

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile | Fundamental research towards an adaptive formwork system development for freeform concrete building components

► Carl-Alexander Graubner¹, Ulrich Knaack², Tilo Prose¹, Björn Freund¹, Matthias Michel², Sascha Hickert²

► ¹ Institut für Massivbau (IfM), TU Darmstadt

► ² Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), TU Darmstadt (bis 30.9.2014 Lehrgebiet Entwerfen und Konstruieren, TH Ostwestfalen-Lippe)

1 Ausgangssituation

Für die Realisierung nach bionischen Prinzipien entworfener Betontragwerke mit frei geformten Bauteilkonturen ist die erforderliche Schalung in technischer und ökonomischer Hinsicht von eminenter Bedeutung. Im Forschungsvorhaben wurde sich mit der Entwicklung adaptiver und aktiv regulierbarer Schalungssysteme befasst, welche durch den Einsatz neuartiger Materialien und Konstruktionsprinzipien flexibel auf beliebig geneigte und gekrümmte Bauteiloberflächen reagieren kann. Das Schalungssystem selbst soll nach bionischen Prinzipien agieren. Computergestützt ansteuerbare, elektrisch regulierbare Stellgliedsysteme ermöglichen effiziente, materialsparende Herstellverfahren und minimieren die Beanspruchung des Schalungssystems.

Zwischen dem auf die Schalung einwirkenden Frischbetondruck und dem verwendeten Schalungssystem besteht ein komplexer, nichtlinearer Zusammenhang, welcher insbesondere für geneigte und frei geformte Bauteiloberflächen wissenschaftlich noch nicht untersucht wurde. Die vielfältigen Einflussgrößen auf den Frischbetondruck werden analysiert. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen wird ein allgemein-

1 Starting point

Formwork has great significance for the realisation of concrete load-bearing structures designed according to bionic principles with free-formed contours in technical and economic regard. The research project focussed on developing adaptive and actively controllable formwork systems that can flexibly respond to arbitrarily inclined and curved building part surfaces using new material and construction principles. The formwork itself is supposed to act according to bionic principles. Computer-aided, electrically controllable control element systems allow for efficient, material-saving manufacturing methods and minimise the load on the formwork system.

A complex non-linear relationship exists between the pressure of the fresh concrete on the formwork and the formwork system used. This relationship has not yet been scientifically examined for inclined and free-formed building part surfaces. The various parameters influencing the pressure of fresh concrete are analysed. The identified findings are used to work out a universally valid engineering model to specify the pressure of fresh concrete that acts on inclined and curved formwork surfaces. The re-

gültiges Ingenieurmodell zur Bestimmung des auf geneigte und gekrümmte Schalungsflächen einwirkenden Frischbetondrucks erarbeitet. Die mit diesem Modell erhaltenen Ergebnisse wurden exemplarisch anhand von Bauteilversuchen verifiziert.

sults gained from this model were exemplarily verified through building part tests.

2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

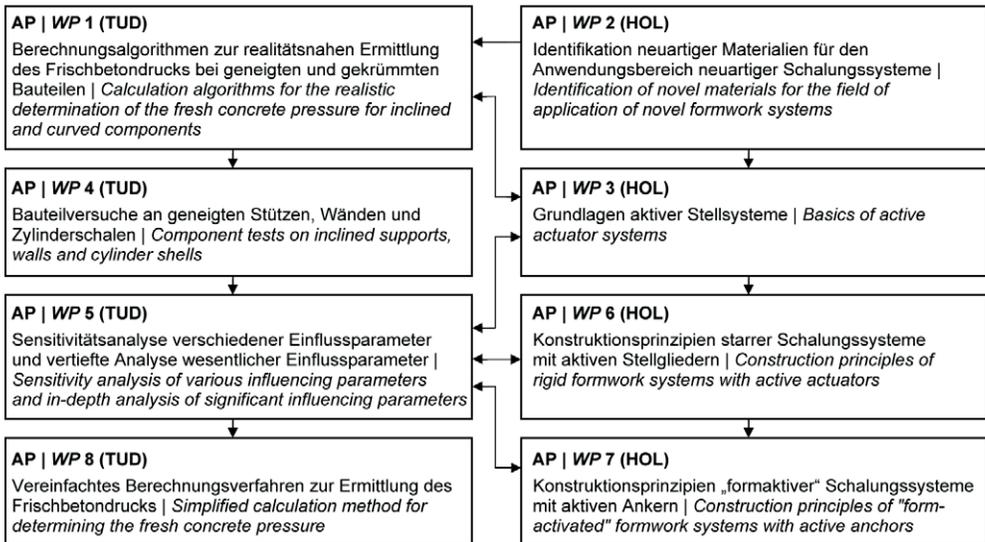
2 Objective and work programme

Der Grundgedanke des Forschungsvorhabens war die wirklichkeitsnahe Erfassung der Interaktion zwischen dem einwirkenden Frischbetondruck und der widerstehenden Schalung als Grundlage für die Entwicklung neuartiger adaptiver Schalungssysteme, deren Geometrie aktiv gesteuert werden kann.

The underlying thought behind the research project was a realistic registration of the interaction between the pressure exerted by the fresh concrete and the resisting formwork for the development of novel, adaptive formwork systems whose geometries can be actively controlled.

Als Grundlage für aktiv regulierbare Schalungssysteme sollten des Weiteren materialsparende und somit dem bionischen Bildungsprinzip angemessene Konstruktionsprinzipien für Schalungssysteme erforscht werden. Die gewählte Projektstruktur und das Zusammenwirken der Projektpartner und der einzelnen Arbeitspakete ist in Bild 1 dargestellt.

Furthermore, as a basis for actively adjustable formwork systems, material-saving construction principles for formwork systems should be researched, thus appropriate to the bionic formation principle. The chosen project structure and the interaction between the project partners and the individual work packages are shown in Fig. 1.



mit | with: TUD: TU Darmstadt, Team Graubner; HOL: Hochschule Ostwestfalen-Lippe (später ebenfalls | later also TU Darmstadt), Team Knaack

Bild 1: Übersicht über das Arbeitsprogramm | Fig. 1: Overview of the work program

3 Computergesteuerte adaptive Schalungen für Wände und Schalen aus Beton (Team Knaack)

3.1 Analyse von Gebäudegeometrien

Bei der Formgebung erstarrender Werkstoffe nimmt der Formenbau einen signifikanten Anteil der Herstellungskosten in Anspruch. Dies gilt insbesondere bei gekrümmten Geometrien und besonders dann, wenn das herzustellende Bauteil flächiger Natur, wie z. B. ein Betonbauteil ist, das als Wand oder Teil eines Schalentragswerks zur Nutzung kommen soll. Zur Grundlagenermittlung wurden 160 realisierte Gebäude mit gekrümmten Stahlbetonbauteilen bzw. Schalentragswerke hinsichtlich ihrer Krümmungsverteilung untersucht und Häufungen von Krümmungen bzw. eine Systematik, welche in der architektonischen Formsprache vermehrt auftritt, identifiziert.

Diese Daten dienen als Grundlage, um die Beanspruchung der Schalungsflächen sowie die notwendige Dimensionierung der aktiven Stellglieder der zu entwickelnden adaptiven Schalungssysteme einzugrenzen. Die in der Analyse verwendeten Radien (Bild 2) basieren auf vorliegenden Grundrissen und Schnitten. Ausschlaggebend für die Auswahl der Radien ist die Dominanz des Radius in Bezug auf das gesamte Gebäude. Kategorisiert wurden die erhobenen Daten zum einen auf Bauteilebene (tragende Wand, Fassade, Dach, Schalentragswerk), zum anderen hinsichtlich der Gebäudegeometrie (einsinnig gekrümmt, antiklastisch, synklastisch).

In einer Evaluationsmatrix wurden geometrische, konstruktive und funktionale Eigenschaften in Beziehung gesetzt. Zur Entwicklung der adaptiven Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile sind die Krümmungen von tragenden, lotrechten Bauteilen mit Freiformflächenanteil (antiklastische Flächen) von Bedeutung. Aus der Systematik der architektonischen Formsprache konnte aus der Evaluationsmatrix herausgestellt werden, dass die meist komplexen Gebäudegeometrien Anwendung in Ge-

3 Computer-controlled adaptive formwork for walls and shells made of concrete (team Knaack)

3.1 Analysis of building geometries

In shaping solidifying materials, mould construction takes up a significant proportion of the manufacturing costs. This particularly applies to curved geometries, especially if the components to be produced are flat, such as concrete components for walls or parts of a shell structure. One hundred sixty realised buildings with curved reinforced concrete components or shell structures were identified to determine the basic parameters. The selection criteria included curvature distribution, accumulations of curvature, or a system that occurs more frequently in the architectural form language.

The collected data served as a basis to limit the stress on formwork planes as well as the necessary dimensioning of the active control elements of the adaptive formwork systems to be developed. The radii used in the analysis (Fig. 2) are based on available floor plans and sections. The decisive factor for selecting the radii is the dominance of the radius in relation to the entire building. The data collected were categorised at the component level (load-bearing wall, façade, roof, load-bearing shell structure), on the one hand, and with regard to the building geometry (single-sided curvature, anticlastic, synclastic), on the other hand.

Geometric, structural and functional properties were correlated in an evaluation matrix. The curvatures of load-bearing, vertical components with free-form surfaces (anticlastic surfaces) are important for developing adaptive formwork systems for free-form concrete building components. The evolution matrix based on the systematics of architectural form language showed that the most complex building geometries find application in building types with a representative character (e.g. museum building). The radii of massive load-bearing structures used to create vertical enveloping surfaces were primarily found in the radius spectrum

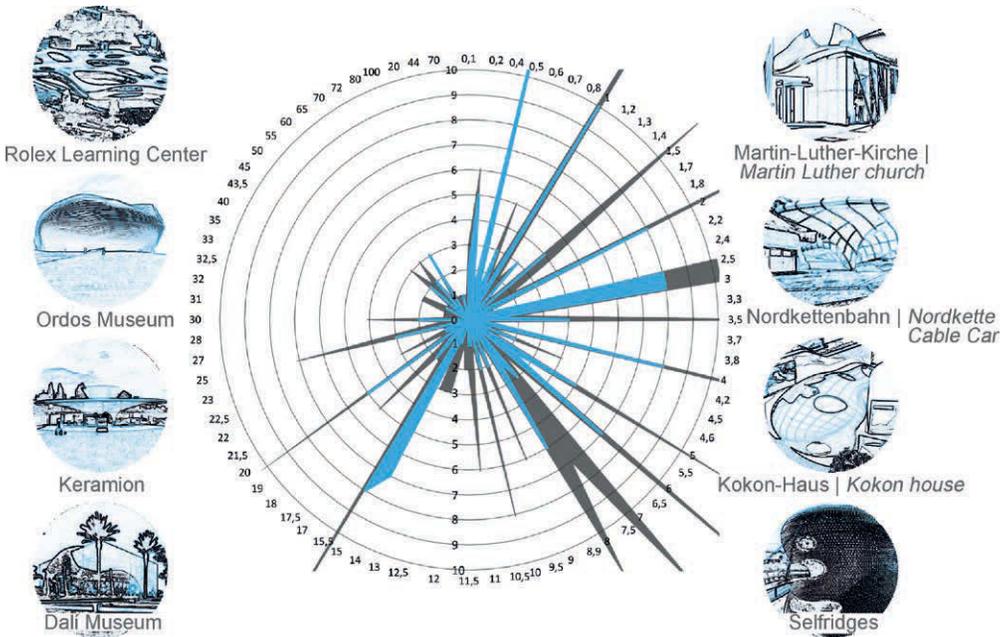


Bild 2: Radiendiagramm mit Gebäuden, die eine antiklastische gekrümmte Fläche aufweisen | Fig. 2: Radius diagram with buildings that have an anticlastically curved area

bäudetyphen mit repräsentativen Eigenschaften (z. B. Museumsbau) finden. Die verwendeten Radien massiver Tragkonstruktionen zur Erzeugung von vertikalen Hüllflächen dominierten im Radienspektrum größer 6 m. Weiter zeichnete sich im architektonischen Trend der sogenannten Nicht-Standard-Architektur (Blob-Architektur, Freiformarchitektur) Tendenzen von komplexen, fließenden, biomorphen Formen mit Radien größer 13 m auf [1].

3.2 Grundlagen aktiver Stellgliedssysteme

Adaptive Schalungen bestehen primär aus einer stützenden, flächigen Schalhaut und beweglichen Stützelementen, denen die Formgebung der Schalungsoberfläche obliegt. Die geometrische und mechanische Interaktion von Stützelementen und Stützfläche stellt eine besondere Herausforderung dar. Recherchen haben gezeigt, dass sich an dieser Stelle maßgebliche Problemstellungen für eine großflächige Nutzung ergeben.

larger than 6 m. Furthermore, the architectural trend of so-called non-standard architecture (blob architecture, free-form architecture) tends to show complex, flowing, biomorphic forms with radii greater than 13 m [1].

3.2 Fundamentals of control element systems

Adaptive formwork primarily consists of a planar supporting skin and movable support elements, which are responsible for shaping the formwork surface. The geometric and mechanical interaction of support elements and support surface poses a particular challenge. Research has shown that these locations account for the most significant problems for large-scale use.

If a flat surface is bent into a curved shape by deflecting the support elements, the distance between its edges is shortened (Fig. 3). Support elements that are firmly connected to the surface must follow this movement. Therefore, they cannot be rigidly mounted on a base plate

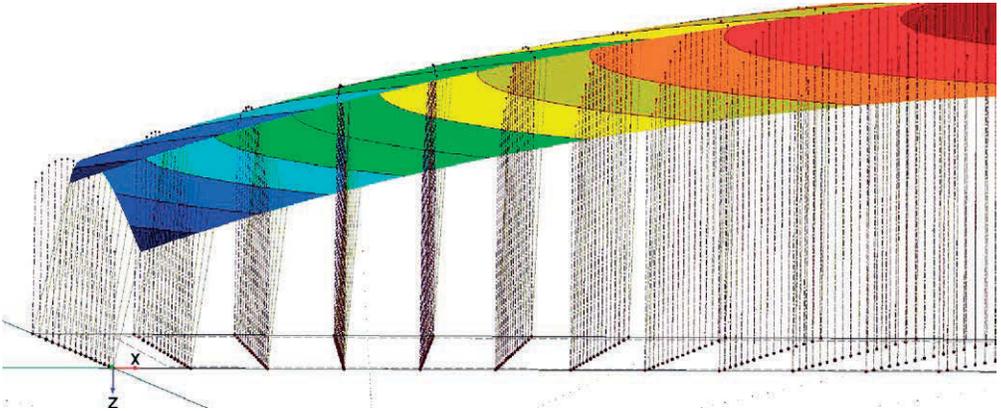


Bild 3: Beim Krümmen einer ebenen Fläche verkürzt sich der Abstand der Ränder zueinander. Um Zwängungen zu vermeiden, müssen die Stützelemente sich neigen. Hierbei ändert sich die Krümmung der Fläche. | **Fig. 3:** If a flat surface is deformed, the distance between the edges is shortened. The support elements must be able to incline to avoid unwanted strain. Inclination changes the curvature.

Wird eine ebene Fläche durch Auslenkung der Stützelemente in eine gekrümmte Form gebracht, verkürzt sich der Abstand ihrer Ränder zueinander (Bild 3). Stützelemente, die fest mit der Fläche verbunden sind, müssen dieser Bewegung folgen. Sie können daher nicht auf einer Grundplatte starr gelagert werden und müssen als Pendelstäbe ausgebildet sein. In der Simulationsumgebung wurde die grundlegende Funktionsweise der Einrichtung mit ihren mechanischen und geometrischen Abhängigkeiten als Ganzes vom Abtasten einer vorgegebenen Fläche bis zum Einstellen der Aktuatoren simuliert. Mit dieser Methode konnte auch gezeigt werden, dass sich neigende Stützelemente an den Rändern eine Formabweichung bewirken, die durch eine Kompensation am Hub der Stützelemente korrigiert werden muss [2].

3.3 Grundlagen der elastischen Formapproximation

Erwartungsgemäß bestehen die größten Abweichungen einer durch elastisches Umformen approximierten Fläche zu ihrer Referenzgeometrie an den Rändern, Bild 4. Die Breite der abweichenden Randbereiche und die sinnvolle Anzahl der Stützelemente bestimmen die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des adaptiven Systems.

and must be designed as pendulum rods. In the simulation environment, the basic functioning of the set-up with its mechanical and geometric dependencies was simulated as a whole, from scanning a given surface to setting the actuators. This method also showed that tilting support elements cause a shape deviation at the edges, which has to be corrected by compensation at the base of the support elements [2].

3.3 Fundamentals of the elastic shape approximation

As expected, the greatest deviations in a surface approximated by elastic shaping from its reference geometry occur at the edges, Fig. 4. The width of the deviating edge areas and the reasonable number of support elements determine the performance and economy of the adaptive system.

Interpolation surfaces can be represented by crossed arrays of elastically bent rods. Therefore, the investigations into the accuracy of the edges were first carried out on a replacement rod. For this study, a simulation environment was created that can be used to represent and measure the complex processes of adaptivity. The Rhinoceros® software package was used for this purpose. The integrated graphical programming interface allows the parametrisation of geometries.

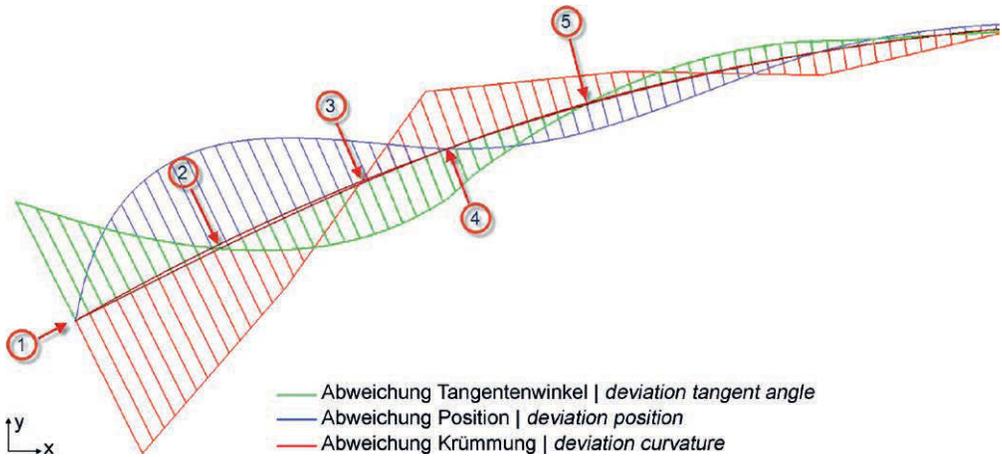


Bild 4: Bei der Approximation eines Kreisbogens durch eine Biegelinie bestehen naturgemäß auftretende Abweichungen, die hier als Graphen auf der Biegelinie abgetragen sind. Die Abfolge und Gestalt der Extrema und der Nullstellen ist stets gleichartig und unabhängig von Anzahl und Dichte der Stützpunkte. So liegen auch potentielle Grenzen der Nutzbarkeit stets gleich in Relation zu den Stützpunkten 1-5. | **Fig. 4:** There are deviations by default when trying to approximate a circle section by a bending curve. The deviation graphs are plotted along the curve. The scheme of the curve's extremes and zeropoints are alike and independent from number and distance of the supporting elements. The position of potential border points of usability are in constant relation to the actuators (points 1 to 5).

Interpolationsflächen können durch gekreuzte Scharen von elastisch gebogenen Stäben repräsentiert werden. Daher wurden die Untersuchungen zur Genauigkeit der Ränder zunächst an einem Ersatzstab vorgenommen. Für diese Untersuchung wurde eine Simulationsumgebung geschaffen, mit deren Hilfe man die komplexen Vorgänge der Adaptivität darstellen und messen kann. Hierzu wurde das Softwarepaket Rhinoceros® genutzt. Die darin implementierte graphische Programmierschnittstelle erlaubt es, Geometrie zu parametrisieren. Innerhalb dieser Schnittstelle bestehen wiederum Programme zur numerischen Berechnung von Strukturen. Somit können unmittelbar numerische Lösungen von Modellen erhalten werden, die in Abhängigkeit bestimmter gestaltgebender Parametereinstellungen in Echtzeit aufgebaut werden, wie es eine schrittweise untersuchte Interaktion von Stellgliedern mit adaptiven Flächen erfordert.

Mit diesen Werkzeugen wurde eine Biegelinie des Ersatzstabes einem Kreisbogen angenähert, wobei die Anzahl der Stützpunkte parametrisch variierbar ist. Die Approximation eines Kreisbogens durch eine Biegelinie wird stets Abweichungen ergeben, da sie an ihren Enden

Within this interface, there are programmes for the numerical calculation of structures. Thus, numerical solutions of models can be obtained immediately, built in real-time depending on certain formative parameter settings, as required when examining an incremental interaction of actuators with adaptive surfaces.

With these tools, a bending line of the replacement rod was approximated to a circular arc, whereby the number of support points can be varied parametrically. Approximation of a bending line to a circular arc will always result in deviations because, unlike the circular arc, it has no curvature at its ends. These deviations from the reference geometry are recorded and evaluated as position, inclination and curvature deviations over the course of the bending line, as shown exemplarily in Fig. 4. The course of the deviations turns out to be independent of the density of the supporting points and is always uniformly distributed between them. An increasing density of the supporting points positively influences the position deviation but not the curvature deviation.

Points on the bending line of the replacement rod were investigated as possible boundary

im Gegensatz zum Kreisbogen keine Krümmung aufweist. Diese Abweichungen zur Referenzgeometrie werden als Lage-, Neigungs- und Krümmungsabweichung über den Verlauf der Biegelinie aufgezeichnet und ausgewertet, wie beispielhaft in Bild 4 dargestellt ist. Der Verlauf der Abweichungen stellt sich als unabhängig von der Dichte der Stützpunkte dar und ist stets gleichförmig zwischen diesen verteilt, wobei die Lageabweichung besonders günstig von einer zunehmenden Dichte der Stützpunkte beeinflusst wird, während die Krümmungsabweichung gar nicht von der Dichte der Stützpunkte profitiert.

Um zu untersuchen, wie breit der wegen zu großer Abweichungen von der Idealform nicht nutzbare Rand der adaptiven Fläche mindestens ist, wurden Punkte auf der Biegelinie des Ersatzstabes als mögliche Grenzstellen der Formtreue untersucht. Die Ergebnisse wurden für einen fiktiven Flächenübergang zu einer benachbarten gleichartigen Fläche numerisch ausgewertet und visualisiert, Bild 5, links. Es zeigt sich, dass ein brauchbarer Übergang am Randabstand vom 1,38-Fachen der Stützpunkt-Abstände erwartet werden kann. Entgegen den Erwartungen konnte gezeigt werden, dass kleinere Abstände zwischen den Stützpunkten aus o. g. Gründen nicht umfassend zu einer Verbesserung der Abbildungsqualität führen.

Eine günstige Teilungsdichte wurde aus dem Abgleich von steigendem Aufwand für Stützpunkte und der abnehmenden Abweichung bei Verwendung von mehr Stützpunkten ermittelt, Bild 5, rechts. Zusätzlich wurde eine Methode zur Lagekompensation der Ränder aufgezeigt, die darauf abzielt, im ersten Feld die Krümmung exakt auf die Referenzkrümmung einzustellen und so ab dem zweiten Stützpunkt eine hohe und annähernd von der Anzahl der Stützpunkte unabhängige Reproduktionsgenauigkeit zu erreichen. Hierbei wird das Endauflager vertikal verschoben, bis das Auflagerpaar am Stabende die Sollkrümmung ab dem zweiten Stützpunkt genau einstellt. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Abbildungstreue und der Wirtschaftlichkeit, Bild 5, rechts.

points of the shape fidelity to identify the minimum width of the adaptive surface's edge, unusable due to excessive deviations from the ideal shape. The results were numerically evaluated and visualised for a fictitious surface transition to a similar neighbouring surface, Fig. 5, left. It turns out that a usable transition at the edge can be expected with a factor of 1.38 of the support point distances. Contrary to expectations and for the reasons mentioned above, the results showed that smaller distances between the interpolation points do not improve the representation quality.

A favourable distribution density was determined by balancing the increasing effort for support points and the decreasing deviation when using more support points, Fig. 5, right. In addition, a method for position compensation of the edges was demonstrated, aiming to adjust the curvature exactly to the reference curvature in the first field and thus to achieve a high reproduction accuracy from the second support point onwards that is almost independent of the number of support points. Hereby, the end support is moved vertically until the support pair at the end of the rod exactly adjusts the nominal curvature from the second support point onward. This leads to a significant improvement in representation fidelity and economy, Fig. 5, right.

3.4 Basics of transforming flat surfaces into doubly-curved geometries

The economic field of application of adaptive systems lies in their use to produce doubly-curved shapes. However, an orthotropic surface with strongly reduced shear stiffness can absorb the deformation exclusively via shear distortion without inducing normal stresses of a significant magnitude [3]. Thus, interpolation surfaces can not only be abstracted as crossed arrays of elastically bendable rods but can also be materialised in this way, acquiring favourable properties in the process. To create such a supporting surface, crossed arrays of thin, flexible rods are placed on top of each other and rotatably connected with

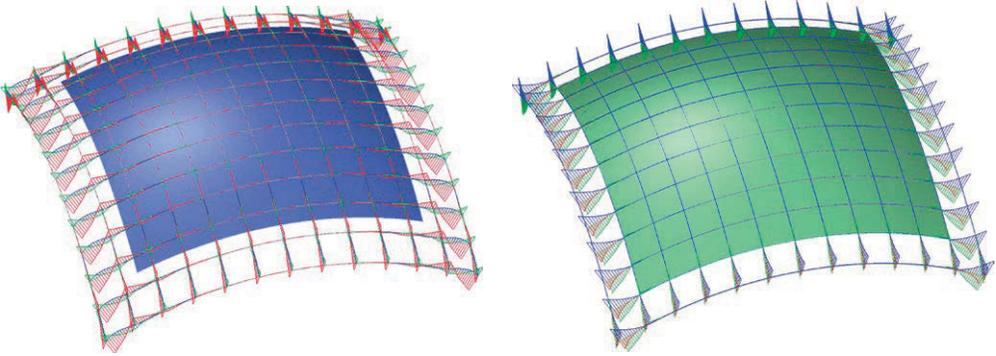


Bild 5: Abweichungsgraphen mit verbleibender nutzbarer Formfläche bei Grenze an Punkt 5 aus Bild 4 (links) und das gleiche System nach Kompensation (rechts): Die Nutzbarkeitsgrenze kann zu Punkt 4 aus Bild 4 erweitert werden und die Approximationsgenauigkeit ist verbessert. | **Fig. 5:** Deviation graphs with remaining usable surface for a border chosen at point 5 of Fig. 4 (on the left); on the right: The same system after compensation: The border can be extended to point 4 of Fig. 4, approximation accuracy is improved.

3.4 Grundlagen der Umformung ebener Flächen in doppelt gekrümmte Geometrien

Der wirtschaftliche Einsatzbereich adaptiver Systeme liegt in der Nutzung zur Herstellung doppelt gekrümmter Formen. Eine orthotrope Fläche mit stark reduzierter Schubsteifigkeit kann die Umformung aber ausschließlich über eine Schubverzerrung aufnehmen, ohne dass Normalspannungen in maßgeblicher Größe induziert werden [3]. Interpolationsflächen können also nicht nur als gekreuzte Scharen von elastisch biegbaren Stäben abstrahiert, sondern auch in dieser Weise materialisiert werden und dabei günstige Eigenschaften erhalten. Um so eine Stützfläche zu erstellen, werden gekreuzte Scharen dünner, elastisch biegbarer Stäbe übereinandergelegt und drehbar an Scherengelenken so miteinander verbunden, dass eine rautenförmige Verzerrung möglich ist.

3.5 Konstruktive Betrachtungen zur Stützfläche aus gekreuzten Stäben

Die Analyse von Implementierungen einer solchen Einrichtung aus gekreuzten Stäben als Stützfläche zeigt konstruktive Problemstellungen auf. Die maßgeblichen identifizierten Zwangspunkte betreffen den gleitenden Anschluss starrer Stützelemente, das Überwinden des Torsionswiderstands der Glieder und vor allem das Unvermögen einer darauf befestigten

scissor joints in a way that allows for rhombic distortion.

3.5 Structural considerations of the supporting surface made of crossed rods

Analysing implementations of such a supporting surface made of crossed rods shows constructive problems. The relevant constraining points identified are the sliding connection of rigid support elements, overcoming the torsional resistance of the elements, and, above all, the inability of an attached cover surface made of a soft isotropic material to follow the deformations of the support structure, in particular its shear distortion, without instabilities.

The requirements derived therefrom suggest a support surface that behaves smoothly in the tangential plane concerning normal and shear forces so that it performs a two-sided deformation via both compression and distortion. However, calculations on highly elastic isotropic materials that could accommodate this type of deformation rule them out. The results point to the fundamental problem of adaptive surfaces, namely that flat materials that are soft enough in the tangential plane to allow reshaping do not have the necessary bending stiffness against the plate plane to carry applied building material loads with little deformation.

Deckfläche aus einem weichen isotropen Material, die Verformungen des Rostes, insbesondere dessen Schubverzerrung, ohne Instabilitäten mitzugehen.

Die daraus abgeleiteten Anforderungen sprechen für eine Stützfläche, die sich in Tangentialebene weich gegenüber Normal- und Schubkräften verhält, sodass sie eine zweisinnige Umformung sowohl über Stauchung als auch über Verzerrung leistet. Berechnungen an hochelastischen isotropen Materialien, die diese Art der Umformung leisten könnten, schließen diese jedoch aus. Die Ergebnisse verweisen auf das grundlegende Problem adaptiver Flächen, dass nämlich flächige Materialien, die in Tangentialebene weich genug sind, eine Umformung zu erlauben, nicht über die erforderliche Biegesteifigkeit gegen die Plattenebene verfügen, um aufgebrachte Baustofflasten verformungsarm abzutragen.

3.6 Potenzial auxetischer Strukturen zur Nutzung als adaptive Stützfläche

Strukturierte Materialien, auch mechanische Metamaterialien genannt, sind Gefüge aus kleinstmaßstäblich sich wiederholend angeordneten Strukturelementen, wie sie beispielsweise durch bestimmte Perforationen entstehen. Die Art der Kopplung der Strukturelemente untereinander führt in der Regel zu einem als auxetisch bezeichnetem Materialverhalten, weil Formänderungen in der Scheibenebene mit dem Verdrehen einzelner Strukturelemente einhergehen, was zu einem umgekehrten Querdehnverhalten mit negativer Poissonszahl führt (Bild 6). Materialien dieser Art sind durch Ronald Resch um 1970 erstmals Gegenstand u. a. von Patenten geworden, z. B. [4]. In [5] und [6] werden die geometrischen und mechanischen Grundlagen flächiger Materialien beschrieben, deren wichtigstes Merkmal die Aufnahme von großen Dehnungs- und Verzerrungsbeträgen ist. Quellen zur Biegesteifigkeit solcher Werkstoffe um die Plattenebene sind jedoch nicht bekannt.

Mit den eingangs beschriebenen digitalen Werkzeugen wurden verschiedene auxetische Strukturen diskret als Finite-Elemente-Modelle

3.6 Potential of auxetic structures for use as adaptive support surfaces

Mechanical metamaterials are structures consisting of small-scale, repetitively arranged structural elements, such as those created by certain perforations. The way in which the structural elements are coupled to each other usually leads to a material behaviour known as auxetic because shape changes in the plane are accompanied by twisting of individual structural elements, which leads to a reversed transverse strain behaviour with a negative Poisson's ratio (Fig. 6). This type of material first became the subject of research and patents by Ronald Resch around 1970, e.g. [4]. In [5] and [6], the geometrical and mechanical fundamentals of planar materials are described, whose most important feature is the absorption of large amounts of strain and distortion. However, sources on the bending stiffness of such materials around the panel plane are not known.

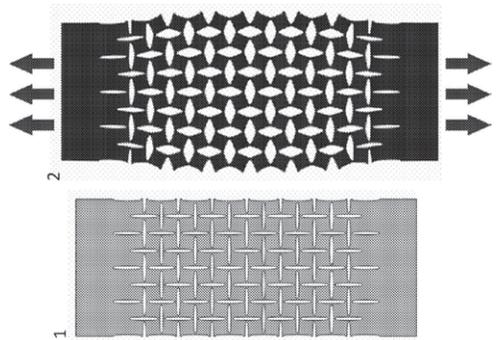


Bild 6: Perforierte Fläche mit auxetischen Eigenschaften, aus [7] | Fig. 6: Perforated surface with auxetic behaviour, taken from [7]

Various auxetic structures were discretised as finite element models (FE models) with planar and beam elements (Fig. 7) using the digital tools described earlier. Their stiffnesses against individual stresses were investigated. It was shown that the stiffness values under panel bending can be influenced independently of the tangential stiffness by adjusting the structure for certain structures. Hereby, the equivalent stiffness is higher against panel bending than against tangential forces, which corresponds to

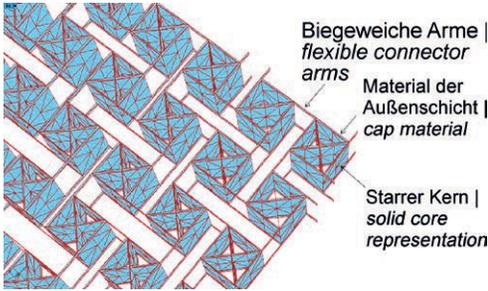


Bild 7: Parametrisch generiertes FE-Modell eines untersuchten Systems, bestehend aus starren Kernen und biegeweichen Kopplungsarmen | **Fig. 7:** Parametrically generated FE model of an analysed structure consisting of rigid cores and flexible coupling arms

(FE-Modelle) mit Flächen- und Stabelementen aufgebaut (Bild 7) und deren Steifigkeiten gegen einzelne Beanspruchungen untersucht. Es zeigte sich, dass bei bestimmten Gefügen die Steifigkeitswerte unter Plattenbiegung unabhängig von der Tangentialsteifigkeit durch das Anpassen des Gefüges beeinflusst werden können. Die äquivalente Steifigkeit ist dabei gegen Plattenbiegung höher als gegen Tangentialkräfte, was dem Anforderungsprofil einer adaptiven Stützfläche entspricht.

3.7 Adaptive Stützflächen aus strukturiertem Material mit auxetischen Eigenschaften

Auf Grundlage des erstellten Modells wurden verschiedene Ausprägungen von Strukturordnungen hinsichtlich ihres Potenzials untersucht, um eine größere Biegesteifigkeit gegenüber der Normalsteifigkeit zu erhalten.

the requirement profile of an adaptive support surface.

3.7 Adaptive support surfaces made of mechanical metamaterial with auxetic properties

Based on the model created, different manifestations of structural arrangements were investigated in terms of their potential to obtain greater bending stiffness compared to normal stiffness.

As a result of this series of calculations with different arrangement patterns or structural elements, one structural arrangement proved to be particularly favourable in terms of constructive aspects and performance. These are rigid square elements extending vertically and at their top and bottom sides, are connected to the respective neighbouring elements with bars in a mirror-symmetrical arrangement, Fig. 8.

Under normal uniaxial force, eccentrically applied forces act on the cores from the connected couplings. The cores tend to twist around their high point under these forces. This twisting is counteracted by the bending stiffness of the couplings connected to them; however, allowing large elastic bending deformations due to their thin bendable cross-section. The twisting of the cores is thus permitted to a defined extent. Since the force applied twists the cores in one direction, the structure contracts in the transverse direction. If this negative transverse

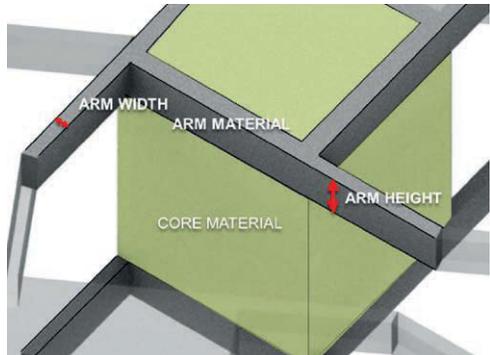
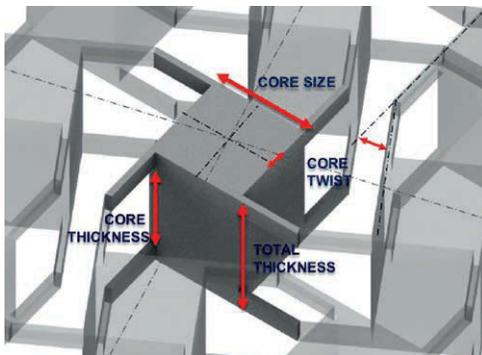


Bild 8: Darstellung der Gestaltparameter (links) und der Strukturparameter (rechts) am System aus Bild 7 mit verdrehten Kernen | **Fig. 8:** Representation of the design parameters (left) and the structural parameters (right) of the system depicted in Fig. 7 with rotated cores

Als Ergebnis dieser Berechnungsreihe mit verschiedenen Anordnungsmustern oder Strukturelementen erwies sich eine Strukturordnung in Bezug auf konstruktive Gesichtspunkte und Leistungsfähigkeit besonders günstig: Diese besteht aus steifen quadratischen Elementen, die eine vertikale Ausdehnung besitzen und die an ihrer Ober- und Unterseite durch Stabelemente mit den jeweils benachbarten Elementen in spiegelsymmetrischer Anordnung verbunden sind, Bild 8.

Unter uniaxialer Normalkraft wirken auf die Kerne exzentrisch ansetzende Kräfte aus den angeschlossenen Kopplungen. Die Kerne tendieren unter diesen Kräften zum Verdrehen um ihren Hochpunkt. Diesem Verdrehen steht die Biegesteifigkeit der an sie angeschlossenen Kopplungen entgegen, die aber wegen ihres dünnen biegeweichen Querschnitts große elastische Biegeverformungen zulassen. Das Eindrehen der Kerne wird somit in einem definierten Maß zugelassen. Die Verdrehung der Kerne infolge der Last in einer Richtung führt zum Zusammenziehen des Gefüges in Querrichtung. Wenn diese negative Querdehnung nicht behindert wird, wird das Gefüge somit weich gegenüber einer Normalkraft in Scheibenebene. Wenn sich die Kopplungen zwischen den Kernen unter Biegung verformen, wird zudem eine Schubverzerrung zugelassen. Bei Normalkraft und Schub in Scheibenebene werden stets das obere und das untere auxetische System gleichgerichtet verformt. Das Gefüge verhält sich weich.

strain is not hindered, the structure will thus become weak against a normal force in the plane. In addition, if the couplings between the cores deform under bending, shear distortion occurs as well. With normal force and thrust in the plane, the upper and lower auxetic system are always deformed in the same direction. The structure behaves “softly”.

3.8 Experimental production and testing of the support surface

The results were examined on 3D-printed samples, and the consistency of the results was verified by measuring the stiffnesses. Based on a reforming simulation, a structure was configured and 3D-printed on a scale of 1 : 2.5 of the dimensions intended for use as a formwork skin (Fig. 9, left). The surface thus created (Fig. 9, right) was mounted on actively controllable control elements that serve as support elements (Fig. 10). This resulted in a 45 mm thick, 1.2 m × 1.2 m adaptive support surface, controlled by 36 control elements and radii of up to a minimum of 2 m. The control elements are controlled via the developed simulation environment. As expected, the deformation of the supporting surface takes place proportionally through strains under normal forces and distortions in the tangential plane. The good expansibility allows the control elements to be clamped and not pivoted, as the change in length is absorbed by the curvature resulting from the expansibility of the structure.

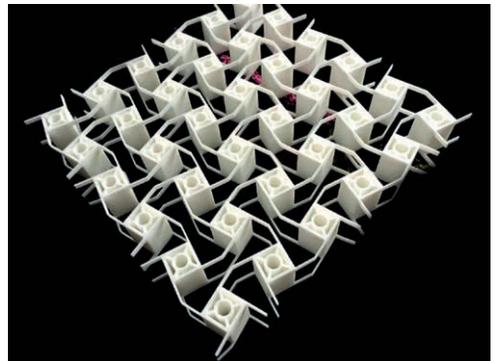
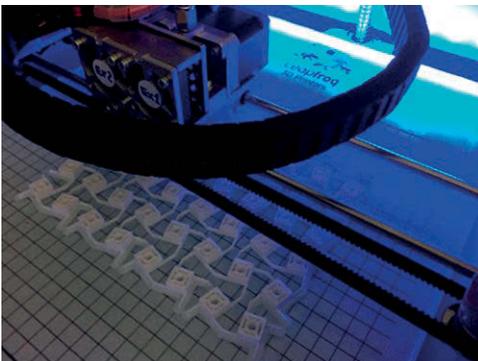


Bild 9: 3D-Druck von Kleinproben zur Verifikation der Simulationsergebnisse | **Fig. 9:** Three dimensional print of small test samples for simulation verification

3.8 Versuchsweise Herstellung und Erprobung der Stützfläche

Die Resultate wurden an 3D-gedruckten Mustern untersucht und die Stimmigkeit der Resultate durch Messungen der Steifigkeiten verifiziert. Auf Grundlage einer Umformsimulation wurde ein Gefüge im Maßstab 1 : 2,5 der für eine Nutzung als Schalhaut angestrebten Dimensionen konfiguriert und 3D-gedruckt (Bild 9, links). Die so erzeugte Fläche (Bild 9, rechts) wurde auf aktiv ansteuerbare Aktuatoren als Stützelemente montiert (Bild 10). So entstand eine 45 mm starke, 1,2 m × 1,2 m große adaptive Stützfläche, die von 36 Aktuatoren angesteuert wird und Radien bis minimal 2 m abbilden kann. Die Ansteuerung der Aktuatoren wird dabei über die entwickelte Simulationsumgebung geleistet. Wie erwartet, findet die Umformung der Stützfläche anteilig durch Dehnungen unter Normalkräften und durch Verzerrungen in der Tangentialebene statt. Die gute Dehnbarkeit erlaubt es, dass die Aktuatoren eingespannt und nicht schwenkbar gelagert sind, da die Längänderung durch Einprägen einer Krümmung infolge des Dehnvermögens des Gefüges aufgenommen wird.

4 Frischbetondruck bei frei geformten Betonbauteilen (Team Graubner)

4.1 Berechnungsmodelle zur Ermittlung des Frischbetondrucks

4.1.1 Allgemeines

Zur theoretischen Untersuchung des Frischbetondrucks frei geformter Betonbauteile wurde ein parametrisiertes numerisches Modell entwickelt. Die Modellierung erfolgte mit dem FEM-Programmsystem ANSYS. Hinsichtlich der Schalungs- bzw. Bauteilgeometrie können nahezu beliebige Neigungen und Krümmungen im Aufriss abgebildet werden, was bislang nicht möglich war. Das numerische Modell erfasst das zeitlich veränderliche Materialverhalten des Frischbetons während eines Betonierprozesses sowie die Reibung zwischen Frischbeton und



Bild 10: Funktioneller Modellversuch mit adaptiver Stützfläche im Maßstab 1 : 2,5 und aktiv steuerbaren Aktuatoren | **Fig. 10:** Functional mock-up testing with adaptive support surface (scale 1 : 2.5) and actively controllable control elements

4 Pressure of fresh concrete for free-formed concrete components (team Graubner)

4.1 Calculation models to determine the pressure of fresh concrete

4.1.1 General

A parameterised numerical model was developed for the theoretical investigation of the fresh concrete pressure of free-formed concrete components. The modelling was carried out with the FEM programme system ANSYS. With regard to the formwork or component geometry, almost any inclinations and curvatures can be represented in the elevation, which was previously not possible. The numerical model captures the time-varying material behaviour of the fresh concrete during a concreting process as well as the friction between fresh concrete and formwork skin or between fresh concrete and reinforcement. The consistency classes F5 and F6 were recorded in the material model for the first time in the project.

4.1.2 Model description

Input parameters are the casting rate as vertical rate of rise v , the final setting time of the fresh concrete t_E (or $t_{E,eff}$ if the time until the start of placement is taken into account), the weight of the fresh concrete γ_c , and the geometric param-

Schalhaut bzw. zwischen Frischbeton und Bewehrung. Im Vorhaben erfolgte erstmals eine Erfassung der Konsistenzklassen F5 und F6 im Materialmodell.

4.1.2 Modellbeschreibung

Eingangsparameter sind die Betoniergeschwindigkeit als vertikale Steiggeschwindigkeit v , das Erstarrungsende des Frischbetons t_E (bzw. $t_{E,eff}$ bei Berücksichtigung der Zeit bis zum Einbaubeginn), die Wichte des Frischbetons γ_c sowie die geometrischen Parameter je nach betrachteter Bauteilgeometrie wie Bauteilhöhe bzw. Betonierhöhe H , Bauteildicke b , Neigung zur Lotrechten α oder Krümmungsradius R (Bild 11).

Der Frischbeton wurde mit Scheibenelementen modelliert, die in übereinanderliegende Schichten unterteilt wurden. Zur Abbildung des zeitlich veränderlichen Materialverhaltens des Frischbetons können jeder Schicht unterschiedliche Materialparameter zugeordnet werden. Die Steifigkeiten von Schalhaut und Schalungssystem können realistisch oder vereinfacht mittels Translationsfedern abgebildet werden. Die Verbindung zwischen Frischbeton und Schalhaut bzw. Frischbeton und Bewehrung erfolgt

ters depending on the component geometry considered, such as component height or concreting height H , component thickness b , inclination to the vertical α or radius of curvature R (Fig. 11).

The fresh concrete was modelled with planar elements divided into superimposed layers. Different material parameters can be assigned to each layer to map the time-varying material behaviour of the fresh concrete. The stiffness of the formwork skin and the formwork system can be represented realistically or simplified using translating springs. The connection between fresh concrete and formwork skin or fresh concrete and reinforcement is made with non-linear node contact elements and associated target surfaces. Hereby, shear and compressive stresses can be transmitted. The simulation is carried out employing transient or steady-state calculation. The two calculation methods are described in detail in [8] and [9].

4.1.3 Material parameters

In the numerical model, the inelastic material law according to Drucker and Prager [10] was assigned to the planar elements, which requires the angle of internal friction α and the cohesion

Simulationsparameter | simulation parameters

- Konsistenzklasse | consistency class
- Wandhöhe, -dicke | wall height & thickness
- Neigung | inclination
- Steiggeschwindigkeit | rate of rise
- Erstarrungsende | solidification
- Wichte | density

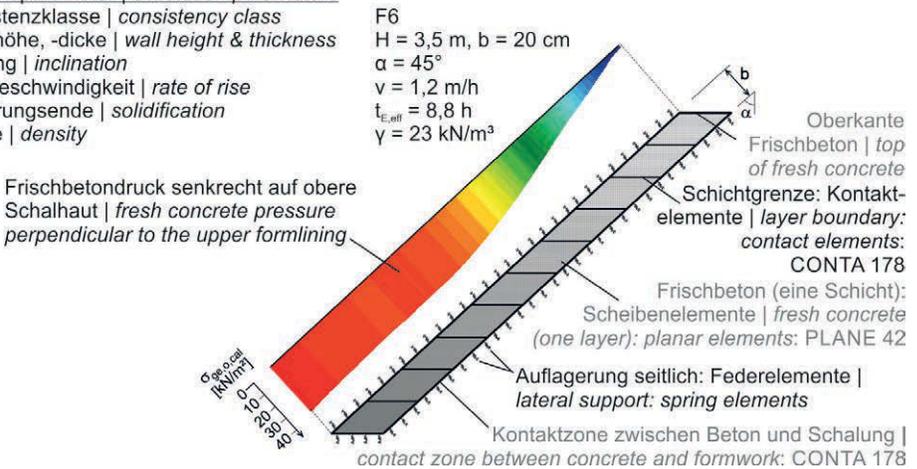


Bild 11: Exemplarisches Beispiel des numerischen Modells für eine geneigte Wand mit Frischbetondruckverteilung senkrecht zur oberen Schalhaut | Fig. 11: Exemplary example of the numerical model for an inclined wall with the distribution of fresh concrete pressure on the upper formwork surface

mit nichtlinearen Knoten-Kontaktelementen und zugehörigen Zieloberflächen. Dabei können Schub- und Druckspannungen übertragen werden. Die Simulation erfolgt mittels transienter oder stationärer Berechnung. Die beiden Berechnungsverfahren sind ausführlich in [8] und [9] beschrieben.

4.1.3 Materialparameter

Im numerischen Modell wurde den Scheibenelementen das nichtelastische Stoffgesetz nach Drucker und Prager [10] zugewiesen, das als Materialparameter den Winkel der inneren Reibung α und die Kohäsion c benötigt. Die Kohäsion wurde mit $c = 0$ angenommen und der Winkel der inneren Reibung inkl. Kohäsionsanteilen φ_{ges} über den Seitendruckbeiwert $\lambda = \sigma_h / \sigma_v$ unter Annahme eines aktiven Erddrucks wie folgt berechnet:

$$\varphi_{ges}^{[rad]} = -2 \cdot \arctan \sqrt{\lambda + \frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

Für die Kontaktelemente wurde zur Abbildung der Reibung zwischen Frischbeton und Schalhaut als Parameter der Reibbeiwert μ benötigt. Daher wurden als integrale Parameter zeitliche Funktionen des Seitendruckbeiwerts $\lambda (t / t_{E,eff})$ und des Reibbeiwerts $\mu (t / t_{E,eff})$ für die zu untersuchenden Frischbetone benötigt. Bisher existierten derartige Funktionen nur für Frischbetone der Konsistenzklasse SVB, die innerhalb von [11] entwickelt wurden. Anhand der in den Materialversuchen ermittelten Messergebnisse zum Seitendruck- und Reibbeiwert wurden zeitliche Funktionen für diese beiden Beiwerte entwickelt. Dabei wurden für die in den Großversuchen (Abschnitt 4.2.2) verwendeten Betone Funktionen als Ist-Werte sowie in Verbindung mit in der Literatur verfügbaren Messwerten [11] zeitliche Funktionen für die Konsistenzklassen F5 und F6 als Mittel- und Quantilwerte abgeleitet.

Es zeigte sich, dass sich die Funktionen der Seitendruckbeiwerte für Betone beider Konsistenzklassen nur geringfügig voneinander unterschieden, weshalb gemeinsame Formulierungen entwickelt wurden. Hinsichtlich des

c as material parameters. The cohesion was assumed to be $c = 0$, and the angle of internal friction including cohesion components φ_{ges} was calculated with the coefficient of lateral pressure $\lambda = \sigma_h / \sigma_v$, assuming an active earth pressure as follows:

$$\varphi_{ges}^{[rad]} = -2 \cdot \arctan \sqrt{\lambda + \frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

For the contact elements, the coefficient of friction μ was required as a parameter for mapping the friction between the fresh concrete and the formwork skin. Therefore, temporal functions of the coefficient of lateral pressure $\lambda (t / t_{E,eff})$ and the coefficient of friction $\mu (t / t_{E,eff})$ were required as integral parameters for the fresh concretes to be investigated. Until now, such functions existed only for fresh concretes of consistency class SCC, which were developed within [11]. Temporal functions were developed for these two coefficients using the measurement results for the coefficients of lateral pressure and friction determined in the material tests. In the process, functions were derived as actual values for the concretes used in the large-scale tests (section 4.2.2) and, in conjunction with measured values available in the literature [11], temporal functions for the consistency classes F5 and F6 as mean and quantile values.

It was found that the functions of the lateral pressure coefficients for concretes of both consistency classes differed only slightly from each other, which is why common formulations were developed. Concerning the coefficient of friction, separate functions were developed for pure formwork skin friction and reinforced components, each as quantile and mean values. Here, the influence of vibrations on the coefficients of lateral pressure and friction is considered, as induced by internal vibrators when compacting fresh concrete. Fig. 12 shows the curves of the quantile values of the coefficients of lateral pressure and friction for the consistency classes F5, F6 and SCC. The shown curves of the coefficients of friction take reinforcement into account. Details on the derivation of the functions and the corresponding equations can be found in [8].

Reibbeiwerts wurden getrennte Funktionen entwickelt, für reine Schalhautreibung und für bewehrte Bauteile jeweils als Quantil- und Mittelwerte. Hierbei wird der Einfluss von Vibrationen auf Seitendruck- und Reibbeiwert berücksichtigt, wie sie beim Verdichten von Frischbeton durch Innenrüttler induziert werden. Bild 12 zeigt exemplarisch die Verläufe der Quantilwerte von Seitendruck- und Reibbeiwert für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB. Die dargestellten Verläufe der Reibbeiwerte berücksichtigen eine Bewehrung. Details zur Herleitung der Funktionen und die zugehörigen Gleichungen sind in [8] zu finden.

4.1.4 Modellverifizierung

Zur Verifizierung des entwickelten numerischen Modells wurden die durchgeführten Großversuche (Abschnitt 4.2.2) und weitere in der Literatur dokumentierte Versuche nachgerechnet, bei denen Betone der Konsistenzklassen F5, F6 und SVB verwendet wurden. Nähere Informationen zu Parametern und Messergebnissen aus der Literatur sind in [8] enthalten. Sowohl für Versuche mit lotrechten als auch mit geneigten Schalungen zeigten die Rechenwerte gute bzw. sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten, sowohl im Vergleich der Verläufe des Frischbetondrucks über die Schalungslänge als auch hinsichtlich der Werte der maximalen Frischbetondrücke.

In Bild 13 sind die gemessenen und berechneten Werte der maximalen Frischbetondrücke für Versuche mit Betonen der Konsistenzklasse F6 dargestellt. Die rechnerischen Werte im linken Diagramm wurden mit den Mittelwertfunktionen, die des rechten Diagramms mit den Quantilwertfunktionen ermittelt. Beide Diagramme zeigen eine gute Übereinstimmung von Rechen- und Messwerten und verdeutlichen die Eignung des numerischen Modells. Die Verifikationen für die Konsistenzklassen F5 und SVB sowie weitere Details und Hintergründe sind in [8] aufgeführt.

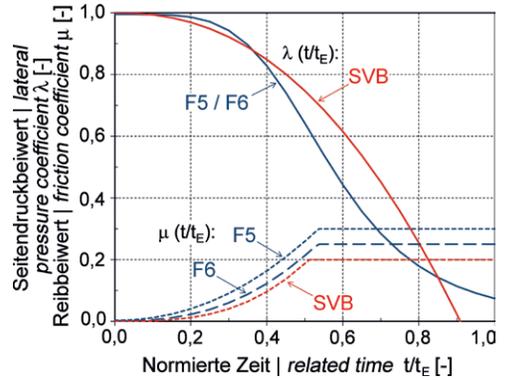


Bild 12: Seitendruckbeiwert λ und Reibbeiwert μ als Quantilwerte für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB | Fig. 12: Coefficient of lateral pressure λ and coefficient of friction μ as quantile values for consistency classes F5, F6 and SCC

4.1.4 Model verification

The large-scale tests carried out (section 4.2.2) and other tests documented in literature were recalculated using concretes of consistency classes F5, F6 and SCC to verify the numerical model developed. More detailed information on parameters and measurement results from literature can be found in [8]. For tests with both vertical and inclined formwork, the calculated values showed good or very good agreement with the measured values, both in the comparison of the fresh concrete pressure curves across the length of the formwork and with regard to the values of the maximum fresh concrete pressures.

Fig. 13 shows the measured and calculated values of the maximum fresh concrete pressures for tests with concretes of consistency class F6. The calculated values in the left graph were determined with the mean value functions, those in the right chart with the quantile value functions. Both charts show good agreement between calculated and measured values and illustrate the suitability of the numerical model. The verifications for the consistency classes F5 and SCC and further details and background details are listed in [8].

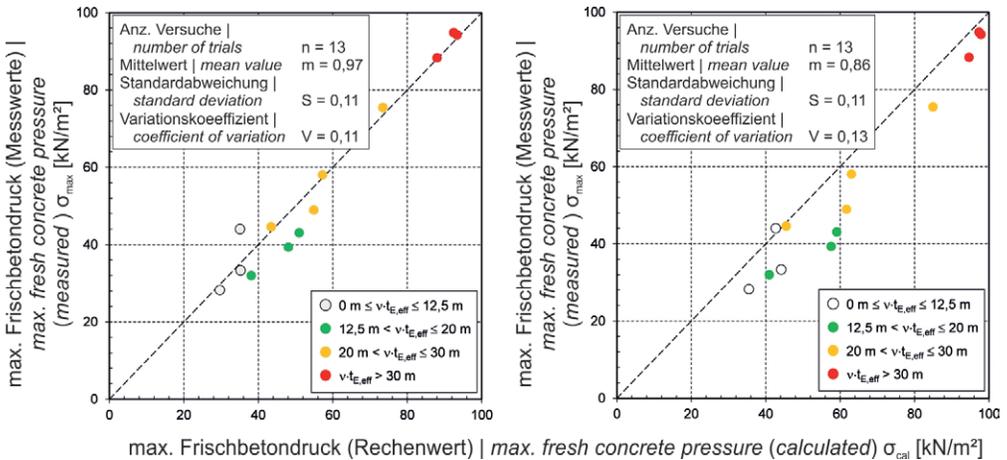


Bild 13: Mess- und Rechenwerte für Versuche mit Betonen der Konsistenzklasse F6 mit Mittelwert- (links) und Quantilwertfunktionen (rechts) von Seitendruck- und Reibbeiwerten | **Fig. 13:** Measured and calculated pressure values of full-scale tests with consistency classes F6 and mean values (left) and quantile values functions (right) of the coefficients of lateral pressure and friction

4.2 Bauteilversuche

4.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden zwei Versuchsprogramme durchgeführt. Innerhalb von Versuchsprogramm I wurde der Frischbetondruck lotrechter und geneigter Wände in realmaßstäblichen Großversuchen experimentell untersucht. Im Fokus von Versuchsprogramm II standen Untersuchungen zum Seitendruck- und Reibbeiwert.

4.2.2 Versuche an lotrechten und geneigten Wänden

In den Großversuchen wurden eine lotrechte und eine geneigte Wand zeitgleich betoniert, Bild 14. Somit konnten die Ergebnisse aus Tests mit lotrechter Schalung als direkte Referenz für die mit geneigter Schalung herangezogen werden.

Es wurden die Einflüsse der Betoniergeschwindigkeit v , der Konsistenz des Frischbetons, der Verdichtungsintensität, der Bewehrung, der Bauteildicke b und der Schalungsneigung α auf den Frischbetondruck untersucht. Die maßgeblichen Versuchsparameter sind detailliert in [8] und [9] aufgeführt. In Bild 15 sind die ermittel-

4.2 Component tests

4.2.1 General

Two experimental programmes were carried out as part of the experimental investigations. Part of test programme I investigated the pressure of fresh concrete in vertical and inclined walls experimentally in large, real-scale tests. Test programme II focused on investigations into the lateral pressure and friction coefficients.

4.2.2 Tests on vertical and inclined walls

In the large-scale tests, a vertical and an inclined wall were concreted simultaneously, Fig. 14. Thus, the results from tests with vertical formwork could be used as a direct reference for those with inclined formwork.

The influences of the casting rate v , the consistency of the fresh concrete, the compaction intensity, the reinforcement, the component thickness b and the formwork inclination α on the fresh concrete pressure were investigated. The relevant test parameters are listed in detail in [8] and [9]. Fig. 15 plots the specified maximum pressures of fresh concrete of the vertical formwork σ_{tot} and the inclined upper formwork $\sigma_{ge,o}$. The REF test served as a refer-

ten maximalen Frischbetondrücke der lotrechten Schalung σ_{lot} und der geneigten oberen Schalung $\sigma_{ge,o}$ aufgetragen. Als Referenz diente der Versuch REF mit einer Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h, Konsistenzklasse F5, Wanddicke 20 cm, bewehrt ($2 \times Q188A$), 38 mm Innenrüttler und Neigung 0 bzw. 45°.

Die Versuchsergebnisse der Versuche 2–5 verdeutlichen den maßgeblichen Einfluss der Betoniergeschwindigkeit v (1 und 4 m/h) und der Frischbetonkonsistenz (F4 und SVB) auf den Frischbetondruck bei lotrechten und geneigten Wänden. Versuch 6 bestätigt den großen Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbetondruck. Die Versuche 8–11 mit einer Wanddicke von 10 cm zeigen den signifikanten Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbetondruck. Die Versuche 8–11 mit einer Wanddicke von 10 cm zeigen den signifikanten Einfluss der Wanddicke auf den Frischbetondruck.

In Bild 16 sind die in den Versuchen maximal aufgetretenen Frischbetondrücke, normiert auf den hydrostatischen Frischbetondruck, dargestellt. Auf der Abszisse sind die normierten Drücke der lotrechten Schalung $\sigma_{lot} / \sigma_{hyd}$ und auf der Ordinate die der oberen geneigten Schalung $\sigma_{ge,o} / \sigma_{hyd}$ aufgetragen. Bild 16 zeigt, dass der Frischbetondruck einer geneigten oberen Schalung immer kleiner ausfällt als bei einer lotrechten Schalung mit ansonsten gleichen Eigenschaften. Die normierten Frischbetondrücke der lotrechten und der geneigten Schalung der Versuche 5, 7 und 11 liegen nahe



Bild 14: Versuchsstand für Betonierversuche; im Vordergrund geneigtes Schalungssystem, im Hintergrund lotrechtes Schalungssystem | **Fig. 14:** Test set-up for concreting tests; front: inclined formwork system, background: vertical formwork system

ence with a casting rate of 2 m/h, consistency class F5, wall thickness 20 cm, reinforced ($2 \times Q188A$), 38 mm internal vibrator and inclination 0 or 45°.

The test results of tests 2–5 illustrate the decisive influence of the casting rate v (1 and 4 m/h) and the fresh concrete consistency (F4 and SCC) on the fresh concrete pressure for vertical and inclined walls. Test 6 confirms the significant influence of the compaction intensity on the pressure of fresh concrete. Tests 8–11 with a wall thickness of 10 cm show the considerable influence of the wall thickness on the fresh concrete pressure.

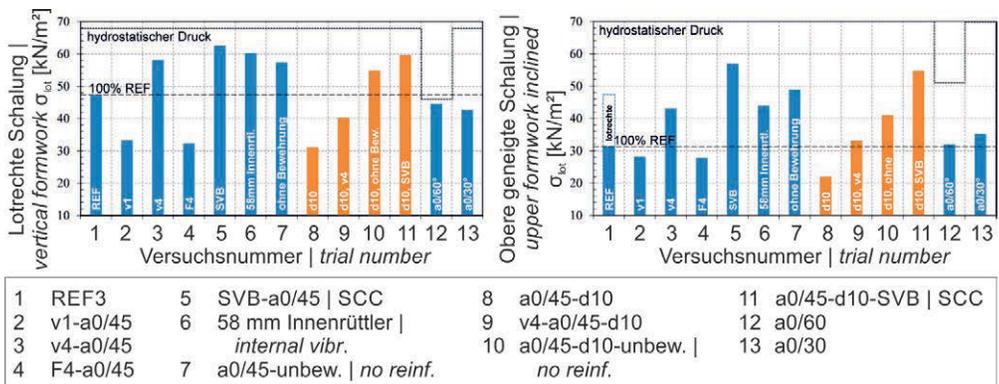


Bild 15: Maximale Frischbetondrücke auf die lotrechte Schalung σ_{lot} (links) und die obere geneigte Schalung $\sigma_{ge,o}$ (rechts) | **Fig. 15:** Maximum pressure of fresh concrete on the vertical formwork σ_{lot} (left) and the upper inclined formwork $\sigma_{ge,o}$ (right)

dem hydrostatischen Frischbetondruck. Dabei stellten sich die Maximalwerte erst am Betonierende ein und wären bei größerer Betonierhöhe weiter angestiegen. Dies zeigt, dass bei Frischbetondrücken nahe dem hydrostatischen Wert der Einfluss der Vibration gering ist. Bei Frischbetondrücken deutlich unterhalb dem hydrostatischen Wert sind die Unterschiede des Frischbetondrucks einer lotrechten und einer geneigten Schalung ausgeprägter, was auf die unterschiedlichen Entfernungen des Innenrüttlers zum Ort des maximalen Frischbetondrucks zurückgeführt wird. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass durch die direkte Wirkung des Frischbetoneigengewichts auf die untere Schalung die dadurch vergrößerte Reibung zwischen Frischbeton und Schalhaut bzw. Bewehrung reduzierend auf den Frischbetondruck wirkt. Ausführliche Erläuterungen können [8] entnommen werden.

4.2.3 Versuche zum Seitendruck- und Reibbeiwert

Im Versuchsprogramm II wurde der Seitendruck- und Reibbeiwert in der von Proske [11] entwickelten kombinierten Versuchsapparatur für die in den Großversuchen verwendeten Betone analysiert. Die Ergebnisse wurden zur Entwicklung von zeitlichen Funktionen für Seitendruck- und Reibbeiwert herangezogen. Details sind in [8] nachzulesen.

4.3 Theoretische Untersuchungen zum Frischbetondruck

Mit dem entwickelten und verifizierten numerischen Modell wurden umfangreiche theoretische Untersuchungen zum Frischbetondruck frei geformter Betonbauteile durchgeführt. Im Detail wurden lotrechte und im Aufriss geneigte sowie radial gekrümmte Wände analysiert. Besonderer Fokus lag auf dem Einfluss der Wanddicke auf den Frischbetondruck, insbesondere bei sehr dünnwandigen Betonbauteilen. Die Untersuchungen erfolgten für Betone der Konsistenzklassen F5, F6 und SVB, da bei filigranen geneigten oder gekrümmten Betonbauteilen derartige Betone sinnvollerweise eingesetzt

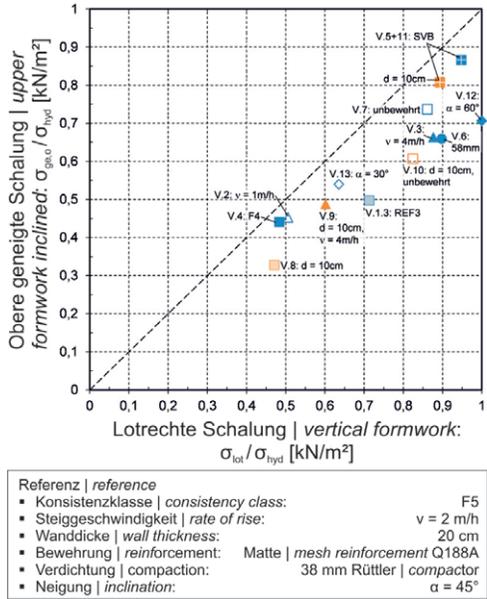


Bild 16: Normierte Frischbetondrücke der lotrechten und der oberen geneigten Schalung | Fig. 16: Normalized pressure of fresh concrete of the vertical and the upper inclined formwork

Fig. 16 shows the maximum pressure of fresh concrete occurring in the tests, normalised to the hydrostatic pressure of fresh concrete. The normalised pressure of the vertical formwork $\sigma_{lot} / \sigma_{hyd}$ are plotted on the abscissa and those of the upper inclined formwork $\sigma_{ge,o} / \sigma_{hyd}$ are plotted on the ordinate. Fig. 16 shows that the fresh concrete pressure of an inclined upper formwork is always smaller than that of a vertical formwork with otherwise the same properties. The normalised fresh concrete pressures of the vertical and the inclined formwork from tests 5, 7 and 11 are close to the hydrostatic pressure of fresh concrete. The maximum values were only reached at the end of the concreting process. They would have increased further with a greater pouring height, indicating that with fresh concrete pressures close to the hydrostatic value, the influence of vibration is small. The differences in the pressure of fresh concrete in a vertical and an inclined formwork are more pronounced if the pressure of fresh concrete is significantly below the hydrostatic value. This is attributed to the different distances of the internal vibrator to the location

werden. Betrachtet wurden der Einfluss der Betoniergeschwindigkeit v , des Erstarrungsendes $t_{E,eff}$, der Bauteildicke b , der Bewehrung sowie der Neigung des Bauteils zur Lotrechten α . Der Frischbetondruck von im Aufriss radial gekrümmten Wänden wurde für drei unterschiedliche Wandtypen, die sich im Öffnungswinkel und durch die Verhältnisse zwischen Betonierhöhe und Radius unterschieden, für verschiedene Krümmungsradien R untersucht, Bild 17.

Bei lotrechten Wänden wurde festgestellt, dass neben Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungsende des Betons insbesondere die Bewehrung und die Wanddicke einen signifikanten Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben. Anhand der Berechnungsergebnisse wurde eine Gleichung abgeleitet, mit welcher der maximale Frischbetondruck lotrechter Wände in Abhängigkeit der vorgenannten maßgeblichen Eingangsparmeter berechnet werden kann [8].

Der Frischbetondruck geneigter Wände wird nicht nur durch deren Neigung, sondern wie bei einer lotrechten Wand auch von Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungsende sowie von den zugrundeliegenden Funktionen des Reibbeiwerts und der Bauteildicke beeinflusst. In Bild 18 sind exemplarisch für die Konsistenzklasse F6 Verläufe normierter Frischbetondrücke $\sigma_{a,max} / \sigma_{h,max}$ für mehrere Wanddicken und Betoniergeschwindigkeiten aufgetragen. Der normierte Frischbetondruck beschreibt das Verhältnis des Frischbetondrucks senkrecht zur oberen geneigten Schalung zum Frischbetondruck einer lotrechten Wand mit ansonsten gleichen Eigenschaften. Anhand von Bild 18 wird ersichtlich, dass der Frischbetondruck einer geneigten Schalung mit zunehmender Neigung den Frischbetondruck einer lotrechten

of the maximum fresh concrete pressure. Furthermore, it is assumed that due to the direct impact of the dead weight of the fresh concrete on the lower formwork, the resulting increased friction between fresh concrete and formwork skin or reinforcement has a reducing effect on the pressure of fresh concrete. Detailed explanations can be found in [8].

4.2.3 Lateral pressure and friction coefficient tests

In test programme II, the lateral pressure and friction coefficients were analysed in the combined test apparatus developed by Proske [11] for the concretes used in the large-scale tests. The results were used to develop temporal functions for the lateral pressure and friction coefficients. Details can be found in [8].

4.3 Theoretical investigations of the pressure of fresh concrete

The developed and verified numerical model was used for extensive theoretical investigations on the pressure of fresh concrete of free-formed concrete components. Vertical and inclined as well as radially curved walls were analysed in detail. Particular focus was placed on the influence of the wall thickness on the pressure of fresh concrete, especially for very thin-walled concrete components. The investigations were carried out for concretes of the consistency classes F5, F6 and SCC, since such concretes are used for filigree inclined or curved concrete components. The influence of the casting rate v , the setting end $t_{E,eff}$, the component thickness b , the reinforcement, and the component's inclination to the vertical α were considered. The fresh concrete pressure of walls radially curved in elevation was investigated for three different wall types, which differed in the opening angle and the ratios between concreting height and radius for different radii of curvature R , Fig. 17.

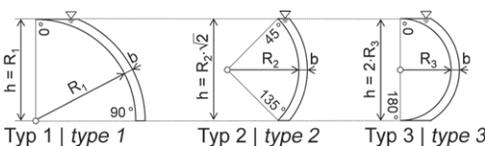


Bild 17: Radial gekrümmte Wände im Aufriss | Fig. 17: Walls radially curved in elevation

For vertical walls, it was found that the reinforcement and the wall thickness, in particular, have a significant influence on the maximum

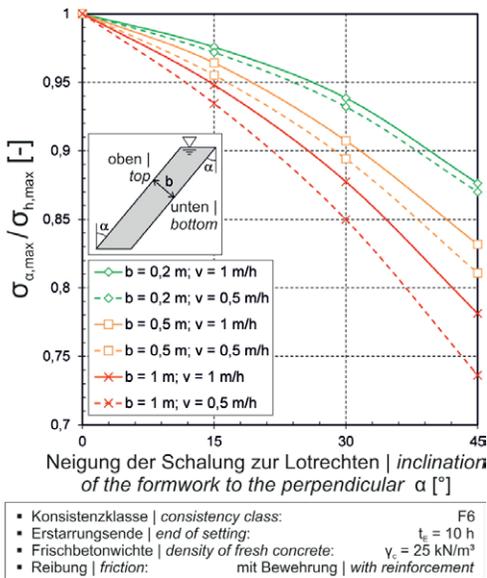


Bild 18: Normierte Frischbetondrücke geneigter Wände (oberes Schalungselement) | Fig. 18: Normalised pressure of fresh concrete of inclined walls (upper formwork element)

Schalung deutlich unterschreitet. Der Frischbetondruck für eine untere Schalung kann durch Addition des senkrecht zur Schalhaut wirkenden Eigengewichtsanteils des Frischbetons errechnet werden. Die Ergebnisse zum Frischbetondruck bei den im Aufriss radial gekrümmten Wänden sind in [8] ausführlich dokumentiert.

4.4 Berechnungsvorschlag zur Bestimmung des Frischbetondrucks

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Berechnungsvorschlag zu Bestimmung des Frischbetondrucks von lotrechten, geneigten und gekrümmten Betonbauteilen erarbeitet. Der Zuverlässigkeitsindex wurde entsprechend JCSS [13] mit $\beta = 3,7$ berücksichtigt. Die Modellsicherheiten wurden separat für jede betrachtete Konsistenzklasse ermittelt. Für den Bemessungsansatz wurde der Teilsicherheitsbeiwert für den Grenzzustand der Tragfähigkeit mit $\gamma_F = 1,5$ vorgegeben. Mit den Kalibrierfaktoren für die betrachteten Konsistenzklassen F5, F6 und SVB wurden die zuvor ermittelten Bestimmungsgleichungen zur

pressure of fresh concrete in addition to the casting rate and the final setting time of the concrete. An equation was derived based on the calculation results, with which the maximum fresh concrete pressure of vertical walls can be calculated depending on the aforementioned decisive input parameters [8].

The pressure of fresh concrete of inclined walls is not only influenced by their slope, but also, as with a vertical wall, by the casting rate and the final setting time, and by the underlying functions of the coefficient of friction and the component thickness. Fig. 18 shows exemplary curves of normalised pressure of fresh concrete pressure $\sigma_{\alpha,max} / \sigma_{h,max}$ for several wall thicknesses and casting rates (consistency class F6). The normalised pressure of fresh concrete describes the ratio of the pressure of fresh concrete perpendicular to the upper inclined formwork to the pressure of fresh concrete of a vertical wall with otherwise the same properties. Fig. 18 shows that, with increasing inclination, the pressure of fresh concrete in an inclined formwork is significantly lower than that in a vertical formwork. The pressure of fresh concrete for a lower formwork can be calculated by adding the self-weight portion of the fresh concrete acting perpendicular to the formwork. The results for the pressure of fresh concrete of walls radially curved in elevation are documented in detail in [8].

4.4 Calculation proposal to determine the pressure of fresh concrete

Based on the previous investigations, a calculation proposal to determine the pressure of fresh concrete of vertical, inclined and curved concrete components was developed. According to JCSS, the reliability index was considered with $\beta = 3.7$ [13]. The model uncertainties were determined separately for each consistency class considered. For the dimensioning approach, the partial safety factor for the ultimate limit state was specified as $\gamma_F = 1.5$. With the calibration factors for the considered consistency classes F5, F6 and SCC, the previously determined conditional equations to calculate the maximum

Berechnung des maximalen Frischbetondrucks modifiziert, wie ausführlich in [8] erläutert ist.

pressure of fresh concrete were modified, as explained in detail in [8].

In Bild 19 sind charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks bei lotrechten Wänden und variierender Betoniergeschwindigkeit für einen Beton F6 dargestellt. Es wird erneut deutlich, dass der Frischbetondruck von bewehrten sowie von dünnen Bauteilen deutlich kleiner ausfällt als bei unbewehrten oder dickeren Bauteilen. Der in Bild 19 eingezeichnete Verlauf des Frischbetondrucks nach DIN 18218 [14], die derzeit den Stand der Technik darstellt, verdeutlicht, dass bei gleichem Sicherheitsniveau durch den neuartigen Berechnungsvorschlag deutlich kleinere Frischbetondrücke bei der Dimensionierung von Schalungssystemen angesetzt werden können.

Fig. 19 shows the characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete for vertical walls, and varying casting rates are shown for F6 concrete. Once again, it becomes clear that the pressure of fresh concrete of reinforced and thin components is significantly lower than that of unreinforced or thicker components. The path of the pressure of fresh concrete according to DIN 18218 [14] shown in Fig. 19, which currently represents state of the art, illustrates that the new calculation model allows using significantly lower pressure values of fresh concrete in the dimensioning of formwork systems while maintaining the same safety level.

Bild 20 zeigt Verläufe der charakteristischen Werte des maximalen Frischbetondrucks senkrecht zur oberen Schalhaut einer geneigten Wand für mehrere Neigungswinkel und Bauteildicken bei Konsistenzklasse F6. Bei Verlassen des Anwendungsbereichs von DIN 18218 [14] wird auf den

Fig. 20 shows curves of the characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete perpendicular to the upper formwork skin of an inclined wall for several angles of inclination and component thicknesses at consistency class F6. When going beyond the scope of DIN 18218 [14], reference is made to the hydrostatic pressure

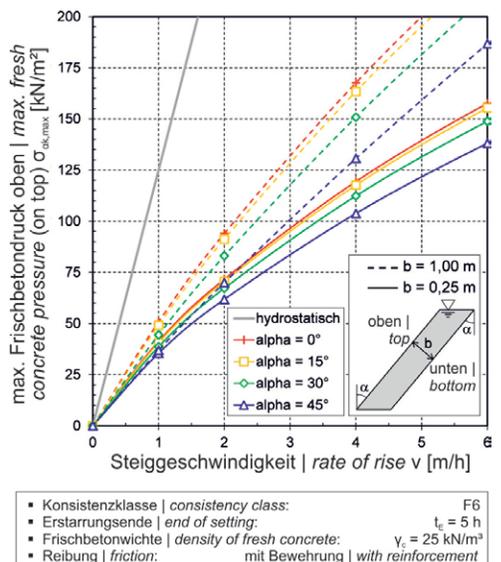
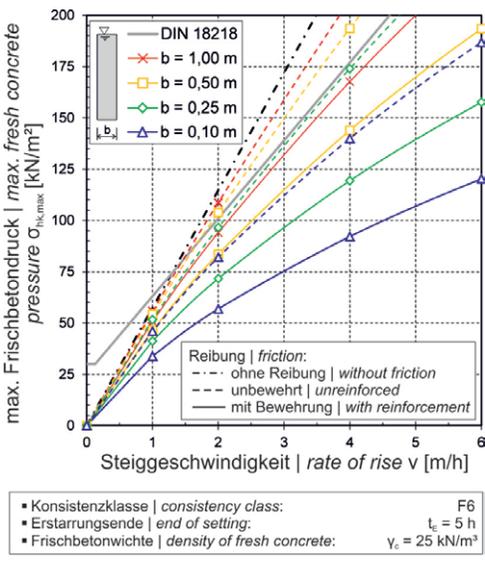


Bild 19: Charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks lotrechter Wände nach dem Berechnungsvorschlag und nach DIN 18218 [14] | Fig. 19: Characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete pressure of vertical walls according to the calculation proposal and DIN 18218 [14]

Bild 20: Charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks geneigter Wände nach dem Berechnungsvorschlag | Fig. 20: Characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete pressure of inclined walls according to the calculation proposal

hydrostatischen Frischbetondruck verwiesen, der ebenfalls in Bild 20 eingezeichnet ist. Beim Vergleich der Verläufe des Frischbetondrucks nach DIN 18218 und Berechnungsvorschlag wird deutlich, dass sowohl bei gewöhnlichen Wanddicken von $b = 0,25$ m als bei auch sehr großen Wanddicken wie $b = 1$ m der Frischbetondruck geneigter Wände den hydrostatischen Frischbetondruck signifikant unterschreitet.

Die den Diagrammen in Bild 19 und Bild 20 zugrundeliegenden Gleichungen für die Konsistenzklasse F6 sowie für F5 und SVB sind in [8] enthalten, ebenso die zugehörigen Lastbilder zum Ansatz des Frischbetondrucks auf die Schalungssysteme.

5 Kommerzielles Verwertungspotential

Eine Patentrecherche ergab, dass ein auxetisches Gefüge in der im Abschnitt 3.6 beschriebenen Form nicht dem bekannten Stand der Technik entspricht. Daher wurde das Patent „System zur Aufnahme von außen einwirkender Kräfte“ angemeldet (erteilt 2018) [15] (Bild 21). Im Patent wird die Möglichkeit, Biege- und Normalsteifigkeit unabhängig voneinander einzustellen, thematisiert. So wird auch eine Variante beschrieben, die umgekehrt zur hier beschrie-

ben of fresh concrete, also depicted in Fig. 20. When comparing the pressure curves of fresh concrete according to DIN 18218 and the calculation proposal, it becomes clear that the pressure of fresh concrete of inclined walls is significantly lower than the hydrostatic pressure of fresh concrete, both for normal wall thicknesses of $b = 0.25$ m and for very large wall thicknesses such as $b = 1.00$ m.

The equations underlying the charts in Fig. 19 and Fig. 20 for consistency class F6 and for F5 and SCC are included in [8], just as the associated load diagrams for the impact of the fresh concrete pressure on the formwork systems.

5 Commercial exploitation potential

A patent search revealed that an auxetic structure in the form described in section 3.6 does not correspond to the known state of the art. Therefore, a patent entitled “System for absorbing forces acting from outside” was filed in June 2016 and issued in 2018 [15], Fig. 21. The patent application addresses the possibility of adjusting bending and normal stiffness independently. Therefore, it also describes a variant that could be ‘programmed’ to behave stiffly against normal forces in the plane and softly against panel bending, in contrast to the design

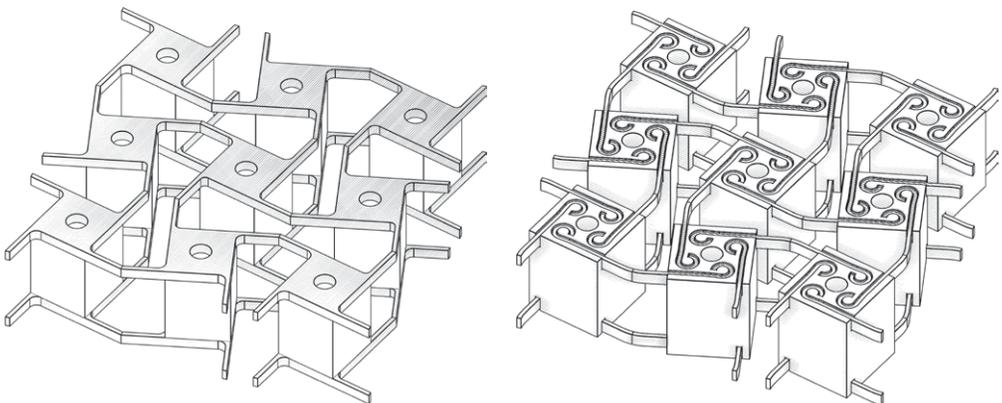


Bild 21: Auszug aus dem Patent [15]; links: Materialisierungsbeispiel aus zwei gelaserten Blechen und starren Blöcken als Abstandhalter, rechts: starre Blöcke z. B. aus UHPC, mit Nuten zur Aufnahme von Federbügeln als Kopplungen | **Fig. 21:** Extract from the patent [15]; left: materialisation example of two laser-cut metal sheets and rigid spacer blocks, right: rigid blocks, e.g. made of UHPC, with grooves to accommodate spring clips as couplings

benen Ausbildung gegen Normalkräfte in Scheibenebene steif und gegen Plattenbiegung weich ‚programmiert‘ werden könnte. Es wurde in diesem Zusammenhang auch erkannt, dass sich auxetische Stützflächen auch zur Formgebung anderer Materialien eignen, wie zum Beispiel Gläsern oder Polymeren, wobei in letzterem Fall auf eine dichtende Deckfläche verzichtet werden kann. Im Patentantrag wurden Materialisierungsvarianten der auxetischen adaptiven Stützfläche dargestellt, die aufzeigen, dass die Herstellung einer solchen adaptiven Stützfläche auch ohne 3D-Druck sehr einfach sein kann. So ist beispielsweise denkbar, die Kerne selbst aus Beton herzustellen und die Verbindungen als Federbügel in Nuten einzulassen.

6 Zusammenfassung

Die günstigen Eigenschaften von Beton bleiben bei der Herstellung von Schalen und freien Formen aufgrund des hohen Schalungsaufwandes oft ungenutzt. Die Technik der adaptiven Schalung kann diesen Aufwand erheblich reduzieren. Die Technologie wurde jedoch bislang nicht in einer industriellen Herstellung von tragenden Bauteilen eingesetzt. Problemstellungen wie die Ungenauigkeit der Ränder oder die vielen konstruktiven Zwänge bei der Implementierung einer Stützfläche aus gekreuzten Scharen von elastisch verformbaren Stäben wurden als Hemmnisse auf dem Weg hin zur Nutzung erkannt.

Die Forschung in diesem Feld zeigt zunächst auf, dass in einer Simulationsumgebung, aus parametrisierbarer Geometrie in Verbindung mit einer numerischen Lösungseinheit die komplexen Vorgänge einer adaptiven Einrichtung simuliert werden können. Diese Methode wird u. a. genutzt, das komplexe Verhalten neigender Stütz- und Stellglieder vorherzusagen und um eine Genauigkeitsvorhersage für adaptive Fläche zu treffen. Die Erkenntnis, dass mechanische Metamaterialien mit auxetischen Eigenschaften hervorragende Eigenschaften für die Nutzung als adaptive lastabtragende Flächen haben, ist neuartig und erlaubt, die entscheidenden Probleme der bisherigen Im-

described here. In this context, it was also recognised that auxetic support surfaces are also suitable for shaping other materials, such as glasses or polymers, whereby in the latter case, a top sealing surface can be dispensed with. The patent application includes materialisation variants of the adaptive auxetic support surface, demonstrating that such adaptive support surfaces can be very simple to produce, even without 3D printing. It is, for example, conceivable to make the cores out of concrete and to set spring clip connections into grooves.

6 Summary

The favourable properties of the material concrete often remain unused in the production of shells and free forms due to the high effort needed to create the formwork. Adaptive formwork technology can reduce this effort considerably. However, this technology has not yet been used in the industrial production of load-bearing components. Problems such as edge inaccuracy or the many design constraints in implementing a support surface of crossed flexible rods arrays were identified as obstacles on the way to implementation.

Research in this field demonstrates that the complex processes of an adaptive device can be simulated in a simulation environment consisting of parameterisable geometry in conjunction with a numerical solution unit. This method is used, among other things, to predict the complex behaviour of inclining support and control elements and to make an accuracy prediction for adaptive surfaces. The realisation that mechanical metamaterials with auxetic properties have excellent properties for use as adaptive load-bearing surfaces is novel. It allows the crucial problems of previous implementations of adaptive shaping to be remedied. It was shown that the mechanical properties of these materials could be programmed so that bending and normal stiffness can be adjusted independently, which could not be achieved with any conventional material. The 3D-printed adaptive support surface of the large-scale test demon-

plementierungen der adaptiven Formgebung abzustellen. Es wurde aufgezeigt, dass diese Materialien in ihren mechanischen Eigenschaften so programmiert werden können, dass Biege- und Normalsteifigkeit unabhängig voneinander einstellbar sind, was mit keinem herkömmlichen Material zu erreichen wäre. Mit der 3D-gedruckten adaptiven Stützfläche des Großversuchs konnte erfolgreich aufgezeigt werden, dass Eigenschaften dieser an sich einfach aufgebauten adaptiven Stützflächen so konfiguriert werden können, dass sie an eine vorgegebene Umgebung angepasst werden können und sich als adaptive Fläche sehr gut eignen. Die Nutzung mechanischer Metamaterialien mit auxetischen Eigenschaften zur Formgebung wurde nach Recherchen für neuartig befunden, so dass hierfür ein Verfahren zur Patentierung eingeleitet wurde. Hierbei wird auch das Potenzial dieser Systeme über die Formgebung von Beton hinaus thematisiert und beschrieben.

Der Frischbetondruck geneigter oder gekrümmter Betonbauteile war bisher weitestgehend unerforscht. Die DIN 18218 macht keine Angaben zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei Lotabweichungen größer 5° bzw. für gekrümmte Betonbauteile. Auch konnten bisher existierende Modell nicht den Einfluss der Bauteildicke und der Bewehrung auf den Frischbetondruck bei Verwendung von Betonen mit fließfähiger oder sehr fließfähiger Konsistenz erfassen. Die Untersuchungen haben den großen Einfluss der Reibung zwischen Frischbeton und Schalhaut bzw. zwischen Frischbeton und Bewehrung sowie der Bauteildicke auf den Frischbetondruck verdeutlicht und belegt. Durch den neuartigen Berechnungsvorschlag zur Bestimmung des Frischbetondrucks von lotrechten, geneigten und gekrümmten Betonbauteilen bei Verwendung von Betonen mit (sehr) fließfähiger oder selbstverdichtender Konsistenz ist es möglich, für vorgenannte Betonbauteile den Frischbetondruck zu ermitteln. Durch die Möglichkeit der Berücksichtigung der Bewehrung bzw. der Bauteildicke können der Frischbetondruck realitätsnaher bestimmt und Schalungssysteme wirtschaftlicher bemessen werden. Darüber hi-

strated successfully that properties of these relatively simple adaptive support surfaces could be configured in such a way that they can be adapted to a given environment and are very suitable as an adaptive surface. Research found the use of mechanical metamaterials with auxetic properties for shaping to be novel, which is why a patenting procedure was initiated. The potential of these systems beyond the shaping of concrete is also discussed and described.

The pressure of fresh concrete of inclined or curved concrete components has been largely unexplored until now. DIN 18218 does not provide any information on the specification of the pressure of fresh concrete for vertical deviations greater than 5° or for curved concrete components. Also, existing models could not capture the influence of the component thickness and the reinforcement on the pressure of fresh concrete when using concretes with flowable or very flowable consistency. The investigations have clarified and proven the significant influence of the friction between fresh concrete and the formwork or between fresh concrete and reinforcement as well as the component thickness on the pressure of fresh concrete. The new calculation proposal to determine the pressure of fresh concrete of vertical, inclined and curved concrete components when using concretes with flowable, very flowable or self-compacting consistency makes it possible to specify the pressure of fresh concrete for the aforementioned concrete components. Since the reinforcement or the component thickness can be taken into consideration, the pressure of fresh concrete can be determined more realistically, and formwork systems can be designed more economically. Furthermore, the smaller calculated values of the pressure of fresh concrete enable completely new types of formwork systems for free-formed wall-like concrete components, especially for thin-walled concrete components.

naus werden insbesondere bei dünnwandigen Betonbauteilen durch die kleineren rechnerischen Werte des Frischbetondrucks völlig neuartige Typen von Schalungssystemen für wandartige freigeformte Betonbauteile ermöglicht.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198151796 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198151796 within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Hickert, S.; Knaack, U.: Freigeformte Betonkonstruktionen: Formen, Schalungssysteme und technische Potentiale.. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 176–185 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171490>
- [2] Michel, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. S. 281–289
- [3] Bergsma, O. K.: Three Dimensional Simulation of Fabric Draping. PhD thesis, Delft University of Technology, 1995
- [4] Huffman, D. A.: Curvature and creases: A primer on paper. IEEE Transactions on Computers 10 (1976) C-25, S. 1010–1019
- [5] Davis, E.; Demaine, E. D.; Demaine, M. L.; Ramseyer, M. J.: Reconstructing David Huffman's Origami Tessellations. Journal of Mechanical Design 135 (2013) 11, 7 S. – DOI: 10.1115/1.4025428
- [6] Lim, T.-C.: Auxetic Materials and Structures. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014
- [7] Boyce, Ch. M.; Socrate, S.; Greviskes, B. P.; Boyce, M. C.: Structured materials with tailored isotropic and anisotropic poisson's ratios including negative and zero poisson's ratios. US20110059291A1, 2011
- [8] Freund, B.: Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit. Diss., TU Darmstadt, 2017
- [9] Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Experimentelle Untersuchungen und numerische Verifizierung zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014) 11, S. 803–811 – DOI: 10.1002/best.201400062
- [10] Drucker, D. C.; Prager, W.: Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics 10 (1952) 2, S. 157–165
- [11] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung. Diss., TU Darmstadt, 2007
- [12] Graubner, C.-A.; Beitzel, H.; Beitzel, M.; Bohnemann, C.; Boska, E.; Brameshuber, W.; Dehn, F.; König, A.; Lingemann, J.; Motzko, C.; Müller, H. S.; Pistol, K.; Proske, T.; Stettner, C.; Zilch, K.: Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz. Forschungsbericht F09-7-2008, gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Nr. Z6-10.08.18.7-07.29 / II2-F20-07-022), Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 2008
- [13] Probabilistic Model Code 2001: Probabilistic Model Code – Part 1 – Basic of design, 12th draft, Joint Committee on Structural Safety, Zürich, 2001
- [14] DIN 18218:2010-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen.
- [15] Michel, M.: System zur Aufnahme von außen einwirkender Kräfte. German Patent DE10 2016 112 143.6, Anmeldung: 07.02.2016, veröffentlicht: 01.04.2018

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 2 [2]: Sascha Hickert
 - Bilder | Pictures 3–5, 7–10, 21 [15]: Matthias Michel
 - Bild | Picture 6: [7]
 - Bilder | Pictures 11, 13–20 [8]; 12 [8]/[9]: Björn Freund
- Bereits publizierte Bilder wurden meist (in Teilen) modifiziert. | Already published images were mostly modified (in parts).

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile

Fundamental research towards an adaptive formwork system development for freeform concrete building components

| | |
|--|--|
| Antragsteller 1 Applicant 1: | Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner Geschäftsführender Direktor Executive director |
| DFG-Geschäftszeichen DFG reference number: | GR 1712/11-1/2 (Projektnummer Project number: 198151796) |
| Adresse Address: | TU Darmstadt, Institut für Massivbau (IfM), Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt |
| Kontakt Contact: | +49 6151 16 21400 info@massivbau.tu-darmstadt.de www.massivbau.tu-darmstadt.de |
| Antragsteller 2 Applicant 2: | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack Leitung FG Fassadentechnik Head of department 'Facade technology' |
| DFG-Geschäftszeichen DFG reference number: | KN 470/2-1/2 (Projektnummer Project number: 198151796) |
| Adresse Address: | TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt <i>(bis until 30.09.2014: Detmold, Hochschule Ostwestfalen-Lippe)</i> |
| Kontakt Contact: | +49 6151 16 23013 knaack@ismd.tu-darmstadt.de https://www.ismd.tu-darmstadt.de/ |
| Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period: | 01.10.2011–30.09.2015 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.07.2016 |
| Team Team: | Björn Freund (IfM, 01.10.2011–31.03.2015) Matthias Michel (ISM+D, 01.10.2011–30.09.2013) Sascha Hickert (ISM+D) Tilo Proske (IfM) |

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Frischbetondruck bei geneigten Schalungen – Sachstandbericht. In: Franz, V.; Hoffmann F. H.; Motzko, C.; Fricke, J. G. (Hrsg.): Tagungsband des 21. Kassel-Darmstädter Baubetriebsseminars Schalungstechnik, Gesellschaft für baubetriebliche Weiterbildung – Arbeitskreis Schalung, 24./25.11.2011 in Kassel, 2011, Kap. C1, S. 1–11
- Proske, T.; Freund, B.; Graubner, C.-A.: Models for prediction of formwork pressure. In: Billberg, P. (Hrsg.): Proc. of the Int. Workshop on Self-Compacting Concrete, 01.06.2012 in Stockholm (Schweden), RILEM TC-FPC "Form pressure generated by fresh concrete", Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 2012, S. 84–92
- Freund, B.: Fresh concrete pressure on inclined or curved formwork. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 331–334
- Michel, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 281–289
- Freund, B.: Großversuche zur Untersuchung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 179–184
- Graubner, C.-A.; Freund, B.; Proske, T.: Frischbetondruck und Sichtbetonqualität bei geneigten Schalungen – Teil 1. In: Franz, V.; Hoffmann F. H.; Motzko, C.; Fricke, J. G. (Hrsg.): Tagungsband des 23. Kassel-Darmstädter

Baubetriebsseminars Schalungstechnik, Gesellschaft für baubetriebliche Weiterbildung – Arbeitskreis Schalung, 28./29.11.2013 in Kassel, 2013, Kap. B1a, S. 1–11

- Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Frischbetondruck bei frei geformten Schalungssystemen. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 208–217 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171516>
- Hickert, S.; Knaack, U.: Freigeformte Betonkonstruktionen – Formen, Schalungssysteme und technische Potentiale. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 176–185 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171490>
- Knaack, U.; Hickert, S.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 186–197 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171637>
- Billberg, P.; Rousel, N.; Amziane, S.; Beitzel, M.; Charitou, G.; Freund, B.; Gardner, J. N.; Graubner, C.-A.; Keller, L.; Khayat, K. H.; Lange, D. A.; Omran, A. F.; Perrot, A.; Proske, T.; Quattrociocchi, R.; Vanhove, Y.: Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC. *Cement and Concrete Composites* 54 (2014) 11, S. 70–79
- Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Experimentelle Untersuchungen und numerische Verifizierung zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen. *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014) 11, S. 803–811 – DOI: 10.1002/best.201400062
- Michel, M.; Knaack, U.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonschalen und Wände. *Bautechnik* 91 (2014) 12, 845–853 – DOI: 10.1002 / bate.201400081
- Hickert, S.; Knaack, U.: Evaluation of free-form concrete architecture, moulding systems and their technical potentials. *Journal of Facade Design and Engineering* 3 (2015) 3–4, S. 273–288 – DOI: <https://doi.org/10.7480/jfde.2015.3-4.978>
- Knaack, U.; Hildebrand, L.; Hickert, S.: imagine 8 – CONCRETABEL. In: Knaack, U.; Klein, T.; Bilow, M. (Hrsg.): *imagine series*, Vol. 8, Rotterdam: NAI/010 publ., 2015
- Graubner, C.-A.; Freund, B.: Frischbetondruck bei frei geformten Betonbauteilen – Ein neuartiges Bemessungskonzept für Schalungssysteme. *BFT International* 82 (2016) 2, S. 80–82 – Proc. der 60. Betontage, 23.–25.02.2016 in Neu-Ulm
- Freund, B.; Proske, T.: Frischbetondruck fließfähiger und selbstverdichtender Betone auf geneigte Schalungen, In: Fenner, J. (Hrsg.): *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko*, Darmstadt: Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt, 2017, S. 165–178

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Freund, B.: Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit. IfM, 2017
- Hickert, S.: Fabrik Formwork – Entwicklung und Bewertung eines textilen Schalungssystems. ISM+D, 2019

Studienarbeiten am IfM | Student's research projects at IfM

- Ritz, M.: Entwicklung eines Rheometers zur Bestimmung der statischen Fließgrenze von Frischbeton. Bachelorarbeit, 2013
- Kaut, M.: Vergleich von Rheometern zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Frischbeton. Bachelorarbeit, 2013
- Möller, L. K.: Entwicklung formoptimierter Betonbauteile aus hochfestem Beton. Bachelorarbeit, 2013
- Bhattacharya K.: Numerical investigation of the formwork-pressure by inclined and curved concrete walls. Studienarbeit (DAAD), 2014
- Cao, Q.: Numerische Untersuchungen zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen. Masterarbeit, 2014
- Hänsel, M.: Ermittlung mechanischer zeitveränderlicher Parameter von Frischbeton und Validierung eines Simulationsprogramms für Frischbetondruck. Masterarbeit, 2014

- Klein, J.: Ermittlung von mechanischen zeitveränderlichen Materialparametern von Frischbeton. Bachelorarbeit, 2014
- Ziegler, A.: Entwicklung eines Ansatzes zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen. Bachelorarbeit, 2015

Patent | Patent

- Michel, M.: System zur Aufnahme von außen einwirkender Kräfte. German Patent DE10 2016 112 143.6, Anmeldung: 07.02.2016, veröffentlicht: 01.04.2018

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Entwicklung textiler Schalungssysteme zur Reduzierung von Bauabfällen und Ermöglichung frei geformter Betonbauteile | Development of textile formwork systems to reduce construction waste and enable freely formed concrete components

| | |
|----------------------------|---|
| Antragsteller Applicant: | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack |
| Förderer Funding: | PERI (Industrieförderung Industrial promotion) |
| Laufzeit Period: | 2016–2018 |

- Entwicklung textilbasierter selbsterrichtender Schalungssysteme | Development of textile-based self-aerated formwork systems

| | |
|----------------------------|---|
| Antragsteller Applicant: | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack |
| Förderer Funding: | PERI (Industrieförderung Industrial promotion) |
| Laufzeit Period: | 2018–2019 |

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des SPP-Jahrestreffens in Darmstadt im November 2013 | Organization of the SPP annual meeting in Darmstadt, November 2013
- Kreativworkshop im Rahmen des SPP-Treffens 2013 | Creative workshop as part of the SPP annual meeting 2013