zur Optimierung deren Längen durch.

Ariel Hanaor versuchte zweilagige geschlossene Tensegrity-Systeme mit klassischen zweilagigen Fachwerken zu vergleichen. Die Untersuchungen ergaben, dass konventionelle Fachwerksysteme doch bei weitem steifer sind, als alle untersuchten Tensegrity-Systeme. Die einzigen Konstruktionen, die annähernd die gleiche Steifigkeit aufwiesen, waren Tensegrity-Kuppelsysteme aus Oktaeder-Einheiten. Bei Twistelementen erkannte er, dass eine sehr hohe Vorspannkraft erforderlich ist, um sie steif zu bekommen. Deshalb müssen die Druckstäbe sehr hohen Kräften standhalten können.

Rene Motro entwickelte unter anderem Tensegrity-Tragsysteme aus Netzen. Ein Gerades an der Unterseite und ein Verdrehtes an der Oberseite, dazwischen liegen Druckstäbe.

Genot M. Minke war es, der schließlich die Tensegrity-Strukturen in offene und geschlossene Systeme unterteilte. (vgl. Gengnagel Christoph, 2002:4-5)

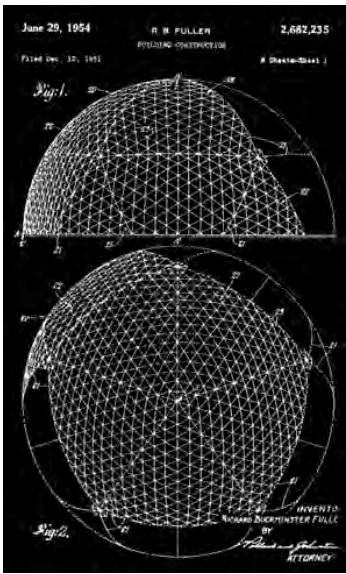


Abb. 73: Buckminster Fuller Geodätische Kuppel

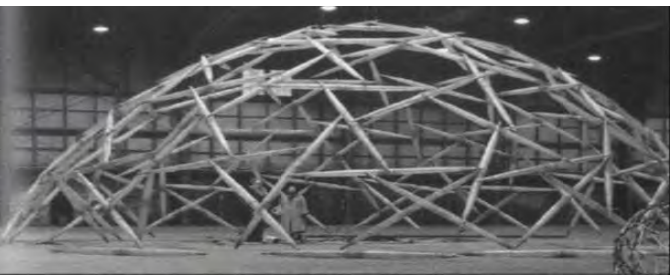


Abb. 74: Buckminster Fuller Geodesic Tensegrity

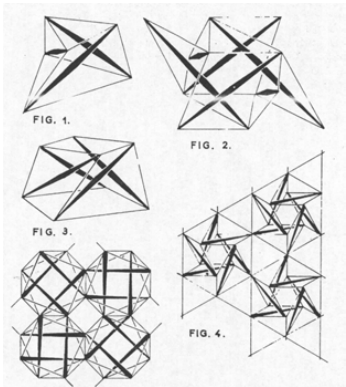


Abb. 75: Emmerich, Kombination aus Twist Elementen

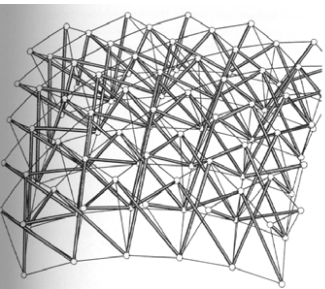


Abb. 77: Rene Motro, Tensegrity Tragwerk

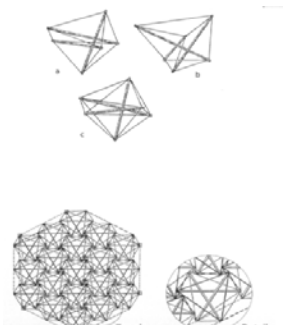


Abb. 76: Hanaor, Untersuchung am ebenen System

Grundformen

Grundsätzlich werden Tensegrity-Systeme in offene und geschlossene Systeme eingeteilt. Offene Systeme übertragen die Kräfte in den Baugrund oder in eine sekundäre Konstruktion. Geschlossene Systeme sind in sich stabil, egal wie man sie dreht oder hinstellt.

Offene Systeme beginnen bei eingespannten Trägern, wo ein oder mehrere Druckstäbe zwischen ein Tragseil und ein Spannseil gespannt werden. Bei mehreren Stäben werden die Felder zusätzlich ausgekreuzt um die Tragfähigkeit zu optimieren.
Bei räumlich offenen Systemen sind es vier oder mehrere Fixpunkte, an denen die Zugseile hängen. Bei mehreren Druckstäben, zum Beispiel vier, kann man das System auch erweitern, indem man die vier Fixpunkte des größeren Systems durch Druckelemente des nächstkleineren ersetzt. So funktionieren auch die „Cable Domes“ und „Saddle Domes.“

Bei räumlich **geschlossenen Systemen** spricht man von Systemen erster Ordnung, wenn zwei oder mehrere Druckstäbe auf einer Ebene liegen.(Typ A bis D) Das System zweiter Ordnung bezieht sich auf Figuren, bei denen kein Druckstab auf der gleichen Ebene liegt.
Beim Twist-Element wird das obere Polygon in einem bestimmten Winkel verdreht, bis das System stabil ist. Die Zugelemente werden in ihrer Länge und Vorspannung optimiert, wenn die richtige Form gefunden ist. Das Twist-Element ist eine Basis-Zelle. Rene Motro hat diese einfache Zelle „Elementary Equilibrium“ genannt. Die Verbindung von einem der sechs Knoten mit seinen vier Nachbarknoten ist bereits die erste Tensegrity Zelle für sich. Wobei einer der Knoten weggelassen werden kann.
Eine weitere Form ist die von Kenneth Snelson entwickelte X- Form. Zwei x-förmige Teile werden mit Zugseilen verbunden und mit Hilfe eines dritten Stabes daran gehindert, sich zu berühren. Dieser kann auch weggelassen und durch ein weiteres X-Element ersetzt werden. Mit der X-Form kann man auch Türme bauen. (vgl. Cieplak Elisabeth, 1999:15-24; vgl.Engstler Martin, 2011:6)

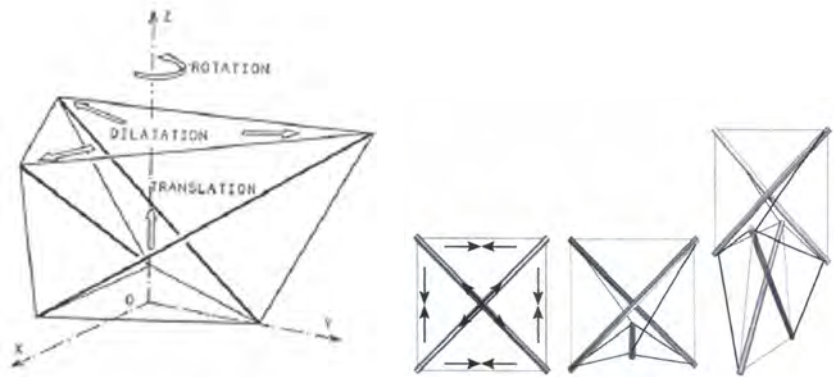


Abb. 81: Twist Element

Abb. 82: X-Form

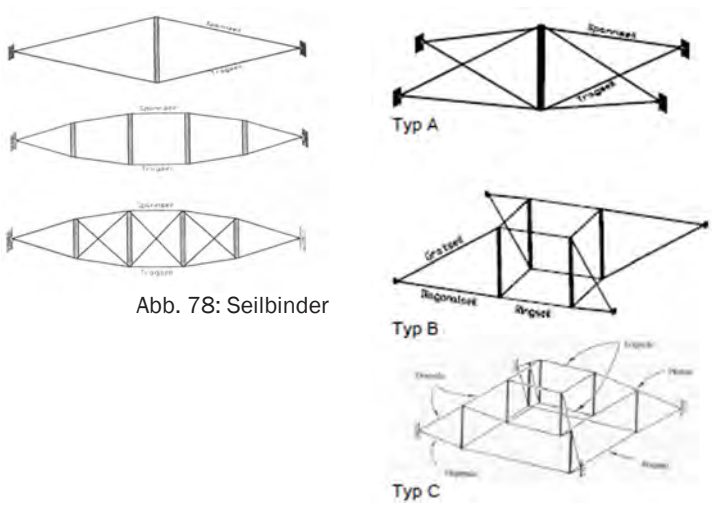


Abb. 78: Seilbinder

Abb. 79: Räumlich offene Systeme

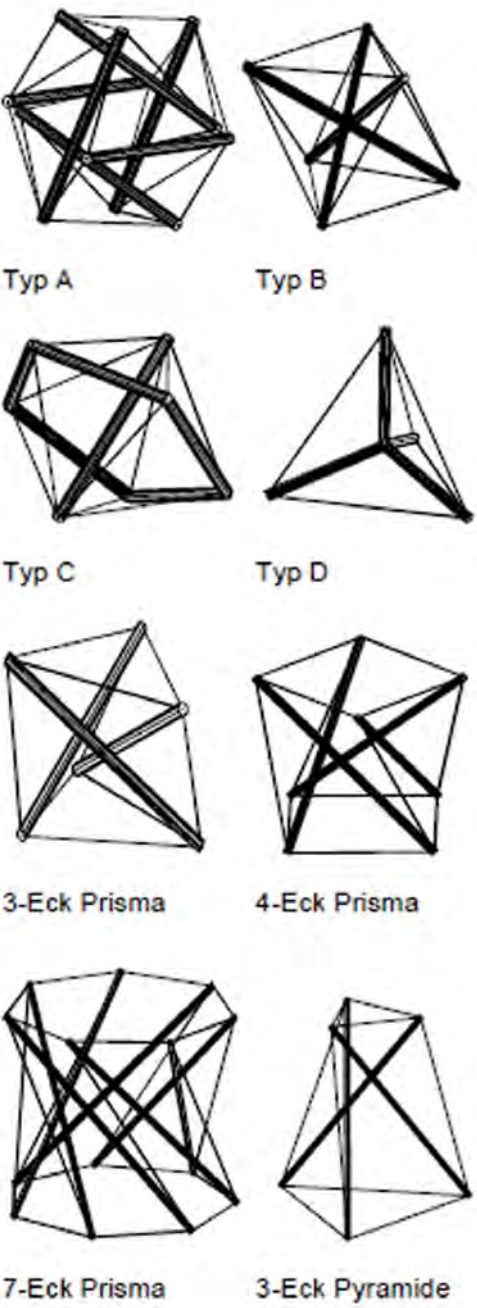


Abb. 80: Räumlich geschlossene Systeme 1. und 2. Ordnung

Mehrzellige Systeme, Türme

Tensegrity-Türme entstehen aus übereinander gereihten Twist-Elementen, einmal linksdrehend, einmal rechtsdrehend. Die obere Verbindung zwischen den Stäben ist gleichzeitig die untere des nächstfolgenden. So entstehen in der Draufsicht ein Polyeder mit der doppelten Anzahl von Ecken des Ausgangspolyeders.
In der zusammenhängenden Struktur gibt es drei Kategorien von Zugelementen.
(1) Randseile(Grün): definieren die Kanten einer Zelle. Die Anzahl der Randseile ist gleich groß wie die Anzahl der Druckstäbe. In ihnen treten nicht so große Spannungen auf wie in den Zugseilen oder Schlingseilen.
(2) Zugseile(Blau): halten das ganze System zusammen. Verbinden die Unterkanten von jedem System. Die Zahl dieser Seile gleicht ebenfalls den Druckstäben.
(3) Schlingseile(Rot): verbinden die Stabenden von jedem Modul.
Mit dem gleichen System kann man auch Bögen und Torusformen darstellen. (vgl.Siegel Teresa,2005:36)
Gebaute Beispiele von Tensegrity-Türmen gibt es bis dato nur als Skulpturen. Bekannte Beispiele sind der „Needle Tower II“ von Snelson oder der Messturm von Rostock von Gerkan Marg&Partner. Letzterer ist sogar 60m hoch. Genauere Erläuterung im folgenden Abschnitt Beispiele.



Abb. 83: Snelson, Penta Tower

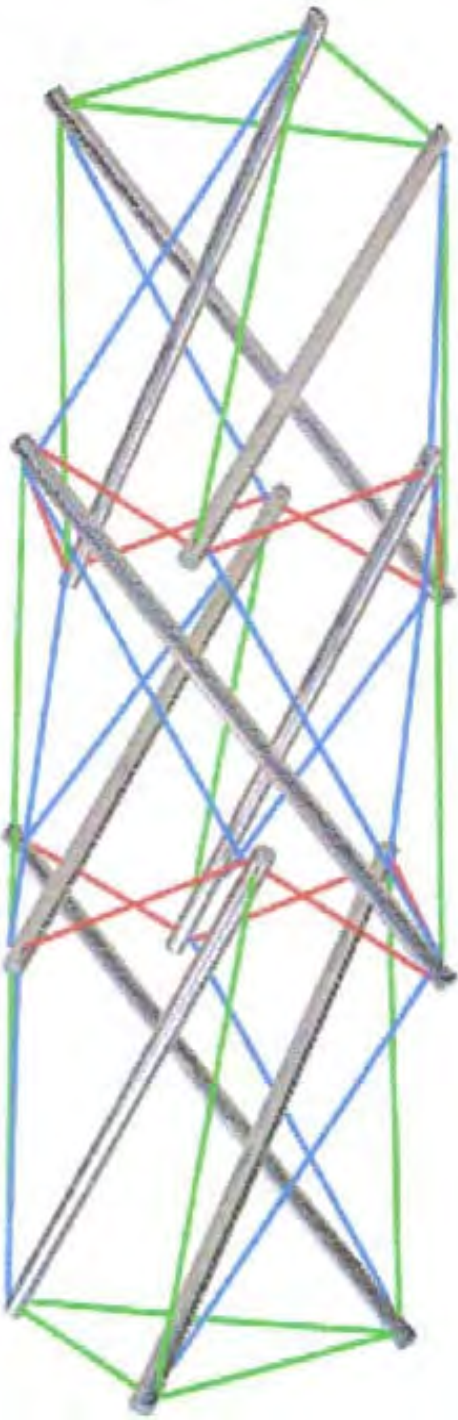


Abb. 84: Verschiedene Aufgaben der Seile

Beispiele:

Kenneth Snelson

Needle Tower II

Holland
1969

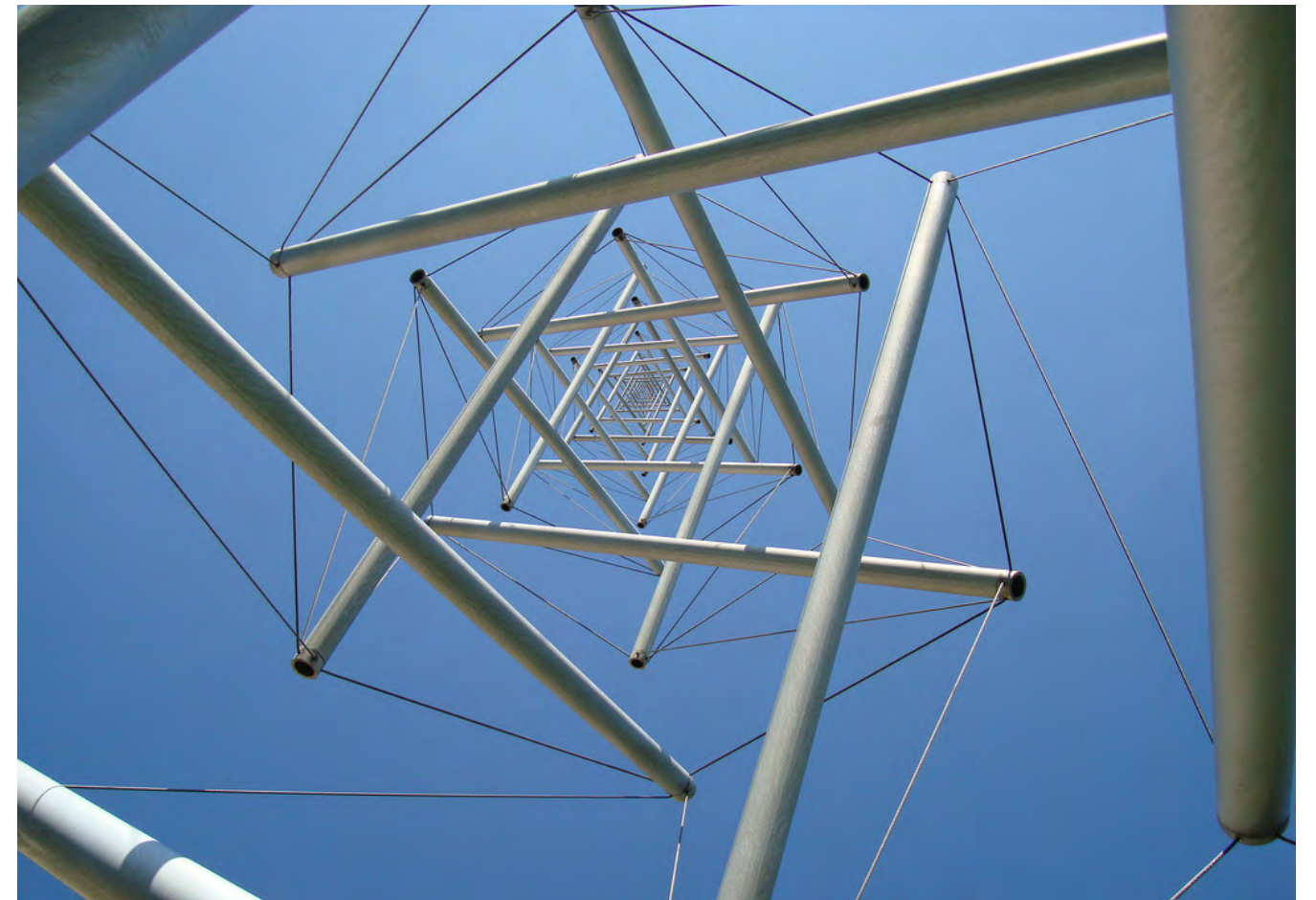


Abb. 85: Needle Tower II

Das klassische Beispiel für einen Tensegrity-Turm. Twist-Elemente mit drei Stäben jeweils in unterschiedliche Richtungen drehend, übereinander gespannt. Die Anordnung von rechts- und linksdrehenden Modulen hat den Vorteil, dass der Tendenz der Beugung bei gleich drehenden Modulen entgegengewirkt wird. Das untere Teil wird also nach oben gespiegelt. Beim „Needle Tower“ ändern sich auch noch die Längen der Druckstäbe. Der „Needle Tower II“ ist der große Bruder des ersten kleineren. Nummer 2 ist unglaubliche 30m hoch. Der Turm wurde liegend gebaut und dann aufgestellt. Die Röhren sind aus Aluminium und die Seile aus rostfreiem Stahl. Die Konstruktion besteht eigentlich nur aus Dreiecken. Von ihnen gibt es zwei verschiedene Typen. Typ A ist das Zug/Druck-Dreieck. Hier laufen die Zugseile von den Enden der einen Stäbe zu den Enden der anderen. Dieses Element erscheint paarweise wie „Schmetterlingsflügel“. Typ B ist das Zug-Dreieck. Es ist an drei verschiedenen Stabenden stabilisiert. (vgl. Siegel Teresa, 2005:22)



Abb. 87: Montage am Boden

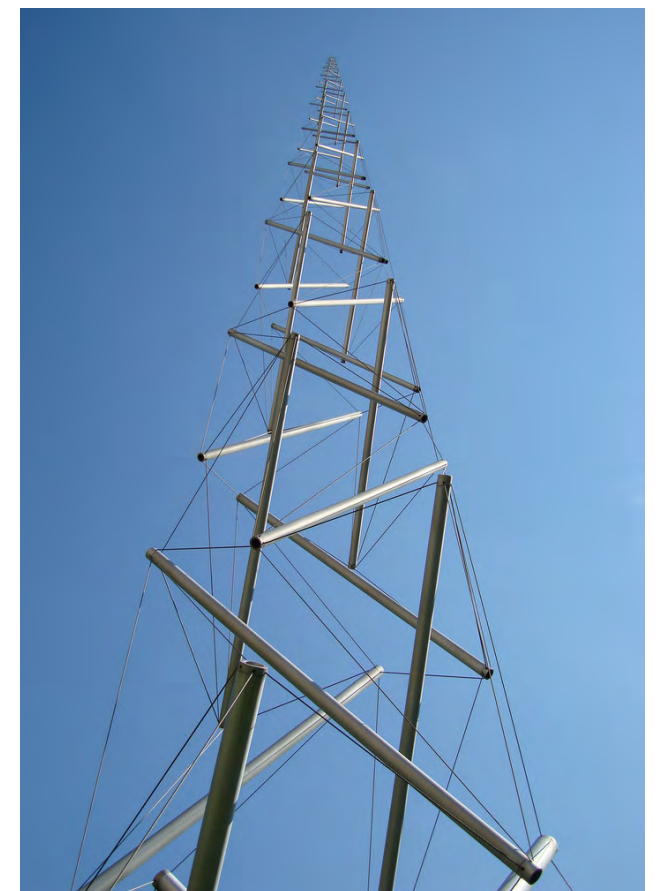


Abb. 86: Needle Tower II

Beispiele:

Kenneth Snelson

Easy K
Holland
1967



Abb. 88: Easy K

Eine sehr weit auskragende sich am Ende noch nach oben beugende Struktur. Für die Konstruktion waren sehr lange Zugseile notwendig. Montiert wurde alles zuerst am Boden. Die Seile mussten vorgespannt werden, bevor das Objekt angehoben werden konnte. So blieb die Form stabil. Die Oberkante der Auskragung wird stärker auf Zug beansprucht, die Unterkante auf Druck. Durch die Vorspannung muss dem entgegengewirkt werden. Die Vorspannkraft muss größer sein als die Druckkraft an der Unterkante. Zug und Druckspannungsfelder variieren entlang der Längsachse. (vgl. Siegel Teresa, 2005:23)

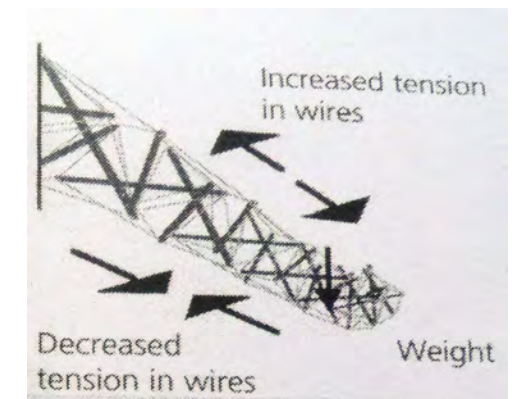


Abb. 89: Zug/Druck



Abb. 90: Easy K, Modell

Beispiele:

Kenneth Snelson

Freeride Home
New York
1974



Abb. 91: Freeride Home

Dieses Objekt steht auf drei Stützen und hat wesentlich längere Druckelemente. Es treten auch hier Verformungen auf, die durch erhebliche Vorspannungen ausgeglichen werden müssen. Je größer die Strukturen werden, desto größer muss die Vorspannung sein. (vgl. Siegel Teresa, 2005:24)



Abb. 93: Freeride Home



Abb. 92: Freeride Home

Beispiele:

Gerkan, Marg & Partner, Hamburg

Warnow Tower
Rostock
2003



Abb. 94: Warnow Tower



Abb. 95: Druckstäbe stehen aufeinander

Am Messegelände von Rostock errichteter Tensegrity Turm. Mit einer Höhe von insgesamt 62 m eine der höchsten Tensegrity Konstruktionen. Basierend wieder auf Twist-Elementen, wobei die Druckstäbe sich berühren. Wenn man es genau nimmt, ist es kein „echtes“ Tensegrity.

Die einzelnen 8,3 m hohen Twist-Elemente für sich aber schon. Die einzelnen Elemente wurden vorgefertigt und dann binnen zehn Tagen aufgestellt. Interessant sind hier die Spannrahmen, mit deren Hilfe die einzelnen Elemente vorgespannt werden. (vgl. Internetquelle 4)



Abb. 97: Spannrahmen am Boden



Abb. 98: Spannrahmen bei der Montage



Abb. 96: Warnow Tower

Beispiele:

Mathias Lanator, Kurt Bock

Tensegrity- Als die Tanne fliegen lernte
Vöcklabruck
2007



Abb. 99: Die fliegende Tanne

Zur Landesgartenschau in Vöcklabruck aufgebaute, temporäre Tensegrity-Struktur. Ein sehr ambitioniertes StudentInnenprojekt an der FH Kuchl. Tannenstämmen mit 50 cm Durchmesser und einer Maximallänge von 12 Metern werden mit Ketten als Zugseilen zum Fliegen gebracht. Die Verwirklichung des Projekts war laut Planer eine große Herausforderung, es waren unkonventionelle Mittel erforderlich, wie der Einsatz von Gewichten zur Formausrichtung. (Internetquelle 5)



Abb. 100: Vorfertigung am Boden



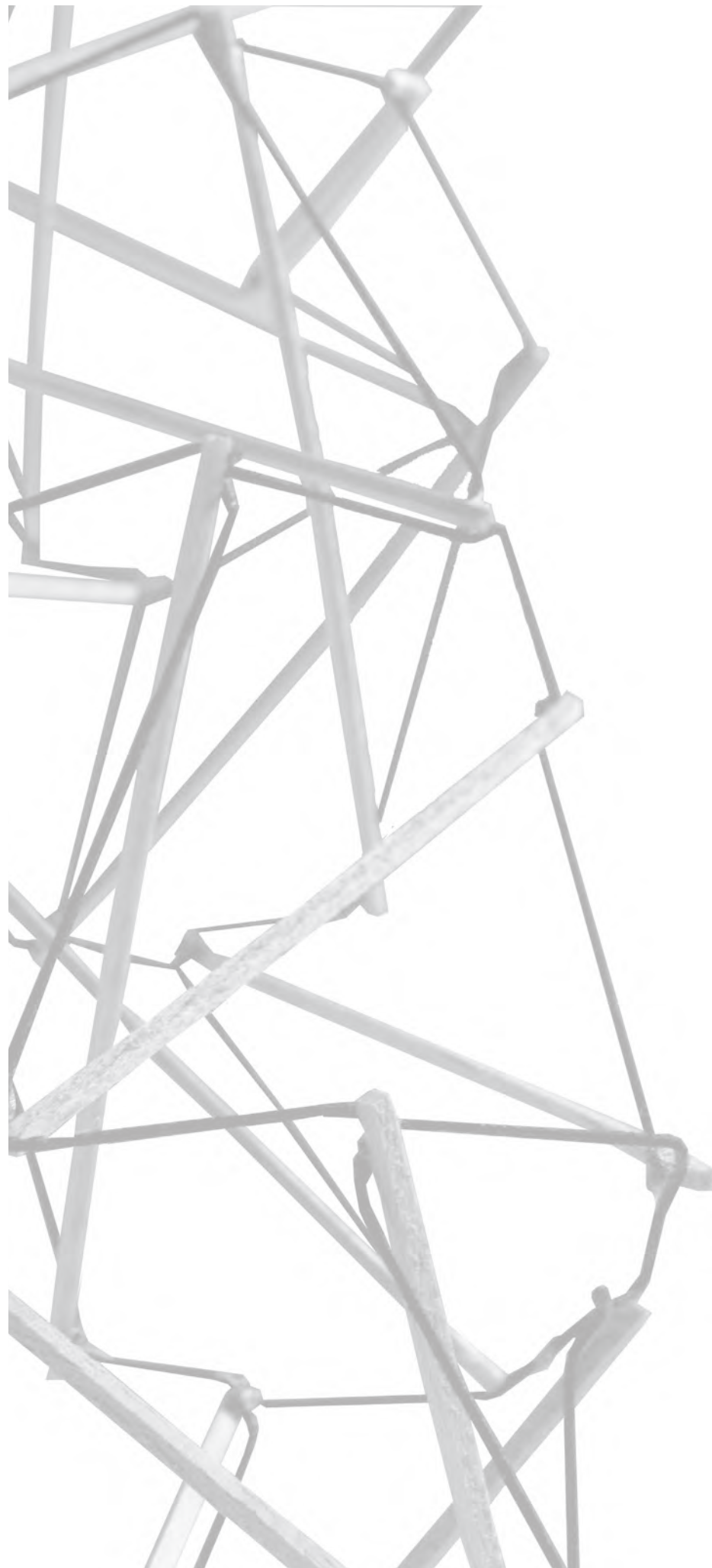
Abb. 101: Aufbau mit Hilfe von Gewichten



Abb. 103: Fertiges System



Abb. 102: Knotendetail



ENTWURF

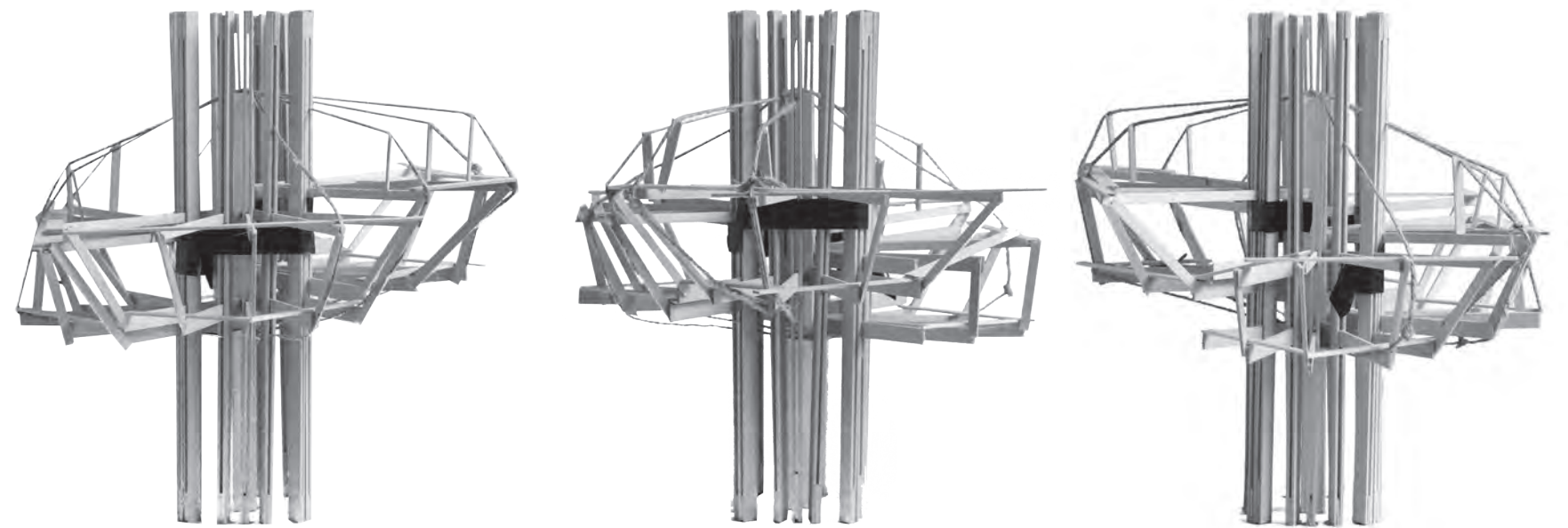


Abb. 104-106: Modell der früheren verworfenen Herangehensweise. Auch hier schon mit dem Prinzip der Seilverspannung.

Bei der Herangehensweise an dieses Thema muss man sich zwangsläufig mit dem Thema Modellbau auseinandersetzen. Nachdem ich von der früheren Idee mit dem Stamm in der Mitte abgekommen war, widmete ich mich der Bauweise des Tensegrity. Die Twist-Elemente hatten meine Aufmerksamkeit erregt. Ich begann damit zu experimentieren. Zuerst abgeleitet vom Dodekaeder mit fünf verbleibenden Druckstäben. Da mein Fundament aber quadratisch ist, war es logisch, die Twist-Elemente aus vier Druckstäben bestehen zu lassen.

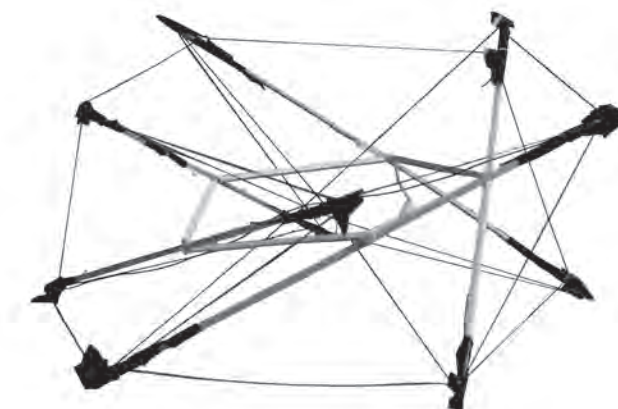


Abb. 109: Versuch aus einem vorher gebauten Dodekaederstern ein Tensegrity-Objekt zu machen.



Abb. 107-108: Erste Versuche mit Twist-Elementen und zusätzlicher Aussteifung.

Bei den Versuchen mit Twist-Elementen wurde klar, dass die Möglichkeiten zur Formfindung für eine einzelne Zelle nahezu unerschöpflich sind. Es kommt immer nur auf die Vorspannung der Zugelemente an. Natürlich wird es ab einer gewissen Maximalspannung nahezu unmöglich, das System stabil zu halten. Wenn die Zelle in sich abgeschlossen stabil steht, kann man sie hinstellen wie man will. Sie bleibt bei ausreichend Vorspannkraft in Position.

Danach folgten einige Versuche die Elemente übereinander zu stapeln. Das Ziel war nach oben hin größer zu werden. Die Struktur sollte sich wie eine Pflanze oder ein Baum nach Oben öffnen. Die richtige Vorspannung ist ausschlaggebend für die Stabilität. Bei einer einzelnen Twist-Zelle kann man so gut wie jede Form erzeugen. Bei mehrzelligen Systemen wie einem Turm, wo die Elemente übereinander gespannt werden, wird es schwieriger.

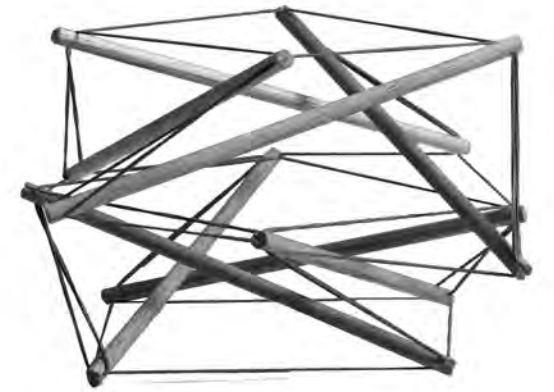
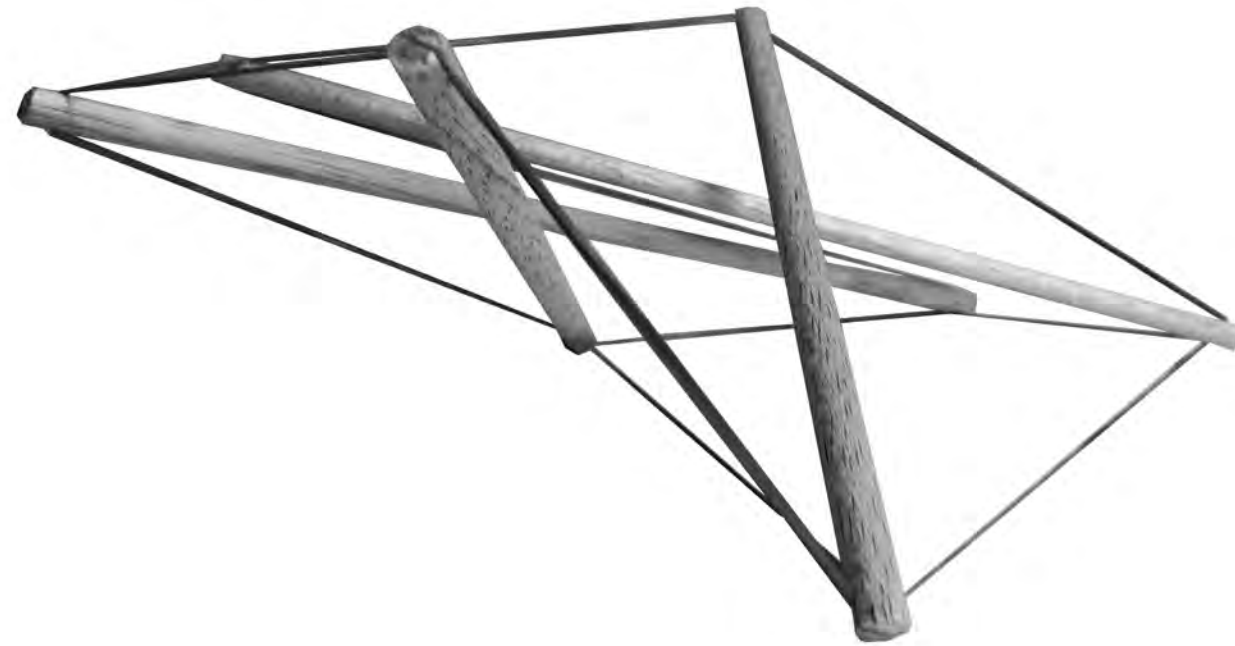


Abb. 114: Modell aus zwei spiegelverkehrten Twist-Elementen übereinander.

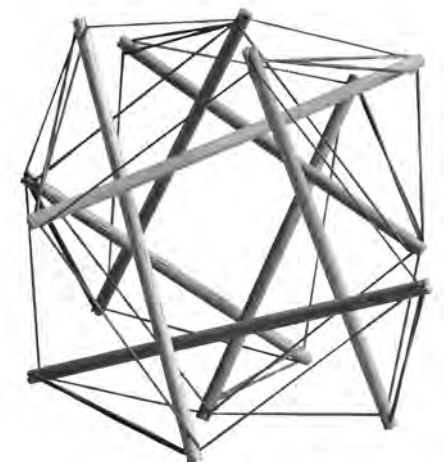
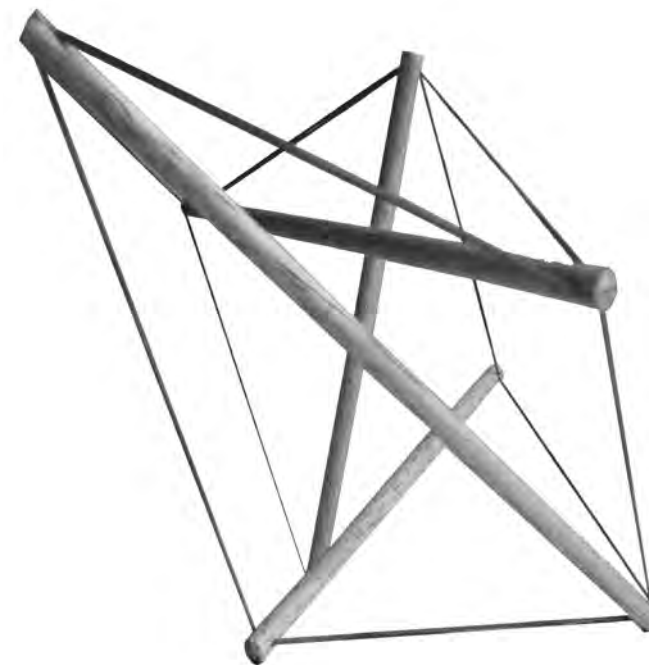
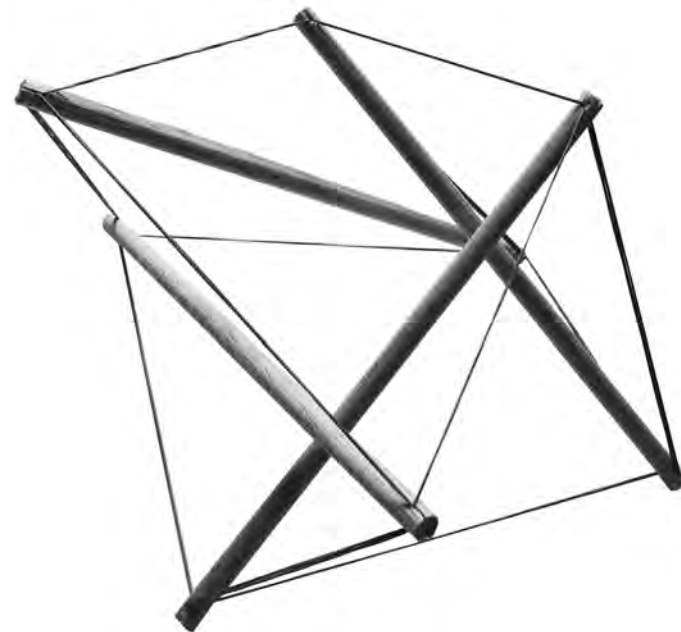


Abb. 115: Modell aus zwei spiegelverkehrten Twist-Elementen übereinander, von Oben.

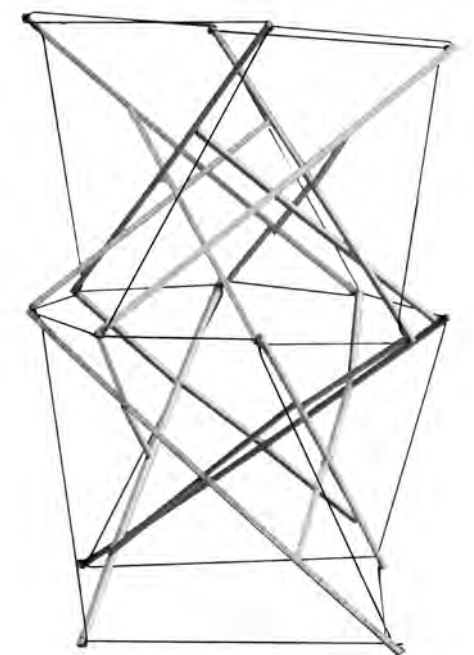


Abb. 116: Modell aus zwei spiegelverkehrten Twist-Elementen übereinander, mit dem Versuch, das System durch gegenläufige Stäbe auszukreuzen.

Abb. 110-113: Versuche mit Twist-Elementen. Die Druckstäbe sind aus Holz und die Zugseile sind Gummiringe. Eine Vielzahl von Formen sind möglich. Bei dem Modell in der Mitte rechts, wird das Element auf die Seite gestellt, so dass statt vier Druckelemente nur drei den Boden berühren. Das System bleibt stabil.

Höhenentwicklung

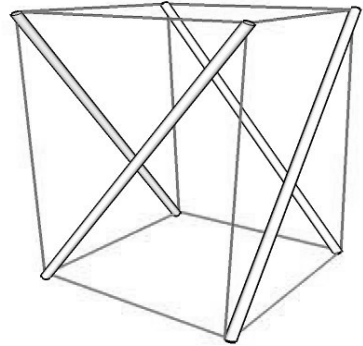


Abb. 117 Bauanleitung einer Zelle

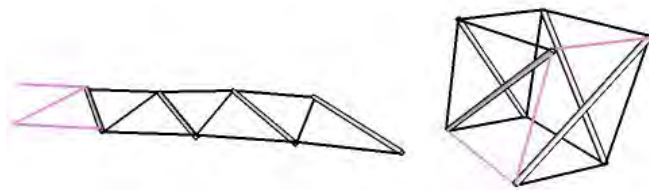


Abb. 118 Bauanleitung einer Zelle, Zuerst das Netz am Boden, dann werden die Enden verbunden.

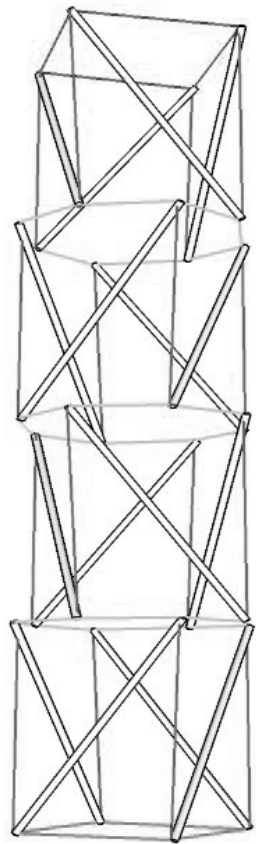


Abb. 119 Bauanleitung, Nach diesem Schema soll der Turm aufgebaut werden

Der nächste Schritt war jetzt an Höhe zu gewinnen. Das Ziel war es, vier einfache Twist-Elemente übereinander zu stapeln, wobei jede Zelle längere Druckstäbe und somit auch längere Zugseile hat. Das Längenverhältnis zwischen Stäben und Seilen ist mathematisch einfach auszurechnen, wenn das obere und untere Polygon gleich sind und die Stäbe die gleiche Länge haben. Das Verhältnis zwischen Zugseil und Druckstab ist 1:1,414. Also hat das Seil die Größe 1, beträgt die Größe des Druckstabes 1,414. Einfacher ist das System zu erklären, wenn es linear betrachtet wird. Das Längenverhältnis zwischen Stab und Seil ist ausschlaggebend dafür, ob die Vorspannung eingebracht wird oder nicht. Ist das Seil länger als der Stab, ist es undefiniert und es gibt keine Vorspannung. Bei gleicher Länge der beiden Teile ist das Seil zwar nicht vorgespannt, das System ist aber definiert. Dieser Zustand wird als „*null self stress equilibrium geometry*“ bezeichnet. Sobald das Seil kürzer ist als der Stab, wird Vorspannung in das System gebracht.

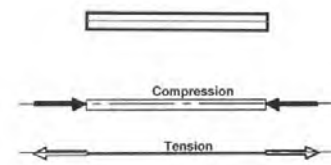


Abb. 120 Vorspannung in einem linearen System

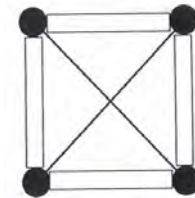


Abb. 121 Vorspannung in einem zweidimensionalen System

Legt man das Prinzip auf ein System mit zweidimensional gerichteter Vorspannung auf ein Quadrat um, so ist das Verhältnis zwischen Stab und Seil, das über die Vorspannung entscheidet, 1 zu 1,414. Die Quadratwurzel aus 2. Mathematisch erklärbar durch den Satz von Pythagoras. Ein Stab bildet mit zwei Seilen ein Dreieck, bei dem angenommen wird, dass die Seile die Länge 1 haben. Die Länge des Stabes ist somit $\sqrt{2}$. Wenn der Stab nicht dieser Länge entspricht, funktioniert keine Formfindung. Diese Rechnung ist auch bei dreidimensionalen Tensegrity-Systemen gleich. (vgl. Benisch Philipp, 2006:12)

Nach diesen Regeln versuchte ich, einen sich nach oben verbreiternden Turm zu bauen. Zuerst konstruiert man ein liegendes Netz, danach werden die Anfänge mit den Enden verbunden und plötzlich richtet sich das System auf und ist in sich stabil.

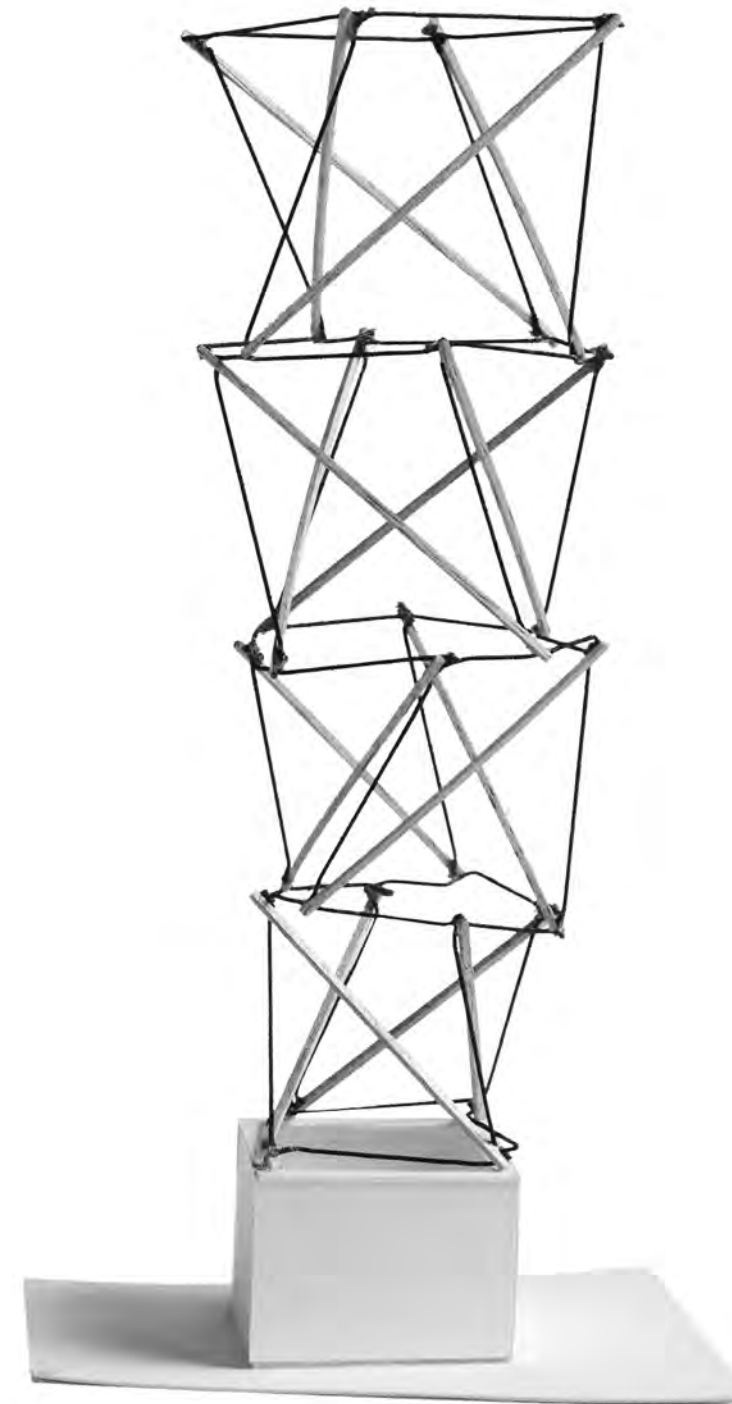
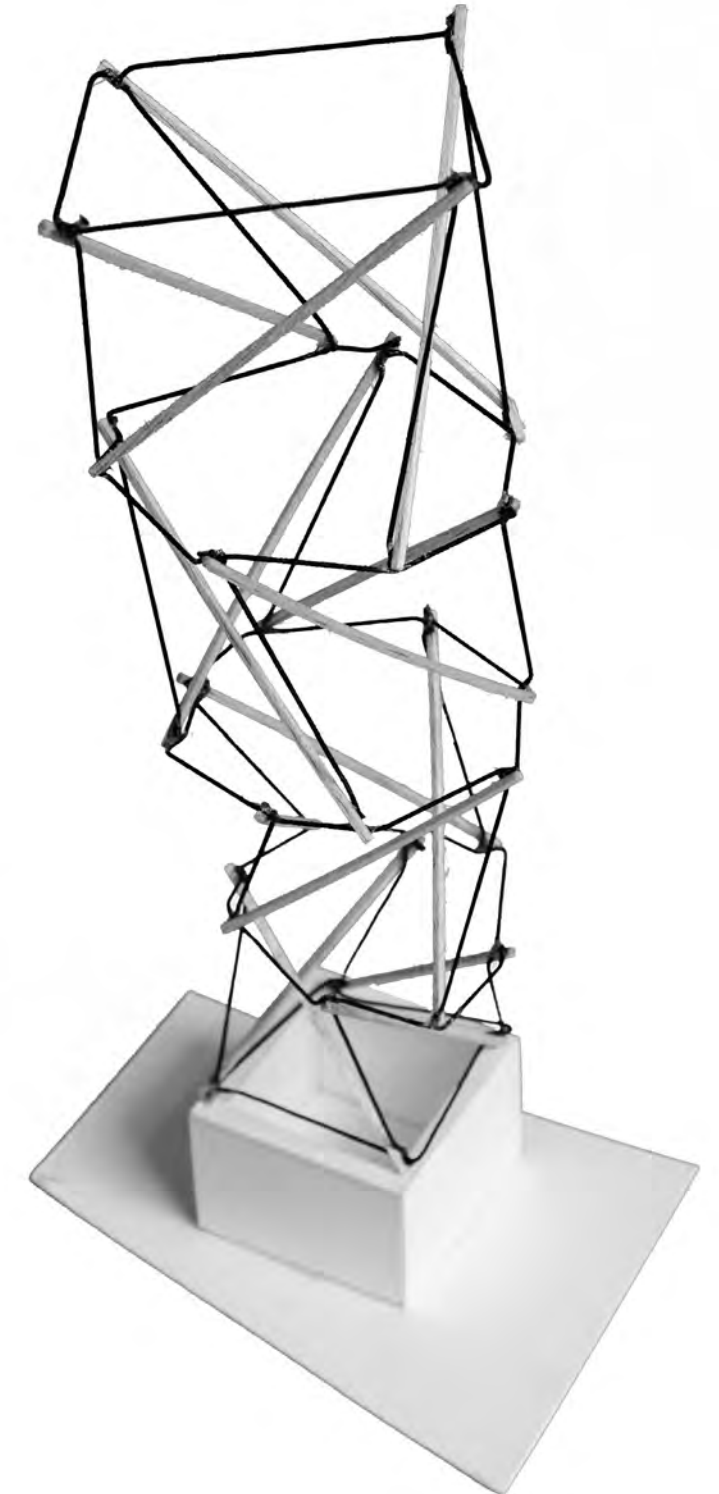


Abb. 122-123 Modell mit genau abgemessenen Druckstäben und dazu passenden Zugseilen. Nach oben hin verbreitert sich die Struktur.



Formfindung

Um weg zu kommen von einer zu geradlinigen Struktur werden im nächsten Beispiel zwei gegenüberliegende Druckstäbe länger gemacht und die zwei anderen kürzer. In der ersten Zelle ganz unten sind noch alle Stäbe gleich lang, in der darüber liegenden werden zwei Stäbe länger und zwei kürzer, in der darauf folgenden noch kürzer und noch länger und so weiter. Daraus geht keine geradlinige Struktur hervor. In punkto Stabilität und Tragfähigkeit schien die Form nicht sehr vielversprechend zu sein. Ich musste ein zusätzliches Seil anbringen, damit die Figur nicht kippte. Hier gab es auch erste Versuche in die Struktur Plattformen einzuhängen.

Das Modell auf die Weise zu bauen, dass vorher alle Längen berechnet und in Bezug zueinander gesetzt werden ist mit viel Aufwand verbunden. Es muss auch sehr genau gearbeitet werden, da das System wenig Spielraum für Toleranzen zulässt. Aus diesem Grund wurde mit Gummibändern weitergearbeitet. Der Vorteil daran ist, dass man bei der Formfindung sehr flexibel ist. Man kann die Längen der Zugseile durch Ziehen auch noch verändern, wenn das System bereits steht. Jeder Druckstab bekommt als erstes ein Gummiband umgespannt. Danach werden die Stäbe auf eine bestimmte Weise ineinander „gewebt“.

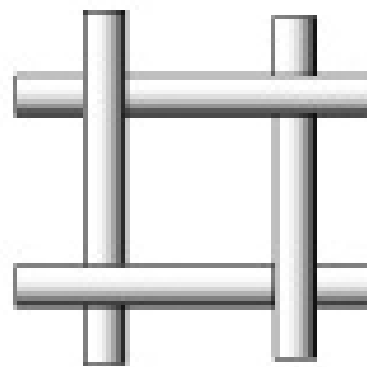


Abb. 125: Das Prinzip des ineinander Webens

Wenn man es geschafft hat, alle Gummibänder richtig zu verbinden, stellt sich das System auf. Man kann jetzt im Nachhinein die Länge der Gummibänder so lange verändern, bis die gewünschte Form dabei heraus kommt.

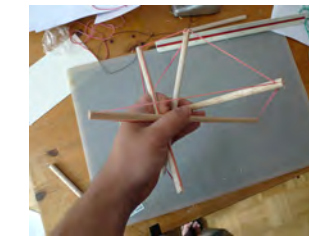
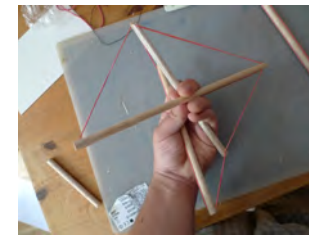
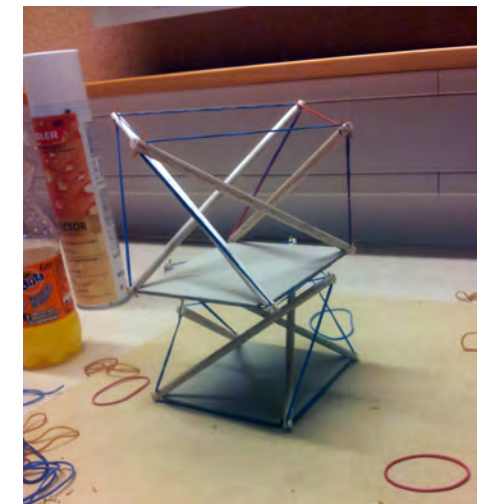
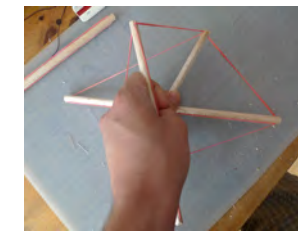


Abb. 126-131: Bauweise einer Zelle mit Gummiringen

Abb. 132: Zwei Zellen übereinander

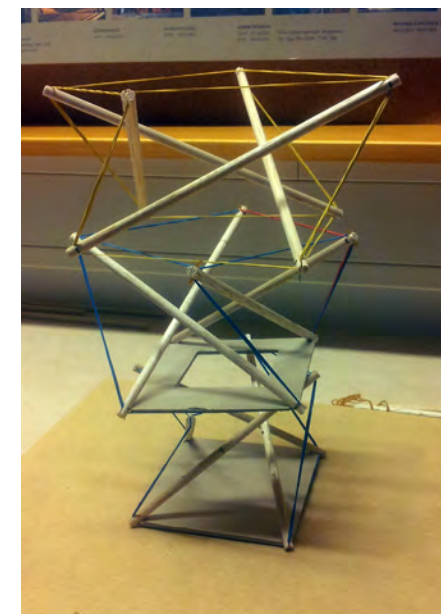


Abb. 133-134: Entstehung des Turmes

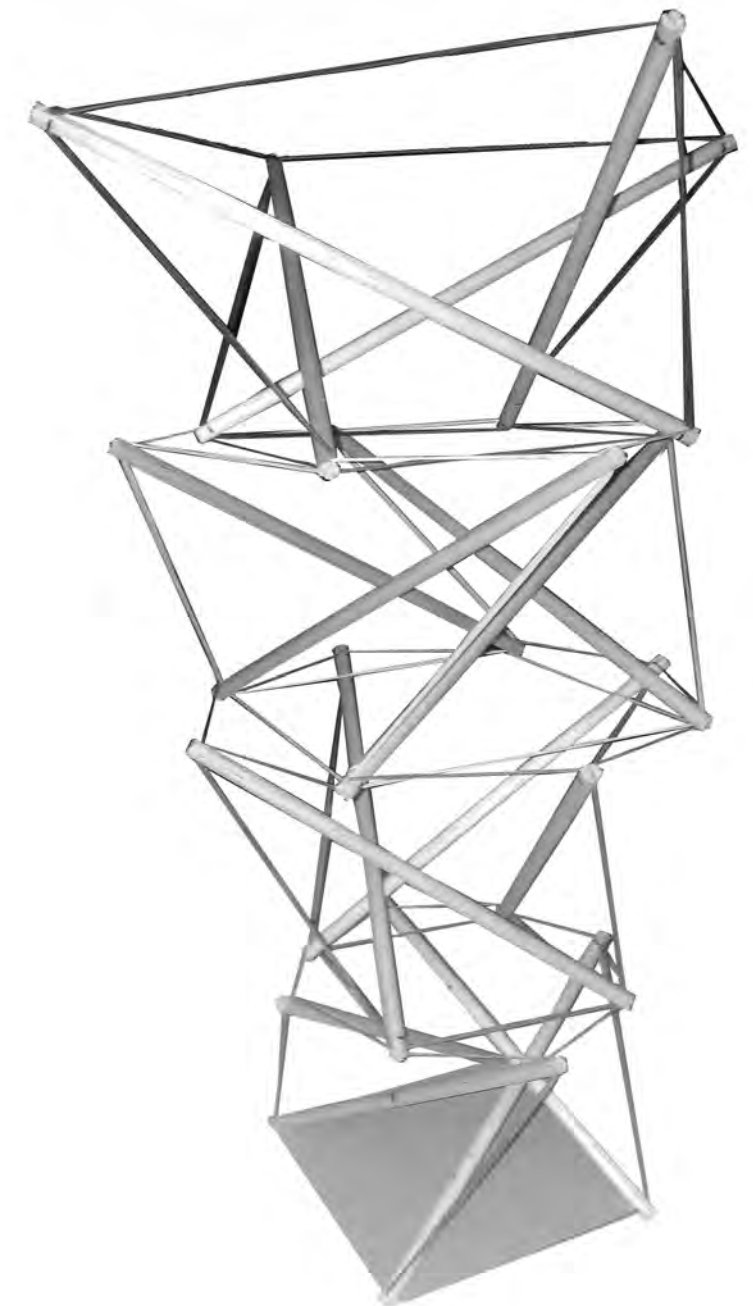


Abb. 135: Modell



Abb. 124: Modell mit kürzer und länger werdenden Druckstäben

Stabilisierung

Die bisher hergestellten Modelle waren mit elastischen Gummibändern gebaut und deshalb nicht sehr tragfähig. Was auch noch Sorge bereitete waren die großen Verformungen bei einseitiger Belastung. Das Vorausdenken an eine mögliche Realisierung einer Tensegrity-Struktur ließ mich, über eine Sekundärkonstruktion nachdenken. Ein weiterer Vorteil eines Versorgungs- und Stützturms ist es, dass alle etwaigen Leitungen oder Rohre darin verlaufen können. Auch beim Thema der Erschließung kann die Stütze eine tragende Rolle spielen. Die Idee der Konstruktion eine „Krücke“ zu verpassen war natürlich keine leichte Entscheidung. Es würde aber sehr viele Dinge erleichtern. Wenn man es noch schaffen würde, die Stütze so einzubauen, dass das Tensegrity Netz sich um sie herum schlängelt, würde es vielleicht wieder passen. Es sollte aussehen wie eine Schlingpflanze, die um einen Stamm herum wächst. Diese Idee gefiel mir ganz gut, und ich begann zu bauen.

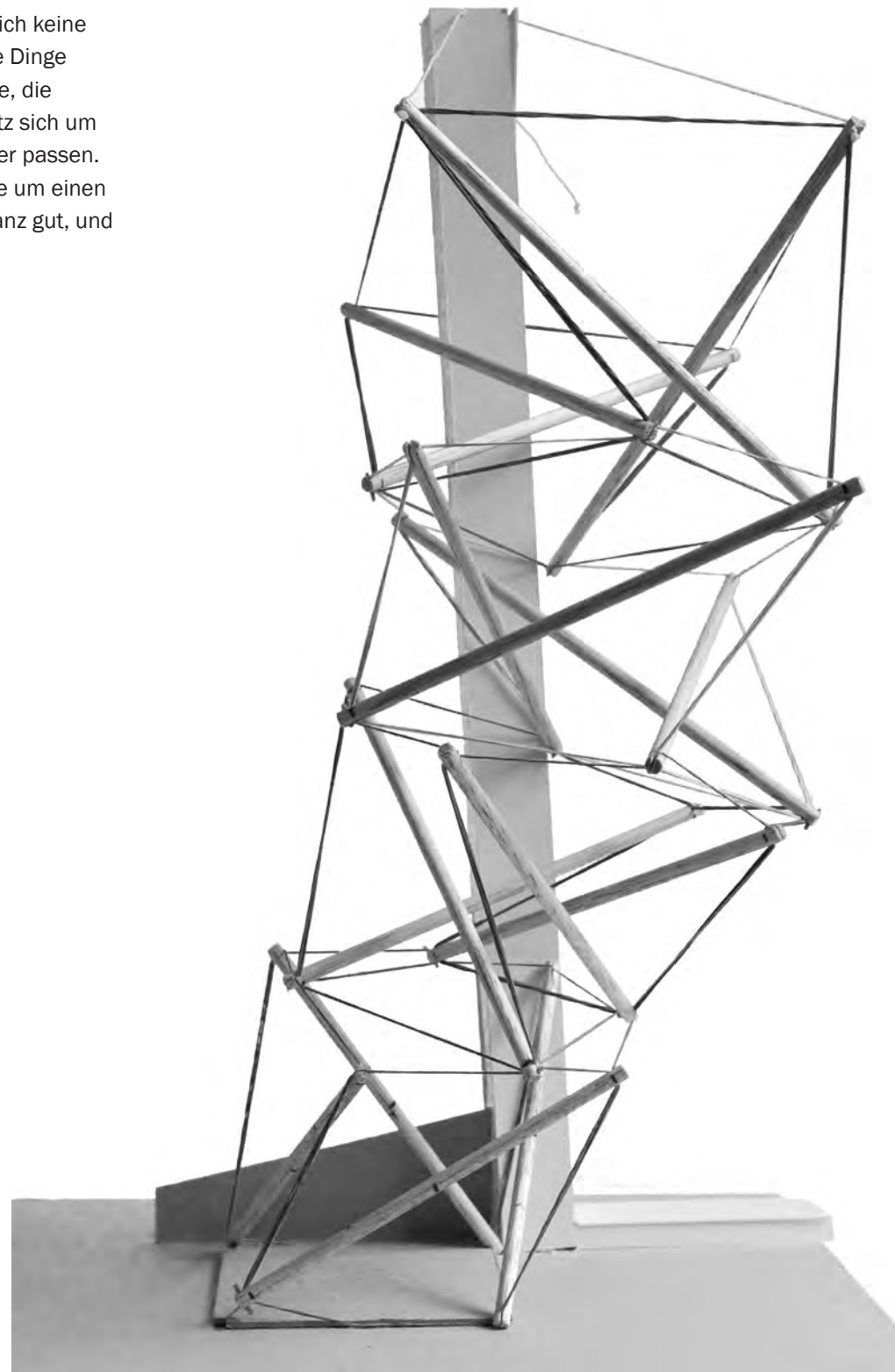


Abb. 136: Versuchsmodell mit Stabilisierungsstütze

Endgültige Form

Nach vielen Modellbauversuchen musste die Formfindung jetzt endlich ein Ergebnis zeigen. Es sollten vier Tensegrity-Zellen übereinander sein, wobei jede größer ist als die vorherige. Zwei Druckstäbe sind länger und so angeordnet, dass die ganze Struktur sich um den Stützturm schlängelt. Am Boden steht die Stütze noch seitlich vom System, oben verläuft sie durch die Zelle. Im Modell werden jetzt auch schon die Möglichkeiten überdacht wie und wo die Plattformen einzusetzen sind. Das Bauwerk soll natürlich begehbar sein. Das Wichtigste hier ist, dass die gesamte zusätzliche Last der Plattformen in den Knotenpunkten zusammen kommt. So kann das System stabil bleiben.

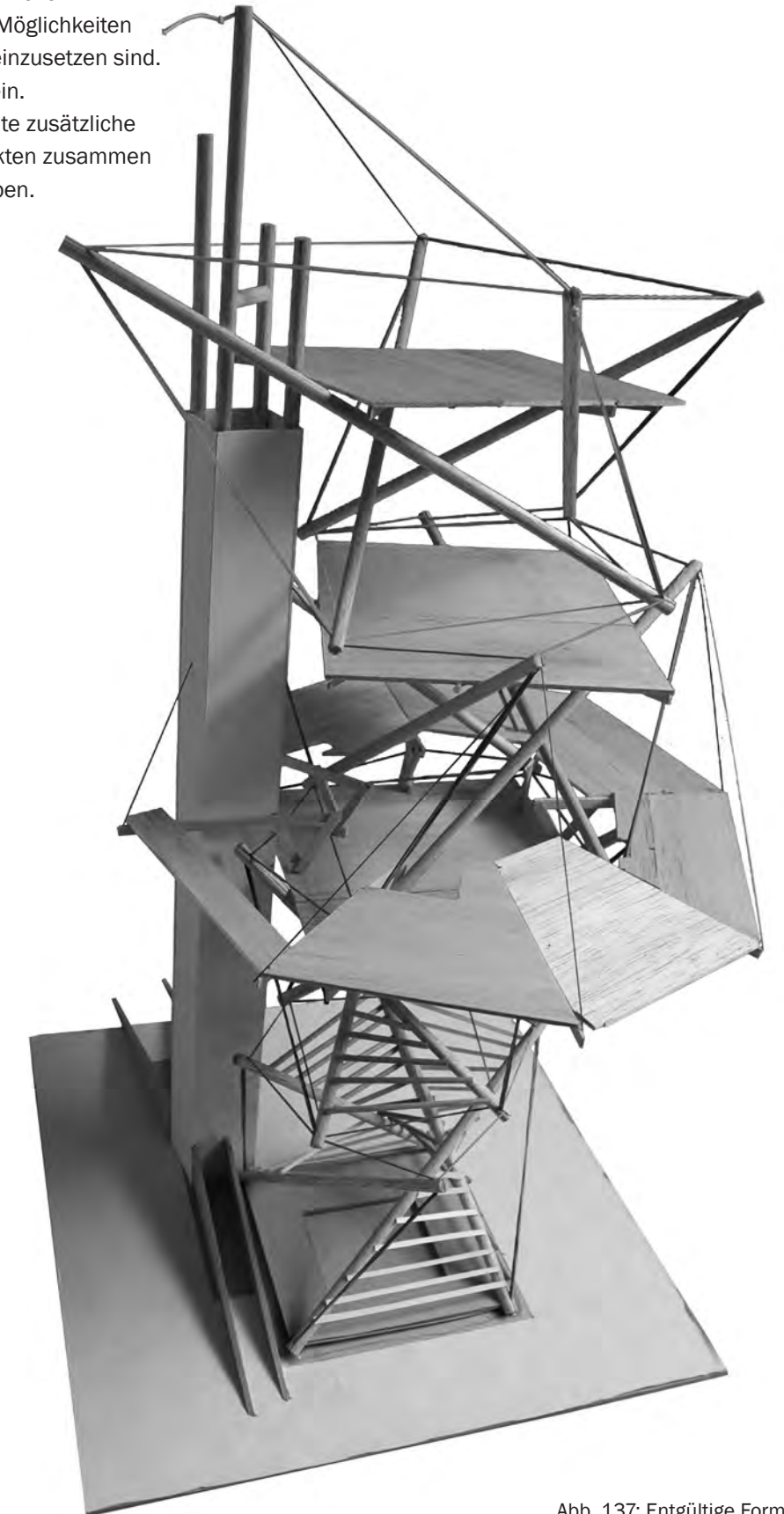


Abb. 137: Entgültige Form

Das System steht

In den Ansichten des Modells ist zu sehen wie sich die Struktur in die Höhe schraubt. Die oberste begehbare Plattform liegt auf 22 Metern. Die Höhe bis zum letzten Zugseil beträgt um die 25 Meter. Höher muss man auch nicht sein, um einen außergewöhnlichen Blick über den Wörthersee und das gesamte Klagenfurter Becken zu haben. Die nächsten Schritte wären jetzt noch die Erschließung und das Einhängen der Plattformen.

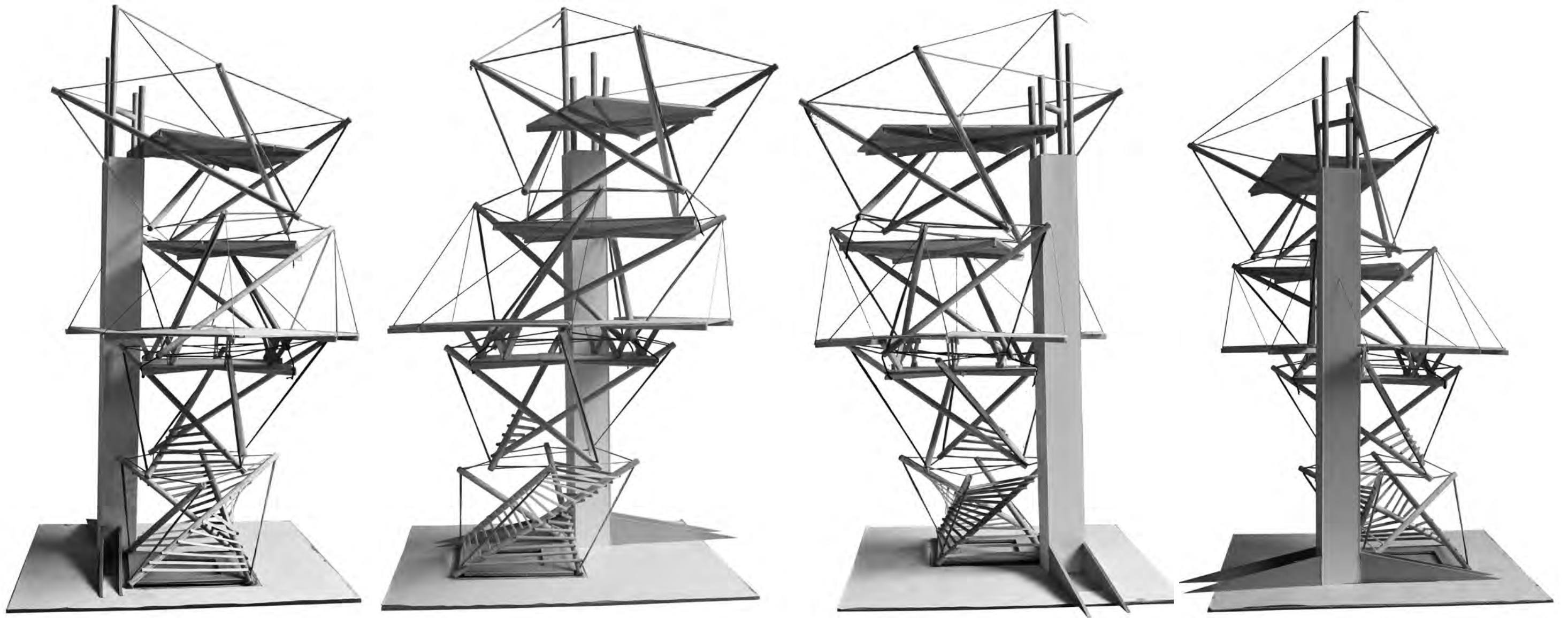


Abb. 138-141: Entgültige Form, Modell



BAUWEISE

Aufbau einer Zelle

Das System sollte Zelle für Zelle nach oben wachsen. Das Prinzip für jede Zelle ist gleich. Der Aufbau so einer Einheit erfordert eine Hilfskonstruktion. Ein Gerüst, das den Stabilisierungsrahmen in die gewünschte Höhe bringt. Der Rahmen und das Gerüst müssen so aufgebaut sein, dass auch die Winkel der Druckstäbe vorgegeben sind. Jetzt werden die Stäbe gelenkig gelagert und mit dem Rahmen auf der richtigen Stelle verbunden, die Zugseile eingehängt und dann vorgespannt. Danach wird die Hilfskonstruktion abgebaut. Die Vorspannung muss genau berechnet werden, nur dann bleibt das System nach dem Abbau des Gerüstes stabil. Dann werden die einzelnen Zellen immer gegendrehend aufeinander gesetzt. Die kritischen Punkte sind, die unteren Enden der Druckstäbe der höher liegenden Zellen. Diese müssen mit acht Seilen mit den oberen Enden der darunter liegenden Druckstäben verbunden werden. Dazu wird die obere Zelle so lange mit einem Kran in der Luft gehalten, bis die notwendige Vorspannung in den acht Schlingenseilen erreicht wird, um die obere Zelle zu halten.

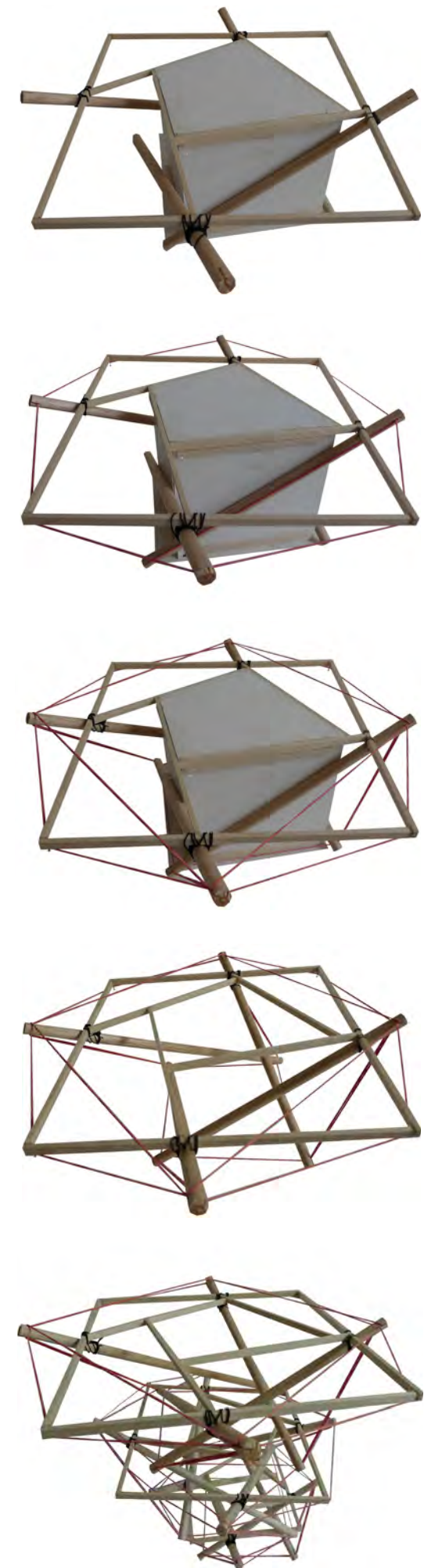


Abb. 142- 146: Aufbau einer Zelle

Der Aufbau

Das Modell wird jetzt in digitale Form übertragen, und die Konstruktion wird konkret. Die Druckstäbe sollten verleimte Rundholzstützen sein. Um das Knicken durch die immense Belastung zu vermeiden, werden sie in der Mitte dicker. Der Durchmesser in der Mitte wird hier mit 50 cm angedacht. Der Durchmesser an den Enden mit 34 cm.

Der Stabilisierungsrahmen sollte aus Leimbindern sein, die mit Zapfenverbindungen verschraubt werden.

Die Stahlseile haben einen Durchmesser von 5 cm

Der Stützturm wird als Stahlkonstruktion ausgeführt und wächst mit jeder Zelle mit.

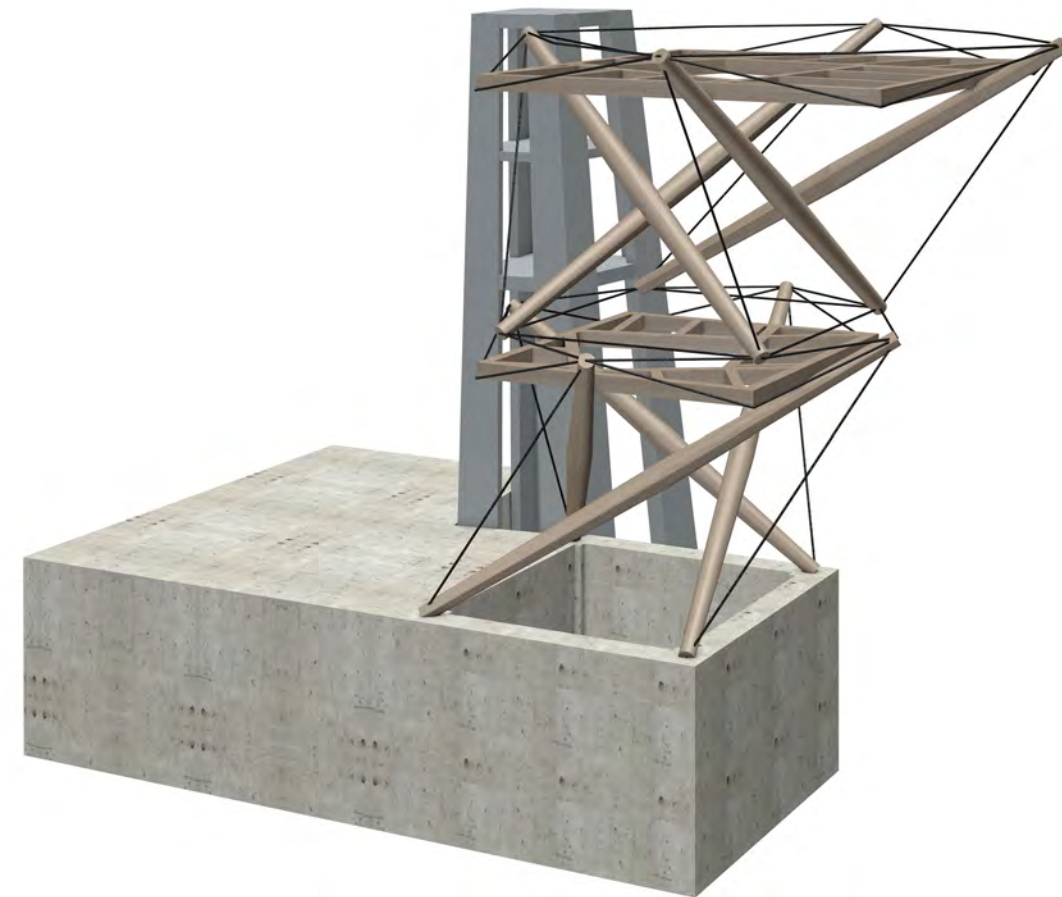
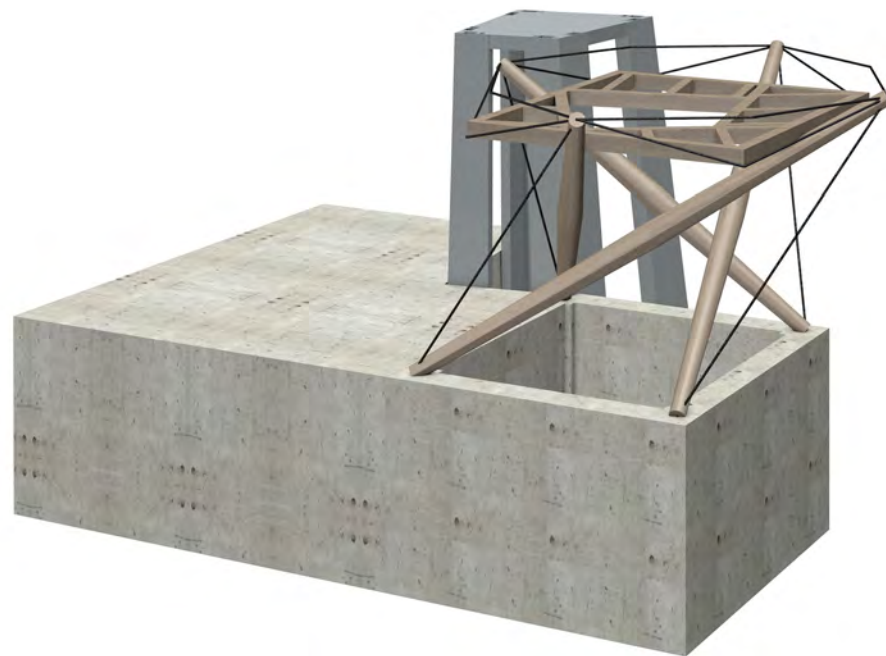


Abb. 147-148: Aufbau Zelle Eins und Zwei

Zelle Drei funktioniert nach dem gleichen Prinzip. Zur Stabilisierung wird die Konstruktion temporär mit dem Stützturm verbunden. Die vierte Zelle wird jetzt an die Spitze des Stützturmes gehängt. Jetzt ist das System geschlossen. Ganz Oben ist der Stabilisierungsrahmen begebar. Zusätzlich wird bereits die Unterkonstruktion für den Glaskubus aufgebaut - das „Sternenguckzimmer.“



Abb. 149: Aufbau Zelle Drei

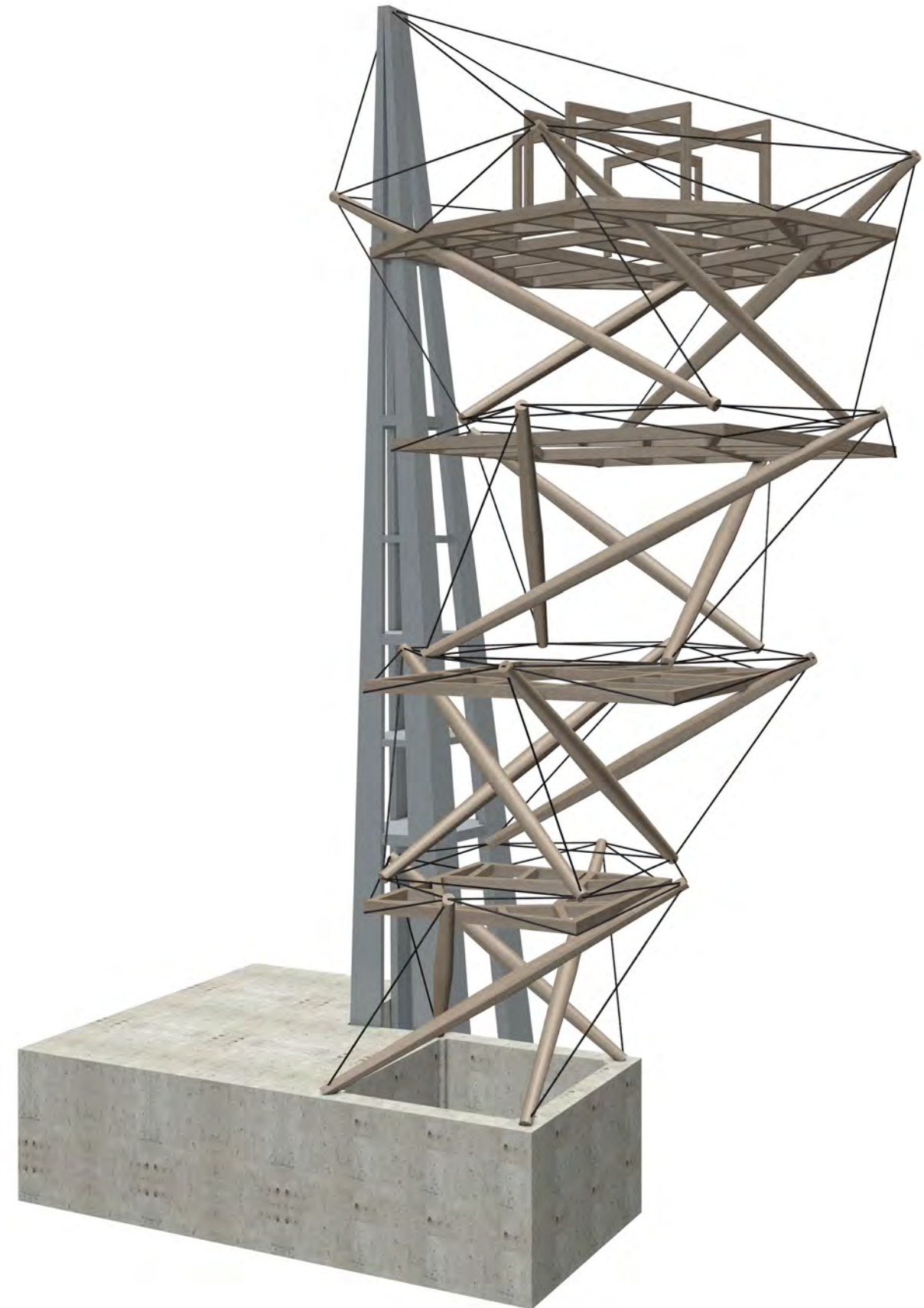


Abb. 150: Aufbau Zelle Vier. Das System ist geschlossen

Hier noch einmal die Tragstruktur, die den Kern der Konstruktion bildet. Auch die Form der Stabilisierungsrahmen, die den Winkeln der unteren Twist-Elemente folgen ist deutlich erkennbar. Auch alle anderen eingesetzten Teile sollten den Winkeln der Druckstäbe folgen.

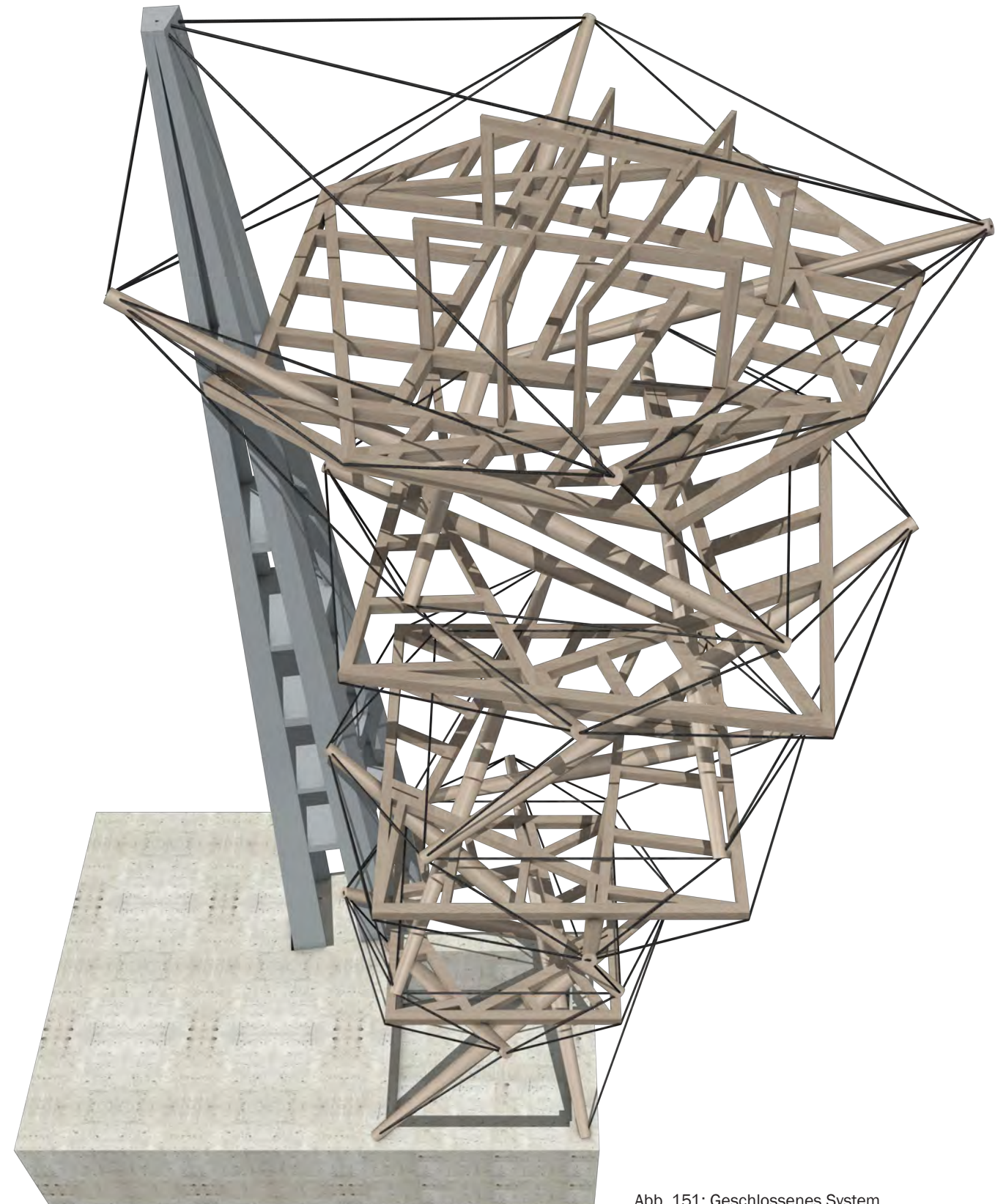


Abb. 151: Geschlossenes System

Die Plattformen

Der Stabilisierungsrahmen funktioniert auch als Basis für die Unterkonstruktion der eingehängten Plattformen. Es handelt sich dabei ebenfalls um Rundhölzer mit einem Durchmesser von 20 cm.

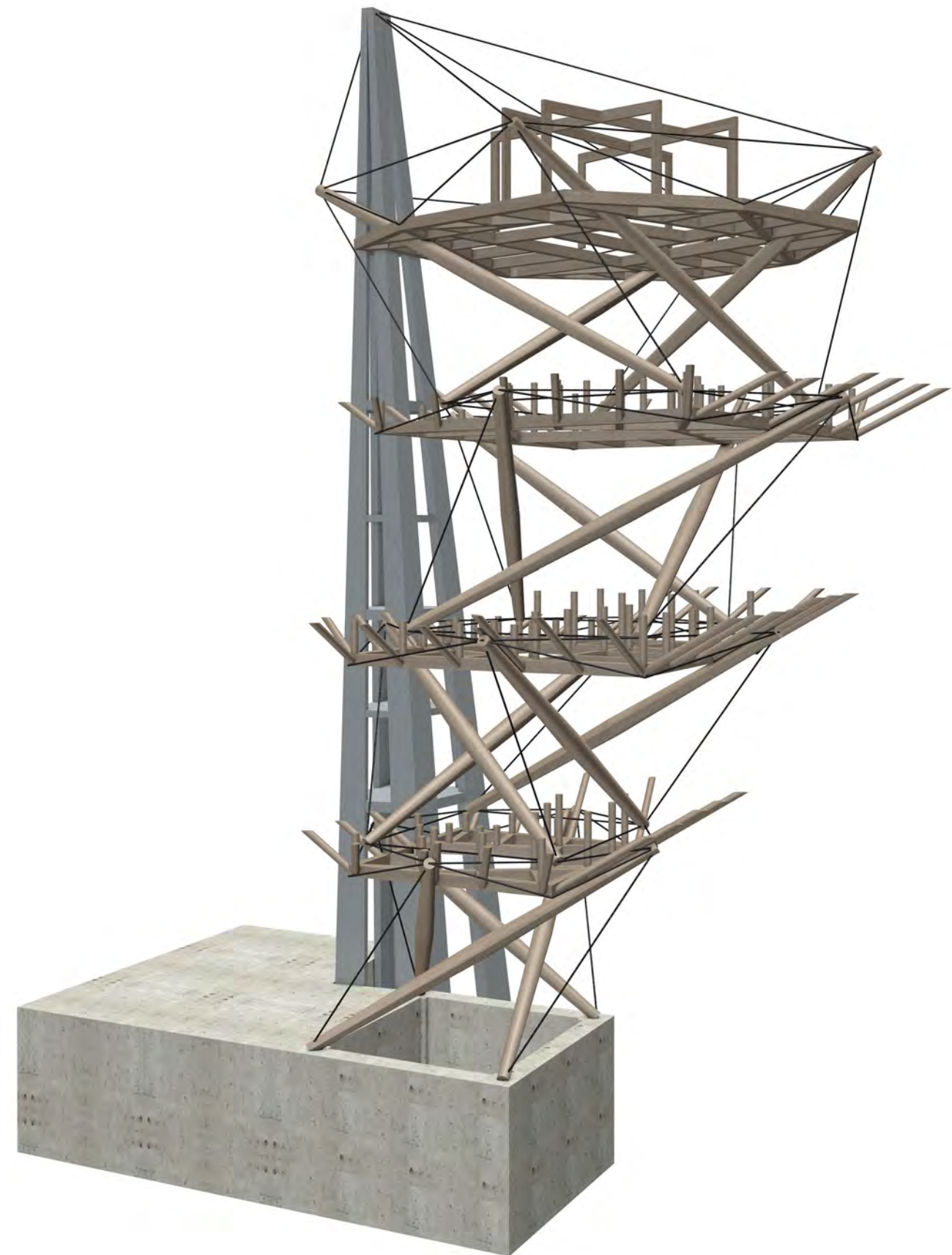


Abb. 152: Unterkonstruktion der Plattformen

Jetzt werden die Plattformen eingehängt. In jedem Stockwerk vier Stück. So entsteht von Plattform zu Plattform immer ein Niveauunterschied von 30 cm. Die Flächen sind zusammengesetzte Kreuzlagenholz-Platten, ausgeführt mit einer Dicke von 30 cm.

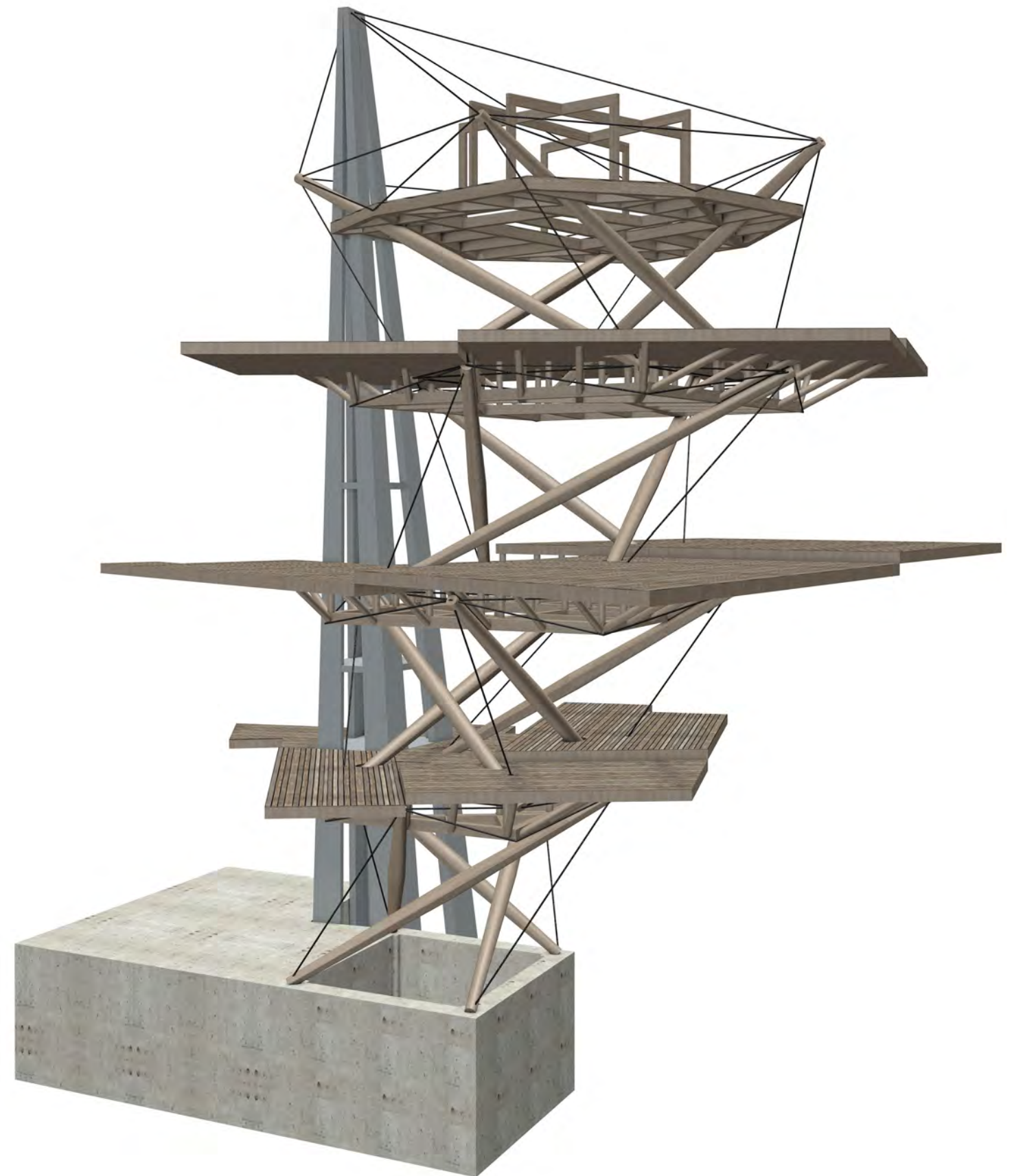


Abb. 153: Eingehängte Plattformen

An den äußeren Seiten der Plattformen werden nun wieder jeweils zwei Zugseile angebracht, die dann an die darüber liegenden Knotenpunkte gehängt werden.

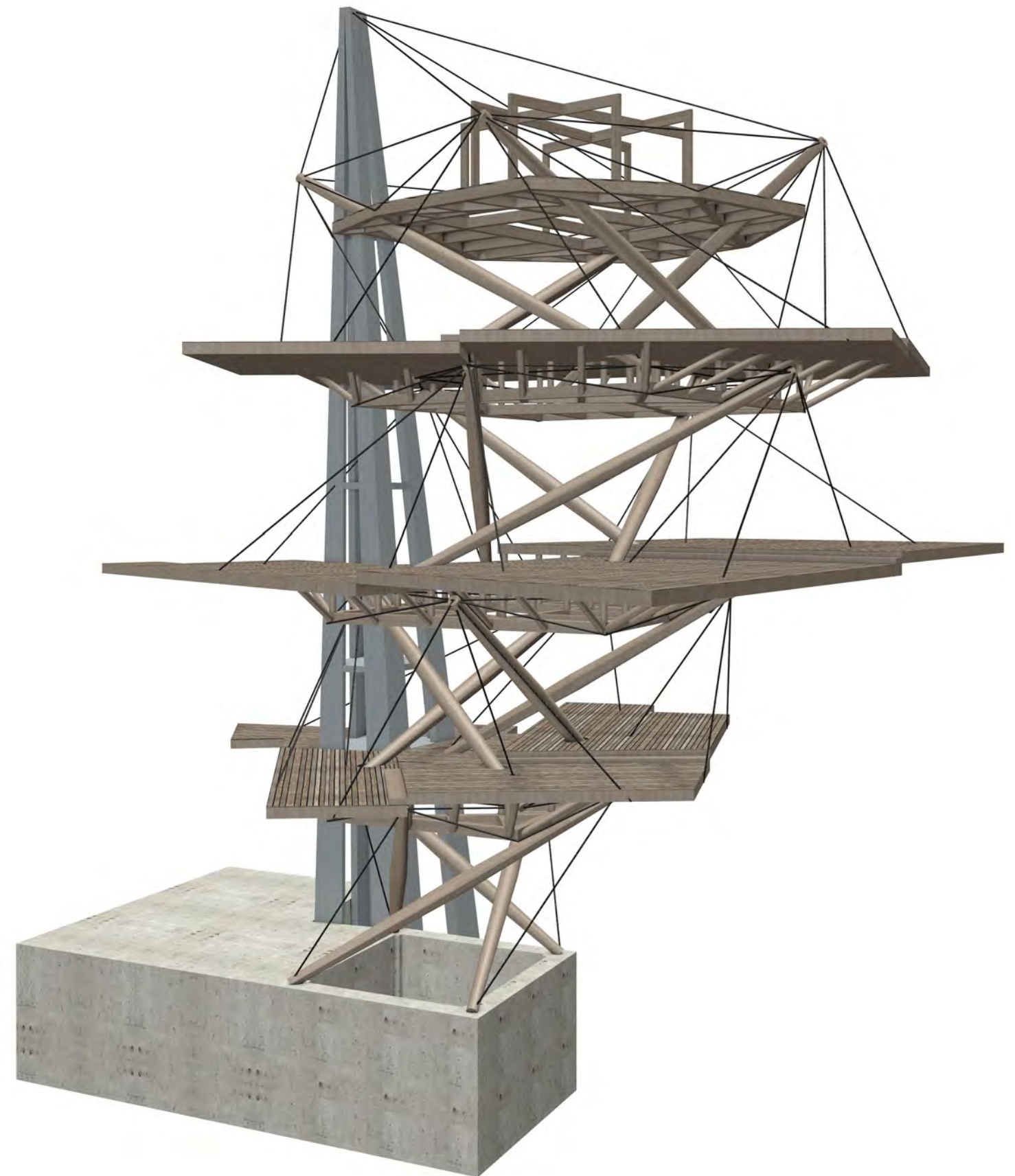


Abb. 154: Aufhängungen der Plattformen

Die Erschließung

Jetzt wird die Treppe eingebaut. Bei der Erschließung spielt der Stützturm eine wesentliche Rolle. Die Stahlstufen hängen an zwei Stellen an einem Zwischenpodest, das vom Stützturm auskragt.

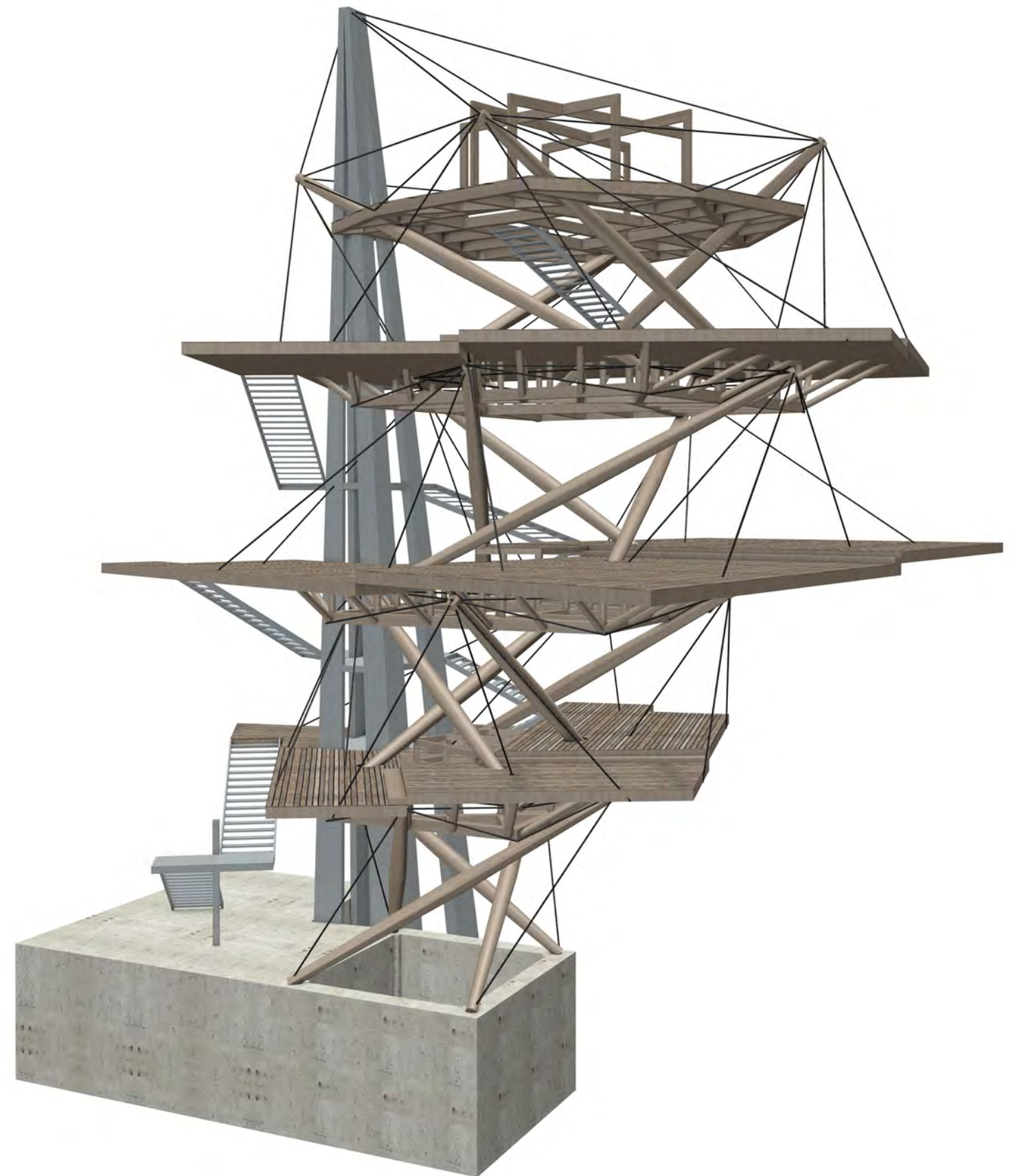


Abb. 155: Erschließung

Die Absturzsicherung

Nach mehreren Versuchen mit verschiedenen Geländen folgte der Versuch, eine horizontale Absturzsicherung an der Vorderseite der Plattformen anzubringen.

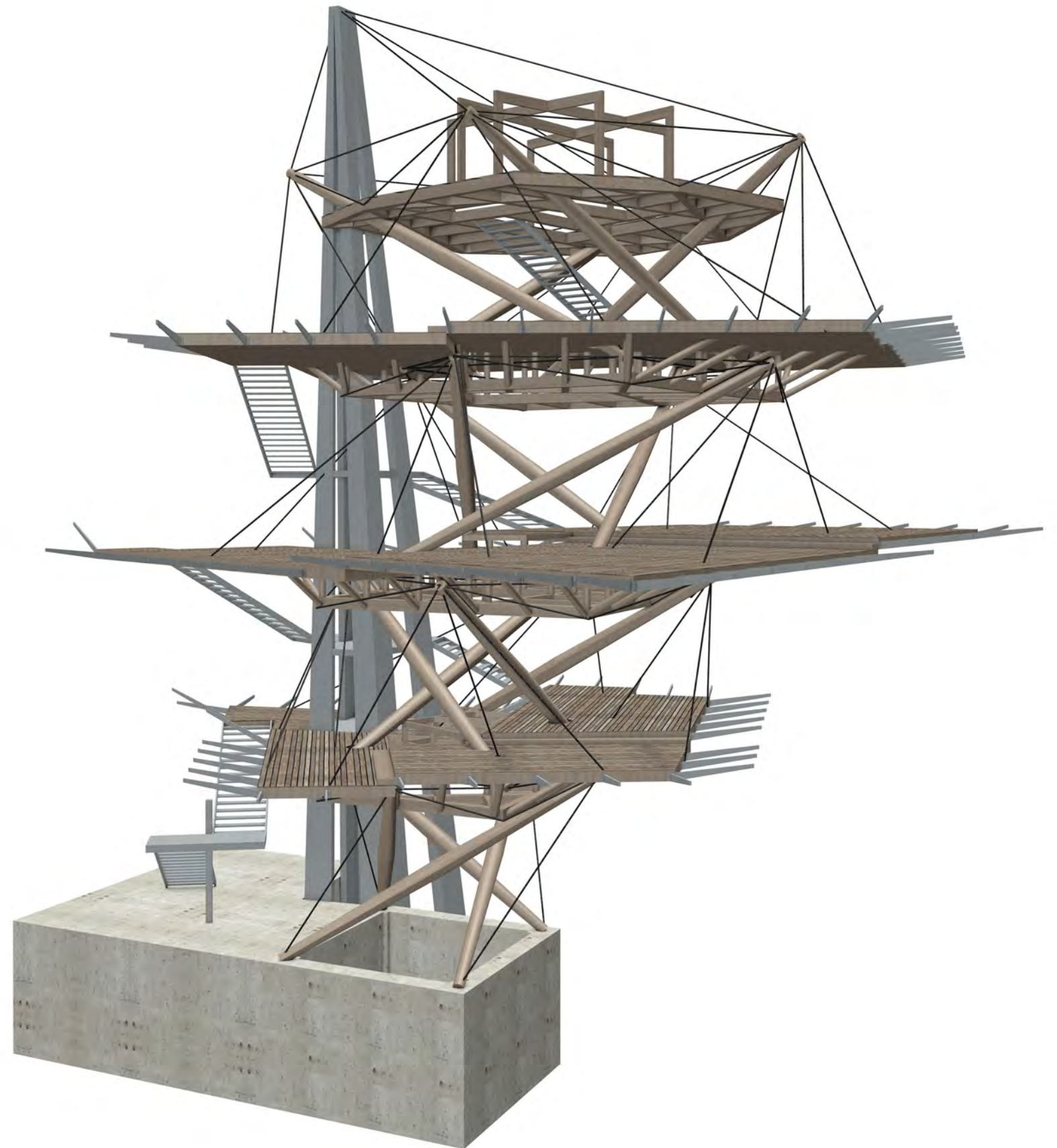


Abb. 156: Absturzsicherung

Zwischen die Stahlkonstruktion wird jetzt noch ein Netz gehängt. Mit dieser Art von Absturzsicherung wird die Höhe deutlich und die Konstruktion wird in ihrer Wirkung unterstrichen.

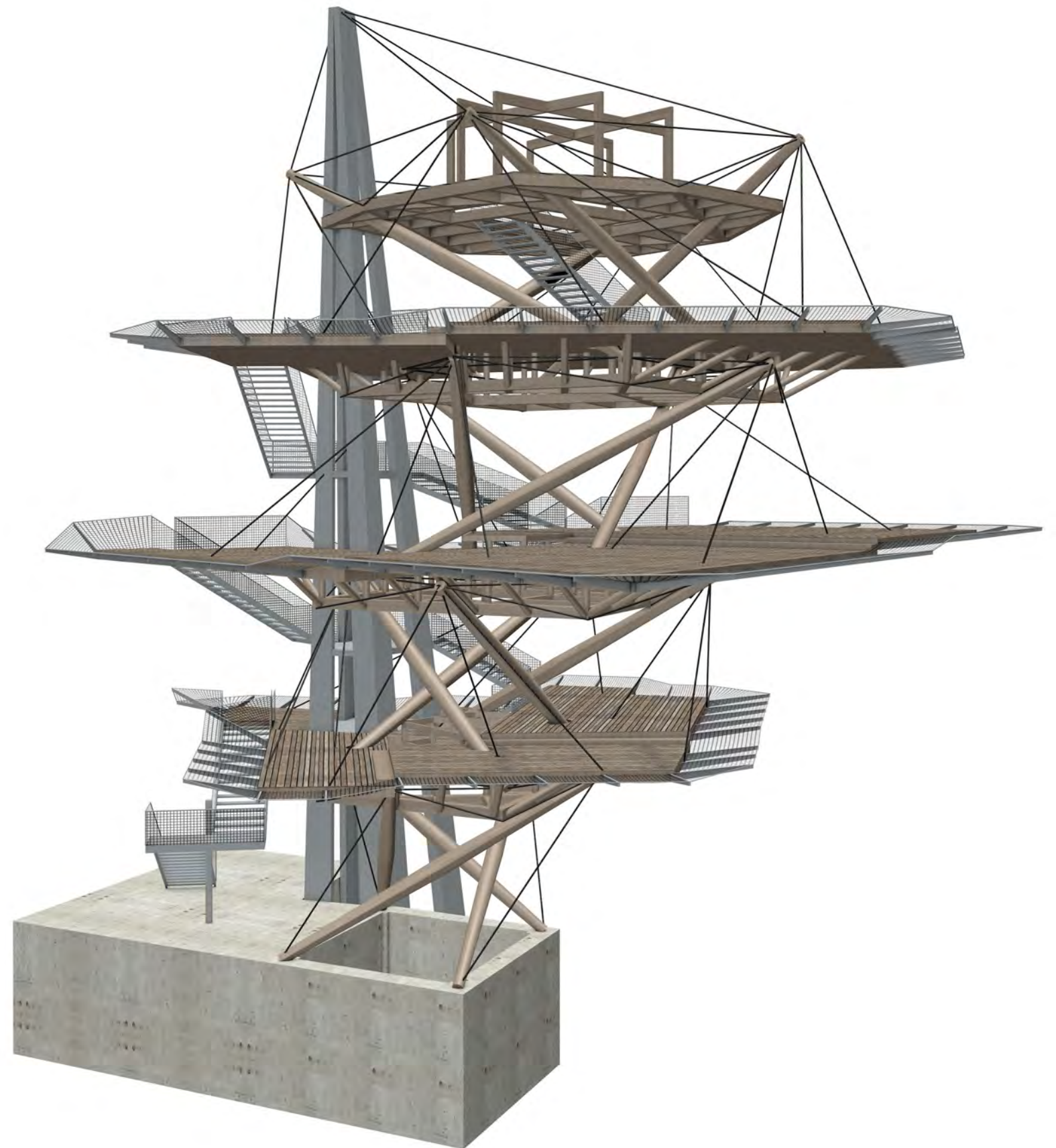


Abb. 157: Absturzsicherung

Verglasung

Als letzter Schritt werden die Löcher in der Mitte verglast.
So hat man im Zentrum der Konstruktion eine Sichtachse durch das ganze Gebäude. Auch der Glaskubus ganz oben wird verglast.

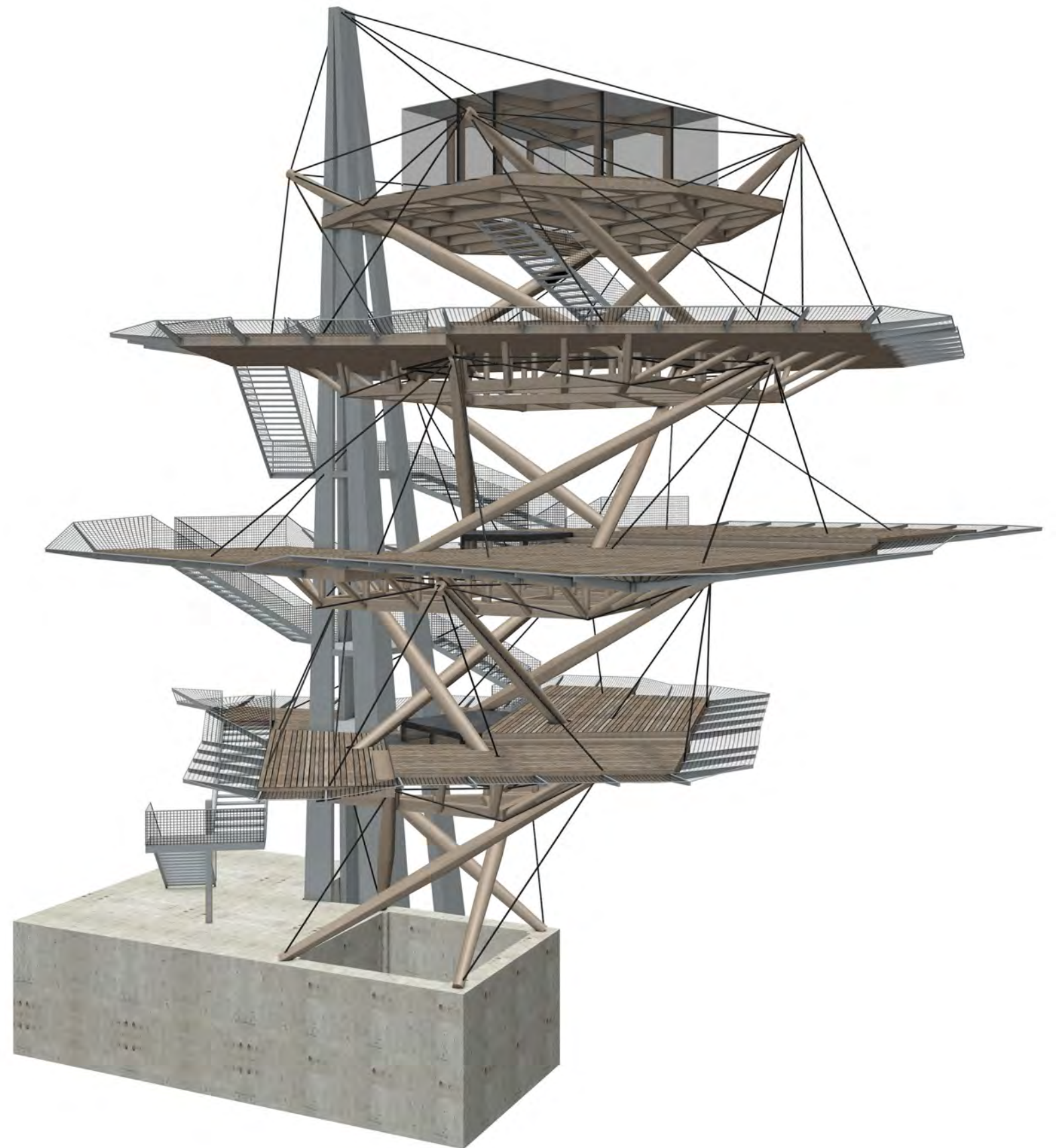


Abb. 158: Verglasung

Als Vergleich noch eine verworfene Version mit einem Glasgeländer.

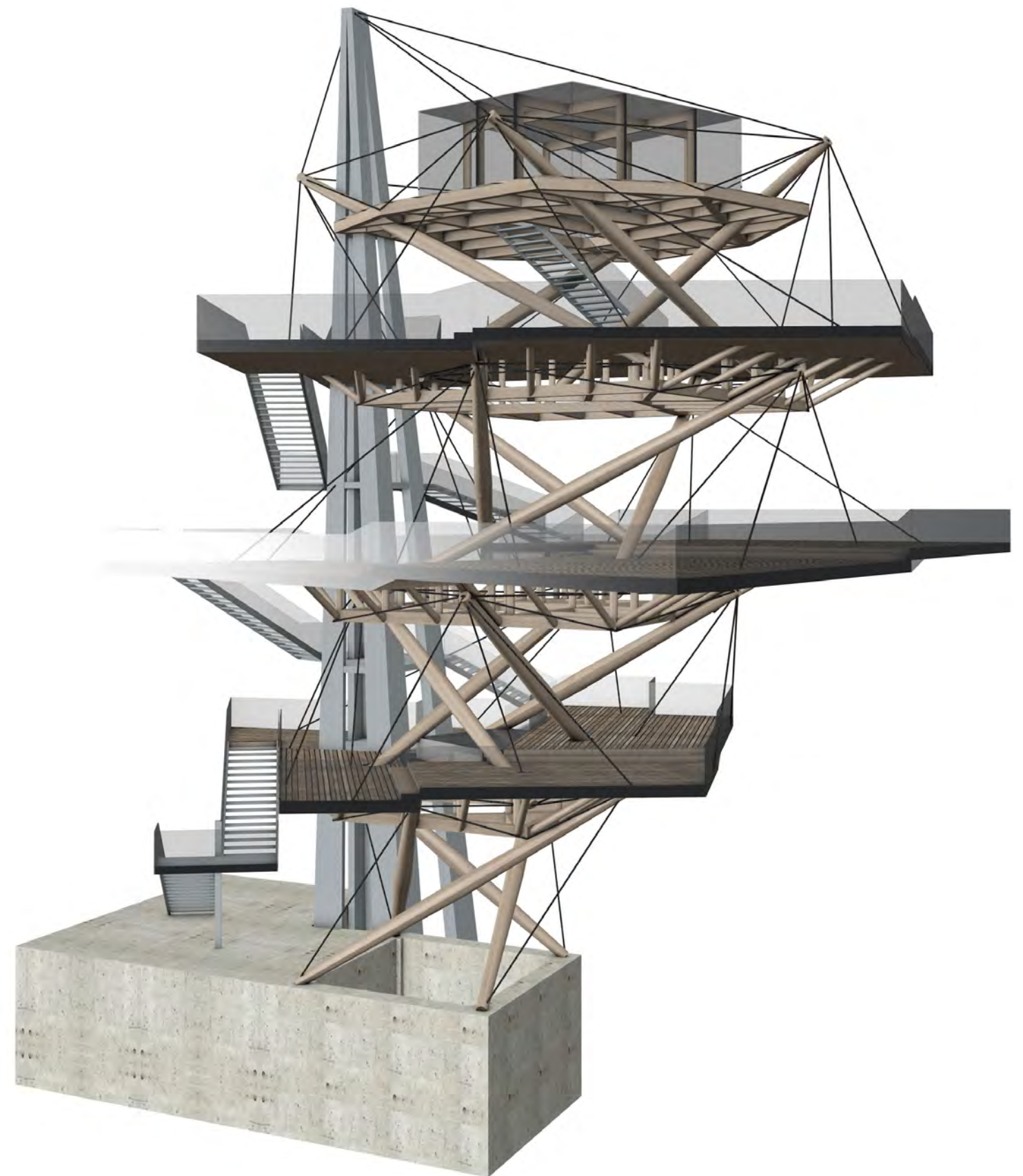


Abb. 159: Glasgeländer



Abb. 160-161: Bodenverankerung

DETAILS

Verankerung im Boden

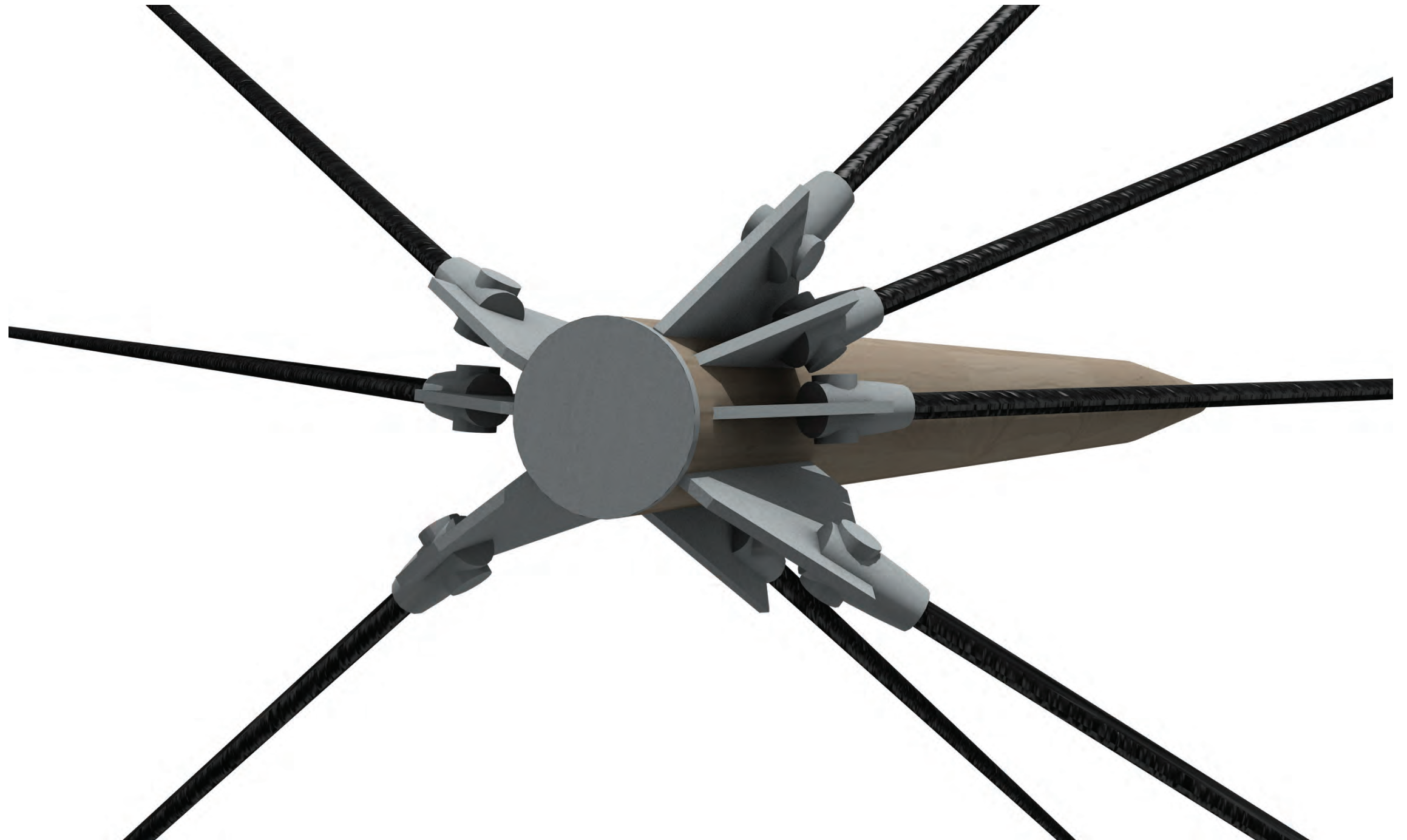
Die Stütze steht auf einem kreuzförmig eingeschlitzten verdübelten Steg, der gleichzeitig die Laschen für die Verbindung mit den Zugseilen bildet. Der Steg ist mit der unteren Stahlplatte verschweißt. Diese ist im Betonfundament verankert.



Knotendetail

Ganz oben, wo der Knoten mit dem Stützturm verbunden ist, kommen acht Seile auf einen Knoten. Auch hier werden miteinander verschweißte Stege als Laschen für die Zugseile eingeschlitzt. An denen hängen dann die Beschlüge mit denen die Seile gespannt werden.

Abb. 162: Knotendetail



Die Plattform-Aufhängung

Die Plattform besteht aus biegesteif miteinander verbundenen Kreuzlagenholz-Platten, die an zwei Punkten mit Seilen abgehängt werden. Die Basis für die Unterkonstruktion ist der Stabilisierungsrahmen.

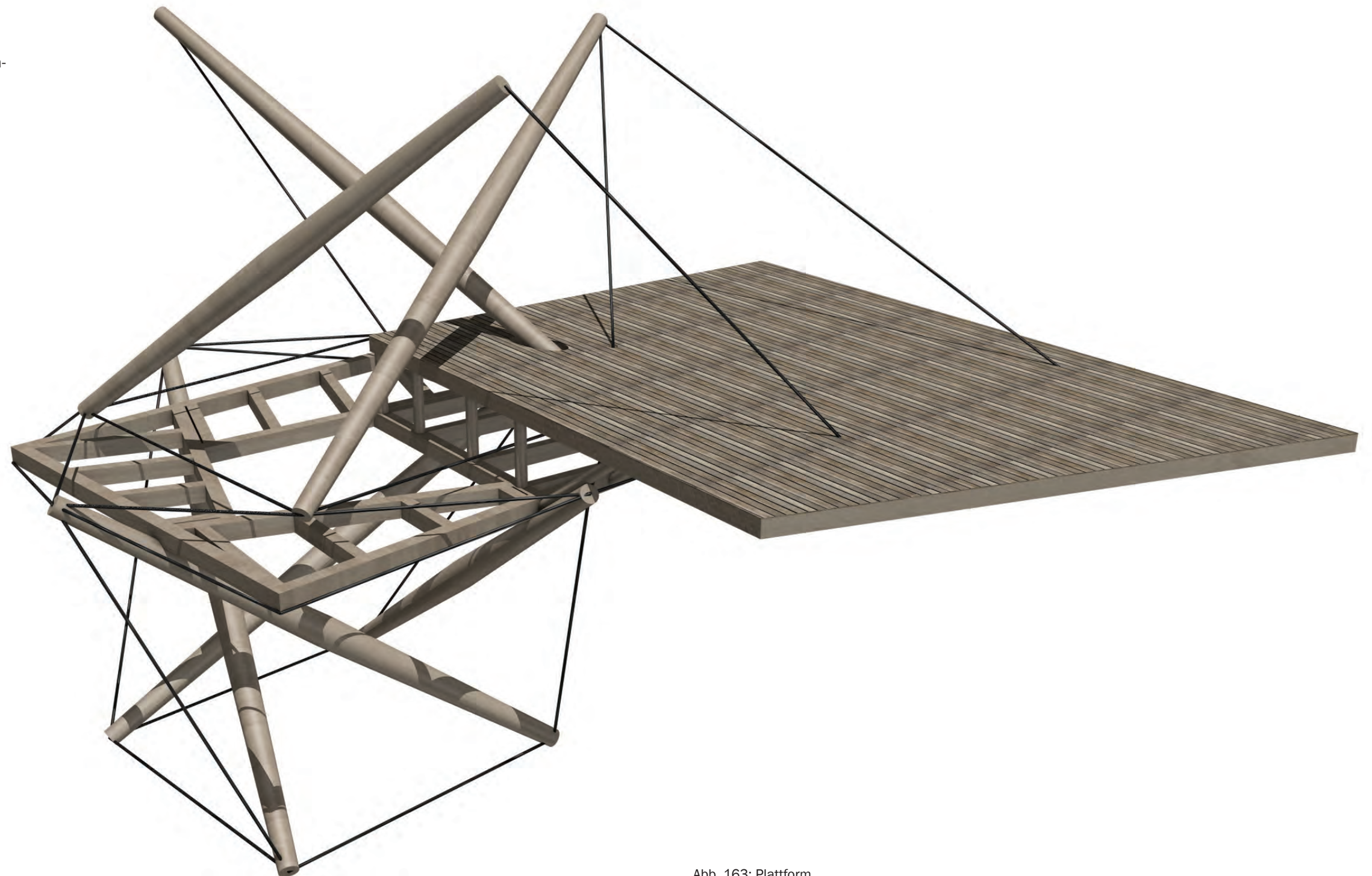


Abb. 163: Plattform

Der Stabilisierungsrahmen

Der Rahmen wird zimmermannsartig mit Einhängezapfen verschraubt.

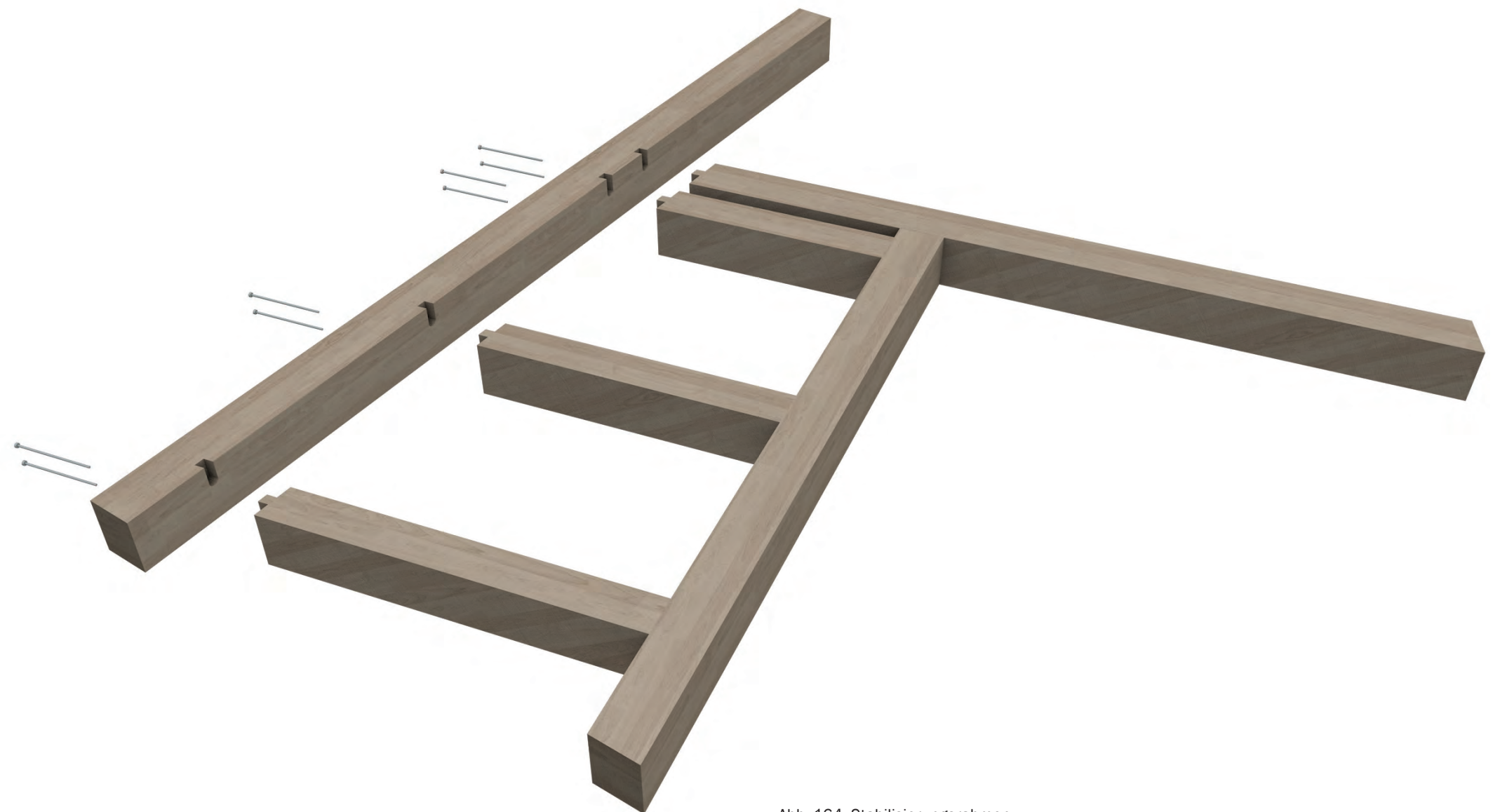


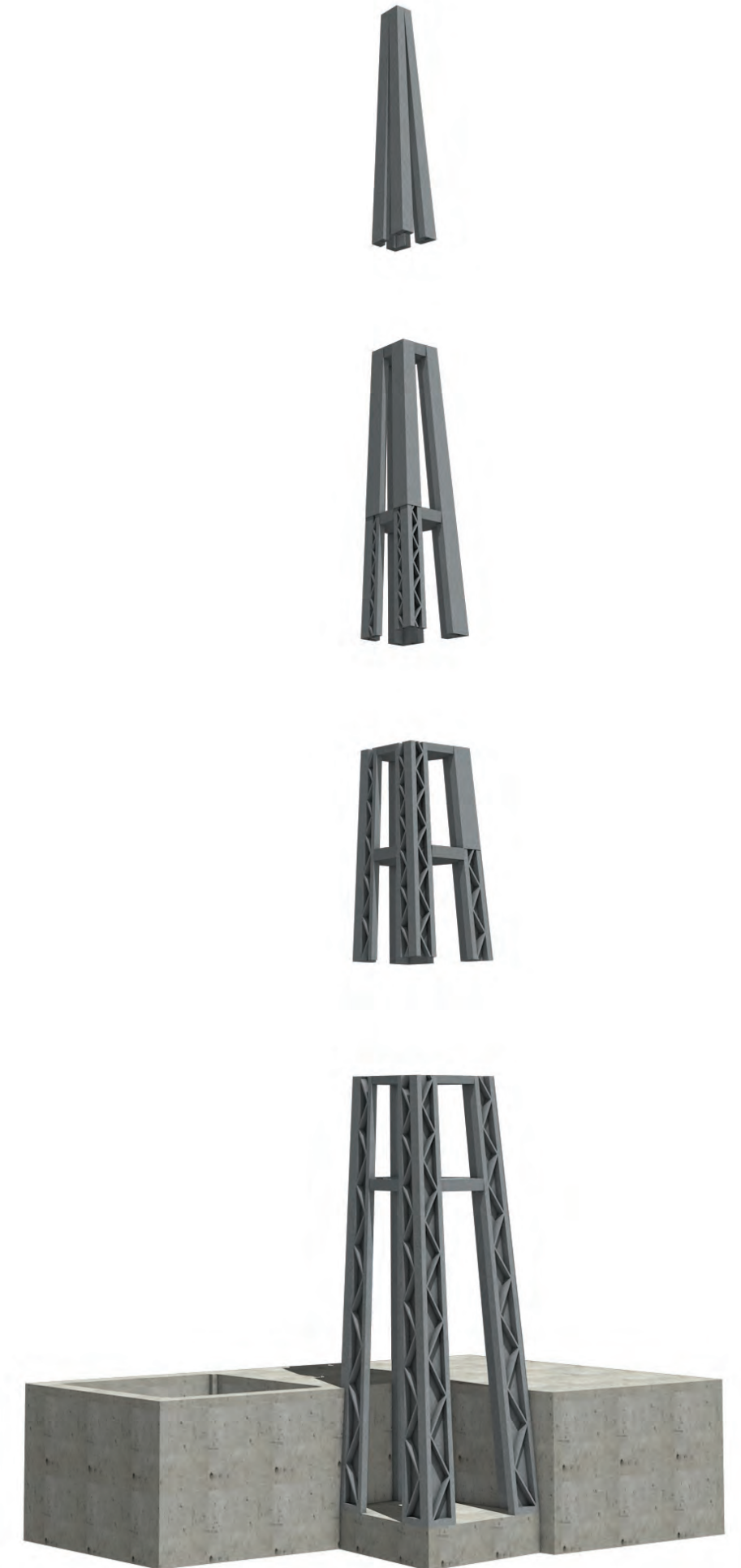
Abb. 164: Stabilisierungsrahmen

Der Stützturm

Der Stützturm besteht aus vier Fachwerksstützen, die an den Ecken jeweils ein Dreieck bilden. In den Ebenen wird das System noch einmal ausgekreuzt. Der Stützturm wächst mit den Twist-Elementen mit.



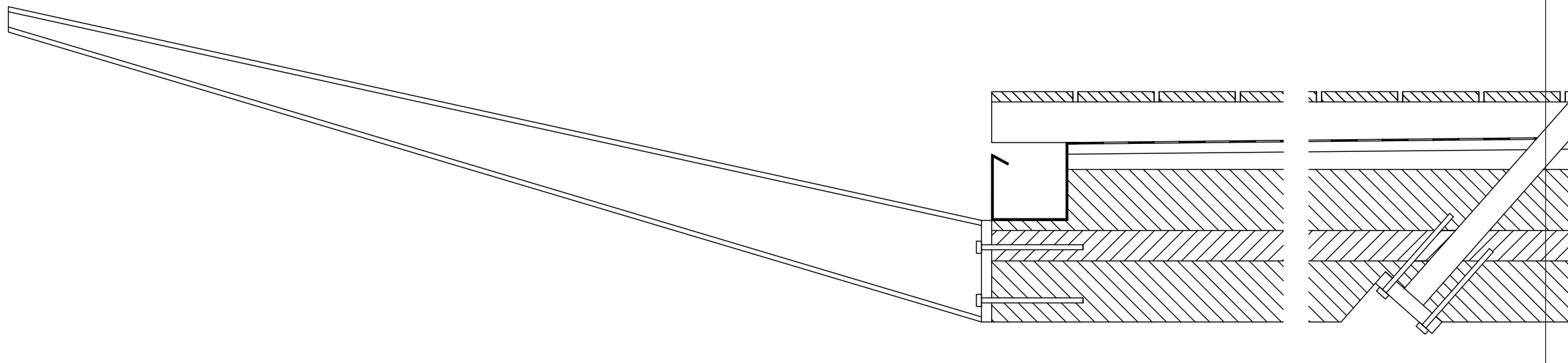
Abb. 165-166: Stützturm



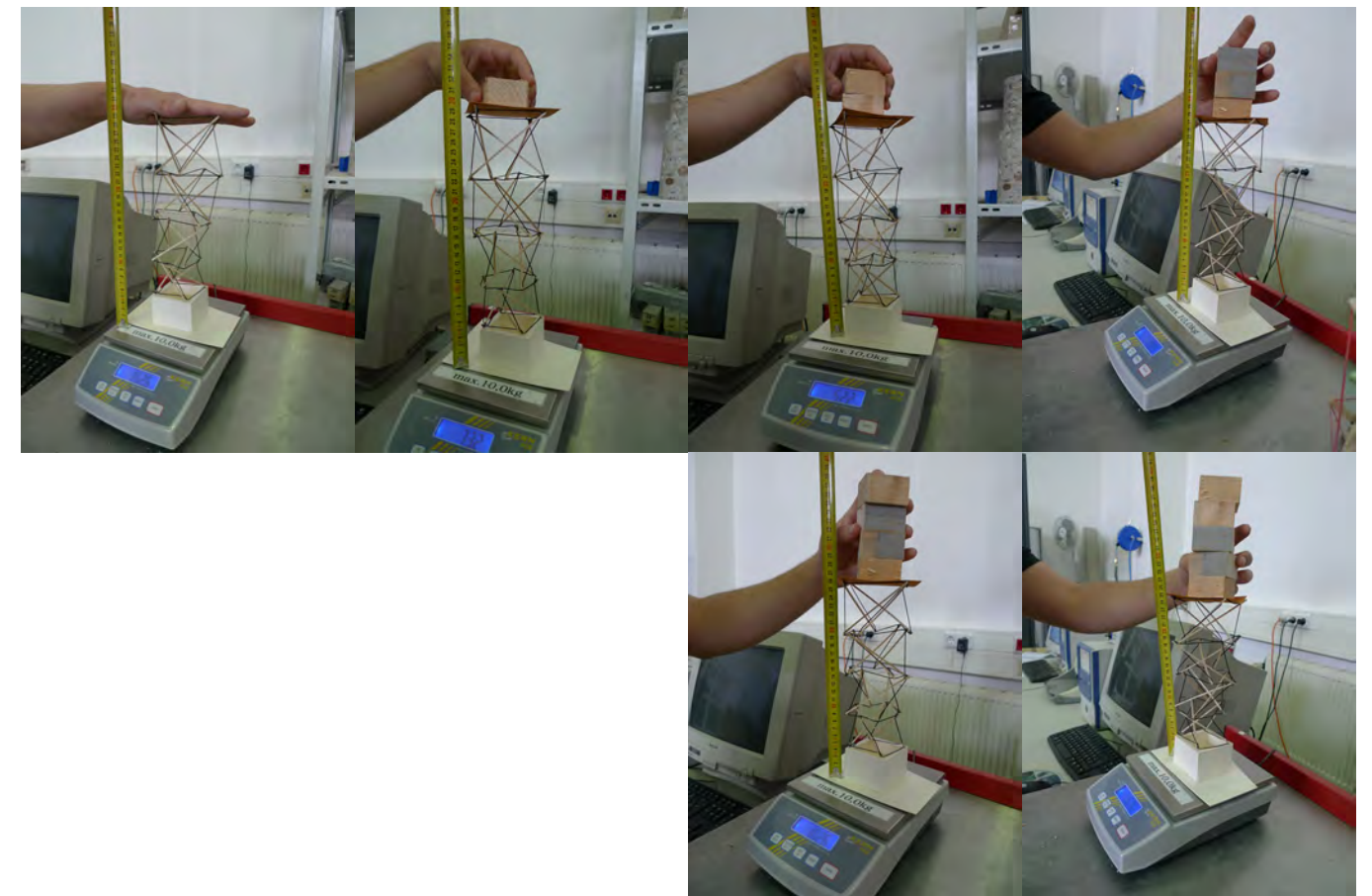
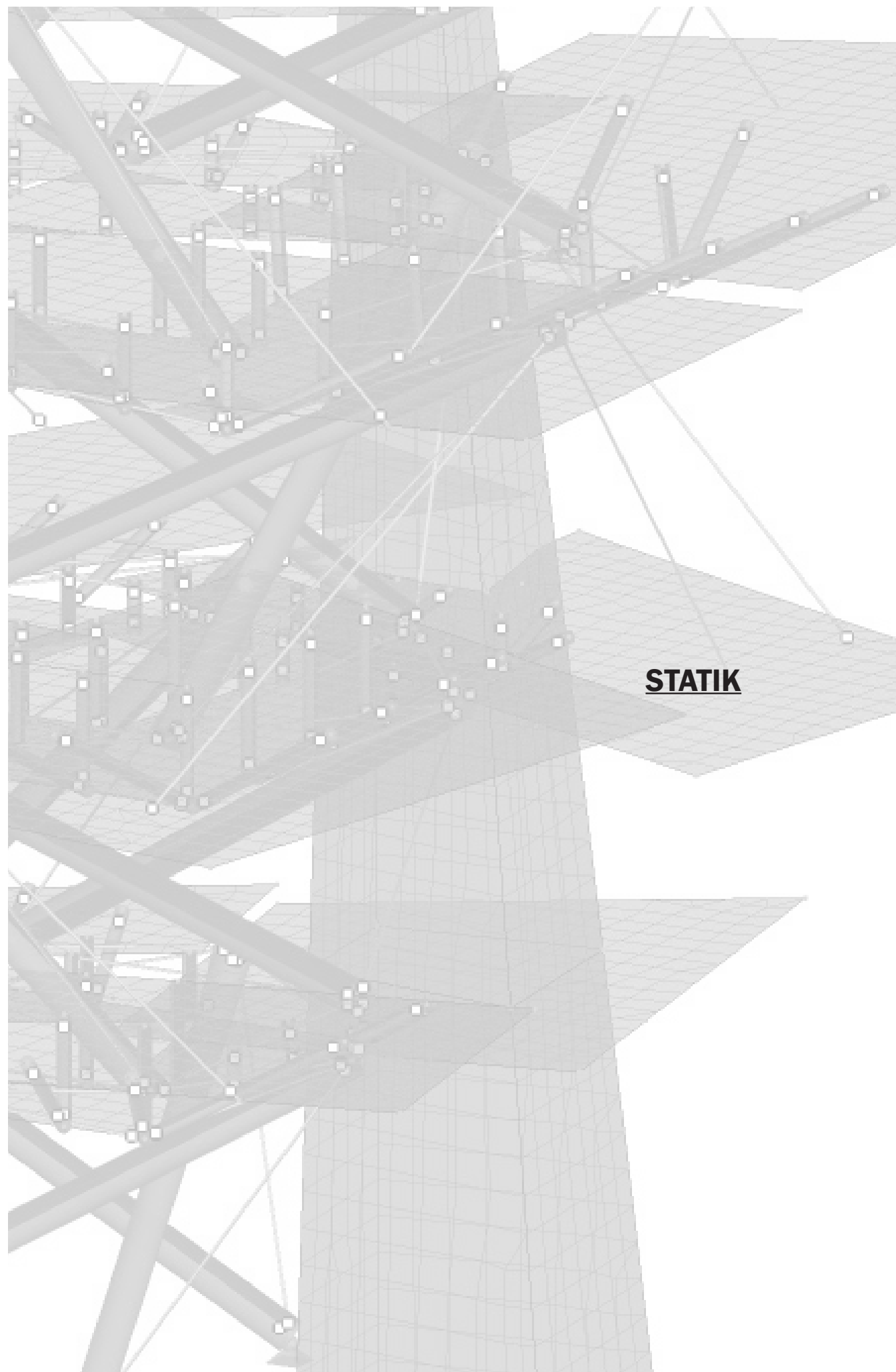
Bodenaufbau

Auf die KLH Platte wird eine weitere Schicht mit 1% Gefälle gelegt, damit das Regenwasser abrinnen kann. Auf der Vorderseite ist die Platte für eine Regenrinne ausgefräst. Die Zugseile sind auf der Unterseite der Platte befestigt.

Bodenbelag
Konterlattung
PVC Folie
OSB Platte
Keilförmige Unterkonstruktion(Gefälle 1%)
KLH Platte 30 cm



M 1:10



Zuerst wurden einige Druckversuche mit Modellen durchgeführt. Hier konnte man eindrucksvoll die Verformung bei Belastung feststellen, die durch Verwendung von elastischen Zugseilen natürlich erheblich war. Bei meiner Konstruktion hängt sehr viel vom Grad der Vorspannung ab. Die Modelle mit den elastischen Gummizugseilen konnte man fast ganz flach zusammenfallen. Wenn man sie wieder entlastete, bewegten sie sich zurück in die Ausgangsposition.

Für eine genauere Prüfung war die Verwendung von Computerprogrammen unerlässlich.

Also wurde die Struktur in den Computer geladen und berechnet. Die Ergebnisse werden in den nächsten Seiten kurz beschrieben.



Abb. 167-174: Druckversuche

Parameter für die Berechnung

Material							
Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm2]	Schubmodul G [kN/cm2]	Querdehnz. μ [-]	Sp. Gewicht γ [kN/m3]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Beiwert gM [-]
11	Nadelholz C30 DIN	1200.00	75.00	0.000	5.00	5.0000E-06	1.300
15	Nadelholz C30 DIN	1200.00	75.00	0.000	5.00	5.0000E-06	1.300
16	Spannstabstahl St 900/1030	20500.00	7900.00	0.300	78.50	1.0000E-05	1.000
17	Glulam Timber GL24h_mod	3160.00	72.00	0.000	3.70	5.0000E-06	1.250

Querschnitte

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	IT [cm4] A [cm2]	Iy [cm4] Ay [cm2]	Iz [cm4] Az [cm2]
3	Kreis 200	11	15707.96 314.16	7853.98 266.24	7853.98 266.24
6	Kreis 500	15	613592.31 1963.50	306796.16 1663.98	306796.17 1663.98
7	RD 50	16	61.36 19.60	30.68 16.46	30.68 16.46

Lastfälle

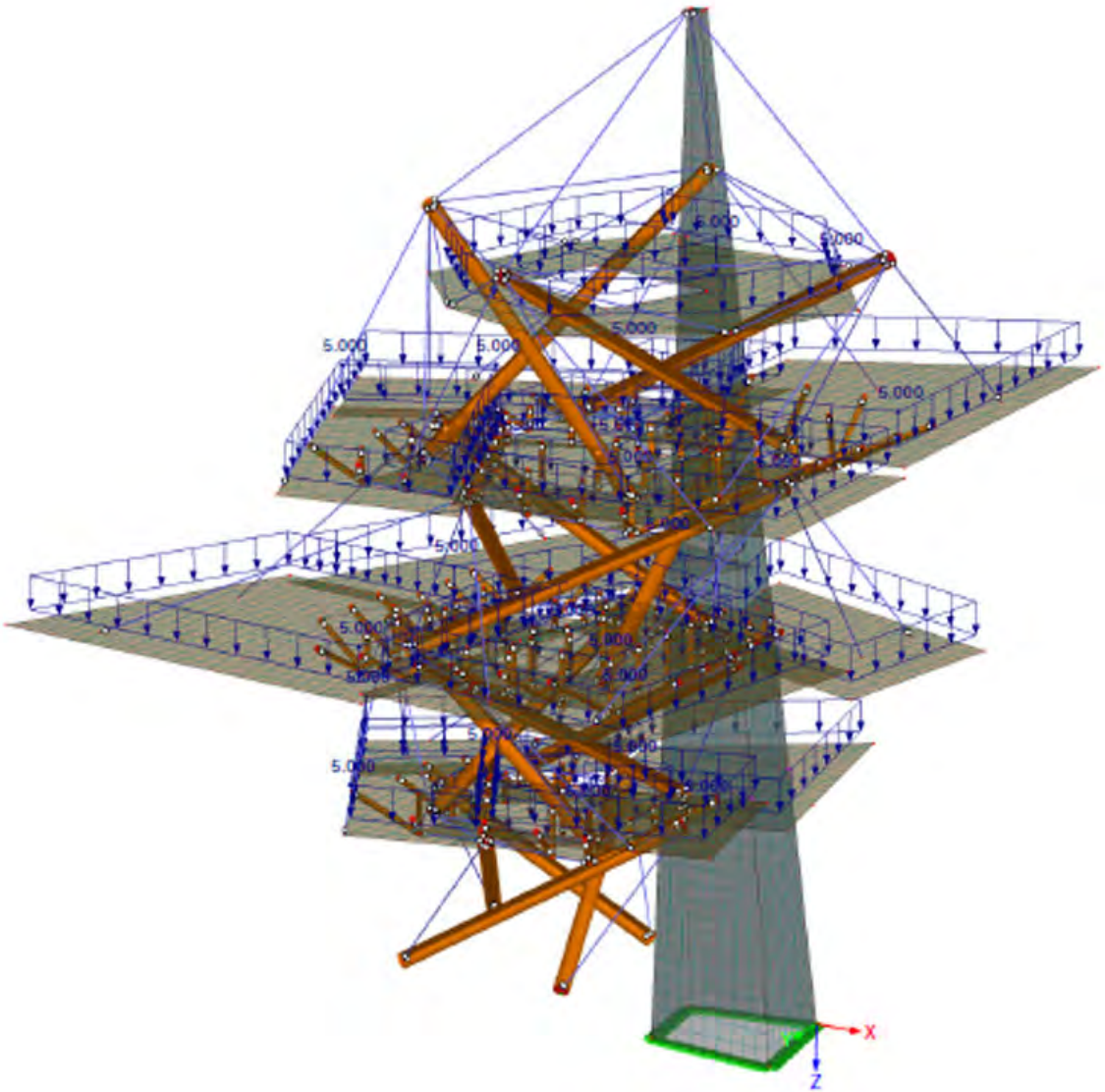
LF-Nr.	LF-Bezeichnung	LF-Faktor	Eigenschaften des Lastfalls	Eigengewicht	Berechnungs-Theorie
1	Eigengewicht	1.0000	Ständig	1.00	I. Ordnung
2	Nutzlast_1	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
3	Nutzlast_2	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
4	Nutzlast_3	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
5	Nutzlast_4	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
6	Nutzlast_5	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
7	Nutzlast_6	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
8	Nutzlast_7	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
9	Nutzlast_8	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
10	Nutzlast_9	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
11	Nutzlast_10	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
12	Nutzlast_11	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
13	Nutzlast_12	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
14	Nutzlast_13	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
15	Nutzlast_14	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
16	Nutzlast_15	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
17	Nutzlast_16	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
18	Wind_X	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
19	Wind_Y	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung

Lastfallkombinationen

LK Nr.	LK-Bezeichnung	Kombinationskriterium
1	LC_1	1.35*LF1/S + 1.5*LF2 + 1.5*LF3 + 1.5*LF4 + 1.5*LF5 + 1.5*LF6 + 1.5*LF7 + 1.5*LF8 + 1.5*LF9 + 1.5*LF10 + 1.5*LF11 + 1.5*LF12 + 1.5*LF13 + 1.5*LF14 + 1.5*LF15 + 1.5*LF16 + 1.5*LF17 + 1.5*LF18
2	LC_2	1.35*LF1/S + 1.5*LF2 + 1.5*LF3 + 1.5*LF4 + 1.5*LF5 + 1.5*LF6 + 1.5*LF7 + 1.5*LF8 + 1.5*LF9 + 1.5*LF10 + 1.5*LF11 + 1.5*LF12 + 1.5*LF13 + 1.5*LF14 + 1.5*LF15 + 1.5*LF16 + 1.5*LF17 + 1.5*LF19

LG1: NUTZLAST

Isometrie



Für die Plattformen wird die maximal Nutzlast von 5 kN/m² angenommen. Der Stabilisierungsrahmen wird hier ebenfalls als Plattform ausgeführt. Deshalb sind es 16 Lastfälle mit Flächenlast.

Abb. 175: Nutzlasten

Ergebnisse

Die Zugseile der Tensegrity-Zellen sind mit 0.004% ihrer Länge vorgespannt. Die äußeren Seile sind nur auf Zug beansprucht, haben aber keine Vorspannung. Der wichtigste Beweis der Berechnung ist, dass das System mit allen Eigengewichten und Nutzlasten stabil ist. In den unteren Bildern werden die Kräfte angezeigt. Die Druckstäbe müssen enormen Kräften von bis zu 300 Tonnen standhalten. Die Tragkraft der 50 cm dicken Holzstäbe wird bis zu 95% ausgenutzt. Auch in den Zugseilen entstehen sehr hohe Kräfte.

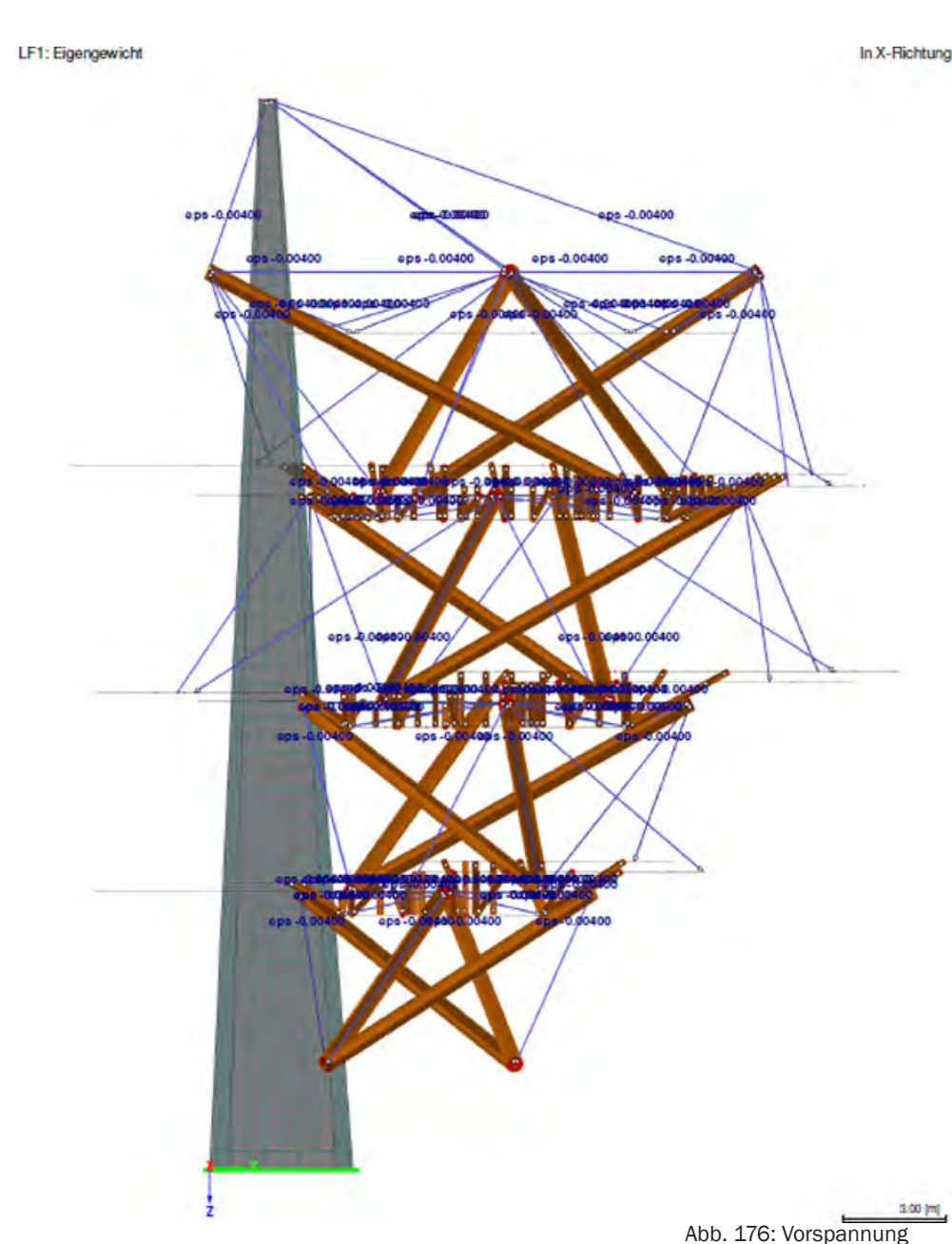


Abb. 176: Vorspannung

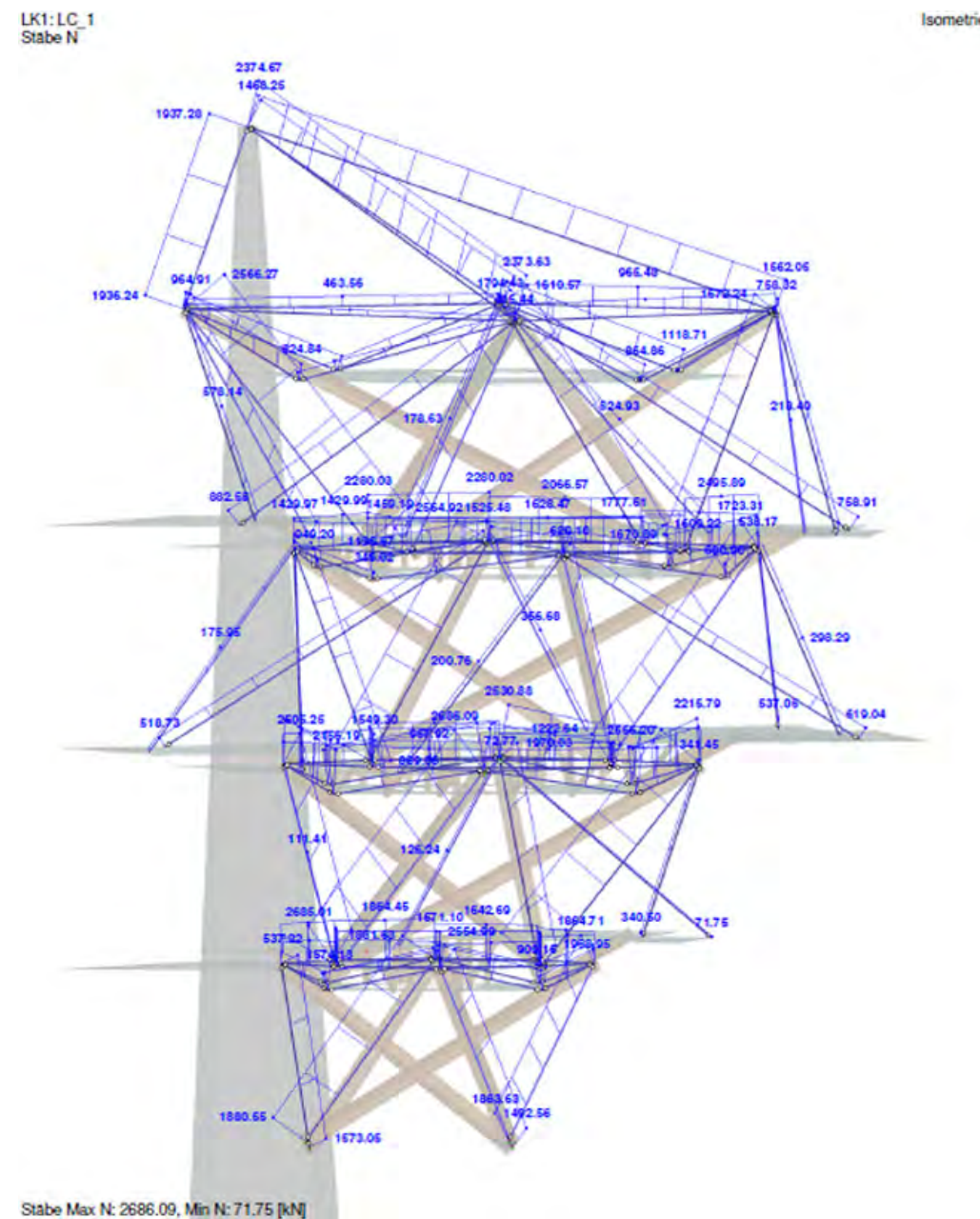


Abb. 177: Zugkräfte

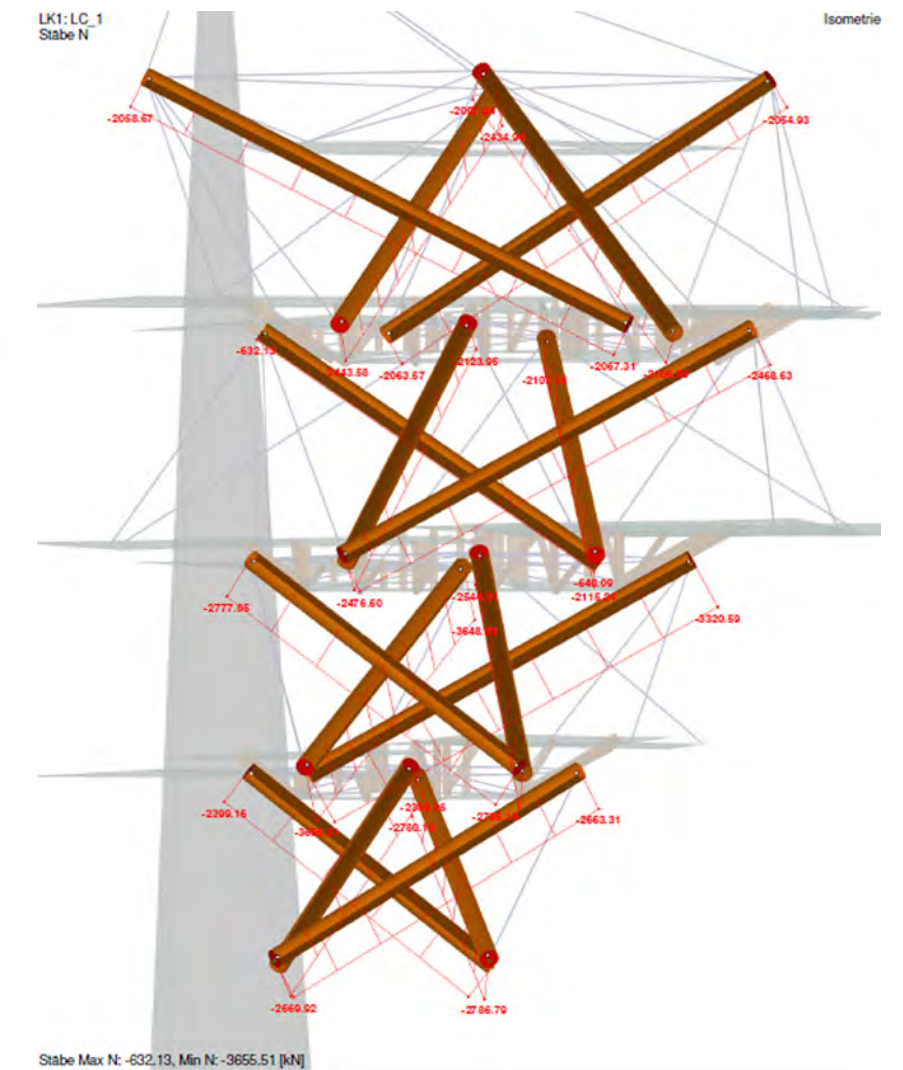
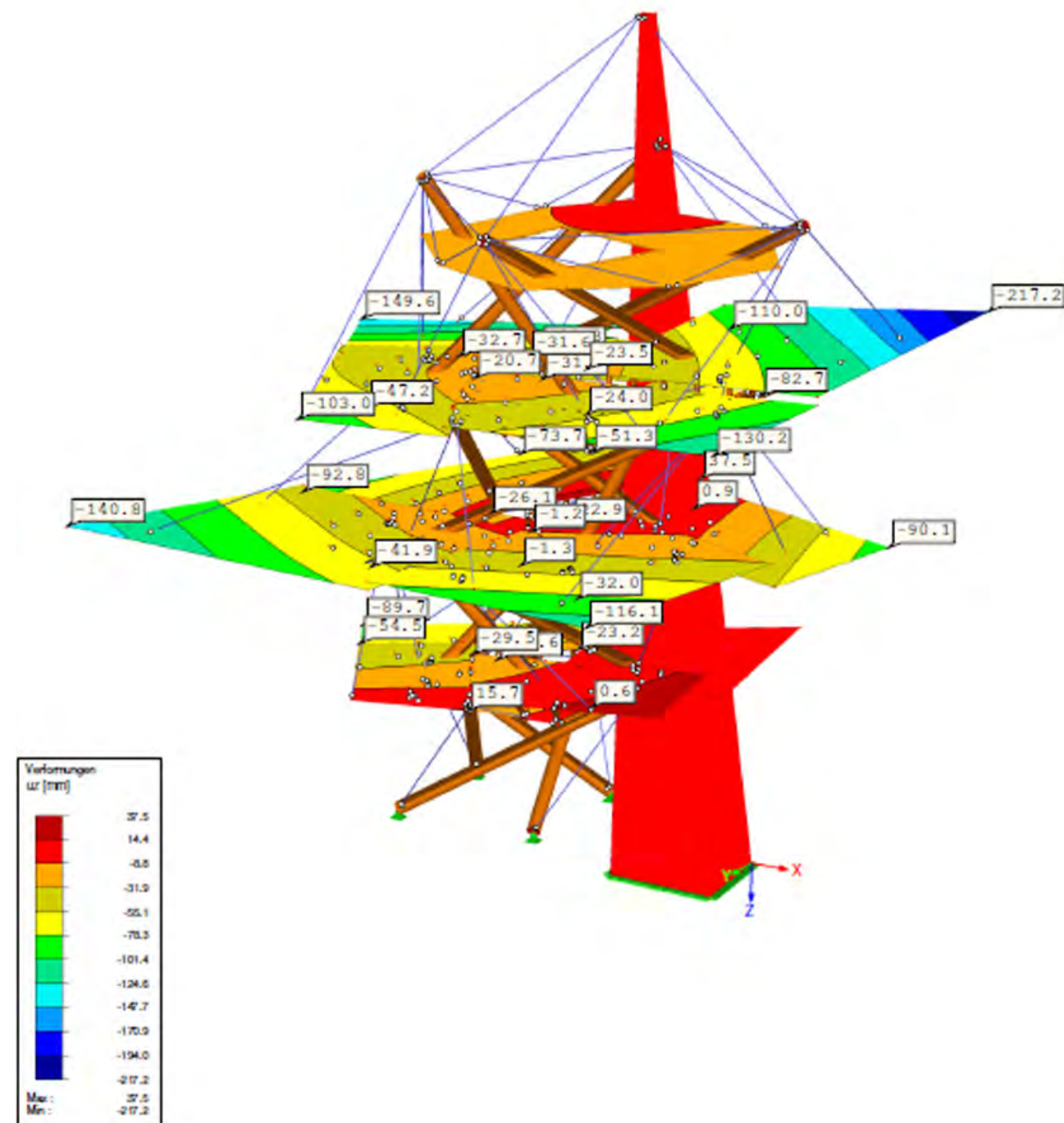


Abb. 178: Druckkräfte

LF1: Eigengewicht
u-Z

Isometrie

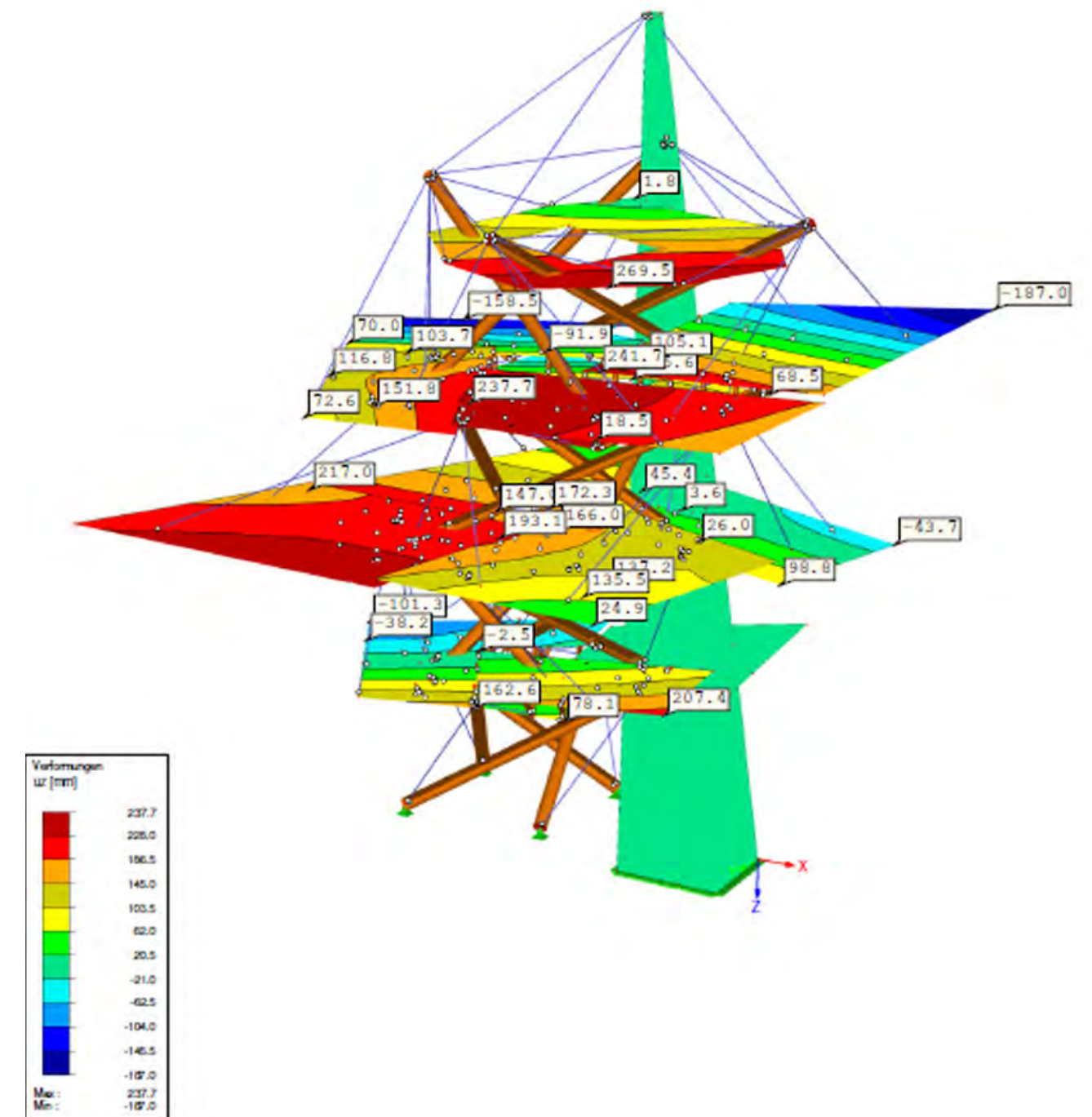


Max u-Z: 37.5, Min u-Z: -217.2 [mm]
Filter Stäbe: none
Faktor für Verformungen: 0.10
Werte: u-Z [mm]

Abb. 179: Verformung in Folge
Eigengewicht

LK1: LC_1
u-Z

Isometrie



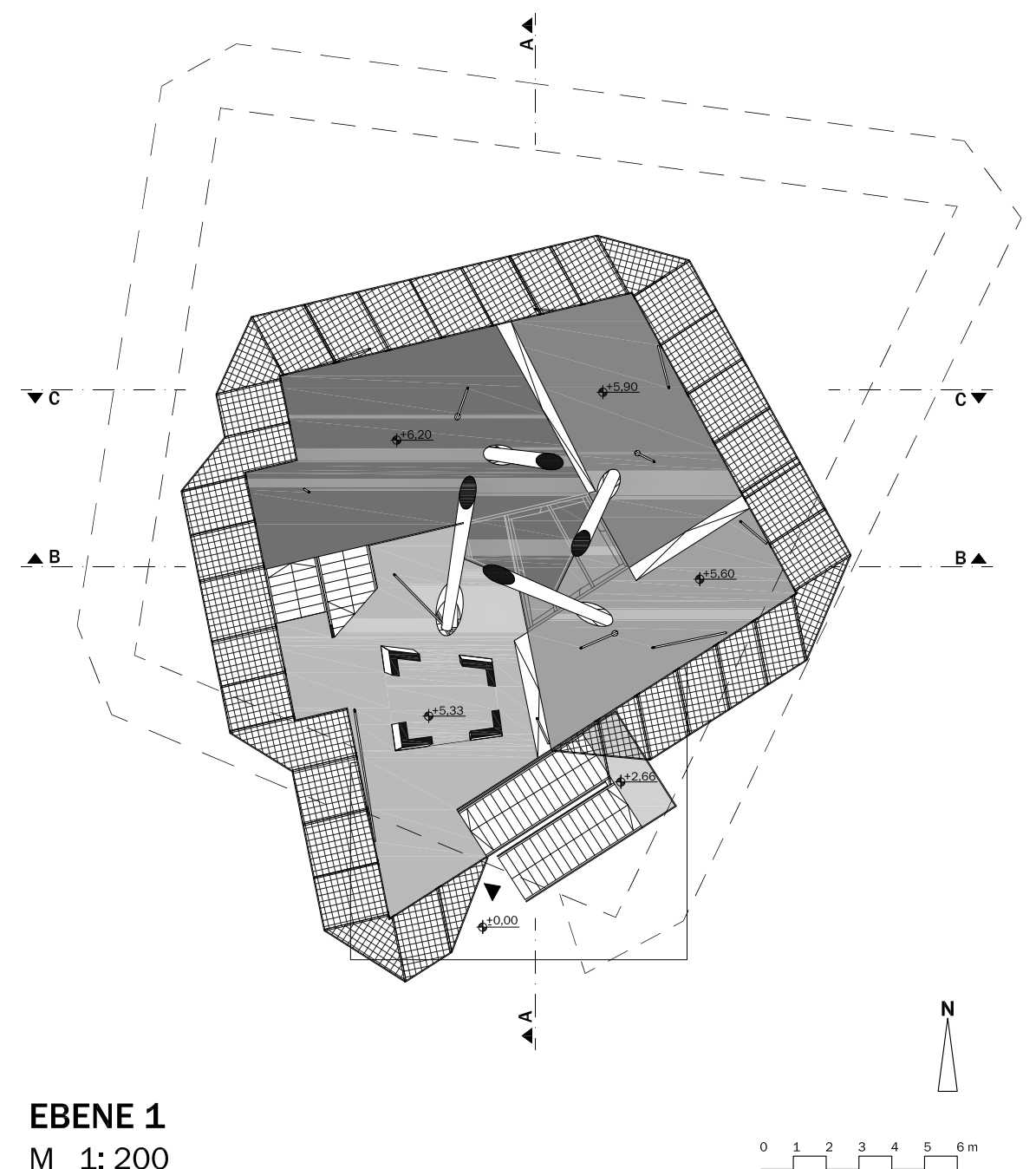
Max u-Z: 237.7, Min u-Z: -187.0 [mm]
Filter Stäbe: none
Faktor für Verformungen: 0.10
Werte: u-Z [mm]

Abb. 180: Verformung in Folge
Eigengewicht und Nutzlasten

PLANMATERIAL

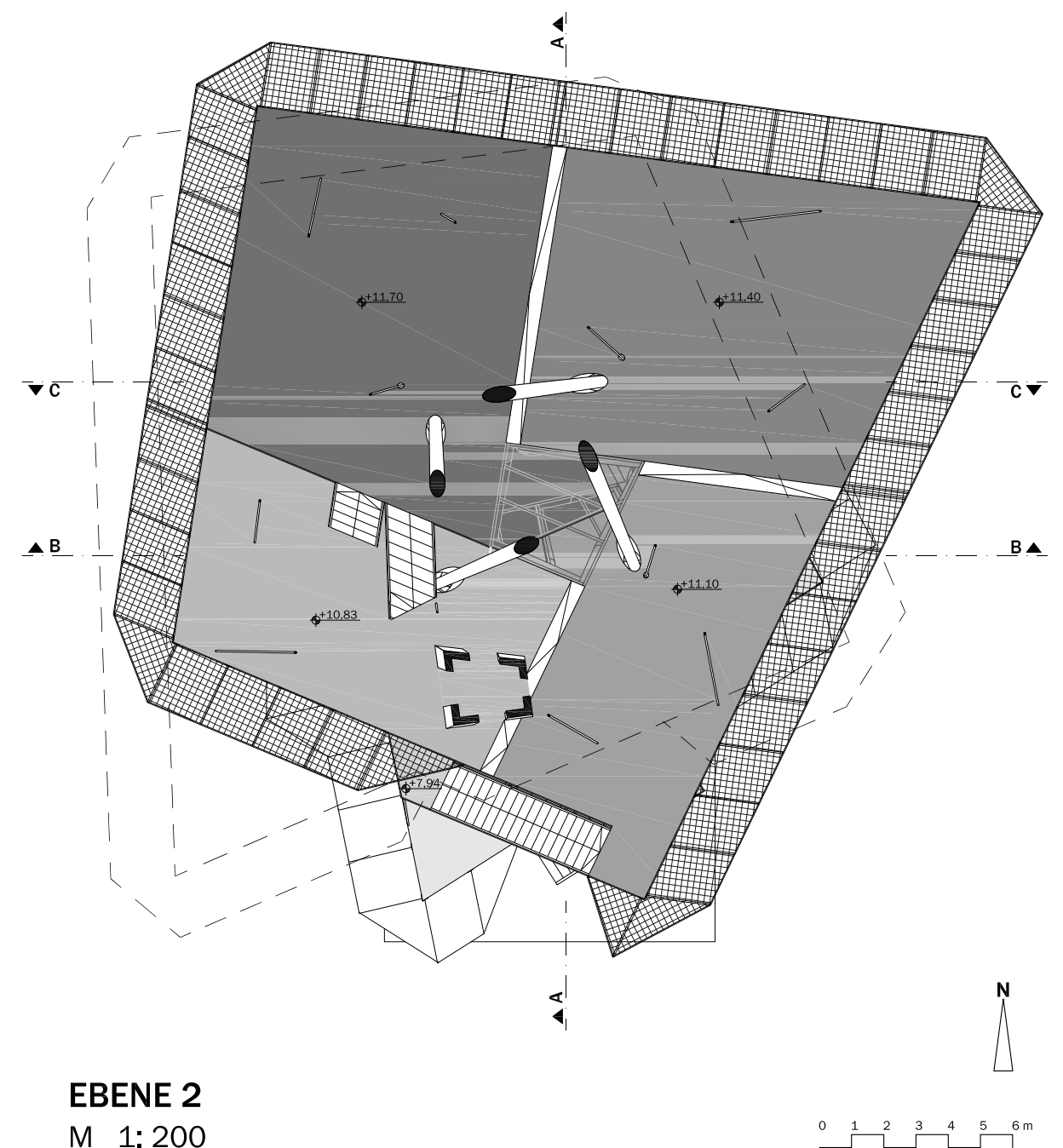
GRUNDRISSE

Ebene 1

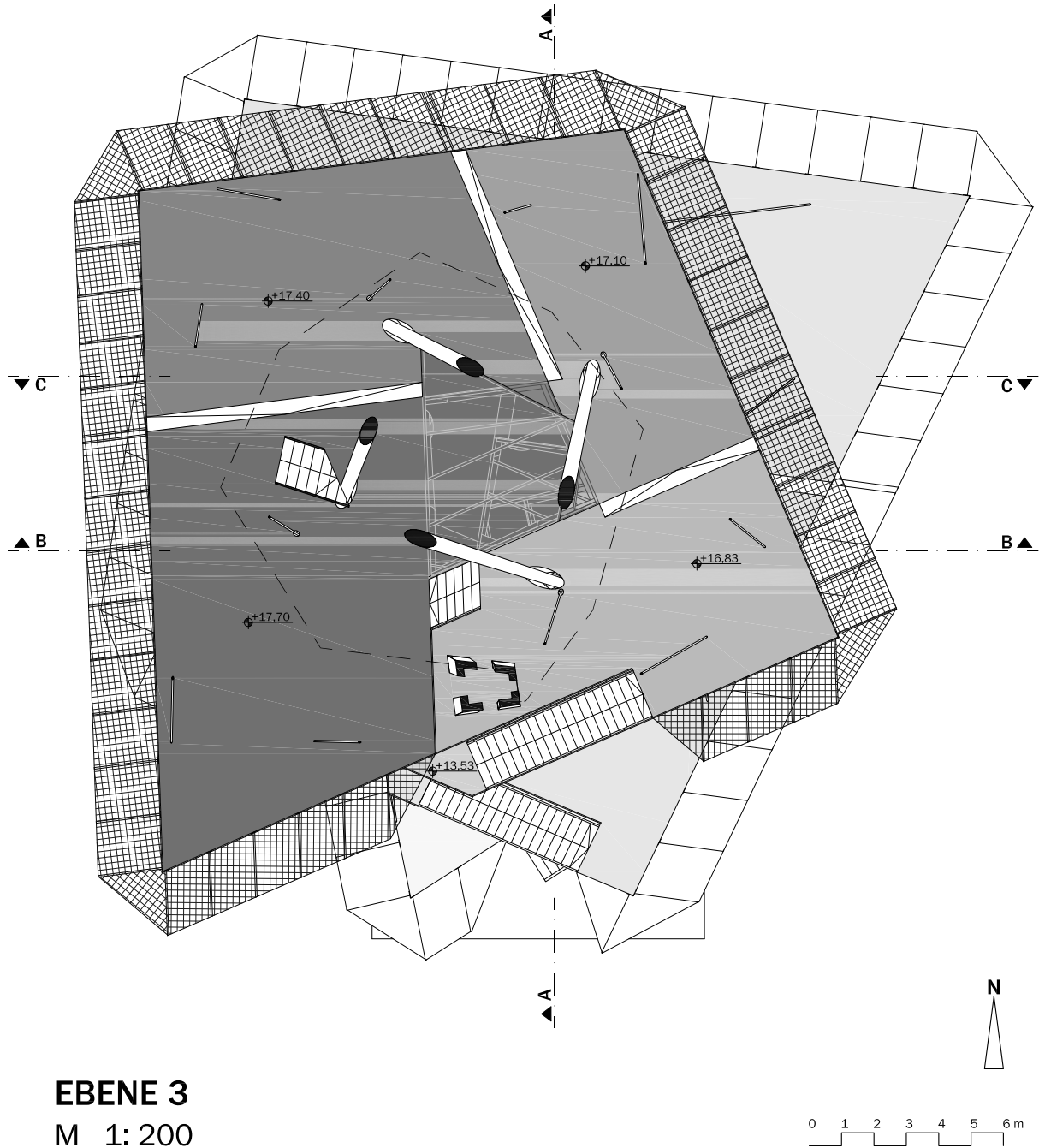


EBENE 1
M 1: 200

Ebene 2

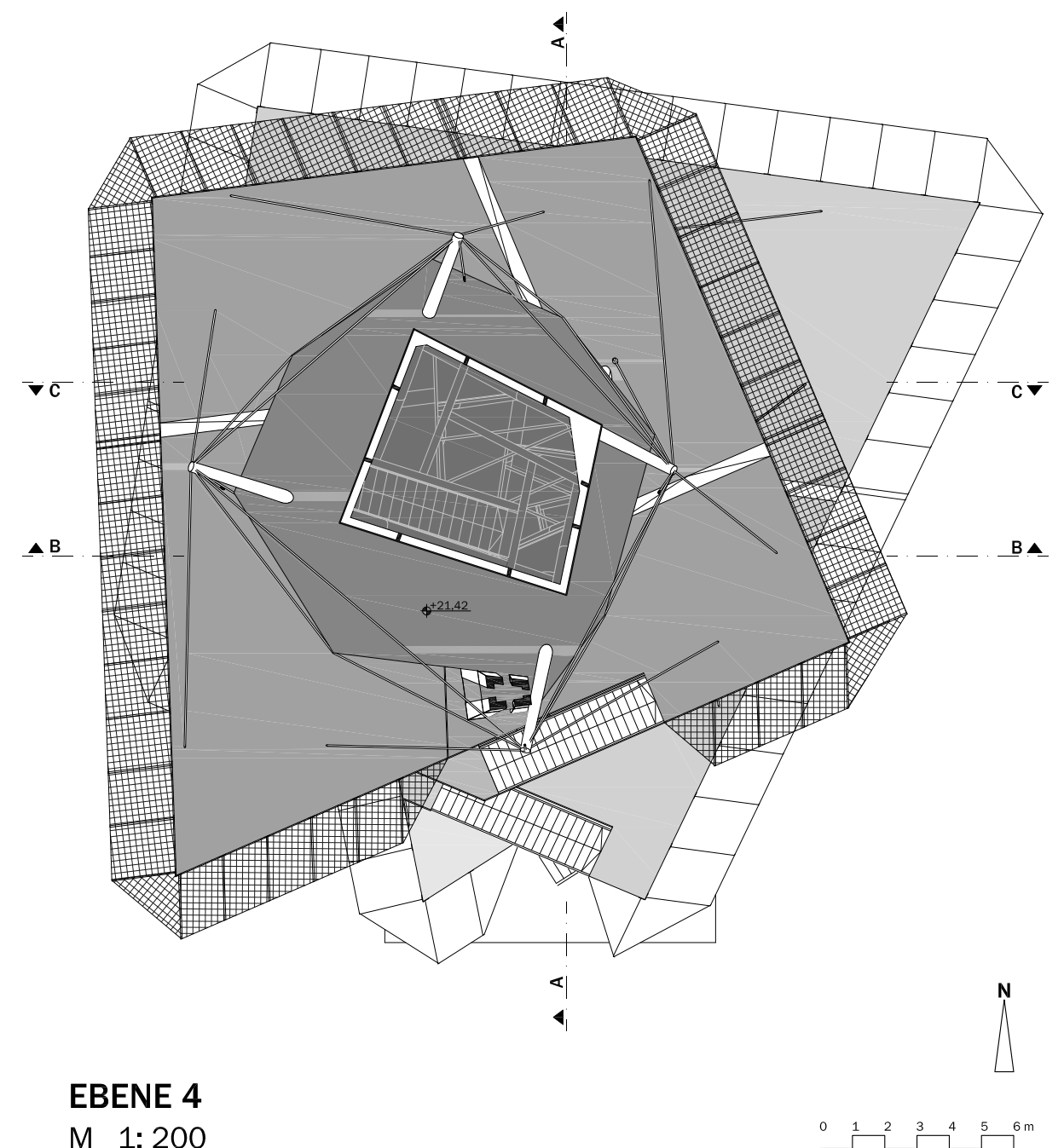


Ebene 3



EBENE 3
M 1: 200

Ebene 4

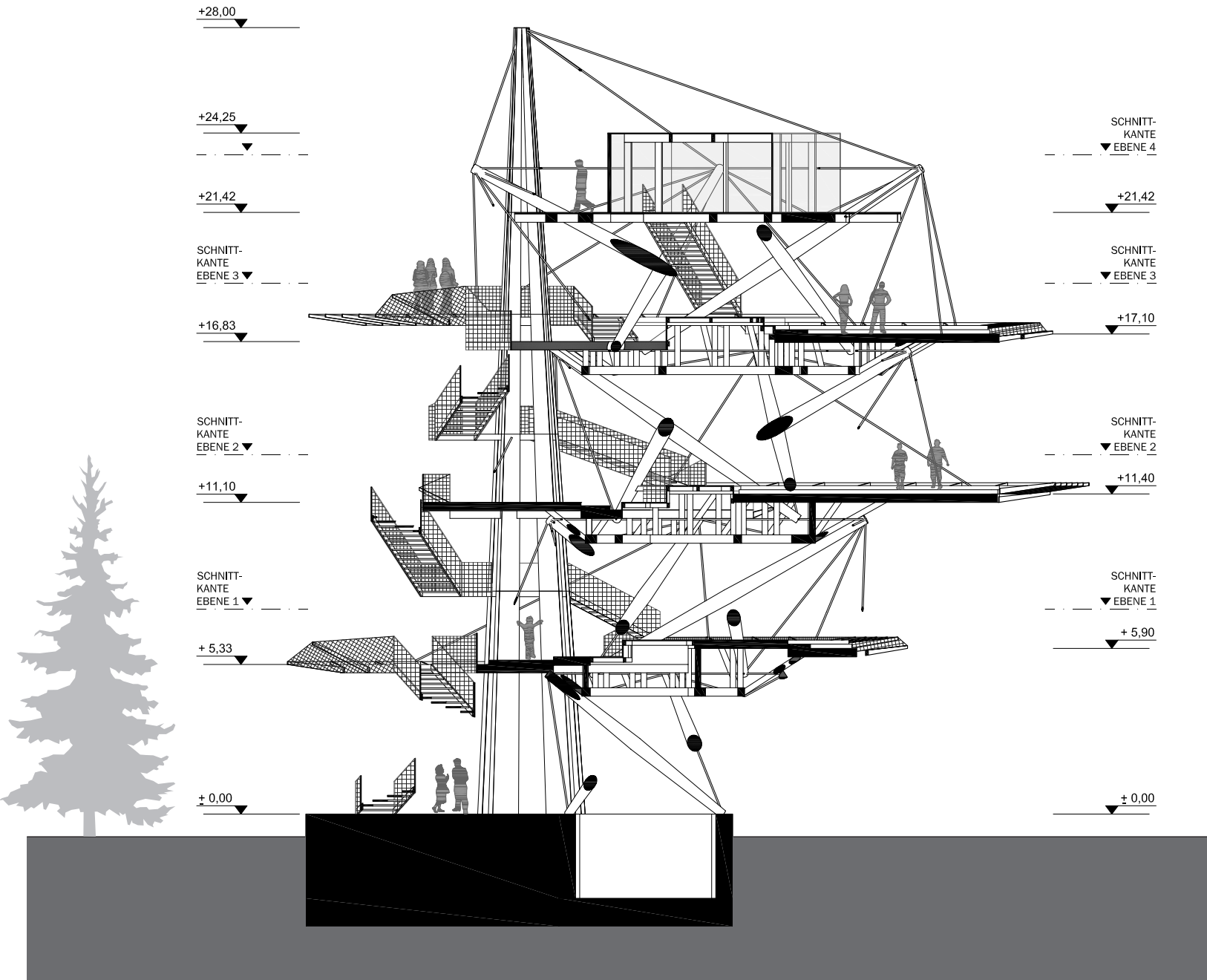


EBENE 4
M 1: 200

PLANMATERIAL

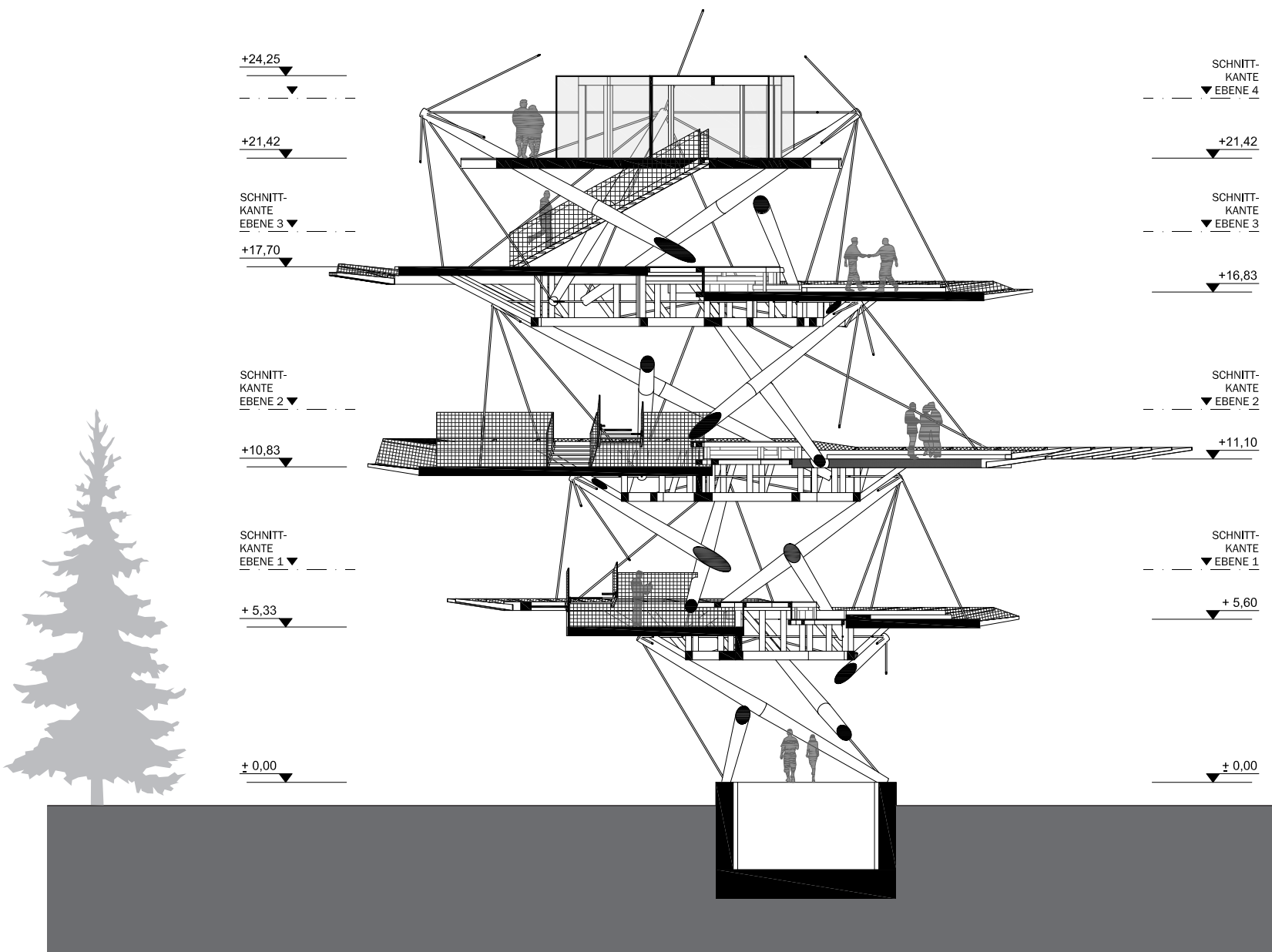
SCHNITTE

SCHNITT AA

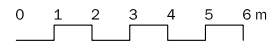


SCHNITT AA
M 1: 200

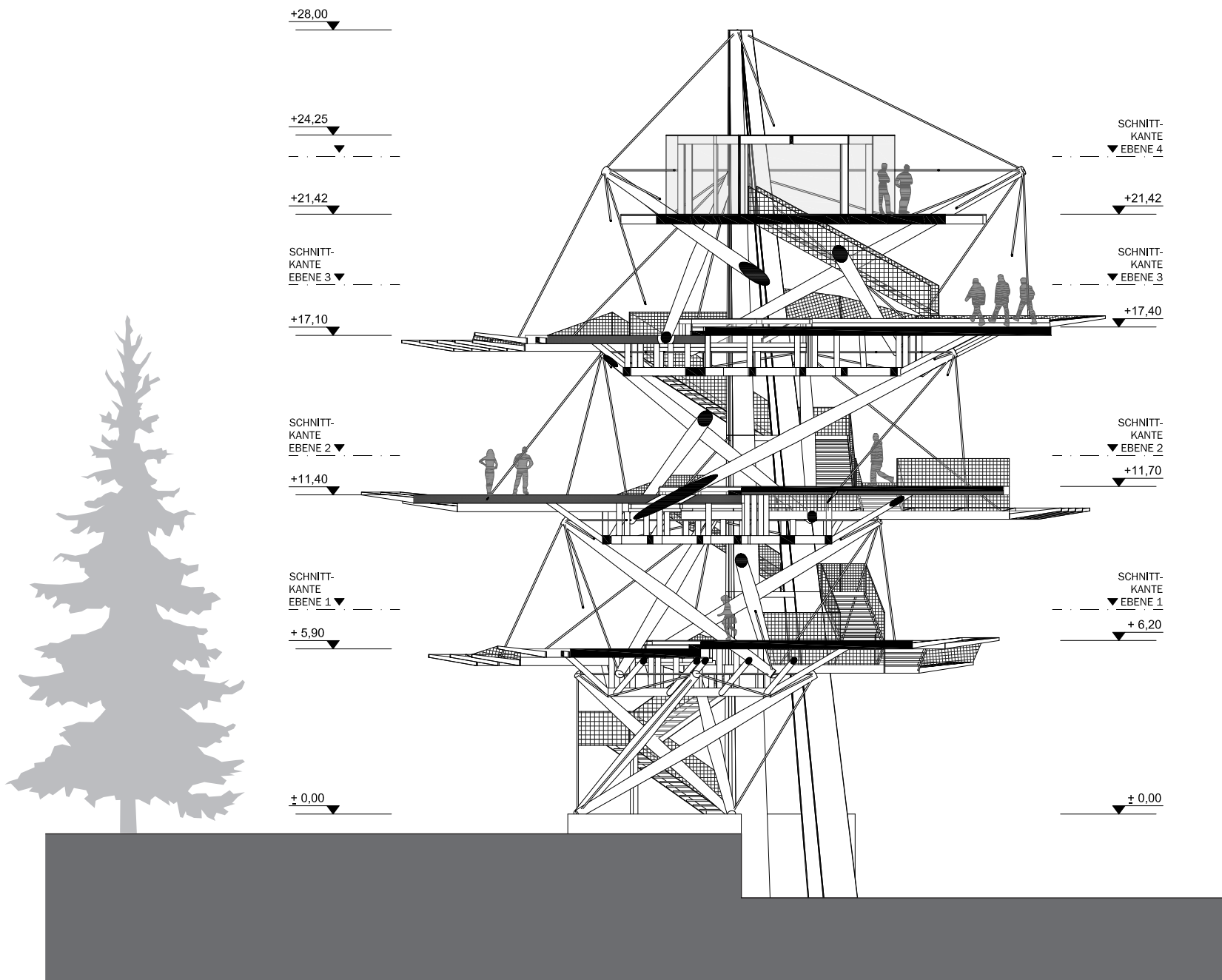
SCHNITT BB



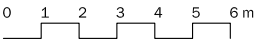
SCHNITT BB
M 1: 200



SCHNITT CC



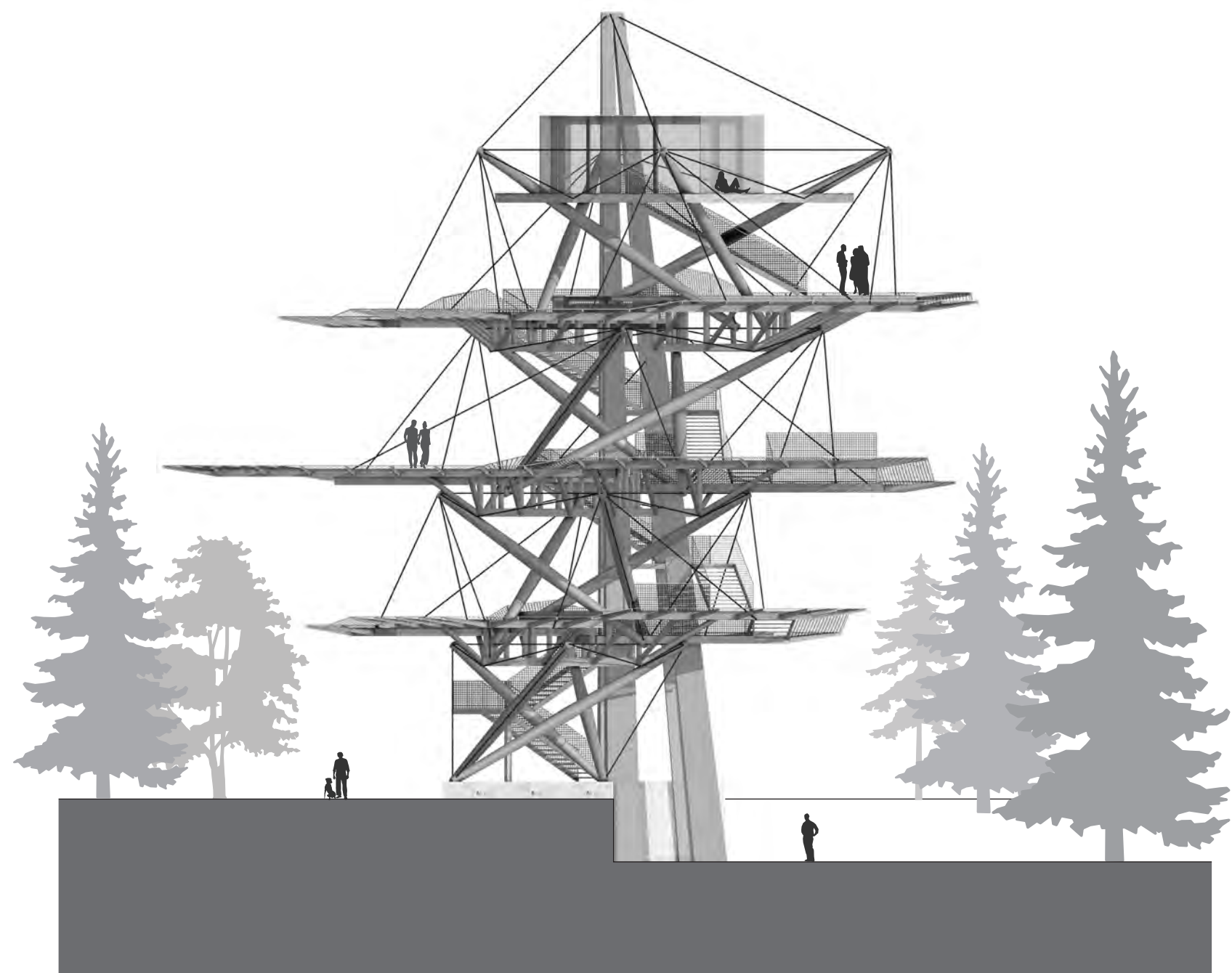
SCHNITT CC
M 1: 200



PLANMATERIAL

ANSICHTEN

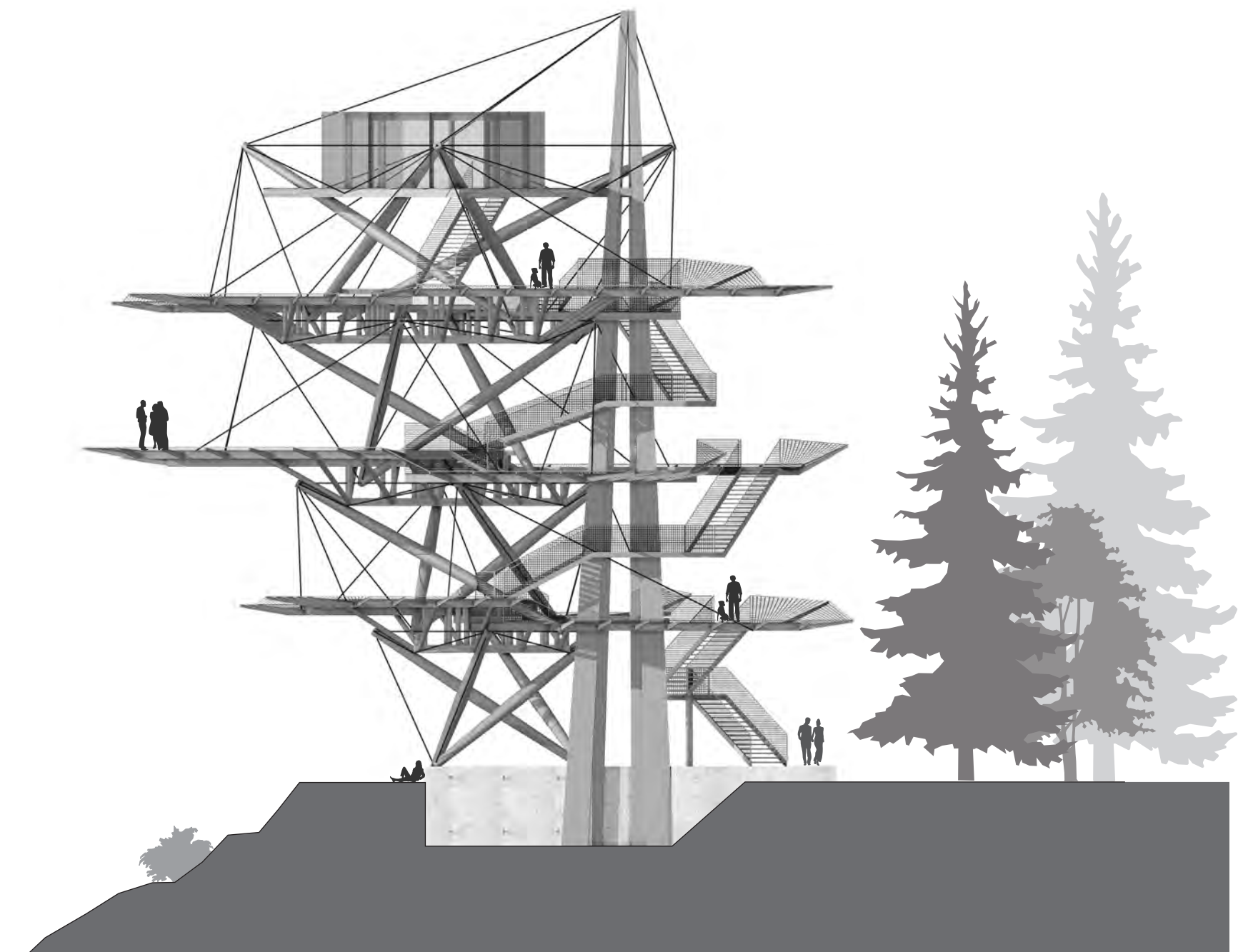
NORD
M 1:200



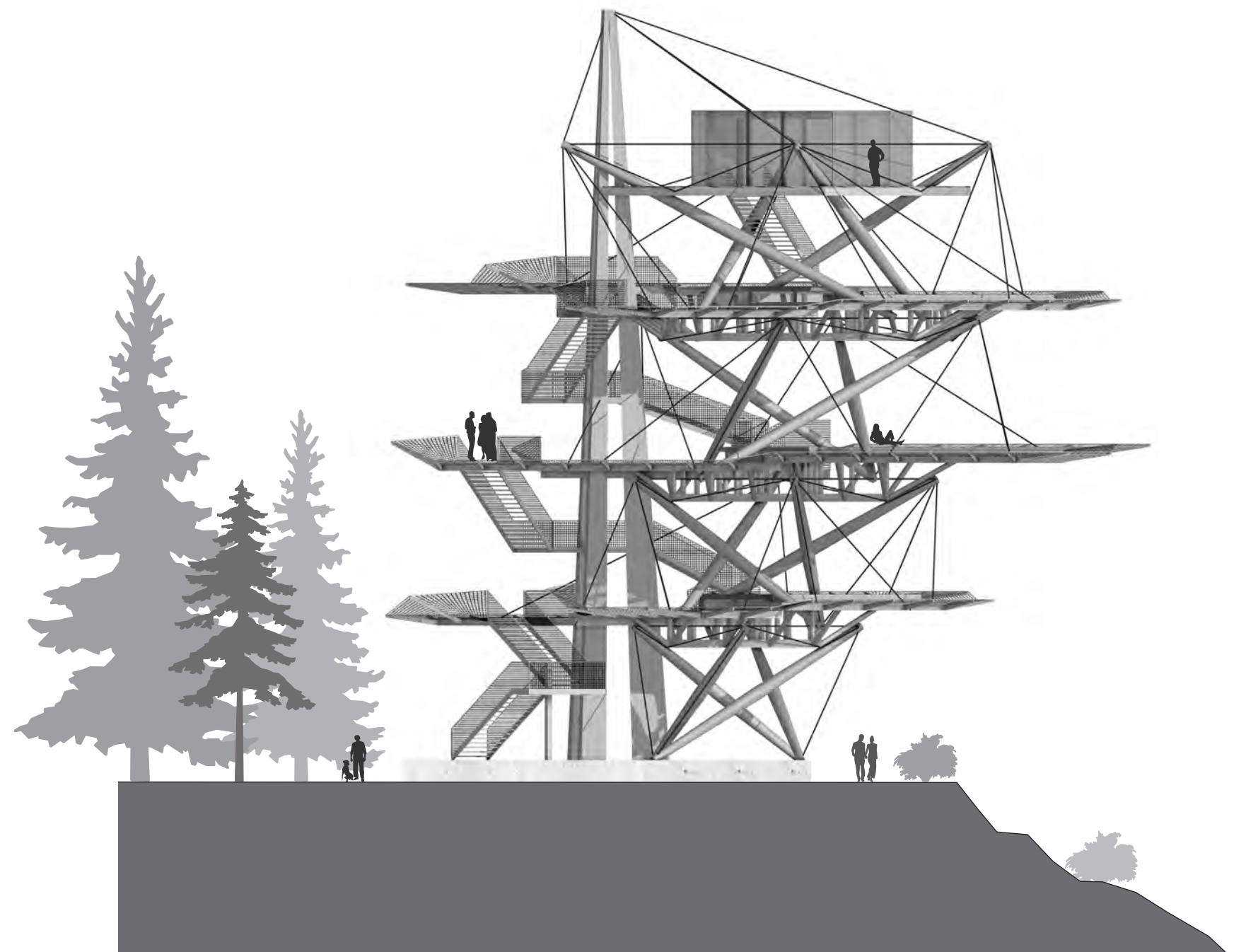
SÜD
M 1:200



WEST
M 1:200



OST
M 1:200



PERSPEKTIVE

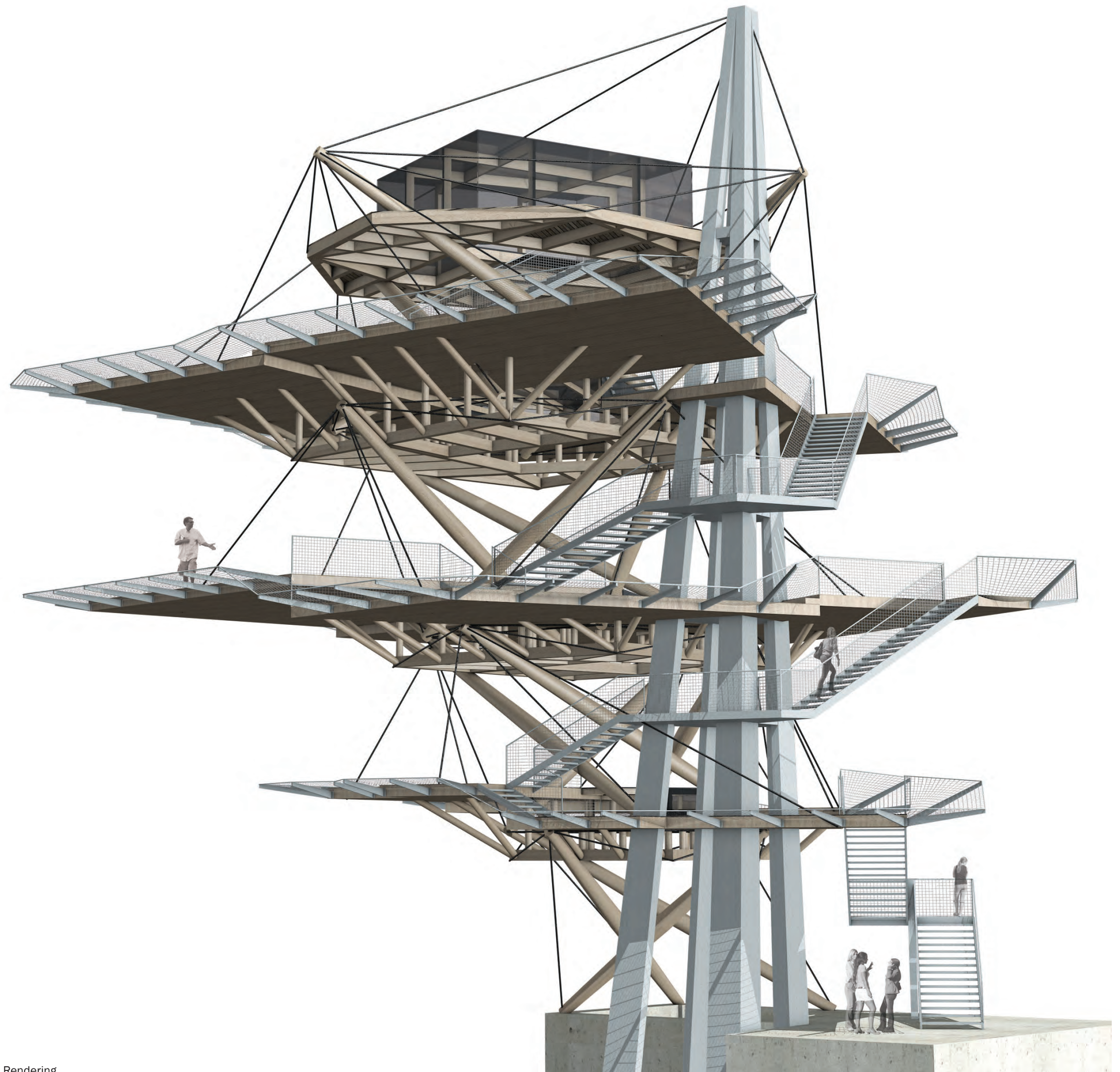


Abb. 181: Rendering

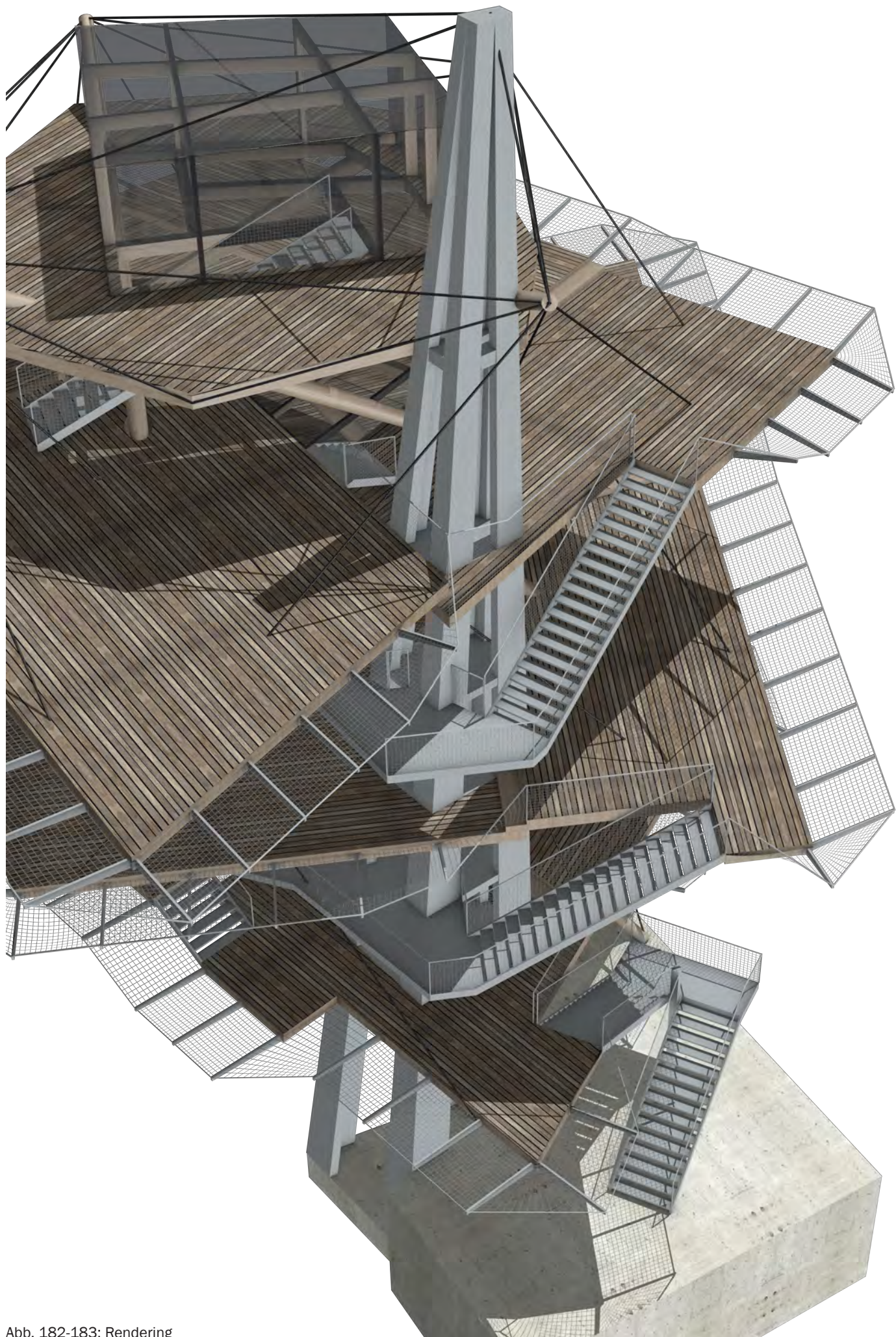
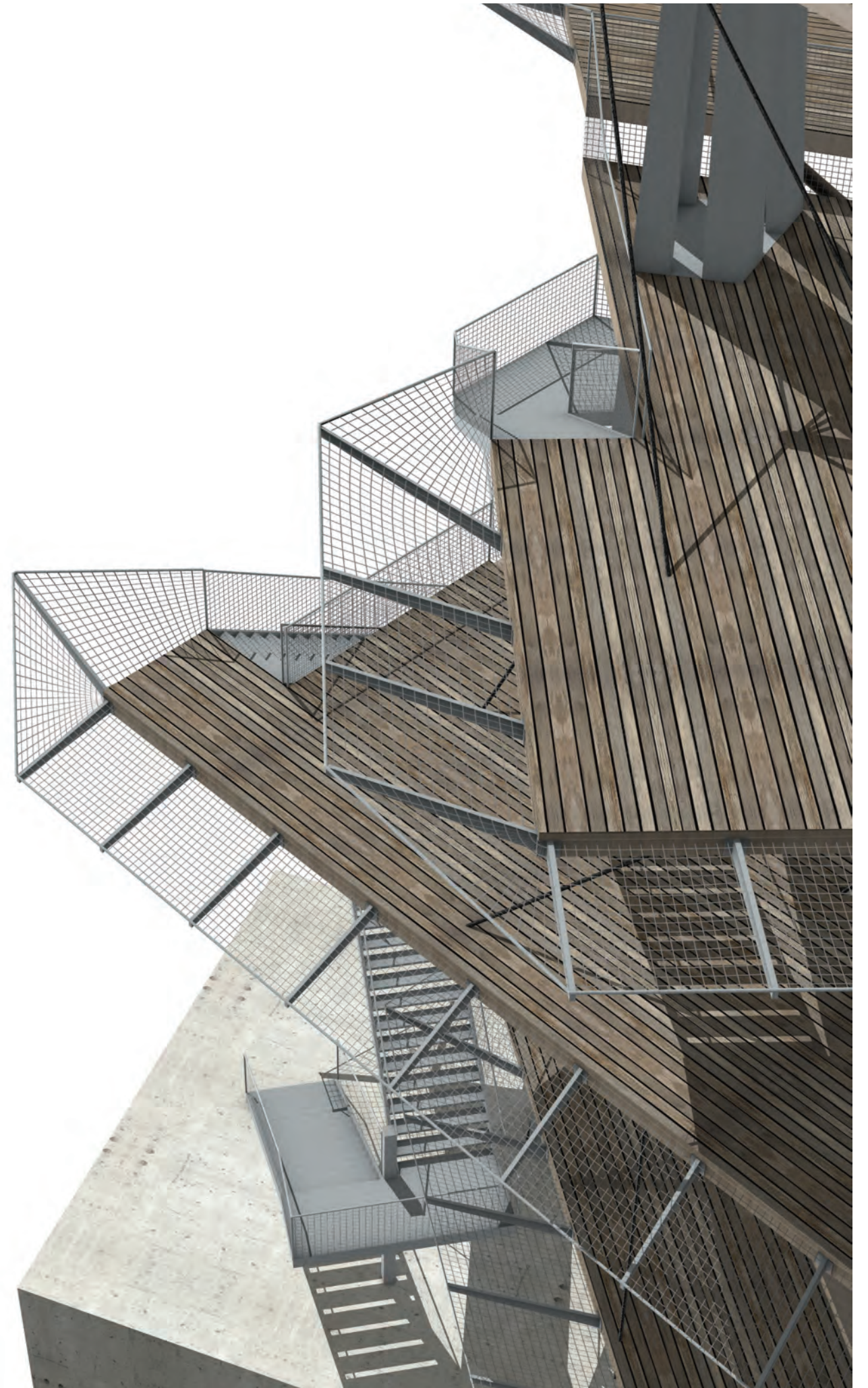


Abb. 182-183: Rendering





Abb. 184-185: Rendering



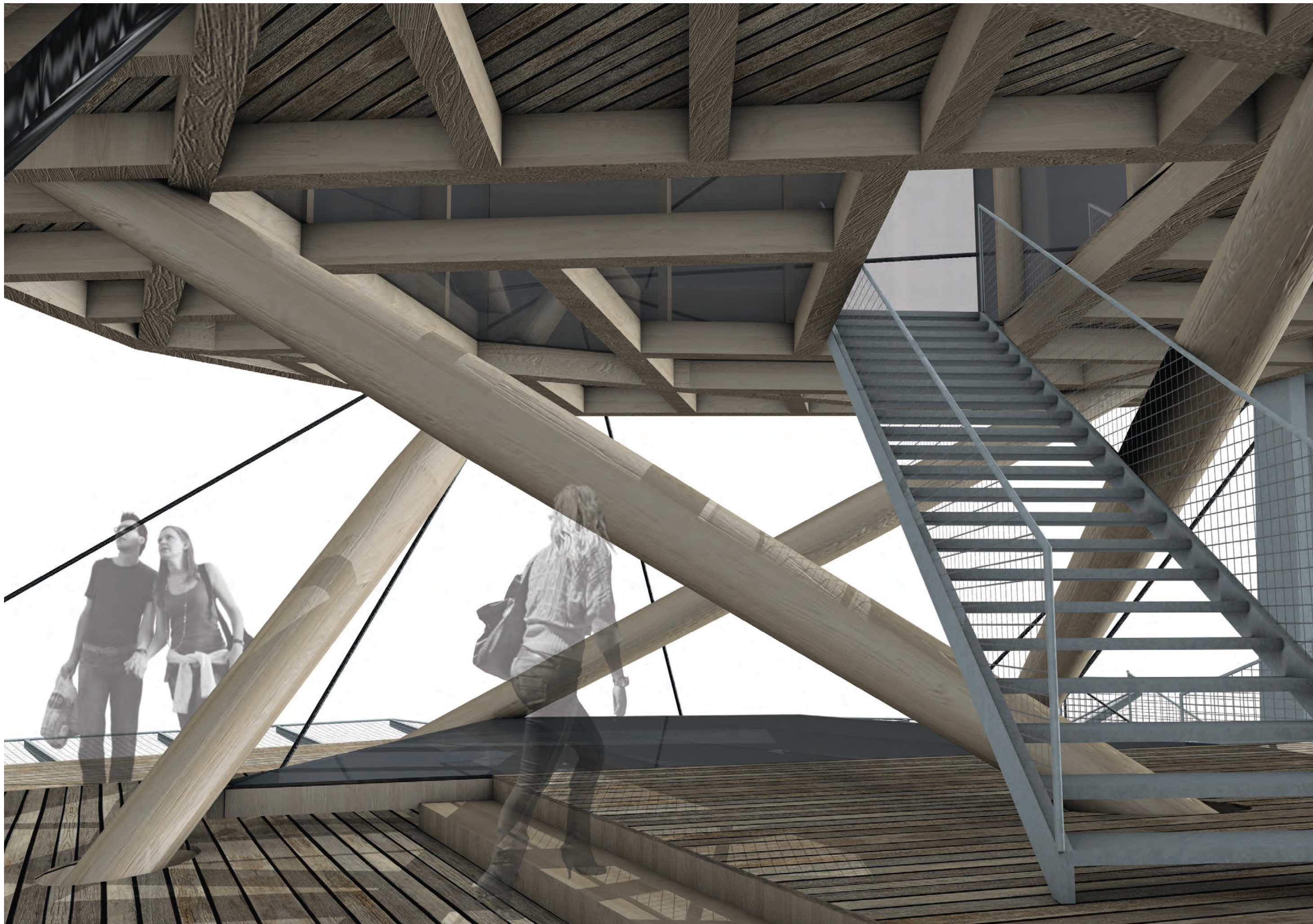


Abb. 186: Rendering

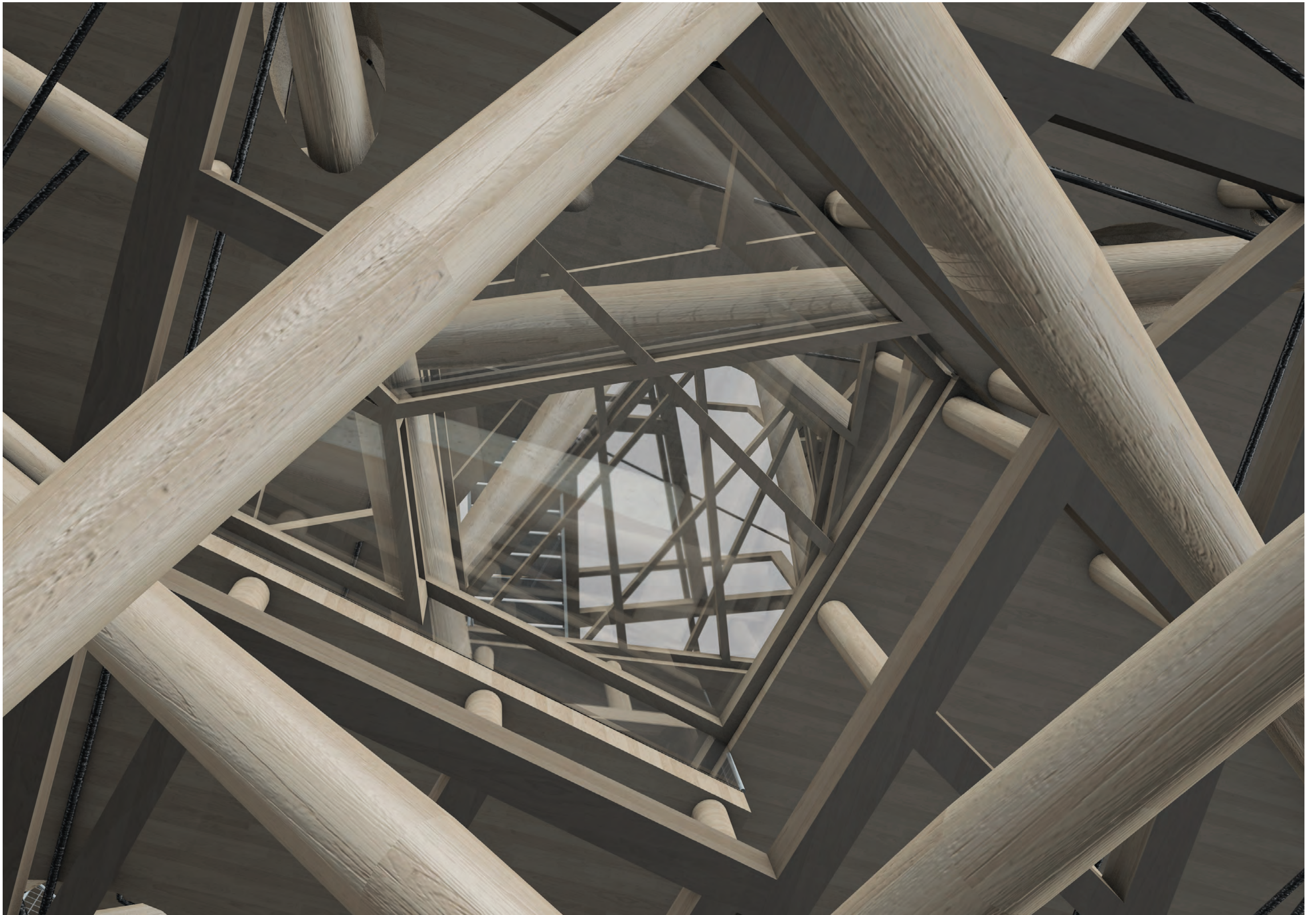


Abb. 187: Rendering

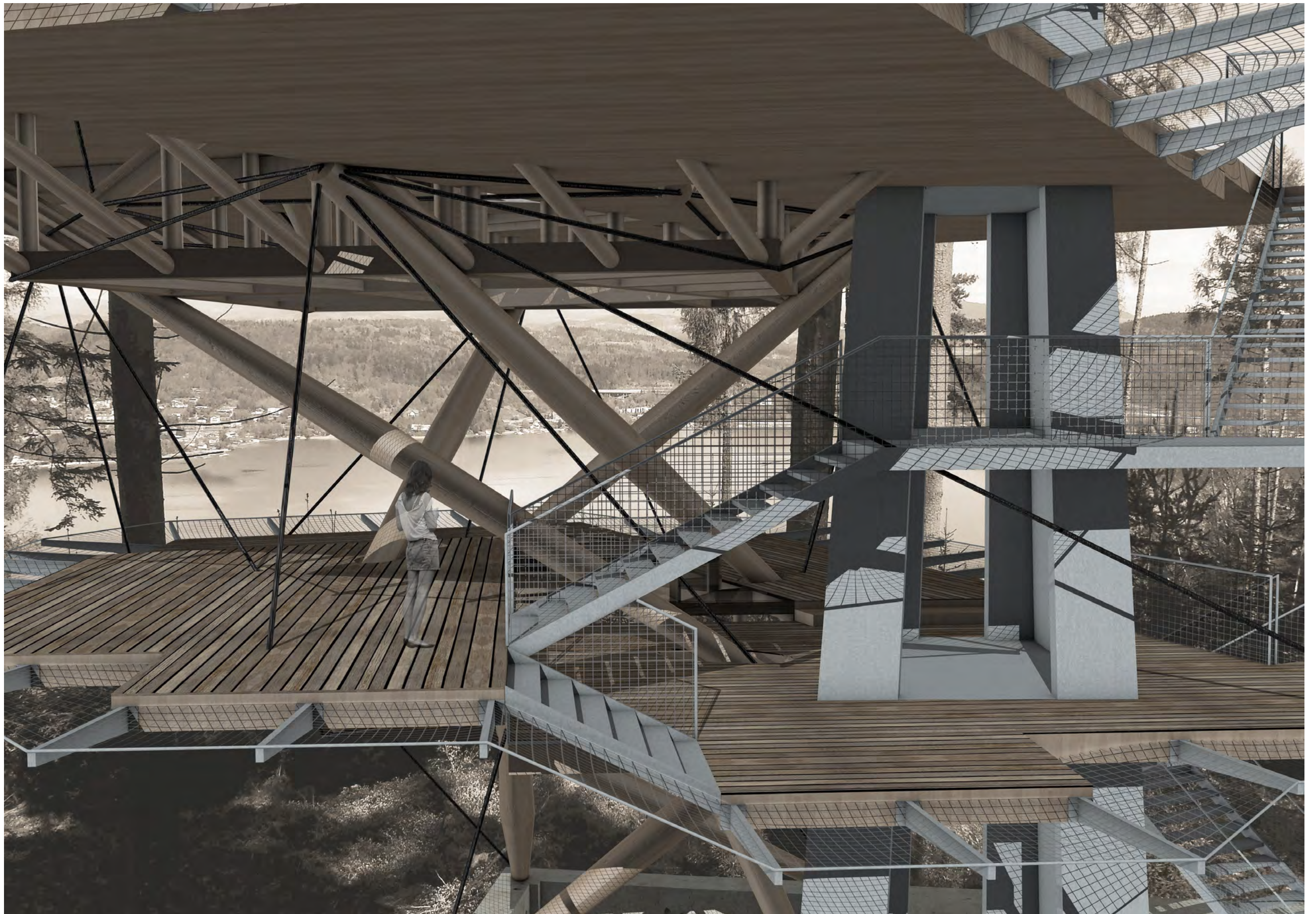


Abb. 188: Rendering

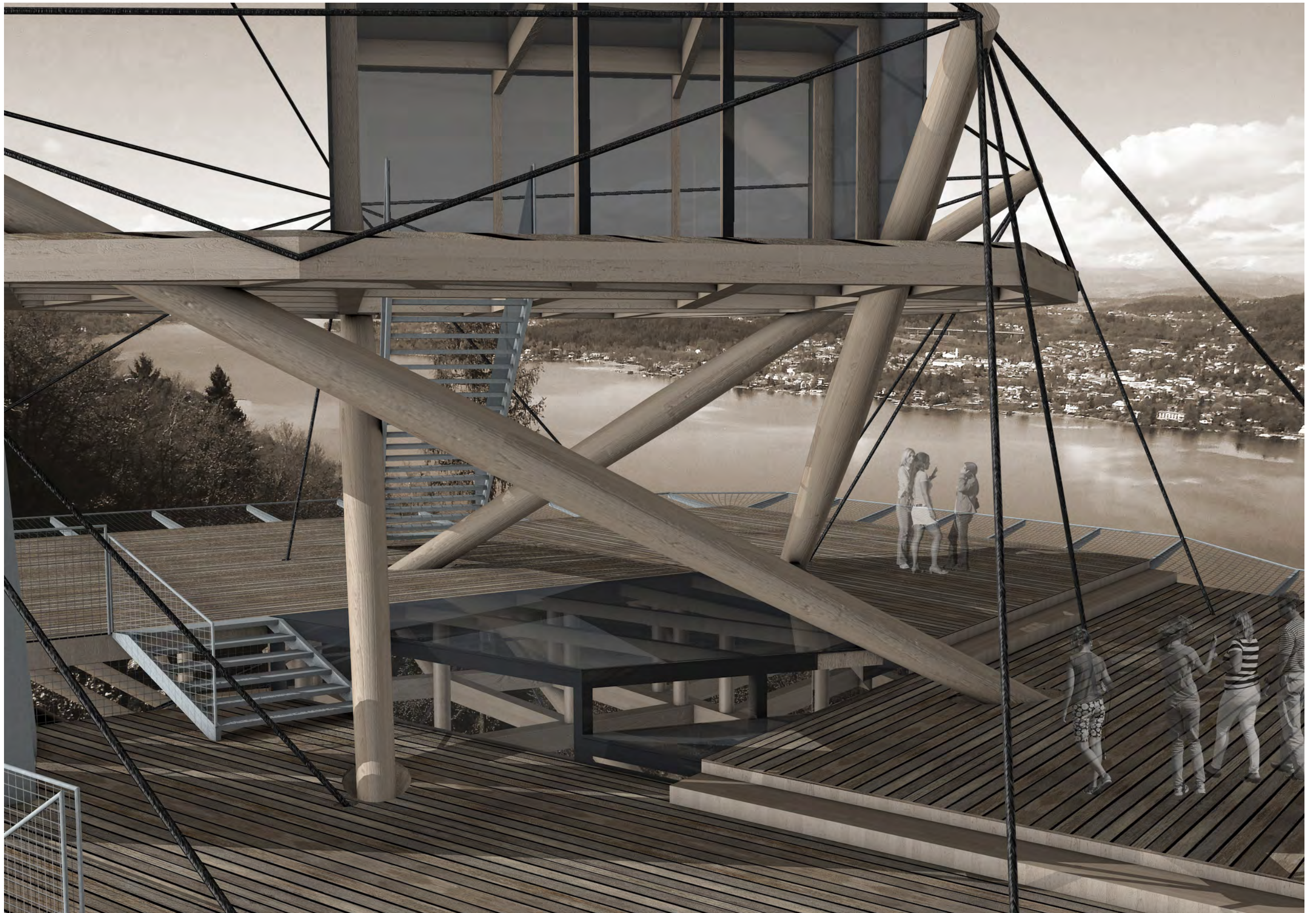


Abb. 189: Rendering

Abb. 190: Rendering

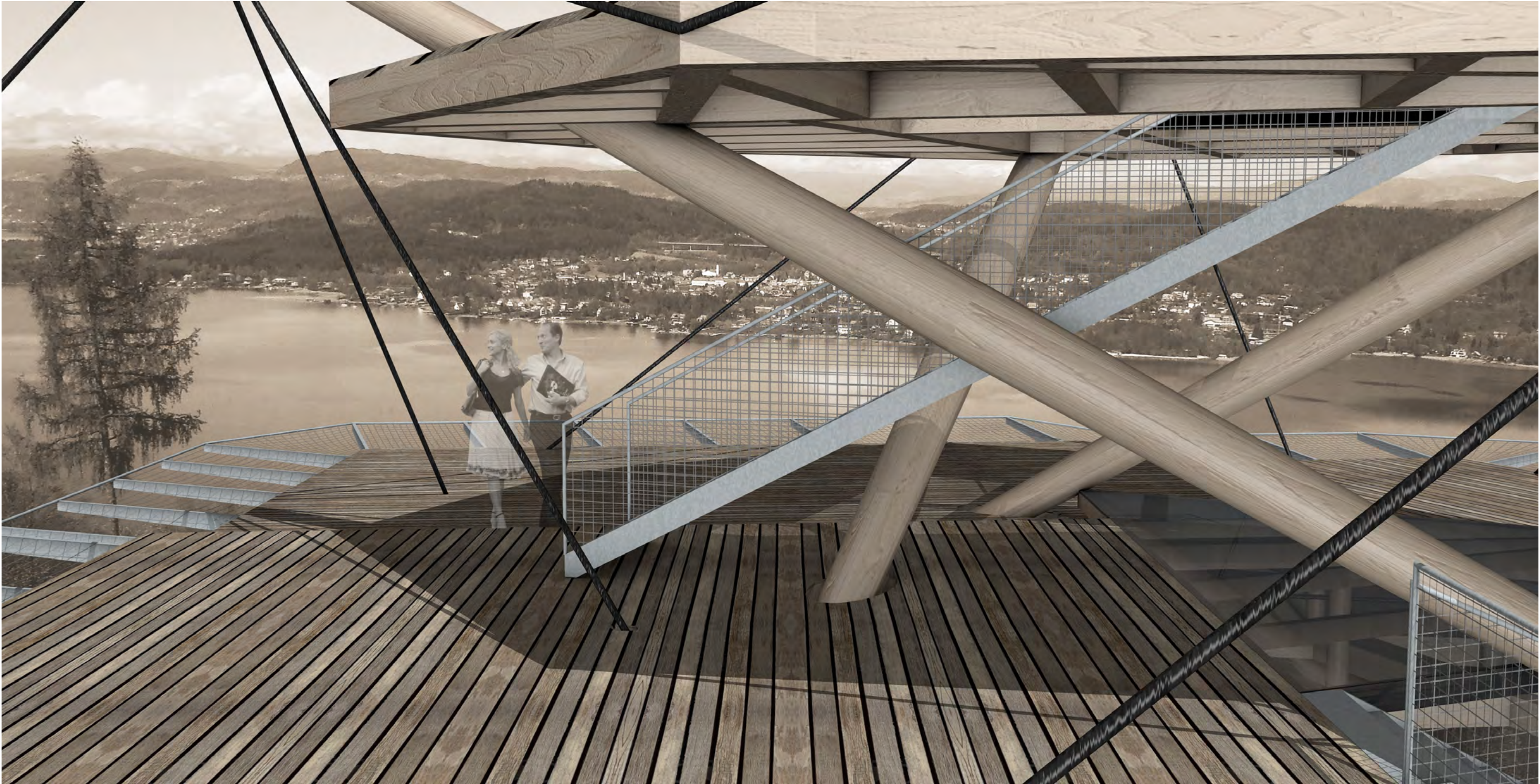


Abb. 191: Rendering



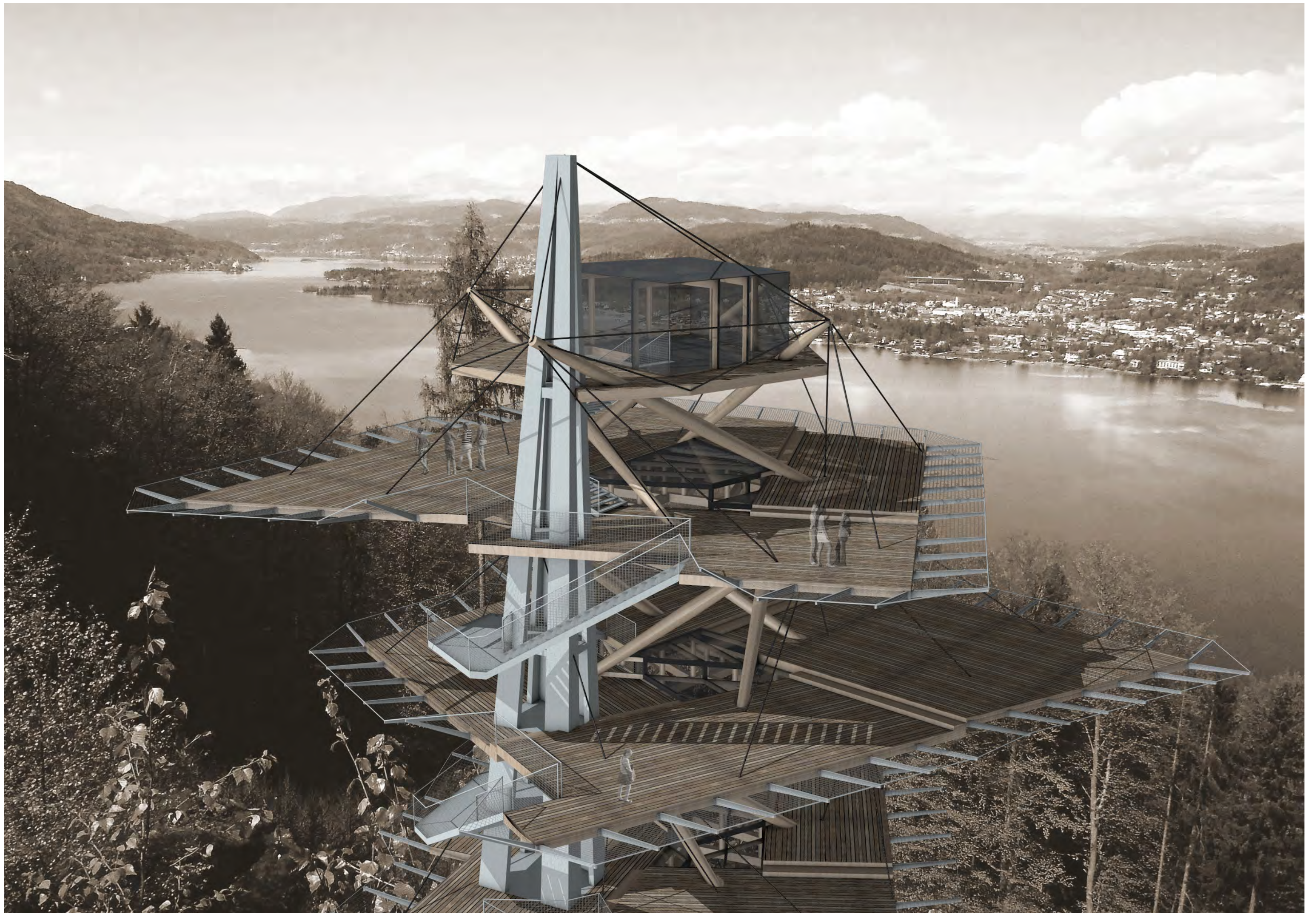


Abb. 192: Rendering

Abb. 193: Rendering

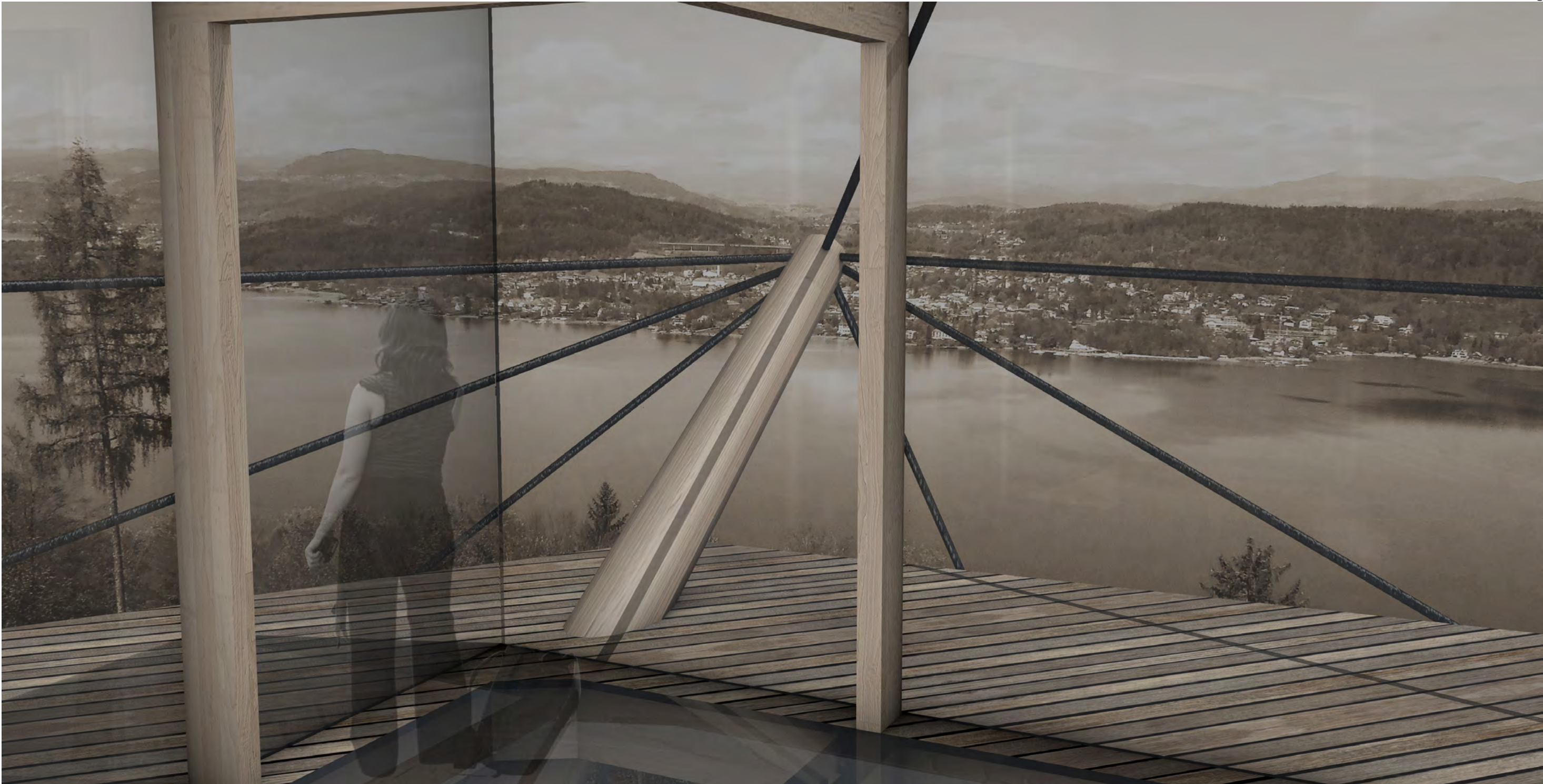




Abb. 194: Rendering

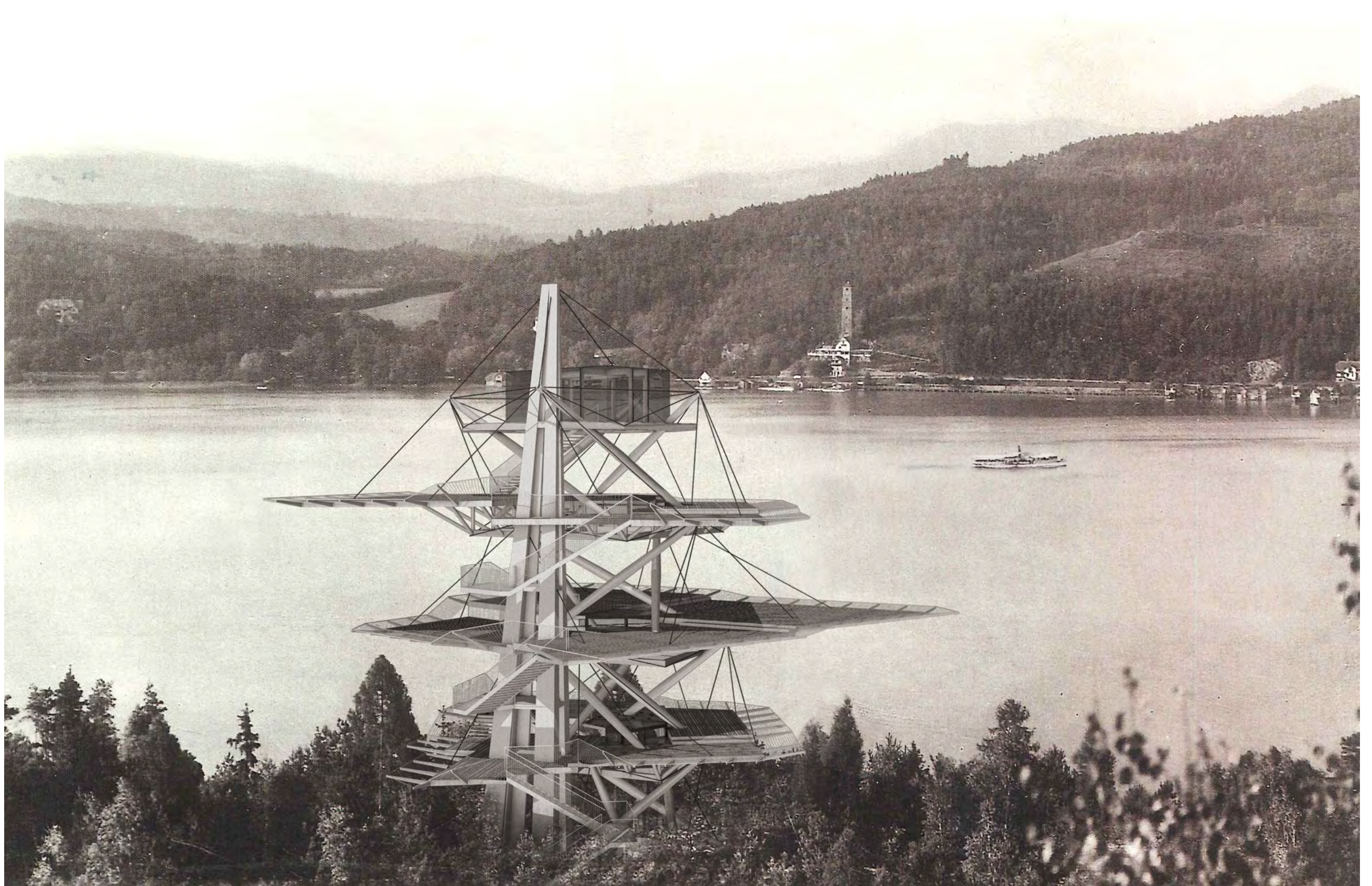


Abb. 195: Rendering

MODELL



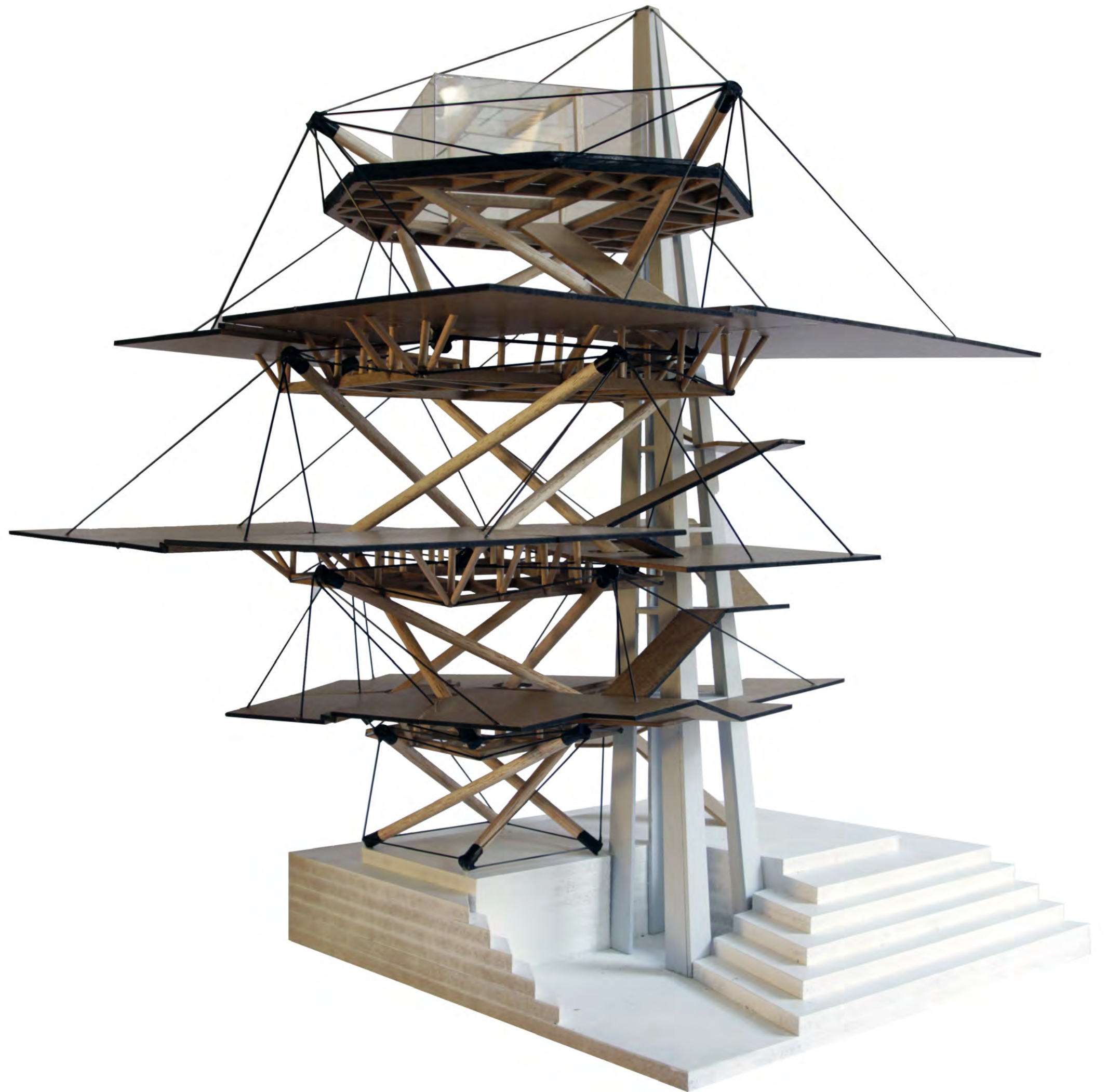






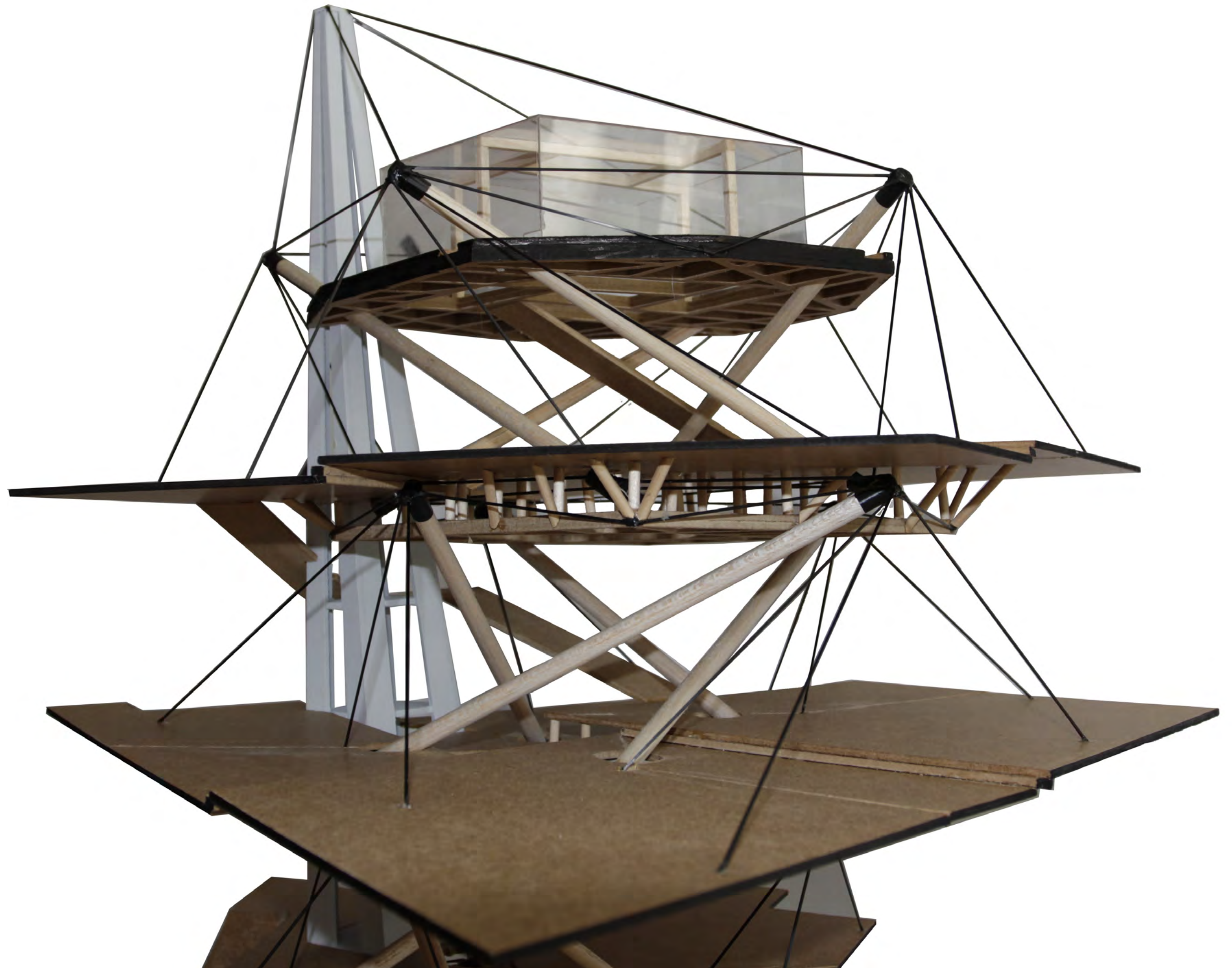












QUELLEN

Literatur

Beutelspacher, Albrecht & Petri, Bernhard (1996): Der Goldene Schnitt. Heidelberg/Berlin/Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.

Benoit B. Mandelbrot (1991): Die Fraktale Geometrie der Natur. Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser

Siegel Teresa (2005): folding tensegrity, Umsetzung anhand einer mobilen Fußgängerbrücke. Diplomarbeit TU Wien

Benisch Philipp (2006): Seminararbeit „Tensegrity“, Fakultät für Architektur und Raumplanung, TU Wien

Gengnagel Christoph (2002): Arbeitsblätter „Tensegrity“, Fakultät für Architektur, TU München

Cziep Eliabeth und Zecusic Zeljka (1999) „Tensegrity“ Diplomarbeit TU Wien

Martin Walter Engstler (2011) Verwendung von Tensegrity-Strukturen in der Architektur, Diplomarbeit TU Wien

Robert Marks und R. Buckminster Fuller (1973) The Dymaxion World of Buckminster Fuller, New York: Anchor Books/Anchor Press/Doubleday

Herzog, Natterer, Schweitzer, Volz, Winter (2003) *Holzbau Atlas*, Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser

Zeitungsartikel

Werbeprospekt über das Strand-Etablissement Maiernigg (1930)/ Kärntner Landesarchiv

Neue Zeit (4.2.1960)

Internetquellen

Internetquelle 1: http://de.wikipedia.org/wiki/Goldener_Schnitt (24.5.2013, 15:48)

Internetquelle 2: <http://www.youtube.com/watch?v=ahXIMUkSXX0> (24.5.2013, 15:48)

Internetquelle 3: http://www.youtube.com/watch?v=fEwHMXD_DPI (24.5.2013, 15:49)

Internetquelle 4: <http://tensegrity.wikispaces.com/Warnow+Tower> (23.5.2013 16:38)

Internetquelle 5: http://www.holz-tragwerk.at/_backend/_files/_upload/_download/_org/1182754054.pdf, (23.5.2013 17:12)

Internetquelle 6: <http://kennethsnelson.net/> (23.5.2013 21:00)

Andere:

Informationstafel bei den Ruinen

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-5: Eigene Fotos
Abb. 6-8: Eigene Grafiken
Abb. 9: Kärnten Atlas © Land Kärnten
Abb. 10: Grafik aus der Werbebroschüre, Kärntner Landesarchiv
Abb. 11-14: Fotos aus der Werbebroschüre, Kärntner Landesarchiv
Abb. 15: Einreichplan von 1929, Kärntner Landesarchiv
Abb. 16: Postkarte von 1930, Kärntner Landesarchiv
Abb. 17: Kalenderbild, Kärntner Landesarchiv
Abb. 18: Foto aus der Neuen Zeit (NZ) 1960, Kärntner Landesarchiv
Abb. 19-23: Eigene Fotos
Abb. 24-25: Eigene Grafik
Abb. 26: Grafik, http://www.gymnasium-vogelsang.de/team2/team2/der_goldene_schnitt.html (26.5.2013, 13:32)
Abb. 27: Grafik <http://work.popperschule.at/projekte/wahrnehmung/daten/index.php?id=97> (26.5.2013, 13:35)
Abb. 28: Grafik, <http://work.popperschule.at/projekte/wahrnehmung/daten/index.php?id=97> (26.5.2013, 13:35)
Abb. 29: Grafik, <http://www.fibonaccifolge.ch/proportionen.php> (25.5.2013, 13:40)
Abb. 30: Grafik, <http://www.michael-holzapfel.de/themen/goldenerschnitt/gs-natur/gs-natur.htm> (26.5.2013, 13:44)
Abb. 31-32: Grafik, <http://www.golden-section.eu/kapitel5.html> (25.5.2013, 13:46)
Abb. 33: Grafik, <http://www.fibonaccifolge.ch/proportionen.php> (25.5.2013, 13:47)
Abb. 34: Grafik, http://kauernet.de/hendes/html/h2034_nat.htm (25.5.2013, 13:49)
Abb. 35: Grafik, http://de.wikipedia.org/wiki/Goldener_Schnitt (25.5.2013, 13:54)
Abb. 36: Foto, <http://www.raumfahrer.net/forum/smf/index.php?topic=1120.0> (25.5.2013, 13:56)
Abb. 37: Foto, Grafik, http://www.beobachter.ch/leben-gesundheit/medizin-krankheit/artikel/wahrnehmung_die-natur-der-schoenheit/ (26.5.2013, 14:00)
Abb. 38: Grafik, <http://www.golden-section.eu/kapitel5.html> (26.5.2013, 14:02)
Abb. 39: Foto, <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenblume> (26.5.2013, 14:03)
Abb. 40: Grafik, Beutelspacher, Albrecht & Petri, Bernhard (1996) S. 61
Abb. 41: Grafik, <http://www.golden-section.eu/kapitel5.html> (26.5.2013, 14:14)
Abb. 42: Grafik, <http://quantennews.blogspot.co.at/2010/10/breathe.html> (26.5.2013, 14:58)
Abb. 43-44: Grafik, Benoit B. Mandelbrot (1991) S.167
Abb. 45: Grafik, <http://www.frank-buss.de/kochkurve/index.html> (22.5.2013, 18:51)
Abb. 46: Grafik, , <http://www.frank-buss.de/kochkurve/index.html> (22.5.2013, 18:51)
Abb. 47: Grafik, <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/90997> (22.5.2013, 18:56)
Abb. 48: Grafik, <http://www.jkurmann.de/applets/julia/index.html> (22.5.2013, 19:07)
Abb. 49: Grafik, <http://narmora-sama.deviantart.com/art/Mandelbrot-Set-Zoom-1-274255883> (22.5.2013, 19:11)
Abb. 50: Grafik, <http://www.brefeld.homepage.t-online.de/polyeder.html> (22.5.2013, 21:56)
Abb. 51: Grafik, <http://www.heilung-des-planeten.net/community/user/gallery16-benu/photo142-ikosaeder-dodekaeder-%E2%80%93-polare-beziehung/> (22.5.2013, 22:12)
Abb. 52: Grafik, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Icosahedron-golden-rectangles.svg> (22.5.2013, 22:12)
Abb. 53-56: Eigene Zeichnungen
Abb. 57-59 Eigene Zeichnungen
Abb. 60-64: Eigene Zeichnungen
Abb. 65: http://einestages.spiegel.de/static/entry/ein_leben_fuers_dymaxion/97396/r_buckminster_fuller.html (22.5.2013,23:06)
Abb. 66: Foto <http://quizlet.com/17178868/modernism-final-flash-cards/> (23.5.2013, 11:21)
Abb. 67: Foto http://mondo-blogo.blogspot.co.at/2011/01/what-happens-when-artists-design_28.html (23.5.2013, 11:32)
Abb.68: Foto <http://www.treehugger.com/sustainable-product-design/quote-of-the-day-buckminster-fuller.html> (23.5.2013, 11:41)
Abb. 69: Foto Phillip Benisch,(2006) Seminararbeit „Tensegrity“, Fakultät für Architektur und Raumplanung TU Wien Seite 5
Abb. 70-72: Grafik Phillip Benisch,(2006) Seminararbeit „Tensegrity“, Fakultät für Architektur und Raumplanung TU Wien Seite 5
Abb. 73: Grafik, http://ke.arch.rwth-aachen.de/ke_ss13/archiv/mirko/science/science.html (23.5.2015, 12:12)
Abb. 74: Foto, http://engg-seminar.blogspot.co.at/2013/03/tensegrity-structures-and-their_10.html
Abb. 75: Grafik, Gengnagel Christoph, (2002) Arbeitsblätter „ Tensegrity“ Fakultät für Architektur, Tu München, Seite 5
Abb. 76 Grafik, , Gengnagel Christoph, (2002) Arbeitsblätter „ Tensegrity“ Fakultät für Architektur, Tu München, Seite 5
Abb. 77 Grafik, , Gengnagel Christoph, (2002) Arbeitsblätter „ Tensegrity“ Fakultät für Architektur, Tu München, Seite 5
Abb. 78 Grafik, Foto Phillip Benisch,(2006) Seminararbeit „Tensegrity“, Fakultät für Architektur und Raumplanung TU Wien Seite 13
Abb. 79 Grafik, Gengnagel Christoph, (2002) Arbeitsblätter „ Tensegrity“ Fakultät für Architektur, Tu München, Seite 7
Abb. 80, Grafik , Gengnagel Christoph, (2002) Arbeitsblätter „ Tensegrity“ Fakultät für Architektur, Tu München, Seite 8

Abb. 81, Grafik , Gengnagel Christoph, (2002) Arbeitsblätter „ Tensegrity“ Fakultät für Architektur, Tu München, Seite 8
Abb. 82, Grafik, Phillip Benisch,(2006) Seminararbeit „Tensegrity“, Fakultät für Architektur und Raumplanung TU Wien Seite 15
Abb. 83, Foto, <http://kennethsnelson.net/category/sculptures/towers/> (23.5.2013, 14:39)
Abb. 84, , Grafik, Phillip Benisch,(2006) Seminararbeit „Tensegrity“, Fakultät für Architektur und Raumplanung TU Wien Seite 20
Abb. 85, Foto <http://www.flickr.com/photos/islespunkfan/2629228251/sizes/l/in/photostream/> (23.5.2013, 14:40)
Abb. 86: Foto <http://www.flickr.com/photos/islespunkfan/2629228133/sizes/l/in/photostream/> (23.5.2013, 14:45)
Abb. 87: Foto, <http://kennethsnelson.net/1970/needle-tower-ii/> (23.5.2013, 15:16)
Abb. 88: Foto <http://www.kennethsnelson.net/sculpture/outdoor/9.htm> (23.5.2013, 15:18)
Abb. 89: Grafik, Diplomarbeit, folding tensegrity, Theresa Siegel, TU Wien 23. 9. 2005. Seite 23
Abb. 90: Foto <http://kennethsnelson.net/1971/easy-k-2/> (23.5.2013, 15:55)
Abb. 91: Foto, <http://www.flickr.com/photos/watz/3930785180/sizes/l/in/photostream/> (23.5.2013, 15:58)
Abb. 92: Foto <http://www.flickr.com/photos/watz/3930794578/sizes/l/in/photostream/>, (23.5.2013, 16:00)
Abb. 93: Foto <http://tomandjolieexplore.files.wordpress.com/2012/02/free-ride-closeup.jpg>, (23.5.2013,16:05)
Abb. 94: Foto, <http://tensegrity.wikispaces.com/Warnow+Tower> (23.5.2013 16:38)
Abb. 95: Foto , <http://tensegrity.wikispaces.com/Warnow+Tower>(23.5.2013 16:38)
Abb. 96: Foto http://reference.rope.ch/ropestructures/default.asp?s=ref_report.asp{q}listtype=A{a}lang=en{a}ID=38, (23.5.2013, 16:10)
Abb. 97: Foto, http://www.if-group.de/fileadmin/redakteur/pdf/Presentation___publication/Stahlbau_Heft_2-2004_Warnow.pdf, (23.5.2013, 16:47)
Abb. 98: Foto, http://www.if-group.de/fileadmin/redakteur/pdf/Presentation___publication/Stahlbau_Heft_2-2004_Warnow.pdf, (23.5.2013, 16:47)
Abb. 99-103 Fotos, http://www.holz-tragwerk.at/_backend/_files/_upload/_download/_org/1182754054.pdf, (23.5.2013, 17:12)
Abb. 104-116: Eigene Modelle
Abb. 117-119 Grafik <http://ropesandpoles.blogspot.co.at/2006/03/step-by-step-tensegrity-tower-part-2.html>, (23.5.2013, 19:23)
Abb. 120-121 Grafik . (Philipp Benisch, 2006, Seminararbeit „Tensegrity“ Fakultät für Architektur und Raumplanung Seite 12)
Abb. 122-124 Eigene Modelle
Abb. 125: Grafik <http://kennethsnelson.net/2010/3-the-five-basic-weave-cells/>, (23.5.2013, 21:00)
Abb. 125-146: Eigene Modelle
Abb. 147-166: Eigene Renderings
Abb. 167-174: Eigene Fotos
Abb. 175-180: Eigene Grafik
Abb. 181- 195: Eigene Renderings

Vielen Dank an Ao.Univ.Prof. Manfred Berthold

Besonderen Dank an Familie und Freunde die mich bei diesem Projekt unterstützt haben. Ohne euch wäre es nicht möglich gewesen.
Insbesondere an Julia, Maria Anna, Lina, Judy
Angelika, Georg, Elias, Patrik, Kai, Florian