

Geometry of Forces: Exploring the Solution Space of Structural Design

Geometrie der Kräfte.
Untersuchungen zum Lösungsraum des Tragwerksentwurfs

Philippe Block | Tom Van Mele | Matthias Rippmann

During his keynote address at the 2015 symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Bill Baker, senior structural engineering partner at Skidmore, Owings & Merrill, LLP (SOM), asked a series of probing questions: Have computational design tools made designers smarter? Do all these tools actually make our buildings more efficient or just more complex or complicated? And, ultimately, do they result in better architecture? Baker remained unconvinced, making his opinion clear in his statement that we need to “tame the beast.” On screen, his slide showed a rhinoceros, seemingly preparing to charge a wildlife photographer.¹

By telling success stories based on his work, Baker made a strong case for tools that provide insights, tools that literally *show* how to improve a design and guide the designer to explore options with (in) strong constraints. Baker was mainly referring to graphic statics, a largely forgotten design and analysis technique, which he had used to optimize his designs, often resulting in material savings of up to 20%. He jokingly added that by doing this, his engineering fee—a small percentage of the total building cost—could be easily justified.

To reinforce his claims further, Baker referenced recent research on data visualization as a design tool in engineering, such as Sam Conrad Joyce’s paper and presentation for the 2015 IASS symposium.² Joyce argues for the use of tools that allow engineers to efficiently and intuitively replace their tried-and-true spreadsheets with (web-based) data visualization possibilities. The goal of such tools is to achieve better, more informed decision making during the design phase based on more effective visualization. However, if the graphical design output ultimately does not reveal the process by which the results of the data visualization were achieved, or if its elements—color, line, scale, orientation, and so on—obscure rather than inform interpretation, the visualization creates a black box. Interestingly, based on the research of visualization experts such as Jacques Bertin, Edward R. Tufte, and Jock Mackinlay, Joyce asserts that position and length are at the top of the chart of information attributes that can be processed intuitively, while colors appear at the bottom. Baker agrees with this, stating that color feedback does not provide him with any insight as to how (well) a structure performs; more importantly, it does not tell us how to improve the structure.

Building upon these convincing statements, we argue that, instead of investing in further digital zookeepers to tame

the animal kingdoms of Rhino and Grasshopper, we ought to throw some more evolved, logical creatures, perhaps even humans, into the mix. The metaphor is admittedly overly simplified, but as such, the animals here—our digital tools—are all black boxes, representing uninformed brute force and blindness. It is time to whiten the box, but also to think outside it, to allow for alternatives, to exploit the indeterminacy of problems, to visualize the design space, and finally, to develop the means to explore that space. To illustrate this overarching philosophy, we include here a series of example case studies from our own graphic-statics based research and practice. The examples demonstrate that traditional methods such as graphic statics have not been made obsolete by modern computational technologies. In fact, their combination seems to bring out the best of both worlds.

Constrained Graphic Statics: Design by Forces.

One of the main advantages of graphic statics is the explicit representation of the relation between the shape of a structure and the equilibrium of internal and external forces in geometrically linked diagrams, called form and force diagrams.³ The magnitudes of forces in the structural system are represented by segments in the force diagram; larger lengths mean larger forces. Enhanced through modern computer technologies and computational methods, these form and force diagrams can be used as bidirectional control mechanisms, not only to explore the effect of the geometry of a structural system on its performance, but also to do the opposite: to design a structure by controlling or constructing the geometry of its forces. Figure 2 shows the example of the transformation of a regular truss into two configurations with constant force in the top or bottom chord, respectively, simply by constraining particular nodes of the force diagram to a line or a circle. This clearly demonstrates that optimized geometry can be obtained by the design of forces, explicitly and directly, and not through endless iterations.

1 William Baker, “Future Visions,” keynote lecture, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Amsterdam, August 20, 2015.

2 See Sam Conrad Joyce, “Web Based Data Visualisation Applied to Creative Decision Making in Parametric Structural Design,” in *Proceedings of the IASS 2015 Symposium*, ed. Jeroen Coenders, Andrew Borgart, and Arno Pronk (Amsterdam, 2015), n. p.

3 See Tom Van Mele and Philippe Block, “Algebraic Graphic Statics,” in *Computer-Aided Design (CAD)* 53 (2014), pp. 104–116.

In seiner Keynote Lecture beim letztjährigen Symposium der International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) warf Bill Baker, Seniorpartner für konstruktiven Ingenieurbau bei Skidmore, Owings & Merrill, LLP (SOM), eine Reihe grundlegender Fragen auf: Sind Planer durch computerbasierte Entwurfstools schlauer geworden? Werden unsere Bauwerke durch all diese Werkzeuge tatsächlich effizienter oder bloß komplexer oder komplizierter? Und *last but not least*: Entsteht durch sie bessere Architektur? Baker war nicht überzeugt, und tat seine Meinung auch deutlich mit den Worten kund, wir müssten „das Ungeheuer zähmen“, wozu er das Bild eines Rhinoceros auf die Leinwand projizierte, das anscheinend gerade im Begriff war auf einen Naturfotografen loszugehen.¹

Anhand von eigenen beruflichen Erfolgsgeschichten brach Baker eine Lanze für Werkzeuge, die buchstäblich *zeigen*, wie sich ein Entwurf verbessern lässt, und den Planenden dabei unterstützen, Optionen mittels (bzw. im Rahmen) strenger Beschränkungen auszuloten. Baker hatte dabei primär die grafische Statik im Sinn, eine weitgehend vergessene Entwurfs- und Analyseverfahren, die er zur Optimierung seiner eigenen Entwürfe verwendet, oft mit einer Materialersparnis von bis zu 20 %. Damit, so fügte er scherzhaft hinzu, würde sein Honorar – ein kleiner Prozentsatz der Gesamtbaukosten – allemal eingespielt.

Zur Untermauerung seines Arguments verwies Baker auf neuere Forschungen zur Datenvisualisierung als konstruktives Entwurfswerkzeug, wie sie etwa Sam Conrad Joyce in einem ebenfalls beim IASS Symposium 2015 gehaltenen Vortrag präsentierte.² Joyce tritt für die Verwendung von Werkzeugen ein, mit deren Hilfe Bauingenieure ihre bewährten Kalkulationstabellen effizient und intuitiv durch (webbasierte) Datenvisualisierungstools ersetzen können. Ziel solcher Werkzeuge ist es, durch effektivere Visualisierungen zu einer fundierteren Entscheidungsfindung in der Entwurfsphase zu gelangen. Wenn aber der grafische Output den Prozess, mit dem die Ergebnisse der Datenvisualisierung erzielt wurden, nicht abbildet oder wenn seine Elemente – Farbe, Linie, Maßstab, Richtung usw. – die Interpretation verschleiern statt sie zu verdeutlichen, so entsteht durch die Visualisierung eine Blackbox. Unter Bezugnahme auf Forschungen von Visualisierungsexperten wie Jacques Bertin, Edward R. Tufte und Jock Mackinlay stellt Joyce fest, dass Position und Länge in der Liste der intuitiv verarbeitbaren Informationen ganz oben stehen, während Farbe ganz unten rangiert. Baker ist der gleichen Meinung: Farbfeedback, sagt er, teile ihm

nichts darüber mit, wie (gut) ein Tragwerk funktioniert; vor allem aber teile es ihm nichts darüber mit, wie es zu verbessern sei.

Ausgehend von diesen überzeugenden Argumenten wollen wir hier dafür plädieren, nicht weiterhin in digitale Zoonwörter zur Zähmung von Rhino und Grasshopper zu investieren, sondern einige höher entwickelte logische Geschöpfe und vielleicht sogar den Menschen mit ins Boot zu holen. Die Metapher ist zugegebenermaßen etwas vereinfachend, aber im Grunde sind die genannten Tiere – unsere digitalen Werkzeuge – allesamt Blackboxes, stehen für Blindheit und rohe Gewalt. Es ist an der Zeit, die Blackbox zu öffnen, oder überhaupt zu verlassen, wenn es darum geht, Alternativen sichtbar zu machen, die Unbestimmtheit von Problemen zu nutzen, den Entwurfsraum zu visualisieren und die Mittel zur Erkundung dieses Raums weiterzuentwickeln. Zur Veranschaulichung dieser allgemeinen Philosophie stellen wir in der Folge eine Reihe von Fallbeispielen aus unserer eigenen auf grafischer Statik beruhenden Forschung und Praxis vor. Wie diese Beispiele zeigen, haben moderne Computertechnologien traditionelle Methoden wie die grafische Statik nicht überflüssig gemacht, sondern es scheint vielmehr so, dass deren Verbindung das Beste beider Welten zum Vorschein bringt.

Auf Beschränkungen basierende grafische Statik: Entwerfen mit Kräften. Einer der größten Vorteile der grafischen Statik ist die Möglichkeit, das Verhältnis zwischen Tragwerksform und dem Gleichgewicht seiner inneren und äußeren Kräfte in geometrisch gekoppelten Zeichnungen, den sogenannten Lage- und Kräfteplänen, darzustellen.³ Die Größe der Kräfte im Tragsystem werden im Kräfteplan durch Liniensegmente dargestellt; je größer die Länge desto größer die Kraft. Mithilfe moderner Computertechnik und computerbasierter Methoden lassen sich diese Lage- und Kräftepläne als bidirektionale Kontrollmechanismen verwenden: also nicht nur, um die Auswirkungen der Geometrie eines Systems auf seine tragstrukturelle Leistungsfähigkeit zu prüfen, sondern auch umgekehrt um ein Tragwerk durch die Kontrolle oder Konstruktion seiner Kräftegeometrie zu entwerfen. Abbildung 2 zeigt die Verwandlung eines regelmäßigen Fachwerkträgers in zwei Konfigurationen mit konstanter Kraft im Ober- bzw. Untergurt, einfach durch die Beschränkungen bestimmter Knoten des Kräfteplans auf eine Linie oder einen Kreis. Das zeigt deutlich, dass eine Optimierung der Geometrie explizit und direkt durch die Gestaltung von Kräften erreicht werden kann, statt durch endlose Iterationen.

1 Vgl. Baker, William: „Future Visions“, Hauptvortrag im Rahmen des Symposiums der International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Amsterdam, 20. August 2015.

2 Vgl. Joyce, Sam Conrad, „Web Based Data Visualisation Applied to Creative Decision Making in Parametric Structural Design“, in: Coenders, Jeroen/Borgart, Andrew/Pronk, Arno (Hg.), *Proceedings of the IASS 2015 Symposium*, Amsterdam 2015, o. P.

3 Vgl. Van Mele, Tom/Block, Philippe, „Algebraic Graphic Statics“, in: *Computer-Aided Design (CAD)* 53 (2014), 104–116.

Compression-Only Branching Structures through Subdivision. An insightful, even surprising way to look at any force diagram in graphic statics is as the subdivision of a closed polygon representing the equilibrium of forces.⁴ Each subdivision of this global polygon corresponds to a different solution for the same boundary conditions. Furthermore, by imposing certain constraints on the subdivision scheme, different types of structures with specific characteristics can be obtained. For example, any subdivision with only convex faces will result in a system of forces that is either in pure compression or tension. This principle can be used to explore a wide variety of topologies and geometries of compression-only branching structures for given loads and supports. Figure 3 depicts three such solutions obtained by different subdivision schemes of the same global force polygon, illustrating the power and versatility of this new way of using graphic statics.

Compression Shells: Exploring Indeterminacy. Thrust Network Analysis (TNA) is a novel method for generating compression-only, vaulted surface structures.⁵ It provides a graphical and intuitive approach to explore discrete, funicular networks by using the form and force diagrams of graphics statics to control the geometry of the projection of a chosen force layout and its horizontal equilibrium. Used in form finding, this method provides control over the many degrees of freedom of highly indeterminate, three-dimensional equilibrium networks, allowing the designer to explore structural form. Figure 4 depicts six of the infinite number of possible funicular equilibrium shapes for a circular support.⁶ The form diagrams represent the horizontal projections of the force patterns of these shapes, and the beautiful force diagrams visualize the specific distributions of horizontal thrust that result in their expressive shapes. A simple geometric constraint requiring all faces of the force diagrams to be convex ensures that all solutions are in pure compression. Such highly constrained form finding would hardly be imaginable without a direct, graphical method. Furthermore,

Rein druckbeanspruchte Verzweigungskonstruktionen durch Unterteilung. Einen lehrreichen, oft überraschenden Blick auf jeden Kräfteplan liefert in der grafischen Statik die Unterteilung des geschlossenen, das Kräftegleichgewicht darstellenden Polygons.⁴ Jede Unterteilung dessen entspricht einer anderen Lösung für die gleichen Randbedingungen. Außerdem lassen sich durch die Anwendung bestimmter Beschränkungen auf das Unterteilungsschema verschiedene Tragwerkstypen mit eigenen Merkmalen erzielen. So wird etwa jede Unterteilung, die nur aus konvexen Polygonen besteht, entweder zu einem rein druck- oder einem rein zugbeanspruchten Kräftesystem führen. Dieser Umstand kann z.B. dazu genutzt werden, eine Vielzahl an Topologien und Geometrien rein druckbeanspruchter Verzweigungskonstruktionen für bestimmte Lasten und Auflagerbedingungen zu erkunden. Abbildung 3 zeigt drei Lösungen, die durch verschiedene Unterteilungsschemata des gleichen globalen Kräftepolygons gewonnen wurden und belegt damit die Leistungsfähigkeit und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieses neuen Ansatzes in der grafischen Statik.

Druckschalen: Erkundung der Formvielfalt. Die Thrust Network Analysis (TNA) ist eine neue Methode zum Entwerfen rein druckbeanspruchter gekrümmter Flächentragwerke.⁵ Sie stellt ein grafisches und intuitives Verfahren zur Erforschung diskreter Stützliniennetzwerke zur Verfügung, bei dem sich mithilfe von Lage- und Kräfteplänen die Projektionsgeometrie der gewählten Kraftflüsse bzw. deren horizontales Gleichgewicht steuern lässt. Diese in der Formfindung eingesetzte Methode ermöglicht die Kontrolle über viele Freiheitsgrade vielfach unbestimmter dreidimensionaler Netzwerke im Gleichgewicht und erlaubt dem Entwerfenden damit eine Erkundung von Tragwerksformen. Abbildung 4 zeigt sechs von unendlich vielen möglichen im Gleichgewicht befindlichen Stützlinientragwerken für ein kreisförmiges Auflager.⁶ Die Lagepläne stellen die Horizontalprojektion der Kraftflüsse dieser Formen dar, und die ausdrucksstarken Kräftepläne veranschaulichen die jeweilige Verteilung der Horizontalkräfte, die ihre

4 See Masoud Akbarzadeh, Tom Van Mele and Philippe Block, "Compression-Only Form Finding through Finite Subdivision of the External Force Polygon," in *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium*, ed. Reyolando M.L.R.F. Brasil and Ruy M.O. Pauletti (Brasilia, 2014), n. p.

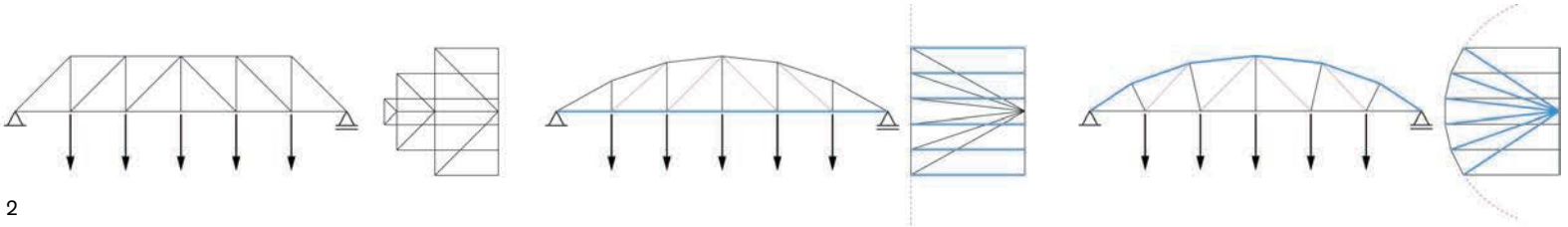
5 See Philippe Block and John Ochsendorf, "Thrust Network Analysis: A New Methodology for Three-Dimensional Equilibrium," *Journal of the IASS* 48, no. 3 (2007), pp. 167–173.

6 See John Ochsendorf and Philippe Block, "Exploring Shell Forms," in *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, ed. Sigrid Adriaenssens, Philippe Block, Diederik Veenendaal, and Chris Williams (London, 2014), pp. 7–12.

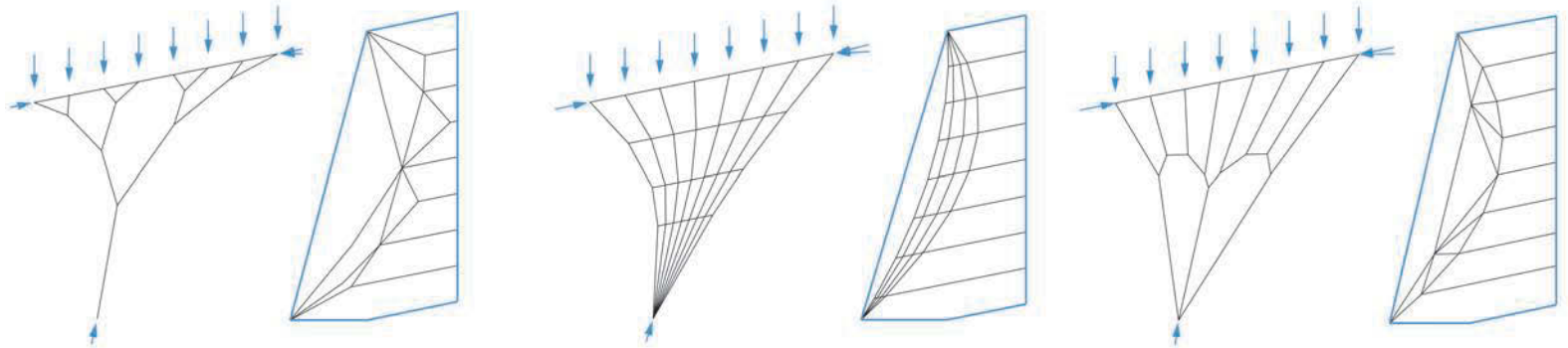
4 Vgl. Akbarzadeh, Masoud/Van Mele, Tom/Block, Philippe: „Compression-Only Form Finding through Finite Subdivision of the External Force Polygon“, in: Brasil, Reyolando M.L.R.F./Pauletti, Ruy M.O. (Hg.): *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium*, Brasilia 2014, o. P.

5 Vgl. Block, Philippe/Ochsendorf, John: „Thrust Network Analysis: A New Methodology for Three-Dimensional Equilibrium“, in: *Journal of the IASS* 48, 3 (2007), 167–173.

6 Vgl. Ochsendorf, John/Block, Philippe: „Exploring Shell Forms“, in: Adriaenssens, Sigrid u. a. (Hg.): *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, London 2014, 7–12.



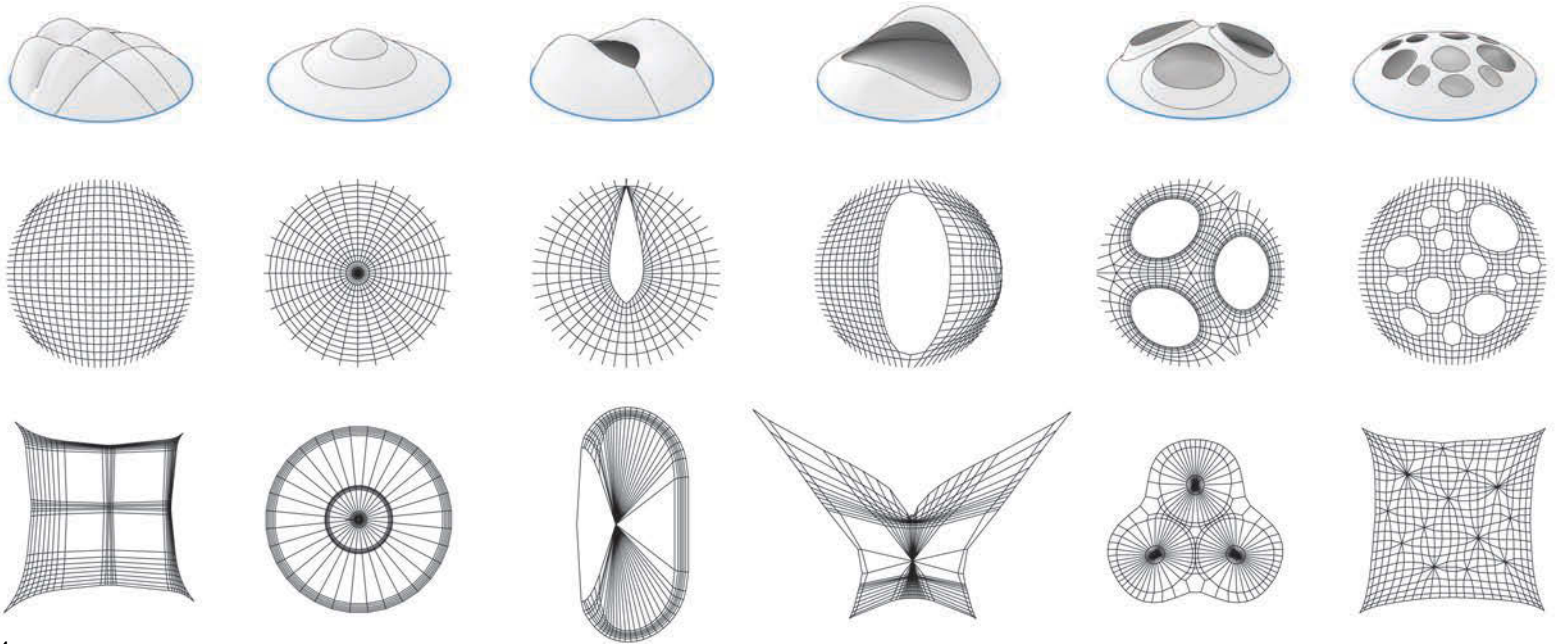
2



3

(2) A truss can be shaped by designing the distribution of forces rather than by designing the truss itself. Here we show three solutions for the same boundary conditions, i.e. the same loads and supports. From left to right: a standard Howe truss, a truss with constant force in the bottom chord, and a truss with constant force in the top chord. In the second and third configurations, selected vertices have been constrained to a vertical line or a circle, respectively, such that the segments representing the forces in the bottom or top chord (marked in blue) have equal length | Ein Fachwerkträger kann auch durch den Entwurf der Kräfteverteilung gestaltet werden, nicht nur durch den des Fachwerks. Wir zeigen hier drei Lösungen für die gleichen Randbedingungen, d. h. dieselben Lasten und Lager. Von links nach rechts: Ein normaler Howe-Träger, ein Träger mit konstanter Kraft im Untergurt und ein Träger mit konstanter Kraft im Obergurt. Im zweiten und dritten Fall wurden bestimmte Knotenpunkte auf eine vertikale Linie bzw. einen Kreis beschränkt, sodass die die Kräfte im Unter- bzw. Obergurt repräsentierenden Segmente (blau hervorgehoben) die gleiche Länge aufweisen, Zürich | Zurich, 2015 © Block Research Group, ETH Zurich

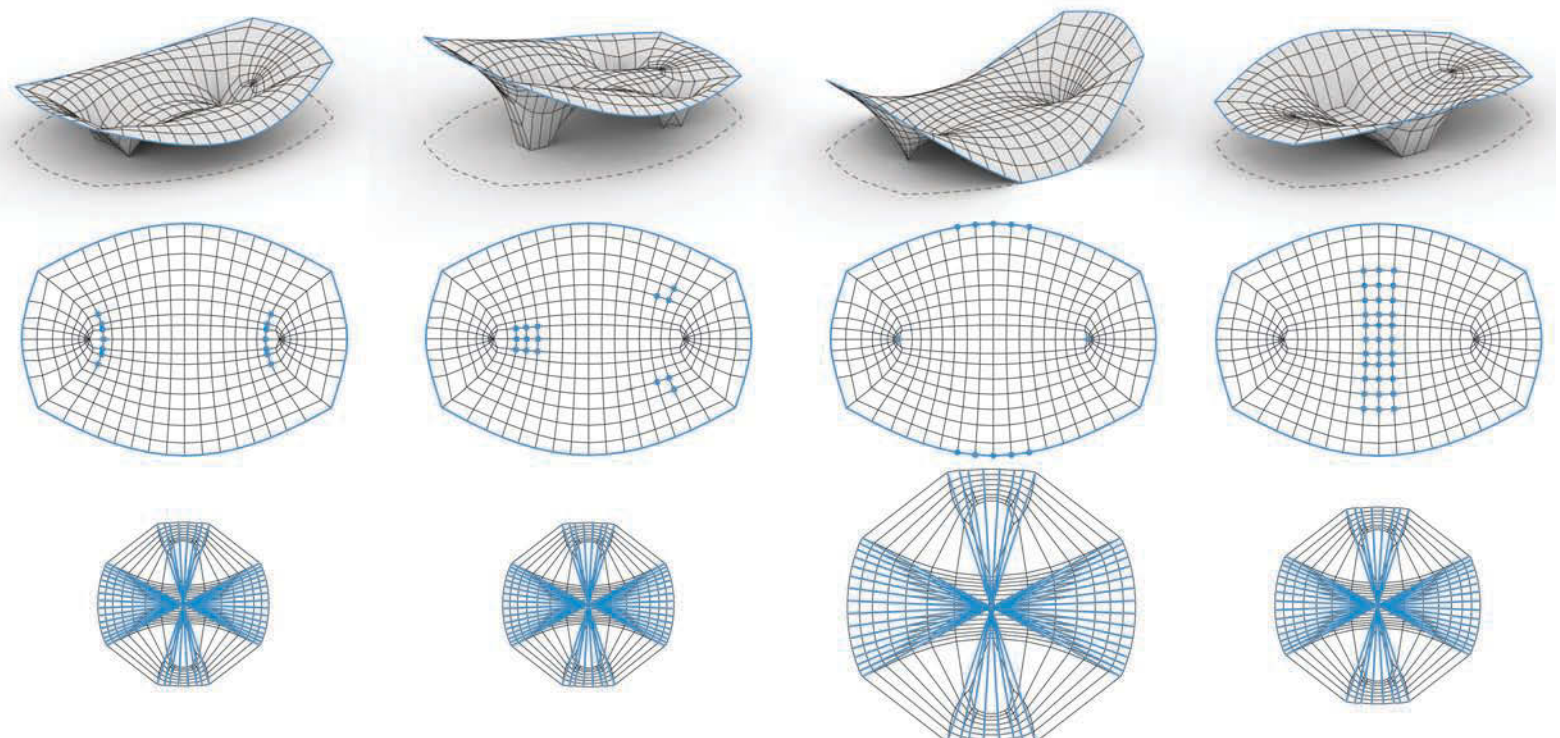
(3) Different branching structures for the same boundary conditions can be obtained by applying different subdivision schemes to the force polygon in the force diagram. The boundary conditions and corresponding global force polygon are marked in blue. From left to right, the resulting tree structures are obtained through simple barycentric subdivision, an offset-based subdivision scheme, and user-controlled, manual subdivision. All subdivisions produce force diagrams with only convex cells, thus representing a compressive solution. | Verschiedene Verzweigungskonstruktionen für gleiche Randbedingungen lassen sich durch unterschiedliche Aufteilungsschemata innerhalb des Kräftepolygons im Kräfteplan gewinnen. Die Randbedingungen und das entsprechende Kräftepolygon sind blau hervorgehoben. Von links nach rechts: die verschiedenen Baumstrukturen entstehen durch einfache baryzentrische Unterteilung, ein versatzbasiertes Unterteilungsschema und durch nutzergesteuerte manuelle Unterteilung, Zurich | Zürich, 2014 © Block Research Group, ETH Zurich



4

(4) Six different compression networks/surfaces for a given circular boundary condition, (marked in blue) for self-weight loading. The figure shows the compression surface on the top, the form diagram representing the layout of the forces in plan in the middle, and the force diagram representing the distribution of horizontal forces in the system at the bottom. | Sechs verschiedene druckbeanspruchte Schalenformen für eine gegebene kreisförmige Randbedingung (blau hervorgehoben). Die Abbildung zeigt die Schalenoberfläche oben, den Lageplan mit der Anordnung der Kräfte im Grundriss (Mitte) und den Kräfteplan mit der Verteilung der Horizontalkräfte im System unten, Zurich | Zürich, 2014 © Block Research Group, ETH Zurich

(5) Design exploration of various funicular funnel shells which are defined as compression-only shells with a tension ring (highlighted in blue) along their boundaries. By changing the definition of free or fixed support nodes (marked with blue dots) and the overall magnitude of the horizontal thrusts in each structure, represented by the overall scale of the force diagram, very different equilibrium solutions, all with the same horizontal projection, are obtained. | Entwurfsfindung verschiedener rein druckbeanspruchter trichterförmiger Druckschalen mit einem Zugring am Rand (blau hervorgehoben). Durch Änderung der Definition freier und fester Auflagerknoten (letztere durch blaue Punkte hervorgehoben) und der Gesamtgröße der Horizontalkräfte jedes Tragwerks, dargestellt durch die Ausdehnung des jeweiligen Kräfteplans, entstehen ganz unterschiedliche Gleichgewichtslösungen, die alle dieselbe Horizontalprojektion im Lageplan aufweisen, Zurich | Zürich, 2013 © Block Research Group, ETH Zurich



5

through the intuitive, visual feedback on the explicit relation between form and forces provided during the form-finding process, the designer learns about the constraints of equilibrium, the exploration of exciting forms, and the geometric possibilities for optimization.

Combined Compression-Tension Structures. The combination of compression-only shells with balanced tension rings leads to a great variety of efficient and expressive forms.⁷ Such “funnel”- or “mushroom”-type structures are supported centrally, forming a cantilevering canopy without columns along the outer edge and extending the typical design space of compression-only structures. The method extends TNA, enabling the explicit and local control and manipulation of both compression and tension in such structures.

Figure 5 shows the design exploration of various funicular funnel shells generated with this approach. The variations of the equilibrium networks shown are realized by simply changing the definition of free or fixed support nodes (the latter marked with blue dots). The only other modification of the diagrams is the uniform scaling of the force diagrams. These are drawn to the same scale in the figure so that the overall magnitude of the horizontal thrusts in each structure can be visually compared. Based on these simple modifications during design exploration, the resulting funicular funnel shells vary greatly in shape and spatial articulation.

3D Graphic Statics: Form and Force Polyhedrons.

In three-dimensional space, the equilibrium of a compression or tension node can be represented graphically/geometrically with a closed (convex) polyhedron.⁸ In this 3D extension of graphic statics, the forces applied to the node are perpendicular to their reciprocal faces in the force polyhedron, and their magnitudes are proportional to the areas of these faces. By combining force polyhedrons into larger aggregations of polyhedral

expressive Gestalt bestimmt. Eine einfache geometrische Bedingung, der zufolge alle Polygone der Kräftepläne konvex sein müssen, sorgt dafür, dass ausschließlich Lösungen mit Druckbeanspruchung entstehen. Eine Formfindung mit so starken Beschränkungen wäre ohne eine direkte grafische Methode kaum denkbar. Durch das intuitive visuelle Feedback über das explizite Form-Kraft-Verhältnis, das der Entwerfende im Lauf des Formfindungsprozesses erfährt, lernt er oder sie zudem etwas über Gleichgewichtsbedingungen, die Erkundung spannender, neuartiger Formen und geometrische Optimierungsmöglichkeiten.

Tragwerke mit kombinierter Druck- und Zugbeanspruchung. Die in Abbildung 5 gezeigte Formfindungsstudie demonstriert, wie die Verbindung von rein druckbeanspruchten Schalen und ausbalancierten Zugringen zu einer großen Vielfalt an effizienten und ausdrucksstarken Formen führt.⁷ Solche „Trichter“- oder „Pilz“-förmigen Tragwerke sind zentral gestützt mit außen freistehenden Kragdächern und erweitern den üblichen Entwurfsraum rein druckbeanspruchter Tragwerke. Das Verfahren ist eine TNA-Erweiterung, die die explizite und lokale Kontrolle und Manipulation der Druck- und Zugverhältnisse in solchen Tragwerken ermöglicht.

Abbildung 5 zeigt die Entwurfsfindung verschiedener mit diesem Verfahren erzeugter Trichterschalen. Die Varianten von im Gleichgewicht befindlicher Netzwerke werden einfach durch die Änderung der Definition freier oder fester Auflagerknoten (letztere sind durch blaue Punkte hervorgehoben) erzeugt. Die einzige andere Modifikation ist die einheitliche Skalierung der Kräftepläne. Diese sind in der Abbildung maßstäblich angepasst, so dass die Horizontalkräfte aller Tragstrukturen visuell vergleichbar werden. Diese sehr einfachen Modifikationen in der Entwurfsfindung bringen in der Form und räumlichen Artikulation sehr unterschiedliche Schalen-geometrien hervor.

Dreidimensionale grafische Statik: Lage- und Kräftepolyeder. Im dreidimensionalen Raum lässt sich der Gleichgewichtszustand eines Druck- oder Zugknotens grafisch/geometrisch durch ein geschlossenes (konvexes) Polyeder darstellen.⁸ In dieser 3D-Erweiterung der grafischen Statik stehen die auf den Knoten wirkenden Kräfte senkrecht zu den ihnen reziproken Flächen im Kraftpolyeder und ihre Größe entspricht dem Inhalt dieser Flächen. Durch Verbindung der Polyeder zu größeren Polyederzellenaggregationen lassen sich dreidimensionale, druckbeanspruchte Tragsysteme entwerfen. Abbildung 6 zeigt drei vollräumliche Lösungen, die durch Ansammlung gleicher Polyeder entstanden sind und damit gleich belastete Knoten aufweisen. Löst man sich von diesem rigiden System, kann die eigentliche Steuerung von Lage und Kraft beginnen.

⁷ See Matthias Rippmann and Philippe Block, “Funicular Funnel Shells,” in *Proceedings of the Design Modelling Symposium*, ed. Christoph Gengnagel, Axel Kilian, Julien Nembrini, and Fabian Scheurer (Berlin, 2013), pp. 75–89.

⁸ See Masoud Akbarzadeh, Tom Van Mele and Philippe Block, “On the Equilibrium of Funicular Polyhedral Frames and Convex Polyhedral Force Diagrams,” *CAD 63* (2015), pp. 118–128.

⁷ Vgl. Rippmann, Matthias/Block, Philippe: „Funicular Funnel Shells“, in: Gengnagel, Christoph u.a. (Hg.): *Proceedings of the Design Modelling Symposium*, Berlin 2013, 75–89.

⁸ Vgl. Akbarzadeh, Masoud/Van Mele, Tom/Block, Philippe: „On the Equilibrium of Funicular Polyhedral Frames and Convex Polyhedral Force Diagrams“, in: *CAD 63* (2015), 118–128.

cells, three-dimensional funicular systems of forces can be designed. Figure 6 shows three fully spatial solutions, constructed by aggregating the same polyhedrons, thus resulting in equally stressed nodes. Breaking away from this rigor, the real steering of form and force can begin.

Spatial Subdivision: Discovering Fully Three-Dimensional Funicular Equilibrium. Extending the subdivision logic introduced above for two-dimensional branching structures to spatial structures allows direct form and force driven explorations of funicular geometry.⁹ Figure 7 shows a sophisticated compression-only tree structure obtained through force-polyhedron aggregation and compression-constrained subdivision schemes. The latter can be driven by aesthetics or used in an optimization that considers buckling.

Conclusion. Baker emphasized that, as engineers, we are trained to design by analysis. This does not often lead to solutions that are actually new, nor does it foster creativity. While we acknowledge that structural design cannot be decoupled from all other important constraints, objectives, or parameters in a real building, this contribution sought to demonstrate how we think tools should function and argues why we should put greater effort into the development of computational “white box” tools. Instead of automated, design-by-analysis, black-box tools that merely give the designer the feeling that he or she is obtaining sophisticated, (r)evolutionary solutions, we advocate the use of tools that truly educate designers in the process of designing.

In 2012, we argued for a “geometry-based understanding of structures.”¹⁰ Still today, this approach provides the tools to continuously discover new structural form, and more importantly, it repeatedly surprises us about the power of equilibrium. Now, with leading practitioners such as Bill Baker demonstrating the potential of such approaches, we are looking forward to what lost methods like graphic statics can enhance and expand. Thanks to new computational possibilities, they will have an impact in a world where the demands and constraints on our buildings, for example, their carbon footprints, are becoming stronger and stronger. ■

Räumliche Unterteilung. Die Erkundung des voll-räumlichen Druckkräftegleichgewichts. Die Erweiterung der oben eingeführten Unterteilungslogik für zweidimensionale Verzweigungsstrukturen auf räumliche Konstruktionen ermöglicht die direkte Untersuchung von druckbeanspruchten Formen auf der Basis von Lage und Kraft.⁹ Abbildung 7 zeigt eine durch Kraftpolyederaggregation und durch druckbeschränkte Unterteilungsschemata gewonnene rein druckbeanspruchte Baumstruktur. Die Unterteilungsschemata können entweder ästhetischen Kriterien folgen oder zur Optimierung der Knickfestigkeit dienen.

Resümee. Baker betonte, dass wir als Ingenieure gelernt haben, analytisch zu entwerfen. Das führt nicht unbedingt zu wirklich neuen Lösungen, noch fördert es die Kreativität. Auch wir sind der Meinung, dass konstruktives Entwerfen nicht von all den anderen wichtigen Beschränkungen, Zielen oder Parametern, die in reale Bauwerke einfließen, getrennt werden kann; hier aber ging es uns vor allem darum zu zeigen, wie Werkzeuge unserer Meinung nach funktionieren sollten und warum wir uns mehr um die Entwicklung computerbasierter „Whitebox“-Tools bemühen sollten. Statt automatisierter Blackbox-Entwurfstools mit integrierter Analyse, die dem oder der Entwerfenden lediglich vorgaukeln, er oder sie gelange damit zu komplexen, (r)evolutionären Lösungen, empfehlen wir die Verwendung von Werkzeugen, die den Entwerfenden im Entwurfsprozess wirklich weiterbilden.

2012 plädierten wir für ein „geometriebasiertes Verständnis von Tragstrukturen“.¹⁰ Auch heute noch bietet dieser Ansatz die Mittel dazu, ständig neue Tragwerksformen zu entdecken und, was wichtiger ist, uns immer wieder mit der Kraft des Gleichgewichts zu überraschen. Nun, da auch führende Praktiker wie Bill Baker zeigen, welches Potenzial diese Ansätze besitzen, können wir uns darauf freuen, was man mit solchen vergessenen Methoden wie der grafischen Statik noch erreichen und weiterbringen wird. Dank neuer, durch den Computer eröffneter Möglichkeiten, werden sie in einer Welt, in der die Anforderungen an unsere Bauwerke – etwa ihre CO₂-Bilanz – immer weiter steigen, sicher ihre Wirkung entfalten. ■

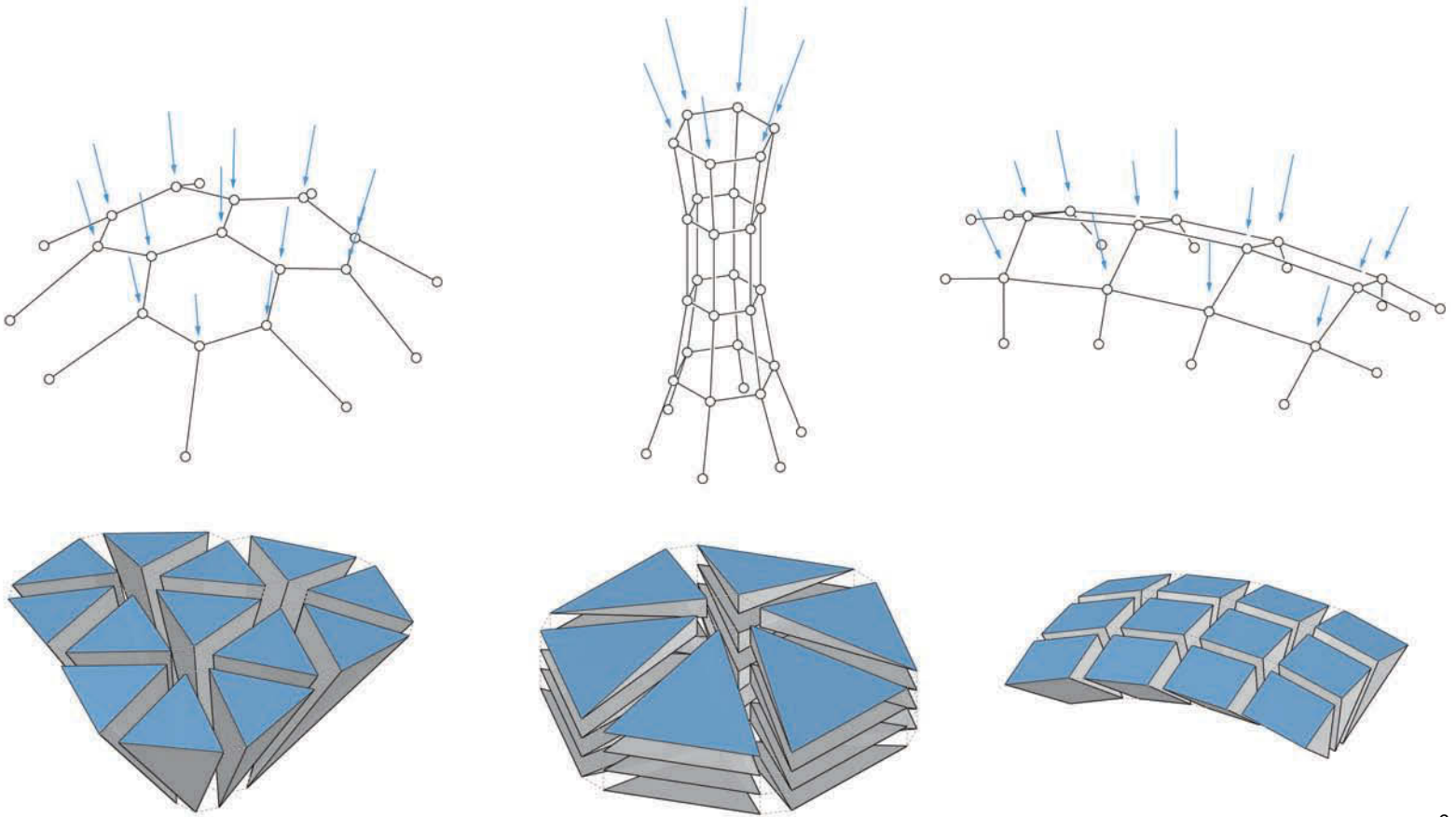
Übersetzung: Wilfried Prantner

9 See Masoud Akbarzadeh, Tom Van Mele and Philippe Block, “Spatial Compression-Only Form Finding through Subdivision of External Force Polyhedron,” in *Proceedings of the IASS 2015 Symposium*, edited by Jeroen Coenders, Andrew Borgart, and Arno Pronk (Amsterdam, 2015), n. p.

10 Tom Van Mele, Lorenz Lachauer, Matthias Rippmann and Philippe Block, “Geometry-Based Understanding of Structures,” in *Journal of the IASS* 53, no. 4 (2012), pp. 285–295.

9 Vgl. Akbarzadeh, Masoud/Van Mele, Tom/Block, Philippe: „Spatial Compression-Only Form Finding through Subdivision of External Force Polyhedron“; in: Coenders, Jeroen/Borgart, Andrew/Pronk, Arno (Hg.): *Proceedings of the IASS 2015 Symposium*, o.P. (wie Anm. 2).

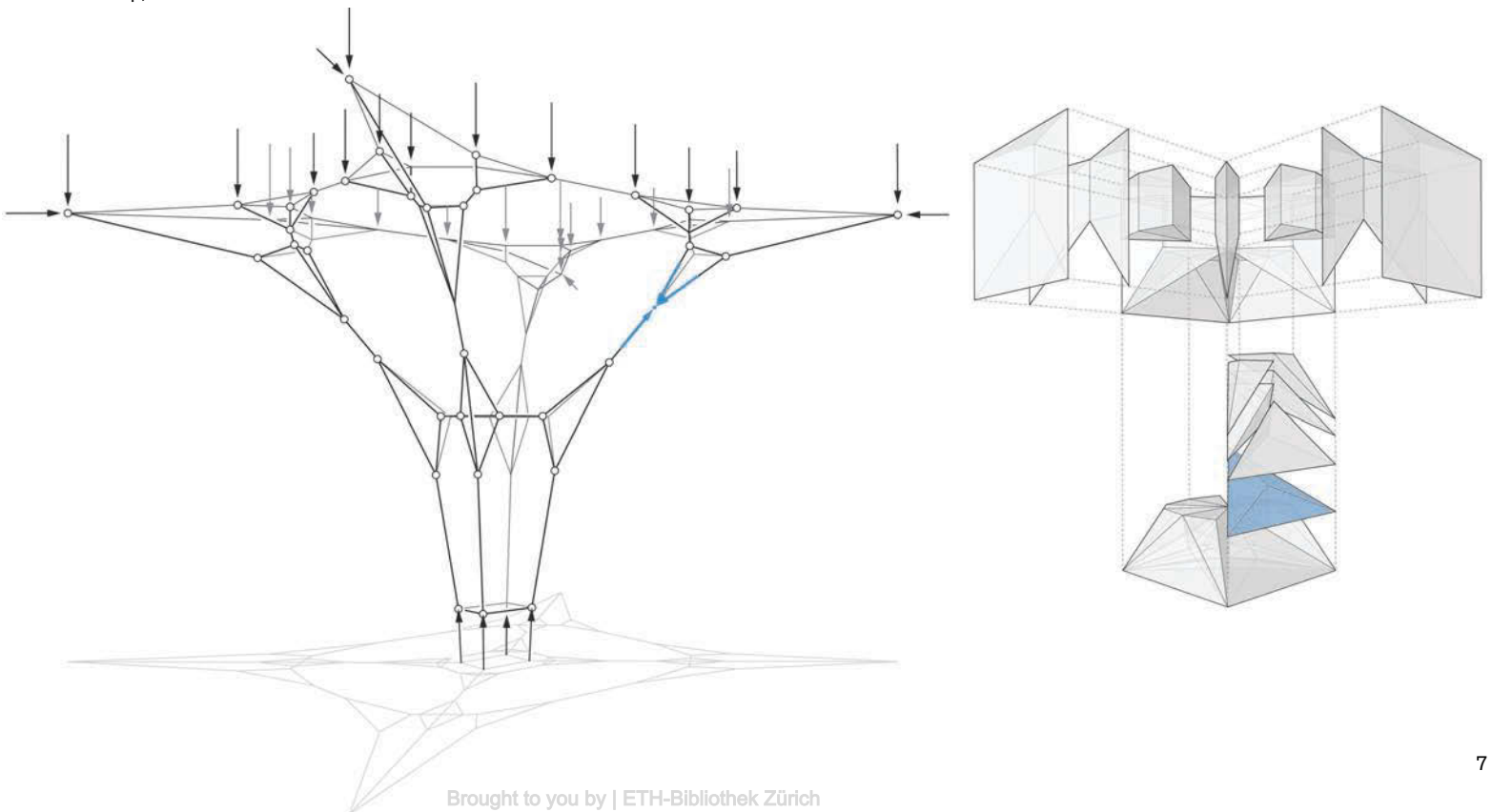
10 Van Mele, Tom/Lachauer, Lorenz/Rippmann, Matthias/Block, Philippe, „Geometry-Based Understanding of Structures“, in: *Journal of the IASS* 53, 4 (2012), 285–295.



6

(6) By aggregating polyhedrons to form a 3D force diagram (bottom), one can quickly design expressive, spatial, funicular networks (top). Each polyhedron represents the equilibrium of forces at a node in the network, with the areas of its faces proportional to the magnitude of forces in the corresponding (perpendicular) elements in the form diagram. | Durch die Aggregation von Polyedern zu einem 3D-Kräfteplan (unten) lassen sich rasch ausdrucksstarke räumliche Seilnetze entwickeln (oben). Jedes Polyeder repräsentiert das Kräftegleichgewicht an einem Knoten des Netzwerks, wobei sein Flächeninhalt der Größe der Kräfte in den entsprechenden (senkrechten) Elementen des Lageplans entspricht, Zurich | Zürich, 2015 © Block Research Group, ETH Zurich

(7) Combining aggregation of polyhedral cells and internal subdivision, very spatial compression or tension-only support structures can be discovered. The force equilibrium of the node highlighted in blue is represented by the closed polyhedral cell. | Durch Verbindung von Polyederaggregation und innere Unterteilung lassen sich räumliche rein druck- oder rein zugbeanspruchte Tragwerke entwerfen. Das Kräftegleichgewicht des blau hervorgehobenen Knotens wird durch die geschlossene Polyederzelle repräsentiert, Zurich | Zürich, 2015 © Block Research Group, ETH Zurich



7