

Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen | Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concrete

- ▶ Michael Frenzel, Kristina Farwig, Manfred Curbach
- ▶ Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

Anmerkung: Auszüge des Aufsatzes zu Ergebnissen der ersten Förderperiode wurden bereits in ähnlicher Form in [1] veröffentlicht. | Note: Excerpts of the report on the results of the first funding period have already been published in a similar form in [1].

1 Einleitung

Stahlbetondeckenplatten sind material- und energieintensive Biegetragwerke, wenn sie, wie derzeit üblich, ebenflächig mit konstanter Querschnittshöhe und aus einer Betonsorte hergestellt werden. Diese Ausführung ist aus statischer und bauökologischer Sicht sehr ineffizient, da der bewehrte Beton nur an wenigen Stellen sowohl in der Haupttragrichtung als auch über die Deckenhöhe voll ausgenutzt wird. Mit einer gleichmäßigen Ausnutzung können Material und Gewicht und damit natürliche Ressourcen gespart werden. Dazu wurden zwei grundlegende Ansätze verfolgt:

- 1. Querschnittsoptimierung:** höherfeste Betone werden in dünnen Deckschichten in besonders druck- und zugbeanspruchten Bereichen eingesetzt. Sie nehmen vorwiegend die Kräfte aus der Biegebeanspruchung auf und sichern den Verbund mit der Bewehrung. Gering tragfähige, leichte Betone werden im weniger beanspruchten mittleren Querschnittsbereich angeordnet, was zu einem dreischichtigen Aufbau führt. Auf eine Schubbewehrung wird – wie bei Platten üblich – verzichtet. Die Tragfähigkeit in der Verbundfuge ist sicherzustellen.
- 2. Formoptimierung:** Die Trägerhöhe wird (zusätzlich) in Haupttragrichtung kraftflussgerecht verändert, so dass das Material in den Deck- und Kernschichten gleichmäßig ausgenutzt ist. Aus funktionalen Gründen kann je-

1 Introduction

Reinforced concrete floor slabs are material- and energy-intensive flexural load-bearing structures if, as it is currently the case, they are produced flat with a constant cross-sectional height and from one type of concrete. This design is very inefficient from a structural and building ecology point of view, as the reinforced concrete is only fully utilised at a few areas both in the main load-bearing direction and across the slab height. With an uniform utilisation, material and weight and thus natural resources can be saved. Two basic approaches were taken to achieve this:

- 1. Cross-section optimisation:** higher-strength concretes are used in thin cover layers in areas subject to particularly high compressive and tensile stresses. They mainly absorb the forces from the bending stress and secure the bond with the reinforcement. Lightweight concretes with low strengths are placed in the less stressed middle part of the cross-section, resulting in a three-layer structure. Shear reinforcement is dispensed – as usual with slabs. The load-bearing capacity of the interface between the different concrete layers must be ensured.
- 2. Shape optimisation:** the member height is (additionally) changed in the main load-bearing direction according to the force flow, so that the material is evenly utilised in the face and core layers. For functional reasons, how-

doch lediglich die Plattenunterseite angepasst werden – die Oberseite verläuft horizontal.

ever, only the underside of the ceiling slab can be adjusted – the top side remains horizontal.

In der ersten Förderphase konzentrierten sich die Untersuchungen auf einachsig gespannte, einfeldrig oder endlos durchlaufende Decken. Besonders wichtig war es, die Betone für die Querschnitts- und Formoptimierung so auszuwählen, dass sie im Zusammenspiel mit der Bewehrung möglichst effizient ausgenutzt werden. Des Weiteren lag der Fokus auf den durch den Schichtenverbund auftretenden Fugen und der damit einhergehenden Fugentragfähigkeit, um ein möglichst monolithisches Tragverhalten sicherzustellen.

In the first funding phase, the investigations concentrated on single-span or endless continuous one way ceilings. It was particularly important to select the concretes for cross-section and shape optimisation in such a way that they are utilised as efficiently as possible in interaction with the reinforcement. Furthermore, the focus was on the interfaces resulting from combining different concrete layers and the associated interface resistance in order to ensure the most monolithic load-bearing behaviour possible.

Die zweite Förderphase diente dazu, die Erkenntnisse der ersten Phase auf zweiachsig gespannte Decken – im Speziellen auf punktgestützte Endlosdurchlaufplatten mit quadratischem Stützenraster – zu übertragen und die generierbaren Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Aufgrund der komplexen Beanspruchungsverhältnisse bei diesen Decken zeigte es sich als erforderlich, die Untersuchungen vor allem auf experimenteller Ebene getrennt für den Stütz- und Feldbereich durchzuführen.

The second funding phase served to transfer the findings of the first phase to two way ceilings – in particular to point-supported continuous flat slabs with a square column grid – and to show the optimisation potential that can be generated. Due to the complex stress conditions in these slabs, it turned out to be necessary to carry out the investigations separately for the support and mid-span area, especially at the experimental level.

2 Einachsig gespannte Decken

2 One way ceilings

2.1 Theoretische Untersuchungen

2.1 Theoretical investigations

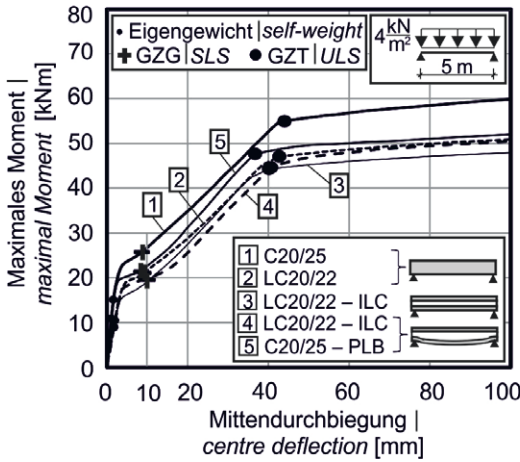
2.1.1 Gewichtersparnis und Effizienz

2.1.1 Weight saving and efficiency

Frenzel und Kahnt [2], [3] zeigen die möglichen Gewichts- und Ressourcenersparnisse infolge der Querschnitts- und Formoptimierung rechnerisch am Beispiel einer gewöhnlichen einfeldrigen Platte mit einer Spannweite von 5 m auf. Dabei wurden die Vorgaben des EC 2 [4] bezüglich der zulässigen Mittendurchbiegung von max. 10 mm im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und der abzutragenden Nutzlast von 4 kN/m² im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) berücksichtigt. Bild 1 stellt das Tragverhalten einer parallelgurtigen Platte aus Normalbeton C20/25 (Nr. 1) konstruktivem Leichtbeton LC20/22 (Nr. 2), einer parallelgurtig

Frenzel and Kahnt [2], [3] show the possible weight and resource savings as a result of cross-section and shape optimisation by calculation using the example of a common single-span slab with a span of 5 m. The specifications of EC 2 [4] regarding the permissible centre deflection of max. 10 mm in the serviceability limit state (SLS) and the imposed load to be transferred of 4 kN/m² in the ultimate limit state (ULS) were taken into account.

Fig. 1 compares the load-bearing behaviour of a flat ceiling slab of regular concrete C20/25 (No. 1) with structural lightweight concrete LC20/22 (No. 2), a three-layered flat and shape-



Nr.	No.	h/d [mm]/[mm]	a_s in [%]	g in [%]
1		210/185	100	100
2		240/210	78	73
3		260/230	67	59
4		310/280	58	51
5		310/285	58	62

h Trägerhöhe | *element's height*
 d statische Höhe | *effective depth*
 a_s Bewehrungsfläche | *area of reinforcement*
 g Eigengewicht | *self-weight*

Bild 1: Tragverhalten verschiedener querschnitts- und formoptimierter Platten unter einer Belastung von 4 kN/m² und einer zulässigen Mittendurchbiegung von 10 mm im GZG, Gegenüberstellung der Stahl- und Gewichtsgewinne geschichteter, einfeldriger Platten | **Fig. 1:** Load bearing behaviour of different cross-sectional and form optimized slabs under a loading of 4 kN/m² and allowed centre deflection of 10 mm at SLS, comparison of the steel and weight gains of layered, one-way slabs

und formoptimierten Platte aus LC20/22 und Infralichtbeton (ILC, Nr. 3 und 4) sowie C20/25 und Porenleichtbeton (PLB, Nr. 5) einander gegenüber. Tabelle 1 zeigt die iterativ numerisch ermittelten Plattenhöhen h , statischen Höhen d , erforderlichen Bewehrungsmengen a_s und die mögliche Gewichtsreduzierung für die verschiedenen Varianten. Bei der kraftflussgerecht ausgebildeten Platte aus konstruktiven Leichtbetonen (Nr. 4) betragen das Gewicht lediglich 51 % und der Stahlbedarf 58 % der Referenzplatte aus Normalbeton C20/25.

2.1.2 Ressourcenersparnis

Zur Beurteilung der Ersparnis an natürlichen Ressourcen ist besonders die Betonzusammensetzung von großer Bedeutung. Um die Gewinne bestimmen zu können, wurden ökobilanzielle Betrachtungen auf Basis der GaBi-Datenbank [5] zu den verschiedenen Betonsorten durchgeführt. Maßgebende Parameter zur Beurteilung der Ressourcenersparnis und des Umwelteinflusses sind z. B. der Bedarf an Primärenergie und der CO₂-Ausstoß. Frenzel/Kahnt [3] führen Betonrezepturen auf, die die benötigten und rechnerisch angesetzten Betonfestigkeiten und -steifigkeiten aufweisen und stellen beispielhaft für den Primärenergiebedarf die verschiedenen

optimised slab of LC20/22 and infralightweight concrete (ILC, No. 3 and 4) as well as C20/25 and porous lightweight concrete (PLB, No. 5). Table 1 shows the iteratively numerically determined slab heights h , effective depth d , required area of reinforcement a_s and the possible weight reduction for the different variants. In the case of the slab made of structural lightweight concretes (No. 4), which is designed in accordance with the force flow, the weight is only 51% and the steel requirement 58% of the reference slab made of regular concrete C20/25.

2.1.2 Saving in resources

In order to assess the savings in natural resources, the concrete composition in particular is of great importance. In order to be able to determine the gains, life cycle assessment considerations were carried out on the basis of data from the GaBi database [5] on the different types of concrete. Decisive parameters for assessing the resource savings and the environmental impact are, for example, the primary energy demand and the CO₂ emissions. Frenzel/Kahnt [3] list concrete mixtures with the required and calculated concrete strengths and stiffnesses and compare the different concrete types and slab designs as examples

Betonsorten und Plattenausführungen einander gegenüber (Bild 2). Es ist ersichtlich, dass konstruktive Leichtbetone (LC20/22 und Infralichtbeton ILC) unter Verwendung von üblichen Blähtonzuschlägen deutlich mehr Energie pro Kubikmeter benötigen als Normal- und Porenleichtbetone (PLB). Damit sind geschichtete Decken in der Kombination C20/25-PLB zur Einsparung von Ressourcen zu bevorzugen.

for the primary energy demand (Fig. 2). It can be seen that structural lightweight concretes (LC20/22 and infralightweight concrete ILC) using common expanded clay aggregates require significantly more energy per cubic metre than regular and porous lightweight concretes (PLB). Thus, layered ceiling slabs in the combination C20/25-PLB are to be preferred for saving resources.

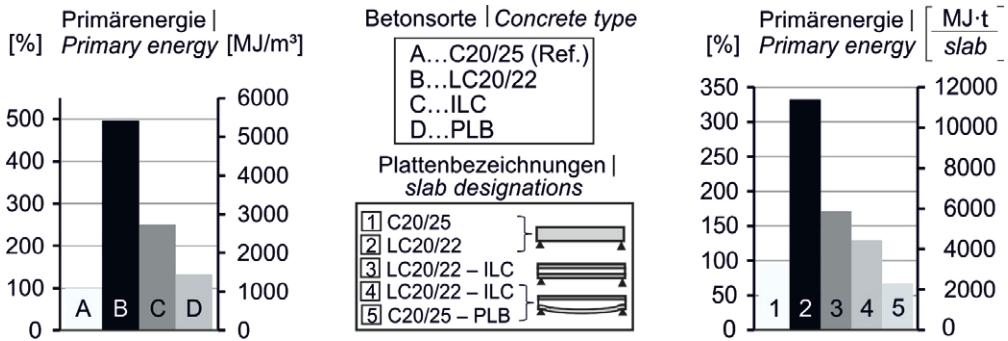


Bild 2: Primärenergieverbrauch der betrachteten Betonsorten (links) und bezogen auf das Gewicht geschichteter Deckenplatten (rechts) | Fig. 2: Primary energy consumption of the considered concrete types (left) and related to the weight of layered ceiling slabs (right)

2.1.3 Auswahl geeigneter Betone

Auf Grundlage der vorgestellten Ergebnisse erfolgten weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen an geschichteten Platten mit der minimalgewichtigen Anordnung LC20/22-ILC (konstruktiver Leichtbeton-Infralichtbeton) und der besonders ressourcensparenden Kombination C20/25-PLB (Normalbeton-Porenleichtbeton). Dabei wurde beachtet, dass die Betone mit der vorhandenen Mischtechnologie der lokal ansässigen Betonwerke herstellbar und damit technisch und wirtschaftlich umsetzbar waren.

2.1.3 Selection of suitable concretes

On the basis of the results presented, further theoretical and experimental investigations were carried out on layered slabs with the minimum weight arrangement LC20/22-ILC (structural lightweight - concrete-infralightweight concrete) and the particularly resource-saving combination C20/25-PLB (normal concrete-porous lightweight concrete). It was taken into account that the concretes could be produced with the existing mixing technology of the local concrete plants and were thus technically and economically feasible.

2.1.4 Analytische und numerische Modellierung

Während der Projektlaufzeit wurde ein analytisches Verfahren zur Querschnitts- und Formoptimierung geschichteter Träger auf Basis der Kraftgrößenmethode nach Theorie I. Ordnung entwickelt (Modellskizze siehe Bild 3, links), mit dem die Betonarten, Schichtdicken, Bewehrungsmenge und Trägerhöhe in der Art bestimmt werden können, dass die Materiali-

2.1.4 Analytical and numerical modelling

During the project, an analytical method for optimising the cross-section and shape of layered elements was developed on the basis of the method of consistent deformation according to the I. order theory (model sketch, see Fig. 3, left), with which the types of concrete, layer thicknesses, amount of reinforcement and cross-sectional height can be determined

en und die Betonfugen im Grenzzustand der Tragfähigkeit in jedem Querschnitt bestmöglich ausgelastet sind. Der genaue Versagensort und die Versagensart können damit nicht mehr vorhergesagt werden. Rechts in Bild 3 ist exemplarisch der theoretische Ausnutzungsgrad (1 = 100 %) entlang der Trägerachse (halbes System, span: 7 m) eines zweiseitig voll eingespannten, geschichteten Trägers mit veränderlicher Querschnittshöhe unter Einzellast gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Biegetragfähigkeit im Bereich der Einspannung ($0 \leq x < 0,8 \text{ m}$ und $x = 3,5 \text{ m}$) und die Fugentragfähigkeit im Bereich $0,8 \text{ m} \leq x < 3,5 \text{ m}$ zu 100 % erreicht werden.

Ergänzend zur analytischen Berechnung geschichteter Deckenelemente wurde ein zwei-dimensionales, numerisches Modell mit dem Finite-Elemente-Programm Atena Engineering 2D, Červenka Consulting Ltd., entwickelt, um Kräfte, Spannungen, Dehnungen und Verformungen in jedem Punkt eines geschichteten Elementes bestimmen und damit die Materialausnutzung beurteilen zu können. Das Modell diente zur Berechnung der Gewichtersparnis und Effizienz (siehe Bild 1) sowie zur – im Vergleich zum analytischen Modell – genaueren Beurteilung des Tragverhaltens der experimentell untersuchten, geschichteten, klein- und großformatigen Schub- und Plattenprüfkörper (s. Abschnitt 2.2). Mit dem numerischen Modell ließ sich jedoch im Gegensatz zum analytischen Modell der Formfindungsprozess im Rahmen des Projektes nicht automatisieren.

in such a way that the materials and the concrete interfaces in the ultimate limit state are optimally utilised in each cross-section. The exact location and type of failure can thus no longer be predicted. Fig. 3 on the right shows an example of the theoretical degree of utilisation (1 = 100%) along the beam axis (half system, span: 7 m) of a layered beam with two fixed ends and variable cross-sectional height under concentrated load. It can be seen that the flexural capacity in the end and centre area ($0 \leq x < 0.8 \text{ m}$ and $x = 3.5 \text{ m}$) and the interface capacity in the area of $0.8 \text{ m} \leq x < 3.5 \text{ m}$ are achieved at a level of 100%.

Complementary to the analytical calculation of layered ceiling slabs, a two-dimensional numerical model was developed with the finite element programme Atena Engineering 2D, Červenka Consulting Ltd. in order to determine forces, stresses, strains and deformations at every point of a layered element and thus to be able to assess the material utilisation. The model was used to calculate weight savings and efficiency (see Fig. 1) and – compared to the analytical model – to more accurately evaluate the load-bearing behaviour of the experimentally investigated, layered, small- and large-sized shear and slab test specimens (see Section 2.2). However, in contrast to the analytical model, the numerical model could not be used to automate the form-finding process within the scope of the project.

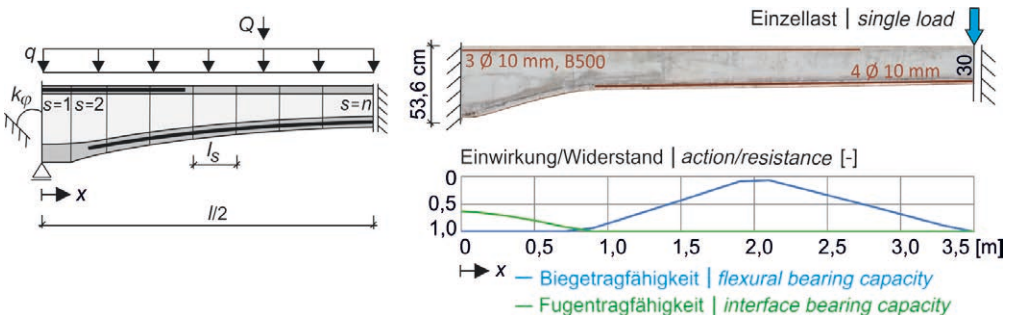


Bild 3: Modellierung querschnitts- und formoptimierter Tragglieder (links) und theoretischer Ausnutzungsgrad (1 = 100 %) entlang der Trägerachse eines 7 m langen, geschichteten und formoptimierten Trägers unter Einzellast (halbes System, rechts) | **Fig. 3:** Modelling of cross-sectional and shape optimized bearing members (left) and theoretical utilisation factor (1 = 100%) along the axis of a 7 m long layered and shape-optimized member under single load (half system, right)

2.2 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl an experimentellen Untersuchungen durchgeführt, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

2.2.1 Schubkörper

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von unbewehrten Betonfugen erfolgte die Prüfung von mehr als 45 kleinformatigen, quaderförmigen ($12 \times 28 \times 21 \text{ cm}^3$), fünfschichtigen Druck-Druck-Schubkörpern in drei verschiedenen Beton- und Fugenrauigkeitskombinationen. Mit Hilfe der bestimmten Bruchlasten und Verformungen ließen sich Kennwerte wie die Haftschub- und Haftzugfestigkeit sowie fugenspezifische Spannungs-Verschiebungs-Beziehungen bestimmen, die zur Kalibrierung und Verifizierung der Rechenmodelle erforderlich waren [6].

2.2.2 Parallelgurtige Platten

Zur Identifizierung und Analyse der für geschichtete Elemente relevanten Versagensarten – Biegezug-, Schub- und Fugenversagen – wurden in 4-Punkt-Biegeversuchen 36 geschichtete Platten bis zum Bruch belastet. Die Probekörper bestanden aus den zwei gewählten Materialkombinationen LC20/22-ILC und C20/25-PLB und besaßen verschiedene Längen (150, 200 und 250 cm) und Plattenhöhen von 10 cm bzw. 20 cm. Zusätzlich wurden drei einschichtige, 10 cm hohe und 250 cm lange Referenzplatten getestet.

Die geschichteten Platten wiesen 20 bzw. 30 mm starke Deckschichten und 50 mm bzw. 150 mm starke Kernschichten auf. Die untere Deckschicht war mit fünf bzw. vier B500-Stabstählen, Durchmesser 6 mm, bewehrt. Typische Momenten-Mittendurchbiegungs-Verläufe zeigt exemplarisch Bild 4 für 10 cm hohe, geschichtete Elemente aus Normal- und Porenleichtbeton. Bei vier Platten dieser Kombination stellte sich ein Fugenversagen ohne Stahlfließen (Bild 4, Nr. 1–4, Bild 5 links), bei vier Platten ein Fugenversagen mit Stahlfließen (Bild 4,

2.2 Experimental investigations

Within the framework of the project, a large number of experimental investigations were carried out, which are presented in the following sections.

2.2.1 Shear specimens

In order to determine the load-bearing capacity of unreinforced concrete interfaces, more than 45 small-format, cuboid ($12 \times 28 \times 21 \text{ cm}^3$), five-layer compression-shear bodies were tested in three different concrete and joint roughness combinations. With the help of the measured failure loads and deformations, specific values such as the adhesive shear strength and adhesive tensile strength as well as interface-specific stress-displacement relationships could be obtained, which were required for the calibration and verification of the calculation models [6].

2.2.2 Layered slabs with constant height

36 layered slabs were loaded to failure in 4-point bedding tests to identify and analyse the failure modes relevant for layered elements – flexural, shear and interface failure. The specimens consisted of the two selected material combinations LC20/22-ILC and C20/25-PLB and had different lengths (150, 200 and 250 cm) and panel heights 10 cm and 20 cm respectively. In addition, three single-layer, 10 cm high and 250 cm long reference panels were tested.

The layered slabs consisted of top and bottom layers, 20 and 30 mm thick respectively and a 50 mm or 150 mm thick core layer. The bottom layer was reinforced with five or four B500 steel bars, diameter 6 mm. Typical moment-centre deflection curves are shown in Fig. 4 for 10 cm high layered elements made of regular and porous lightweight concrete. Four slabs of this combination showed an interface failure without steel yielding (Fig. 4, numbers 1–4, Fig. 5, left), four slabs showed an interface failure with steel yielding (Fig. 4, numbers 5–8) and one slab showed a bending tensile failure character-

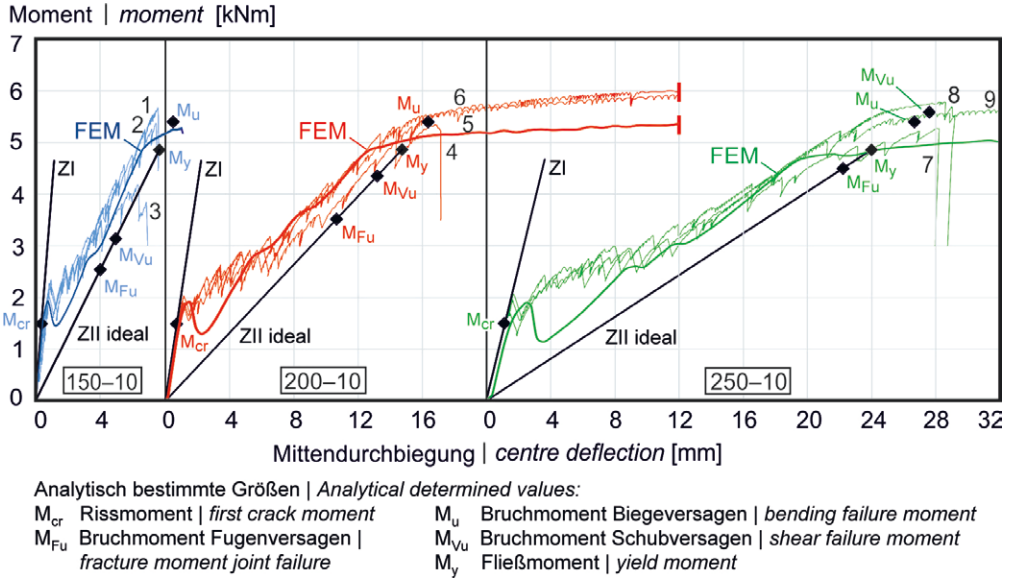


Bild 4: Vergleich zwischen experimentell und rechnerisch bestimmten Momenten-Mittendurchbiegungs-Beziehungen für geschichtete Plattenstreifen aus Normal- und Porenleichtbeton (C20/25-PLB) mit einer Höhe von 10 cm und Längen von 150, 200 und 250 cm | **Fig. 4:** Comparison between experimentally and computationally determined moment-centre deflection relationships for layered slab strips made of regular and foam concrete (C20/25-PLB) with a height of 10 cm and lengths of 150, 200 and 250 cm

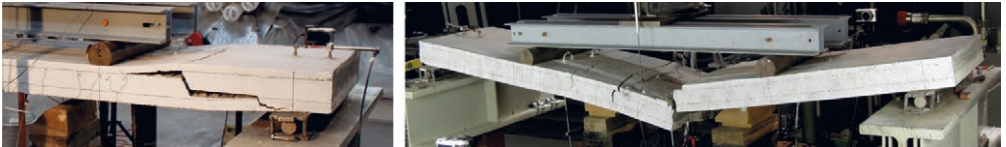


Bild 5: Geschichtete Platten aus Normal- und Porenleichtbeton (C20/25-PLB) mit Fugenversagen (links) bzw. Biegezugversagen (rechts) | **Fig. 5:** Layered slabs made of regular and foam concrete (C20/25-PLB) with interface failure (left) and bending failure (right)

Nr. 5–8) und bei einer Platte Biegezugversagen ein, das durch das Reißen des Stahls gekennzeichnet war (Bild 4, Nr. 9, Bild 5, rechts, [7]).

used by fracture of the steel (Fig. 4, No. 9, Fig. 5, right), [7].

2.2.3 Großformatige Plattenstreifen

2.2.3 Large format slab strips

Die Erkenntnisse aus den zuvor genannten kleinformatigen Tests, die erfolgreiche Validierung der Berechnungsmodelle und die Bereitstellung eines Verfahrens zur Formfindung führten zur Dimensionierung, Herstellung und Prüfung von drei großformatigen Plattenstreifen. Zum einem konnte damit die praktische Umsetzbarkeit geschichteter Deckenelemente mit veränderlicher Querschnittshöhe im Maßstab 1 : 1, zum anderen auch die Eignung der Rechenmodelle demonstriert werden. Exemplarisch erfolgte die

The findings from the aforementioned small-format tests, the successful validation of the calculation models and the provision of a procedure for form finding led to the dimensioning, production and testing of three large-format slab strips. On the one hand, this made it possible to demonstrate the practical feasibility of layered ceiling elements with variable cross-sectional heights on a scale of 1 : 1, and on the other hand, the suitability of the calculation models. As an example, the centre span of an endless continuous strip with 7 m span was investigated

Untersuchung des Mittelfeldes eines Endlosdurchlaufträgers mit 7 m Spannweite in folgenden drei Varianten: ein Referenzträger mit konstanter Höhe von 35 cm aus Normalbeton C20/25 unter mittig angeordneter Einzellast und zwei formoptimierte Träger aus Normalbeton C20/25 und Porenleichtbeton, die konstante Deckschichtdicken von 45 mm und eine veränderliche Querschnittshöhe entlang der Spannrichtung aufwiesen. Die Formen waren verschieden, da ein Träger mit einer Einzellast in Feldmitte und einer mit einer Streckenlast (durch acht Einzellasten aufgelöst) belastet wurde. Bild 6 stellt exemplarisch den Träger unter Streckenlast mit den wesentlichen Abmaßen im Versuchsstand dar. Die Form des geschichteten Trägers unter Einzellast ist ausschnittsweise in Bild 3 abgebildet. Alle drei Träger wiesen gleiche Betonvolumina zwischen den Auflagerlinien und die gleiche Bewehrungsmenge auf, so dass die Bruchlasten direkt miteinander verglichen werden konnten, [1].

2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

2.3.1 Schubkörper

Die Untersuchungen an Schubkörpern haben gezeigt [6], dass:

- die Haftscher- und Haftzugfestigkeit (erwartungsgemäß) relativ großen Streuungen unterliegen, wobei diese bei glatten und gerechten Fugen aus C20/25-PLB am geringsten sind,
- gerechte und verzahnte Fugen eine ähnliche Tragfähigkeit zeigen, die über der von glatten Fugen liegt,

in the following three variants: a reference member with a constant height of 35 cm made of regular concrete C20/25 under a centrally arranged concentrated load and two form-optimised strips made of regular concrete C20/25 and porous lightweight concrete, which had constant cover thicknesses of 45 mm and a variable cross-sectional height along the span direction. The shapes were different, as one girder was loaded with a concentrated load in the centre of the span and one with a line load (resolved by eight concentrated loads). Fig. 6 shows exemplarily the strip under line load with the main dimensions and the test set-up. The shape of the layered slab strip under concentrated load is shown in part in Fig. 3. All three members had the same concrete volumes between the support lines and the same amount of reinforcement, so that the failure loads could be compared directly with each other, [1].

2.3 Results and conclusions

2.3.1 Shear specimens

The investigations on shear specimens have shown [6], that:

- the adhesive shear strength and adhesive tensile strength are (as expected) subject to relatively large scatters, whereby these are lowest for smooth and rough interfaces made of C20/25-PLB,
- rough and indented interfaces have a similar load-bearing capacity, which is higher than that of smooth interfaces,

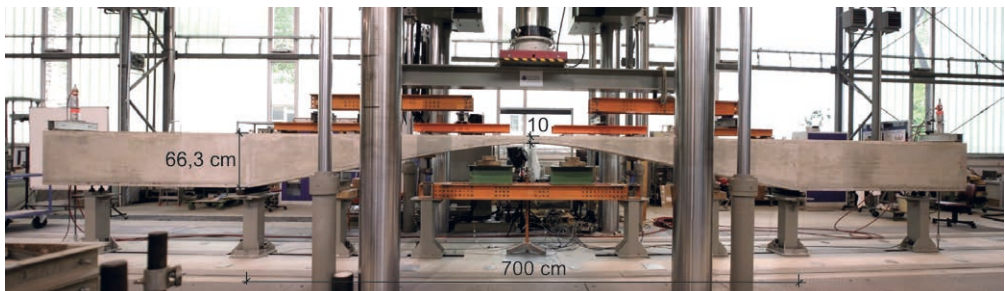


Bild 6: Formoptimierter, geschichteter Plattenstreifen unter Streckenlast (hier realisiert mit acht Einzellasten im Feldbereich) | **Fig. 6:** Shape-optimized, layered slab strip under uniform loading (here realised with eight single loads in the mid span)

- gerechte Fugen deutlich leichter bei geschichteten Deckenelementen realisiert werden können als verzahnte Fugen und somit bevorzugt herzustellen sind,
- die Fugen der Materialkombination LC20/22-ILC etwa doppelt so tragfähig wie die der Materialkombination C20/25-PLB sind,
- das Tragverhalten von Schubkörpern numerisch simuliert werden kann und daraus fugenspezifische Spannungs-Öffnungs-Beziehungen bestimmbar sind, die zur Berechnung des Fugenversagens geschichteter Platten benötigt werden.
- roughened interfaces can be realised much more easily with layered ceiling elements than indented interfaces and are therefore preferable,
- the interfaces of the material combination LC20/22-ILC are about twice as load-bearing as those of the material combination C20/25-PLB,
- the load-bearing behaviour of shear specimens can be simulated numerically and interface-specific stress-opening relationships are determinable from this, which are required for the calculation of the interface failure of layered slabs.

Der gewählte Versuchsaufbau und das Analyseverfahren werden als geeignet bewertet und daher zur weiteren Anwendung empfohlen.

The chosen experimental set-up and the analysis procedure are evaluated as suitable and therefore recommended for further application.

2.3.2 Parallelgurtige Platten

Mit Hilfe der Untersuchung von 36 kleinformatigen, parallelgurtigen, geschichteten Platten konnten sowohl analytische Rechenansätze als auch die erstellten numerischen Modelle bewertet, kalibriert und damit verbessert werden. Bild 4 zeigt beispielhaft für neun geschichtete Elemente aus C20/25 und Porenleichtbeton die analytisch bestimmten Bruchmomente für das Biege-, Schub- und Fugenversagen (M_{u} , $M_{V,u}$, $M_{F,u}$) und die Fließmomente M_y , die rechnerisch bestimmten Momenten-Durchbiegungs-Beziehungen im ungerissenen (Zustand ZI) und im idealen gerissenen Zustand (ZII ideal), [7], sowie die mit dem Finite-Elemente-Modell bestimmten Momenten-Mittendurchbiegungs-Beziehungen.

2.3.2 Layered slabs with constant height

With the help of the investigation of 36 small-sized, layered slabs with constant height, both the analytical calculation approaches and the numerical models created could be evaluated, calibrated and thus improved. Fig. 4 shows, as an example, for nine layered elements made of C20/25 and porous lightweight concrete, the analytically determined moments for the bending, flexural shear and joint failure (M_{u} , $M_{V,u}$, $M_{F,u}$) and the yield moments M_y , the computationally determined moment-deflection relationships in the uncracked (state ZI) and in the ideal cracked state (ZII ideal), [7], as well as the moment-centre deflection relationships determined with the finite element model.

Aus den Untersuchungen konnten weitere Schlussfolgerungen gezogen werden. So waren – ähnlich den Erkenntnissen aus den Schubfugenuntersuchungen – Platten aus konstruktiven Leichtbetonen tragfähiger als die der vergleichbaren Platten aus Normal- und Porenleichtbeton.

Further conclusions could be drawn from the investigations. Thus – similar to the findings from the shear interface investigations – slabs made of structural lightweight concretes were more load-bearing than those of the comparable slabs made of regular and porous lightweight concrete.

Die drei maßgebenden Versagensarten Biegeschub-, Fugen- und Biegezugversagen konnten identifiziert werden. Einige Platten (Nr. 5–8) zeigten auf Bruchlastniveau Merkmale mehre-

The three decisive failure modes, flexural shear, interface and bending tensile failure, could be identified. Some slabs (numbers 5–8) showed characteristics of several failure modes at

rer Versagensarten auf, indem z. B. ein Fugenversagen unter Fließen der Bewehrung eintrat. Damit waren die Bewehrung und die Fugen gleichzeitig stark beansprucht, was auf eine effiziente Querschnittsgestaltung schließen lässt.

Bild 4 zeigt, dass mit dem entwickelten numerischen Modell die experimentellen Momenten-Mittendurchbiegungs-Beziehungen sehr zufriedenstellend wiedergegeben werden können. Bei der Platte der Serie 150-10 stellte sich rechnerisch ein Fugenversagen ein, bei den anderen beiden Serien ein Biegezugversagen mit stark beanspruchter Schubfuge. Auch die Auswertung einzelner Bereiche des Finite-Elemente-Modells zeigten, dass besonders bei den schlanken Platten mit einer Länge von 250 cm sowohl der Stahl unter Zug und Beton unter Druck in Plattenmitte als auch die Fuge und der Beton im stark schubbeanspruchten Bereich in Auflagernähe auf Bruchlastniveau und damit gleichzeitig stark ausgelastet waren. Dies bestätigte die experimentellen Beobachtungen.

Bei der Anwendung der analytischen Berechnungsansätze wird bei allen Plattengeometrien stets das Fugenversagen gegenüber dem Querkraftversagen maßgebend (siehe Bild 4). Dies stimmt mit den Versuchsbeobachtungen überein. Es ist auch ersichtlich, dass mit abnehmender Schlankheit bzw. Plattenlänge die Fugen- und Querkrafttragfähigkeit zunehmend unterschätzt werden. Die Eignung der analytischen Ansätze kann daher (nur) für praxisübliche (Schub-)Schlankheiten > 5 empfohlen werden.

2.3.3 Großformatige Plattenstreifen

Die Prüfungen der großformatigen Plattenstreifen zeigten, dass sich die theoretisch bestimmten, bezogenen Verhältnisse aus Bruchlast zu Trägergewicht von 2,2 beim geschichteten und gevouteten Träger unter Einzellast und von 2,5 beim Träger unter Streckenlast – das Verhältnis beträgt 1,0 beim einschichtigen Referenzträger konstanter Höhe unter gleicher Belastung – experimentell in dieser Höhe nicht bestätigt werden konnten. Das Verhältnis und damit die

the ultimate load level, e.g. interface failure occurred under yielding of the reinforcement. This meant that the reinforcement and the joints were heavily stressed at the same time, suggesting an efficient cross-section design.

Fig. 4 shows that the experimental moment-centre deflection relationships can be reproduced very satisfactorily with the numerical model developed. In the case of the slab 150-10 series, an interface failure occurred computationally. For the other two series, a bending tensile failure with a strongly stressed shear interface was determined. The evaluation of individual areas of the finite element model also showed that, especially for the slender slabs with a length of 250 cm, both the steel under tension and concrete under compression in the centre of the slab as well as the interface and the concrete in the heavily shear-stressed area near the support were stressed at the ultimate load level and thus heavily loaded at the same time. This confirmed the experimental observations.

When applying the analytical calculation approaches, the interface failure is always decisive compared to the shear failure for all slab geometries (see Fig. 4). This is consistent with the test observations. It is also evident that with decreasing slenderness or slab length, the interface and shear load-bearing capacity are increasingly underestimated. The suitability of the analytical approaches can therefore (only) be recommended for common (shear) slendernesses > 5 .

2.3.3 Large format slab strips

The tests of the large-format slab strips showed that the theoretically determined relative ratios of failure load to self-weight of 2.2 for the layered and haunched strip under single load and of 2.5 for the one under line load – the ratio is 1.0 for the mono-layered reference strip of constant height under the same load – could not be confirmed experimentally at this level. The ratio and thus the efficiency of the cross-section and shape optimisation were 1.1 for the beam un-

Effizienz der Querschnitts- und Formoptimierung lagen beim Träger unter Einzellast bei 1,1 und beim Träger unter Streckenlast bei 2,0. Hier zeigte sich, dass die analytischen Rechenansätze nur begrenzt zur Formoptimierung geeignet sind bzw. zu größeren Abweichungen gegenüber dem realen Tragverhalten führen. Dennoch ist die Effizienzsteigerung um den Faktor 2,0 sehr positiv zu bewerten, da Decken-tragwerke üblicherweise unter dem Ansatz von Flächen- bzw. Streckenlasten bemessen werden. Speziell die Formfindung sollte zukünftig noch intensiver mit numerischen Modellen erfolgen – auch wenn dies sehr aufwendig ist – da das Tragverhalten damit genauer prognostiziert werden kann. Auch müssen eventuelle Probleme bei der Herstellung solch schlanker Tragwerke von vornherein Berücksichtigung finden.

2.3.4 Fazit

Mit den generierten und durch Versuche verifizierten Rechenansätzen lassen sich geschichtete Deckenelemente effizienter dimensionieren und ihr Tragverhalten vorausbestimmen. Mit den experimentellen Untersuchungen können die theoretisch erarbeiteten und in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 vorgestellten Ergebnisse und damit einhergehende Ersparnisse prinzipiell bestätigt werden.

3 Zweiachsig gespannte Decken

3.1 Theoretische Untersuchungen

3.1.1 Gewichtersparnis und Effizienz

Frenzel et al. [8] bestimmten die mögliche Gewichtersparnis bei zweiachsig gespannten Betonplatten infolge von Querschnitts- und Formoptimierungen. Der Fokus lag dabei auf punktgestützten Endlosdurchlaufplatten (Bild 7, links). Für eine praxisübliche Spannweite von 7 m und unter Berücksichtigung der Vorgaben aus dem EC 2 [4] wurden die Querschnittshöhe und der Aufbau in der Art bestimmt, dass sowohl die Nachweise für die Momenten- und die Querkrafttragfähigkeit unter Eigengewicht,

der single load and 2.0 for the beam under line load. Here it was shown that the analytical calculation approaches are only suitable for shape optimisation to a limited extent or lead to greater deviations compared to the real load-bearing behaviour. Nevertheless, the increase in efficiency by a factor of 2.0 is very positive, since slab structures are usually designed using area or line loads. In future, the form-finding in particular should be carried out more intensively with numerical models – even if this is very time-consuming – as the load-bearing behaviour can be predicted more precisely with this. Possible problems in the production of such slender structures must also be taken into account from the outset.

2.3.4 Conclusions

With the computational approaches generated and verified by experiments, layered ceiling slabs can be dimensioned more efficiently and their load-bearing behaviour can be predicted. With the experimental investigations, the theoretically elaborated results and associated savings presented in sections 2.1.1 and 2.1.2 can be confirmed in principle.

3 Two way ceilings

3.1 Theoretical investigations

3.1.1 Weight saving and efficiency

Frenzel et al. [8] presented the possible weight saving for two way concrete slabs as a result of cross-section and shape optimizations. The focus was on point-supported continuous slabs (Fig. 7, left). For a practical span of 7 m and taking into account the specifications from EC 2 [4], the cross-section height and the superstructure were determined in such a way that both the checks for the moment and shear at ultimate limit state under self-weight, an additional dead and imposed load (5 kN/m^2) as well as for the centre deflection at the serviceability limit state (SLS) are fulfilled.

Ausbaulast und einer veränderlicher Last von 5 kN/m^2 als auch der Mittendurchbiegungsnachweis (GZG) erfüllt sind.

Dazu benötigt eine herkömmliche Stahlbetonplatte aus C25/30 eine Stärke von 30 cm (Nr. 1), eine gevoutete Platte eine Höhe von 10–40 cm (Nr. 2), eine ebene Dreischichtplatte mit Infralichtbeton (ILC) eine Stärke von 52 cm (Nr. 3) und diese gevoutet eine Höhe von 10–48 cm (Nr. 4). Das Eigengewicht lässt sich dabei auf bis zu 50 % reduzieren (Bild 7, rechts). Um gleichzeitig auch eine möglichst schlanke, wenig voluminöse Decke auszubilden, ist es erforderlich, auflagernahe Stützbereiche mit (höherfestem) Normalbeton zu versehen (Nr. 5 und 6). Gegenüber der Referenzplatte können mit einer gevouteten, geschichteten Platte neben dem Eigengewicht auch das Betonvolumen und damit der Ressourcenverbrauch auf ca. 58 % reduziert werden. Dabei liegt der Stahlverbrauch um lediglich 6 % über dem der Referenzplatte (Nr. 1 bzw. 6, Bild 7 rechts). Die Analyse zeigt ebenfalls, dass bei punktgestützten Mehrfeldplatten hinsichtlich der Optimierungspotentiale zwischen dem stark schubbeanspruchten Stütz- und dem vorwiegend momentenbeanspruchten Feldbereich zu unterscheiden ist. Die weiteren Untersuchungen erfolgten daher getrennt für diese beiden Bereiche.

A conventional reinforced concrete slab of the strength class C25/30 requires a thickness of 30 cm (No. 1), a haunched slab a height of 10–40 cm (No. 2), a three-layer flat slab with infralightweight concrete (ILC) a thickness of 52 cm (No. 3) and this slab – if haunched – height of 10–48 cm (No. 4). The self-weight can be reduced by up to 50% (Fig. 7, right). In order to simultaneously shape a slab that is as slender and of low-volume as possible, it is necessary to provide areas with (higher-strength) regular weight concrete close to the supports (numbers 5 and 6). Compared with the reference slab, a haunched, layered slab can reduce not only the self-weight but also the required concrete volume and thus the resource consumption to approx. 58%. At the same time, the steel consumption is only 6% higher than that of the reference slab (No. 1 and 6, Fig. 7 right). The analysis also shows that in the case of point-supported multi-span slabs, a distinction must be made between the support area, which is subject to high shear stresses, and the mid-span area, which is predominantly subject to stresses due to moments, with regard to optimization potential. Further investigations were therefore carried out separately for these two areas.

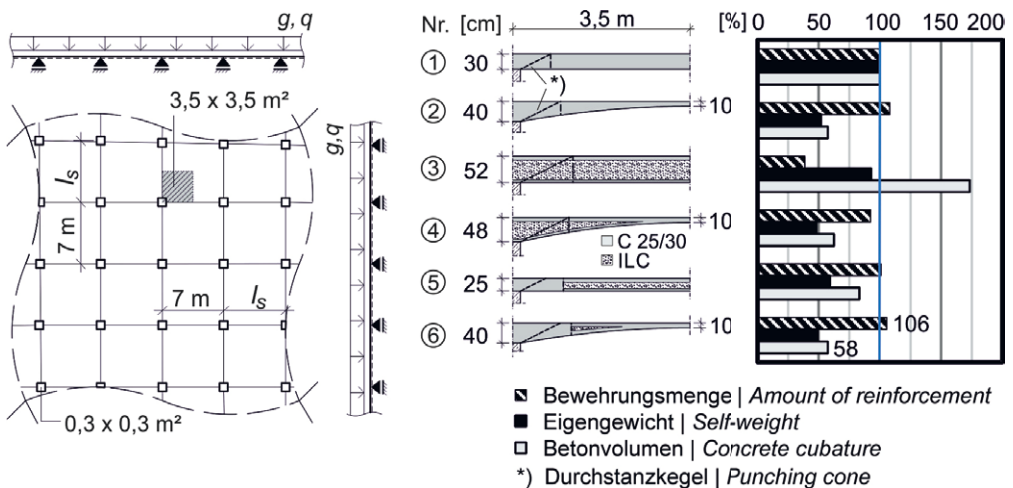


Bild 7: Punktgestützte Durchlaufdecken; links: statisches System, rechts: Massen-/Mengenvergleich verschiedener Deckenausbildungen | Fig. 7: Structural system of a point supported multi-span slab (left) and mass/quantity comparison of different ceiling designs (right)

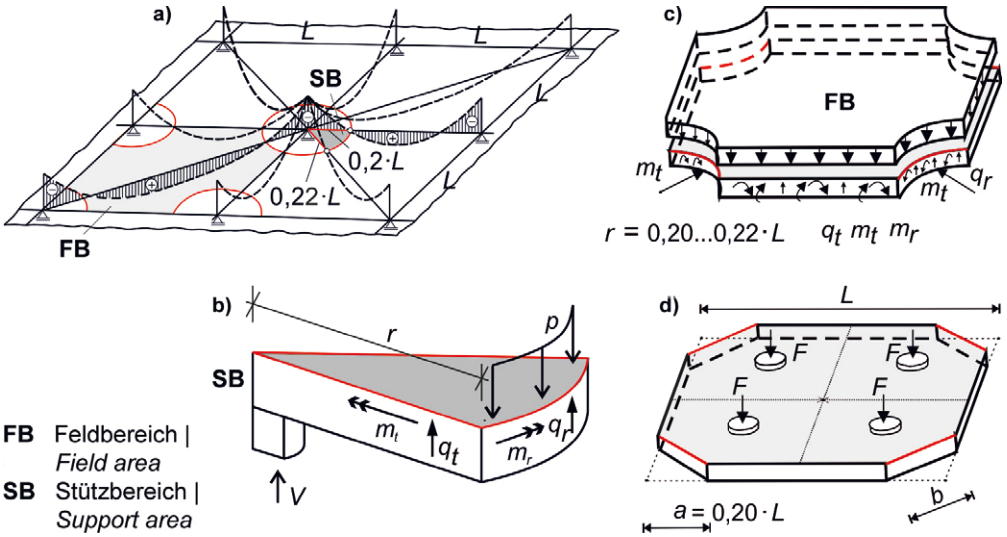


Bild 8: Punktgestützte Platten; a) Radialmomentenverlauf, b) Ausschnitt Stützbereich, c) Ausschnitt Feldbereich, d) vereinfachter Feldbereich | **Fig. 8:** Point supported slabs; a) radial moment distribution, b) cut-out support area, c) cut-out mid area, d) simplified mid area

3.1.2 Analytische und numerische Betrachtung – Feldbereich

Auf zweiachsig gespannte Decken wirken radial und tangential zur Stütze Querkräfte und Biegemomente (q_t , m_t , q_r , m_r). Bild 8 a) zeigt den typischen Verlauf der Radialmomente zwischen zwei Stützen unter einer flächigen Last [9]. Im Feldbereich sind diese positiv, im Stützbereich negativ. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode und dem Programm RFEM der Dlubal Software GmbH ermitteln Frenzel und Curbach [10] die auftretenden Beanspruchungen. Dabei zeigte sich, dass der im Bild 8 c) dargestellte Feldbereich unter Flächenlast gut durch einen achteckigen Ausschnitt mit vier Einzellasten (Bild 8 d)) approximiert werden kann, der zur experimentellen Untersuchung geeignet ist. Zur Berechnung der Widerstände für die verschiedenen Beanspruchungen wurde auf die Formelapparate des EC 2 [4] zurückgegriffen.

3.1.3 Analytische und numerische Betrachtung – Stützbereich

Im Stützbereich ist eine kombinierte Beanspruchung aus – im Vergleich zum Feldbereich – großen Momenten und Querkräften für die

3.1.2 Analytical and numerical analysis – mid-span area

Shear forces and bending moments (q_t , m_t , q_r , m_r) act radially and tangentially to the column on two-way multi-span flat slabs. Fig. 8 a) shows the typical course of the radial moments between two supports under a uniform area load [9]. They are positive in the mid-span and negative in the support region. Using the finite element method and the RFEM program from Dlubal Software GmbH, Frenzel and Curbach [10] determined the acting forces and stresses. They showed that the mid-span region under surface load shown in Fig. 8 c) can be well approximated by an octagonal section with four concentrated loads (Fig. 8 d)), which is suitable for experimental investigation. To calculate the resistances for the different loads, the formula apparatus of EC 2 [4] was used.

3.1.3 Analytical and numerical analysis – support area

In the support area, a combined stress situation resulting from – compared to the field area – large moments and shear forces is decisive for the load-bearing capacity, which usually

Tragfähigkeit ausschlaggebend, die meist zum Durchstanzen des Stützbereiches punktgestützter Platten führt. Zur Untersuchung des Traglastpotentials war gemäß den Ergebnissen von Frenzel et al. [8] dieser Versagensfall nähergehend zu betrachten. Dazu wurde ein Mindestmaß an Biegetragfähigkeit durch eine vorhandene Längsbewehrung vorausgesetzt.

Zur analytischen Bestimmung der Durchstantragfähigkeit von punktgestützten, ebenen Stahlbetonplatten ohne Durchstanzbewehrung kam die von Muttoni [11], [12] entwickelte *Critical Shear Crack Theory* (CSCT) zur Anwendung. Die Durchstantraglast, also die Ausbildung des kritischen Schubrisses, bestimmt sich aus dem Schnittpunkt des von Muttoni entwickelten Bruchkriteriums mit einer Last-Rotations-Beziehung, die sich entweder aus einer analytisch oder einer numerisch ermittelten Momenten-Krümmungs-Beziehung bzw. Last-Rotations-Kurve ergibt. Diese sowie die Modellfindung für die numerischen Untersuchungen des Durchstantragverhaltens sind in Farwig/Curbach [13] näher beschrieben. Ergänzend wurde auch die Durchstantraglast nach EC 2 [4] ermittelt. Die numerische Berechnung erfolgte mit dem Programm ANSYS® WB 17.1 der Ansys Inc. an einem rotationsymmetrischen Plattenausschnitt, s. Bild 8 b). Über die Materialmodellensammlung multiPlas der Fa. Dynardo GmbH [14] wurde für Beton das Materialgesetz nach Menétrey-Willam [15] in ANSYS® eingelesen.

Um das Optimierungspotenzial hinsichtlich des Traglast-Masse-Verhältnisses von punktgestützten Deckentragwerken ohne Durchstanzbewehrung zu ermitteln, führte Farwig [16] eine Studie durch. Dabei wurden insgesamt sechs Varianten (a-f) mit unterschiedlichen Materialanordnungen und Formen hinsichtlich ihrer Durchstantragfähigkeit numerisch untersucht und die Ergebnisse denen eines ebenen Referenzbauteils aus Beton der Klasse C20/25 gegenübergestellt (Bild 9). Die Variation der Form erfolgte unter der Prämisse der Volumengleichheit, so dass ein eindeutiger Vergleich der Traglasten stattfinden konnte. Bild 9 zeigt auch, dass die Traglast gegenüber der Referenzplat-

leads to the punching of the support area of the point-supported ceiling slab. According to the results of Frenzel et al. [8], this failure mode had to be considered in more detail in order to investigate the ultimate load potential. For this purpose, a minimum bending load capacity due to an existing longitudinal reinforcement was assumed.

The *Critical Shear Crack Theory* (CSCT) developed by Muttoni [11], [12] was applied to analytically determine the punching shear capacity of point-supported, flat reinforced concrete slabs without punching shear reinforcement. The punching shear load, i.e., the formation of the critical shear crack, is determined from the intersection of the failure criterion developed by Muttoni with a load-rotation relationship resulting from either an analytically or a numerically determined moment-curvature relationship or load-rotation curve. This as well as the model finding for the numerical investigations of the punching shear bearing behaviour are described in more detail in Farwig and Curbach [13]. In addition, the punching shear load was determined according to EC 2 [4]. The numerical calculation was carried out with the program ANSYS® WB 17.1 from Ansys Inc. on a rotationally symmetrical slab section, see Fig. 8 b). The material law according to Menétrey-Willam [15] was imported into ANSYS® for concrete via the material model collection multiPlas by Dynardo GmbH [14].

In order to determine the optimization potential with regard to the ultimate load-mass ratio of point-supported ceiling structures without punching shear reinforcement, Farwig [16] carried out a study. In this study, a total of six variants (a-f) with different material arrangements and shapes were numerically investigated with respect to their punching shear load capacity. The results were compared with those of a plane reference slab made of concrete of class C20/25 (Fig. 9). The variation of the shape was carried out under the premise of volume equality, so that a clear comparison of the ultimate loads could take place. Fig. 9 also shows that, compared with the reference slab, the ultimate

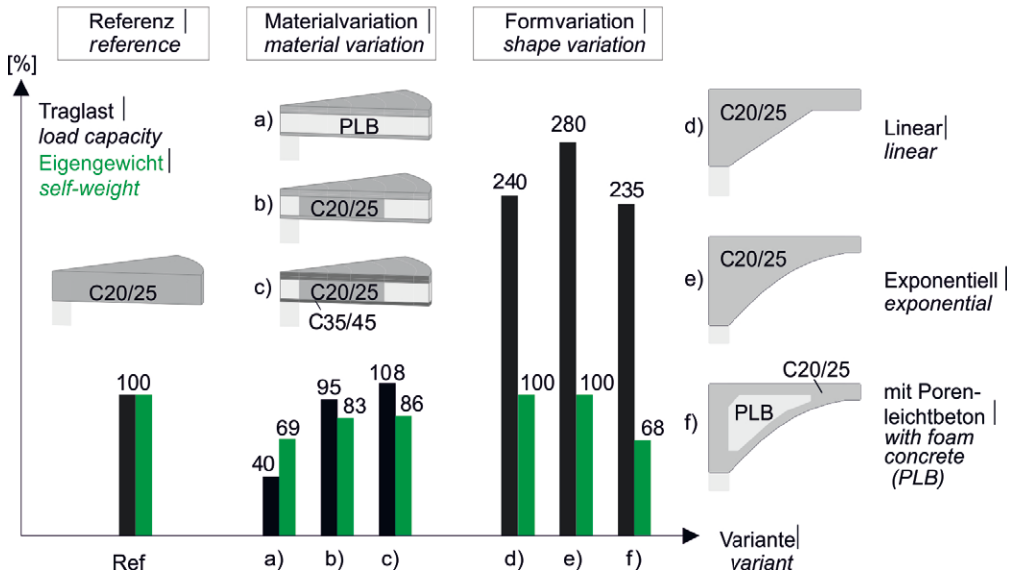


Bild 9: Optimierungspotenzial punktgestützter Deckentragwerke | Fig. 9: Optimization potential of point supported flat slabs

te infolge der Materialvariation auf 108 % (mit 14 % Gewichtsminderung) und infolge der Formvariation bis auf 280 % (bei identischen Massen) gesteigert werden konnte.

load could be increased to 108% as a result of the material variation (with 14% weight reduction) and up to 280% as a result of the shape variation (with identical masses).

3.2 Experimentelle Untersuchungen

3.2 Experimental investigations

3.2.1 Feldbereich

3.2.1 Mid-span area

Die zuvor ermittelte, theoretisch mögliche Gewichtersparnis bzw. Effizienzsteigerung sollte durch experimentelle Untersuchungen an vier verschiedenen, $2 \times 2 \times 0,1 \text{ m}^3$ großen Plattenkonfigurationen und damit etwa im Maßstab $1 : 2,5$ zu herkömmlichen Deckengrößen verifiziert werden. Serie S-A stellt dabei die Referenzplatte dar, die aus Normalbeton der Festigkeitsklasse C20/25 bestand. Als Bewehrung kam bei allen Platten kreuzweise und zum Rand parallel verlegter Baustahl B500 mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Querschnittsfläche von $2,26 \text{ cm}^2/\text{m}$ (Bewehrungsgrad $\rho_s = 0,26 \%$) auf der zugbeanspruchten Plattenunterseite (Betondeckung: 10 mm) zum Einsatz. Die Platten der Serie S-B und S-C bestanden aus zwei bzw. drei Schichten in der Kombination Normalbeton C20/25-Porenleichtbeton (PLB). Dieser wies

The previously determined, theoretically possible weight saving or efficiency increase was to be verified by experimental investigations on four different slab configurations measuring $2 \times 2 \times 0.1 \text{ m}^3$ and thus approximately on a scale of $1 : 2.5$ to conventional slab sizes. Series S-A represents the reference slab, which consisted of regular concrete of strength class C20/25. Steel reinforcement, type B500, with a diameter of 6 mm and a cross-sectional area of $2.26 \text{ cm}^2/\text{m}$ (reinforcement ratio $\rho_s = 0.26\%$) was used on the tensile stressed underside of the slab (concrete cover: 10 mm) for all slabs. The slabs of series S-B and S-C consisted of two and three layers, respectively, in the combination of regular weight concrete C20/25 porous light-weight concrete (PLB). This had a dry bulk density ρ_{tr} of $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ and a compressive strength

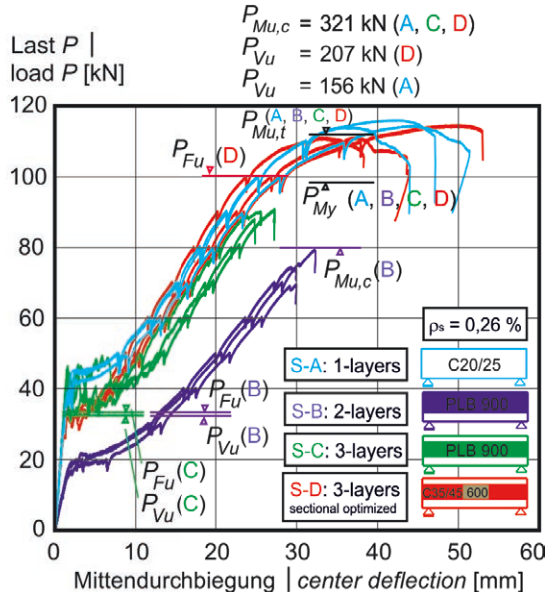
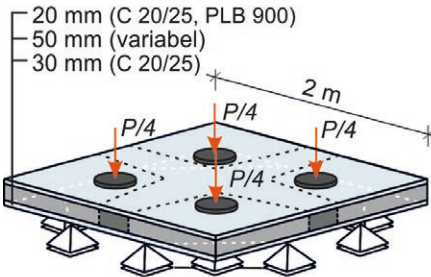


Bild 10: Experimentelle Untersuchung punktgestützter Platten; links oben: Herstellung Kernschicht (hier: Platte S-D), links unten: Belastungssituation, rechts: gemessene Last-Mittendurchbiegungs-Kurven sowie rechnerische Bruchlasten | Fig. 10: Experimental investigation of point-supported plates; top left: casting core layer (here: slab S-D), left bottom: loading of the specimen, right: measured load-center deflection relations and calculated failure loads

eine Trockenrohddichte ρ_{tr} von 900 kg/m^3 und eine Druckfestigkeit f_{cm} von $8,5 \text{ N/mm}^2$ auf. Für die Platte der Serie S-D wurde zudem weiter querschnittsweise optimiert, d. h. in stark beanspruchten Bereichen ein Normalbeton der Klasse C35/45 und in gering belasteten Bereichen ein sehr gering tragfähiger Porenleichtbeton ($f_{cm} = 2,7 \text{ N/mm}^2$) der Dichte $\rho_{tr} = 600 \text{ kg/m}^3$ als Kernschicht sternförmig gemäß Bild 10, oben links, eingebaut. Da jede Serie aus drei identischen Platten bestand, erfolgten insgesamt zwölf Prüfungen.

Bild 10, rechts, zeigt für jede Serie die gemessenen Last-Mittendurchbiegungs-Beziehungen, die rechnerisch ermittelten Bruchlasten für Schubversagen (P_{Vu}), Fugenversagen (P_{Fu}), Biegezugversagen ($P_{Mu,t}$), Biegedruckversagen ($P_{Mu,c}$) und das Lastniveau P_{My} , bei dem das Fließen der Bewehrung einsetzt. Die Referenzplatten versagten infolge Biegezug unter Ausbildung von Schubrisen auf einem Niveau von ca. 112 kN . Davor setzte das Fließen der Bewehrung bei ca. 100 kN ein. Werden die Kern- bzw. obere Deckschicht durch Porenleichtbeton ersetzt

f_{cm} of 8.5 N/mm^2 . For the S-D series slab, further cross-sectional optimization was also carried out, i.e. a concrete of class C35/45 was used in heavily loaded areas and a very low load-bearing porous lightweight concrete ($f_{cm} = 2.7 \text{ N/mm}^2$) of density $\rho_{tr} = 600 \text{ kg/m}^3$ was installed as a core layer in a star-like shape as shown in Fig. 10, top left. Since each series consisted of three identical slabs, a total of twelve tests were carried out.

Fig. 10, right, shows for each series the measured load-deflection relationships, the calculated failure loads for shear failure (P_{Vu}), interface failure (P_{Fu}), bending tensile failure ($P_{Mu,t}$), bending compression failure ($P_{Mu,c}$) and the load level P_{My} at which yielding of the reinforcement starts. The reference slabs failed due to tensile bending with the formation of shear cracks at a level of about 112 kN . Before that, reinforcement yielding started at a level of about 100 kN . If the core or upper surface layer is replaced by porous lightweight concrete (series B, C), shear failure occurred at a lower load level between 70 and 90 kN and thus without yielding of the

(Serien B, C), so stellte sich ein Schubversagen auf niedrigerem Lastniveau zwischen 70 und 90 kN und damit ohne Fließen des Baustahls ein. Das Bruchlastniveau der Referenzplatten konnte mit der Serie D und damit unter Biegezugversagen wieder erreicht werden. Aufgrund des festeren Betons C35/45 traten in den stark beanspruchten Bereichen kaum Schubrisse vor dem Plattenbruch auf.

3.2.2 Stützbereich

Die in Abschnitt 3.1.3 dargelegten Ansätze und Ergebnisse sind durch die Experimente überprüft worden. Dabei wurden die analytischen Methoden zur Bestimmung der Biege- sowie Durchstantraglast von rotationssymmetrischen Plattenausschnitten ohne Durchstanzbewehrung dazu verwendet, die erzeugten numerischen und experimentellen Ergebnisse anhand der Referenzgeometrie einzuordnen. Je nach erreichter Traglast konnte so abgeschätzt werden, welches Versagen im Bauteil eingetreten ist.

Der in Bild 8 b) aufgeführte Ausschnitt einer Ersatzkreisplatte ($r = 1,0\text{ m}$) bildete die Grundlage für die durchgeführten Versuche. Dabei wurde die Belastung über den durch einen massiven Stahlzylinder verkörperten Stützenstumpf ($d = 25\text{ cm}$) von oben in die Platte eingetragen. Die unterseitige Auflagerung der Platte erfolgte über 16 entsprechend des Plattenumfangs angeordnete, gelenkig ausgebildete Stützpunkte unter Berücksichtigung eines 10 cm breiten, überstehenden Plattenrandes (Bild 11).

structural steel. The failure load level of the reference slabs could be reached again with series D and thus under flexural tensile failure. Due to the stronger C35/45 concrete, hardly any shear cracking occurred in the heavily loaded areas before slab failure.

3.2.2 Support area

The approaches and results presented in Section 3.1.3 have been verified by experimental tests. The analytical methods for determining the bending and punching loads of rotationally symmetrical slab sections without punching shear reinforcement were used to classify the numerical and experimental results generated on the basis of the reference geometry. Depending on the ultimate load achieved, it was thus possible to estimate which failure had occurred in the component.

The section of an equivalent circular slab ($r = 1.0\text{ m}$) shown in Fig. 8 b) formed the basis for the tests carried out. The load was applied to the slab from above via the column stub ($d = 25\text{ cm}$) embodied by a solid steel cylinder. The underside of the slab was supported by 16 articulated support points arranged according to the slab circumference, taking into account a 10 cm wide projecting slab edge (Fig. 11).

The test setup shown, consisting of three steel girder levels, has already been successfully used for punching shear tests at the Ruhr University Bochum, e.g. by Bocklenberg et al. [17],

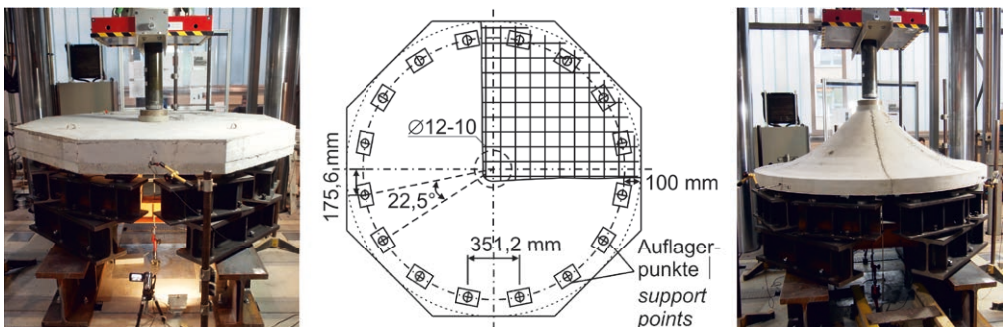


Bild 11: Versuchsaufbau für Durchstanzversuche | Fig. 11: Test setup for punching shear tests

Der dargestellte Versuchsaufbau, bestehend aus drei Stahlträger-Ebenen, wurde bereits erfolgreich für Durchstanzversuche an der Ruhr-Universität Bochum, z. B. von Bocklenberg et al. [17], eingesetzt und der TU Dresden zur Prüfung von insgesamt 3 Serien à 3 Platten zur Verfügung gestellt. Zwei Serien (Referenzplatte und Var. c, s. Bild 9, Dicke: 20 cm) konnten in achteckiger Form hergestellt werden, um den Schalungsaufwand möglichst gering zu halten. Für die drei gevouteten Platten (Var. e, Bild 9, Dicke: 10–58 cm) ließen wir eine Sonderschalung aus hochfestem Polystyrol vom Institut für Tragwerksentwurf der TU Braunschweig anfertigen. Als Bewehrung kam für alle Platten kreuzweise verlegter Baustahl B500 ($\varnothing = 12$ mm, Abstand 10 cm) zum Einsatz. Zudem wurden begleitend zu jeder Betonage Routineprüfkörper zur Ermittlung der Betondruck- und -zugfestigkeit und des E-Moduls hergestellt. Die Kennwerte dienten als Eingabewerte für die numerischen Berechnungen.

Im Versuch zeigte sich bei den Referenzplatten und den geschichteten Platten auf der Zugseite des Plattenausschnitts das für ein Durchstanzversagen typische, sternförmige Rissbild. Zunächst traten radiale Biegerisse und zum Zeitpunkt des Versagens der kritische Schubriss auf. In nachträglich durchgeführten Sägeschnitten war dieser unter einem stark variierenden Winkel von 46° bis 58° zu erkennen [13]. Die gevouteten Platten wiesen ein stärker ausgeprägtes und am Bewehrungsnetz orientiertes, orthogonales Rissbild sowie ein sprödes Versagen am Plattenrand auf. Der mehraxial beanspruchte Druckring konnte durch die veränderte Form entsprechend des Verlaufs der Druckstreben entlastet werden.

3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.3.1 Feldbereich

Die experimentellen Untersuchungen des Feldbereiches einschließlich der Berechnung der Bruchlasten (Bild 10, rechts) haben gezeigt, dass:

and was made available to the TU Dresden for testing a total of 3 series of 3 slabs each. Two series (reference slab and Var. c, see Fig. 9, thickness: 20 cm) could be manufactured in an octagonal shape to keep the formwork effort as low as possible. For the three haunched slabs (Var. e, Fig. 9, thickness: 10–58 cm) we used a special formwork made of high-strength polystyrene produced by the Institute for Structural Design of the Technical University of Braunschweig. Cross-laid B500 steel bars ($\varnothing = 12$ mm, spacing 10 cm) were used as reinforcement for all slabs. In addition, routine test specimens for determining the concrete compressive and tensile strength and the modulus of elasticity were produced to accompany each concreting operation. The determined values served as input data for the numerical calculations.

In the test, the reference and the layered slabs showed the star-shaped crack pattern typical of punching shear failure on the tensile side of the slab cutout. Initially, radial bending cracks occurred and, at the time of failure, the critical shear crack. In subsequently performed saw cuts, this was visible at a strongly varying angle of 46° to 58° [13]. The haunched slabs exhibited a more pronounced orthogonal cracking pattern oriented to the reinforcement mesh and brittle failure at the plate edge. The multi-axially stressed compression ring could be relieved by the modified shape according to the course of the compression struts.

3.3 Results and conclusions

3.3.1 Mid-span area

The experimental investigations of the mid-span area including the calculation of the failure loads (Fig. 10, right) have shown that:

- the calculation approaches for determining the shear force failure are very conservative; finally, the experimental failure loads of the S-B (approx. 75 kN) and S-C (approx. 90 kN) series are significantly higher than the calculated failure loads (35 kN),

- die Rechenansätze zur Bestimmung des Schub- bzw. Querkraftversagens sehr konservativ sind; schließlich liegen die experimentellen Bruchlasten der Serien S-B (ca. 75 kN) und S-C (ca. 90 kN) deutlich über den rechnerischen Bruchlasten (35 kN),
- mit den Rechenansätzen zur Bestimmung des Biegezugversagens und des Beginns des Stahlfließens diese auf etwa $\pm 10\%$ genau vorhergesagt werden können (Serien S-A und S-D),
- neben einer vertikalen Schichtung auch eine horizontale Gradierung, wie sie bei der Serie S-D getätigt wurde, sehr zielführend ist, um leichte, effizient tragende (Feldbereiche von) Platten zu generieren. Schließlich konnten bei gleicher Tragfähigkeit 15 % Gewicht gegenüber der Referenzplatte gespart werden. Diese wies jedoch durch den gewählten Beton der Klasse C20/25 in Kombination mit dem Bewehrungsgrad von 0,25 % sowohl unter Biegezug- als auch unter Schubbeanspruchung bereits einen hohen Ausnutzungsgrad und damit vergleichsweise wenig Optimierungspotential auf.
- the bending tensile failure and the onset of steel yielding can be predicted with the calculation equations to an accuracy of about $\pm 10\%$ (S-A and S-D series),
- in addition to vertical layering, horizontal grading, as it was done with the S-D series, is also very effective in generating lightweight, efficiently load-bearing slab (mid-span) areas. Finally, 15% weight could be saved compared to the reference slab while maintaining the same load-bearing capacity. However, due to the selected concrete of class C20/25 in combination with the reinforcement ratio of 0.25%, the reference slab already showed a high degree of utilisation under both bending tensile and shear loads and thus comparatively little potential for optimisation.

Further investigations of the mid-span area should be carried out with numerical calculation methods, as they were carried out for the support area, due to the better representation of the load-bearing behaviour and under variable cross-section heights.

Weitere Untersuchungen zum Feldbereich sollten mit numerischen Berechnungsmethoden, wie sie für den Stützbereich getätigt wurden, aufgrund der besseren Abbildung des Tragverhaltens und unter veränderlichen Querschnittshöhen durchgeführt werden.

3.3.2 Stützbereich

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse zum Stützbereich und daraus gezogene Schlussfolgerungen zusammengefasst.

Bild 12 zeigt die während der Versuche gemessenen Last-Verformungs-Kurven. Für jede Serie wurde aus den drei Bruchlasten (Maximallasten) der Mittelwert gebildet und mit der jeweils numerisch und analytisch ermittelten Traglast sowie den zugehörigen Verformungen verglichen. Augenscheinlich ist, dass die numerisch ermittelte Traglaststeigerung von ca. 180 % durch die Voutung bzw. Formoptimierung der Platten experimentell bestätigt werden konnte, wobei das errechnete Traglastniveau (1.447 kN)

3.3.2 Support area

In the following, the results obtained for the support area and the conclusions drawn from them are summarised.

Fig. 12 shows the load-deformation curves measured during the tests. For each series, the mean value was calculated from the three failure loads (maximum loads) and compared with the numerically and analytically determined ultimate load and the corresponding deformations. It is obvious that the numerically determined increase in the ultimate load of approx. 180% could be confirmed experimentally by the haunch and shape optimisation of the slabs, whereby the calculated ultimate load level (1,447 kN) was 9% above the mean value (1,327 kN) of the achieved test failure loads. Compared with this, the mean value of the ultimate loads of the layered slabs (392 kN) is about 16.5% below the loads achieved in the reference tests (456 kN). In contrast, the numerical calculation determined a 5.5% higher

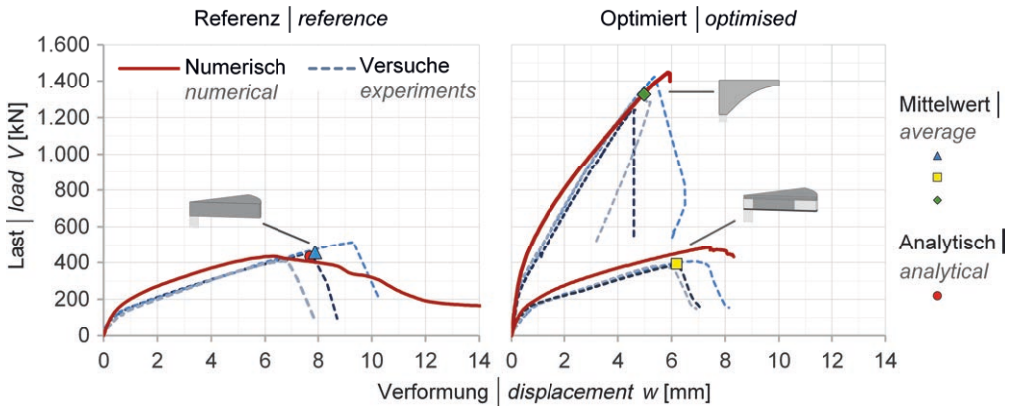


Fig. 12: Durchstanzversuche der Referenzplatten (links) im Vergleich zu den optimierten Platten (rechts) gegenüber den numerischen Kurven und dem analytischen Vergleichswert | **Fig. 12:** Punching shear tests of the reference slabs (left) compared to the optimised slabs (right) in comparison to the numerical curves and the analytical reference value

9 % über dem Mittelwert (1.327 kN) der erreichten Versuchstraglasten lag. Dahingegen liegt der Mittelwert der Traglasten der geschichteten Platten (392 kN) circa 16,5 % unterhalb der erreichten Lasten bei den Referenzversuchen (456 kN). Demgegenüber wurde bei der numerischen Berechnung ein um 5,5 % höherer Durchstanzwiderstand (482 kN) infolge der Materialschichtung ermittelt.

Wie in den Bildern 9 und 12 dargestellt, lässt sich durch die Querschnittsoptimierung, also die partielle Anordnung von Porenleichtbeton, die Traglast nicht steigern, jedoch das Gewicht reduzieren. Mit einer Massensparnis von etwa 14 % ergibt sich bei der in diesem Projekt untersuchten Ausführung ein relatives Traglast-Masse-Verhältnis von 1,25 (Referenz 1,0), das somit 25 % über dem der Referenzplatte liegt und damit eine 25%ige Laststeigerung bei gleicher Masse impliziert.

Eine noch deutlichere Masseinsparung ließe sich erzielen, wenn Querschnitts- und Formoptimierung an einem Bauteil simultan betrachtet werden würden. Theoretische Untersuchungen hierzu sind im Rahmen einer numerischen Studie mit kalibrierten Materialkennwerten in Farwig/Curbach [13] dokumentiert und zeigen, dass mindestens 30 % der Masse im Vergleich zur Referenzplatte eingespart werden kann, während noch ca. 2/3 der Traglast des

punching shear resistance (482 kN) due to the material layering.

As shown in the Figs. 9 and 12, cross-section optimisation, i.e. the partial arrangement of porous lightweight concrete, does not increase the load-bearing capacity, but it does reduce the weight. With a mass saving of about 14%, the design of the slab structure investigated in this project results in a relative load-mass ratio of 1.25 (reference 1.0), which is thus 25% higher than that of the reference slab and thus implies a 25% increase in load for the same mass.

An even more significant mass saving could be achieved if cross-section and shape optimisation were considered simultaneously on one component. Theoretical investigations on this are documented in a numerical study with calibrated material parameters in Farwig and Curbach [13] and show that at least 30% of the mass can be saved compared to the reference slab, while still achieving approx. 2/3 of the ultimate load of the purely shape-optimised slab-column connection.

This corresponds to a relative load-mass ratio of 3.47 (reference 1.0), which could thus be increased by another 6% compared to the load-mass ratio of the purely shape-optimised variant of 3.27. An experimental verification of this variant was no longer carried out within

rein formoptimierten Decken-Stützen-Anschlusses erreicht wird. Dies entspricht einem bezogenen Traglast-Masse-Verhältnis von 3,47 (Referenz 1,0), das sich somit im Vergleich zu dem Traglast-Masse-Verhältnis der rein formoptimierten Variante von 3,27 noch einmal um 6 % steigern lassen würde. Eine experimentelle Überprüfung dieser Variante ist im Rahmen des Forschungsprojekts aus Herstellungsgründen nicht mehr durchgeführt worden.

Die geringen Abweichungen (5–9 %) zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten Traglasten zeigen, dass mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode und analytischer Rechenansätze komplexe Tragmechanismen sowohl für monolithische als auch querschnitts- und formoptimierte Deckenstützbereiche aus Stahlbeton abgebildet werden können. Genauere Vorhersagen der Bruchlasten werden kaum möglich sein, da schließlich die Betonfestigkeiten streuen, Ungenauigkeiten beim Herstellungsprozess entstehen und sowohl der Verbund zwischen Bewehrung und Beton, die damit einhergehende Rissbildung als auch der Verbund zwischen den verschiedenen Betonschichten nur bedingt genau erfasst werden können.

4 Demonstrator

In Zusammenarbeit mit dem weiteren SPP-Projekt an unserem Institut „*Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile*“ (s. S. 118 ff.) erfolgte zum Abschluss der zweiten Projektphase der Bau eines Demonstrators, s. S. 686 ff.

5 Zusammenfassung

In der ersten Förderphase lag der Fokus auf der Optimierung von einachsigen gespannten Deckenplatten. Bereits bei Einfeldträgersystemen lassen sich durch einen dreischichtigen Querschnittsaufbau mit Normalbeton in den Deckschichten und Leichtbeton im Kern Eigengewicht und Ressourcen sparen. Die Effizienz kann durch eine veränderliche Querschnittshöhe gesteigert werden, so dass die Versagensart

the scope of the research project for manufacturing reasons.

The small deviations (5–9%) between the experimentally and computationally determined failure loads show that complex load-bearing mechanisms for both monolithic and cross-section- and shape-optimised slab support areas made of reinforced concrete can be mapped with the help of the finite element method and analytical calculation approaches. More precise predictions of the failure loads will hardly be possible, since, after all, the concrete strengths are scattered, inaccuracies arise in the manufacturing process and both the bond between reinforcement and concrete, the associated cracking and the bond between the different concrete layers can only be recorded with limited accuracy.

4 Demonstrator

In cooperation with the second SPP project at our institute „*Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression*“ (s. page 118 and following) a demonstrator was realized at the end of the second project phase, see page 686 et seq.

5 Summary

In the first funding phase, the focus was on optimising one way ceiling slabs. Even with single-span systems, dead weight and resources can be saved by a three-layer cross-sectional design with regular concrete in the face layers and lightweight concrete in the core area. Efficiency can be increased by varying the cross-section height so that the mode and location of failure – in a positive sense – can no longer be predicted.

In the 2nd phase, two way spanned, point-supported slabs with a three-layer cross-sectional structure and different shapes in the support area were investigated. Especially the shaping in the support area leads to a high increase

und der Versagensort – im positiven Sinne – nicht mehr vorhergesagt werden können.

In der zweiten Phase wurden zweiachsig gespannte, punktgestützte Decken mit dreischichtigem Querschnittsaufbau und verschiedenen Formen im Stützbereich untersucht. Besonders die Formgestaltung im Stützbereich führt zu einer hohen Traglast- und damit Effizienzsteigerung. Leichte und gering tragfähige Betone sind vor allem für den Feldbereich bzw. in Bereichen mit geringer Schubbeanspruchung geeignet.

Die Versuchsnachrechnungen in beiden Phasen haben gezeigt, dass das Tragverhalten leichter Deckentragwerke vor allem mit Hilfe von Finite-Elemente-Modellen sehr gut beschrieben werden kann. Diese eignen sich potentiell auch für automatisierte Querschnitts- und Formfindungsprozesse, die in künftigen Forschungsprojekten (weiter-)entwickelt werden sollten. Um die optimierten Bauteile in Zukunft fertigen zu können, benötigt es zudem geeignete, wirtschaftlich umsetzbare Herstellungsverfahren sowohl für den Schalungsbau als auch für die dreidimensionale Betongradierung.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198117966 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

in load-bearing capacity and thus efficiency. Lightweight and low load-bearing concretes are particularly suitable for the mid-span area or in areas with low shear loads.

The test recalculations in both phases have shown that the load-bearing behaviour of lightweight ceiling structures can be described very well, especially with the help of finite element models. These are also potentially suitable for automated cross-section and form-finding processes, which should be (further) developed in ongoing research projects. In order to be able to manufacture the optimised components in the future, it also requires suitable, economically feasible manufacturing processes for both formwork construction and three-dimensional concrete grading.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198117966 within the priority program SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Frenzel, M.; Curbach, M.: Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient. 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. 70–81
- [2] Frenzel, M.: Numerical simulation of single-span lightweight concrete sandwich slabs. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 309–315
- [3] Frenzel, M.; Kahnt, A.: Ökobilanzielle Betrachtung von leichten Sandwichelementen aus Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 23–28
- [4] DIN EN 1992-1-1:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [5] PE International GmbH (Hrsg.): GaBi Software Systems and Life Cycle Databases for Engineering. LBP und PE, Stuttgart und Leinefelde Echerdingen, 2011
- [6] Frenzel, M.; Curbach, M.: Shear strength of concrete interfaces with infra-lightweight and foam concrete. *Structural Concrete* 19 (2018) 1, S. 269–283
- [7] Frenzel, M.; Curbach, M.: Tragverhalten von geschichteten Deckenelementen aus Normal- und Porenleichtbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 828–838
- [8] Frenzel, M.; Eger, T.; Curbach, M.: Numerical investigation of two-way layered lightweight concrete slabs. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-521562, publ. auf USB stick, 12 S.
- [9] Staller, M.: Analytische und numerische Untersuchungen des Durchstanzverhaltens punktgestützter Stahlbetonplatten. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft Nr. 515, Berlin: Beuth, 2001
- [10] Frenzel, M.; Curbach, M.: Load-bearing behavior and efficiency of layered two-way slabs. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture. engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9868, Book of Abstracts: S. 153, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- [11] Muttoni, A.: Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs with Tranverse Reinforcement. *ACI Structural Journal* 105 (2008) 4, S. 440–450
- [12] Muttoni, A.: Schubfestigkeit und Durchstanzen von Platten ohne Querkraftbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau* 98 (2003) 2, S. 74–84
- [13] Farwig, K.; Curbach, M.: Durchstanzen von punktgestützten Deckenplatten – Optimierungspotenzial bei ebenen Flachdecken nach dem Ansatz form follows force. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019) 5, S. 286–295 – DOI: 10.1002/best.201800110
- [14] Dynardo (Hrsg.): Elastoplastic Material Models for ANSYS – General Multisurface Plasticity. Dynardo GmbH, Mai 2016
- [15] Menetrey, P.: Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss., École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1994
- [16] Farwig, K.: Querschnitts- und Formoptimierung des Auflagerbereiches punktgestützter Betondecken ohne Durchstanzbewehrung. Diplomarbeit, Institut für Massivbau der TU Dresden, 2017
- [17] Bocklenberg, L.; Winkler, K.; Mark, P.: Durchstanzexperimente an Plattenvierteln – Optimierung der Symmetrielage und Verifikation gegenüber Vollplatten. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 3, S. 167–177

Bildnachweise | Picture credits

- Die Bilder 1–7, 8 (oben links und rechts) sowie 9 wurden von Michael Frenzel, die Bilder 8 (links unten), 9, 11, 12 von Kristina Farwig erstellt. Sie wurden wie folgt bereits in modifizierter Form publiziert: Bilder 1, 2 aus [3], 3 aus [1], 4 basierend auf [7], 5 aus [7], 7 in Anlehnung an [8], 8 in Anlehnung an [9], [10], [16], 10 auf Basis von [10], 11 modifiziert nach [13].
- Pictures 1–7, 8 (top left and right) and 9 were made by Michael Frenzel, pictures 8 (bottom left), 9, 11, 12 by Kristina Farwig. They have already been published in modified form as follows: images 1, 2 from [3], 3 from [1], 4 based on [7], 5 from [7], 7 based on [8], 8 based on [9], [10], [16], 10 based on [10], 11 modified after [13].

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen

Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concrete

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Institutsdirektor und Direktor des Otto-Mohr-Laboratoriums Institute's director and director of the Otto Mohr Laboratory
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	CU 37/16-1/2 (Projektnummer Project number: 198117966)
Adresse Address:	TU Dresden, Institut für Massivbau, 01062 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463 37660 Manfred.Curbach@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 01.10.2011–30.09.2014 Förderphase II Funding period II: 01.11.2014–30.09.2018 (inklusive kosten- neutraler Verlängerung inclusive cost-neutral extension)
Team Team:	Michael Frenzel (10/2011–12/2017) Kristina Farwig (05/2017–Projektende End of project)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Frenzel, M.: Numerical simulation of single-span lightweight concrete sandwich slabs. 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. 309–315
- Frenzel, M.; Kahnt, A.: Ökobilanzielle Betrachtung von leichten Sandwichelementen aus Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 23–28
- Frenzel, M.; Curbach, M.: Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient. 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. 70–81
- Frenzel, M.; Eger, T.; Curbach, M.: Numerical investigation of two-way layered lightweight concrete slabs. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-521562, publ. auf USB stick, 12 S.
- Frenzel, M.; Curbach, M.: Tragverhalten von geschichteten Deckenelementen aus Normal- und Porenleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 828–838
- Frenzel, M.; Curbach, M.: Load-bearing behavior and efficiency of layered two-way slabs. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9868, , Book of Abstracts: S. 153, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- Frenzel, M.; Curbach M.: Shear strength of concrete interfaces with infra-lightweight and foam concrete. Structural Concrete 19 (2018) 1, S. 269–283
- Frenzel, M.: Decken aus geschichteten Betonen - leicht und effizient. In: Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E. V. (Hrsg.): Vorträge zum Deutschen Bautechnik-Tag am 07./08.03.2019 in Stuttgart, DBV-Heft 45, 2019, S. 29–30 – DOI: 10.5445/KSP/1000028287
- Farwig, K.; Curbach, M.: Durchstanzen von punktgestützten Deckenplatten – Optimierungspotenzial bei ebenen Flachdecken nach dem Ansatz form follows force. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 5, S. 286–295 – DOI: 10.1002/best.201800110

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

Dissertation | Dissertation

- Frenzel, M.: Zum Tragverhalten von leichten, geschichteten und gevouteten Betondecken. 2021

Studienarbeiten | Student's research projects

- Mavromatis, A.: Numerical Analysis of reinforced concrete sandwich elements and columns with changing cross-section. Project Work, 2012
- Dhungana, P. T.: Numerical analysis of reinforced concrete sandwich elements with foamed concrete core. Master's Thesis, 2013
- Rödel, S.: Untersuchung von geschichteten Stahlbetonplatten mit Schaumbetonkern. Projektarbeit, 2014
- Schuler, R.: Entwicklung eines numerischen Modells zur Analyse des Tragverhaltens geschichteter Stahlbetonelemente mit veränderlicher Querschnittshöhe. Projektarbeit, 2014
- Weinert, D.: Untersuchung des Tragverhaltens von Schubfugen zwischen Normal- und Leichtbetonen. Diplomarbeit, 2014
- Eger, T.: Untersuchung von leichten Deckentragwerken aus Beton. Projektarbeit, 2015
- Bai, H.: Untersuchung von leichten geschichteten Stahlbetonplatten. Projektarbeit, 2015
- Richter, S.: Numerische Formoptimierung geschichteter Stahlbetonelemente. Projektarbeit, 2015
- Farwig, K.: Querschnitts- und Formoptimierung des Auflagerbereiches punktgestützter Betondecken ohne Durchstanzbewehrung. Diplomarbeit, 2017
- Bai, H.: Untersuchung von leichten, effizient tragenden Betonfertigteildecken. Diplomarbeit, 2017
- Zavadski, V.: Design and calculation of a shape-optimizied bicycle shelter. Master's Thesis, 2017
- Bina, F.: Bearing capacity of layered concrete beams. Master's Thesis, 2019

Folgeprojekt | Follow-up project

- SFB/Transregio 280: Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen – Grundlagen für eine neue Art zu bauen | CRC/Transregio 280: Design strategies for material-minimised carbon reinforced concrete structures – principles of a new approach to construction

Sprecher Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Förderzeitraum Funding period:	seit since: 01.07.2020
Partner Partners:	25 Forschende der TU Dresden, der RWTH Aachen University und des ipf Dresden e.V. 25 researchers of TU Dresden, RWTH Aachen University and ipf Dresden e.V.

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- 2012: Teilnahme am SPP-internen Hornbach-Wettbewerb | Participation on the SPP 1542 Hornbach Competition
- 2019, Michael Frenzel: Innovationspreis Bautechnik, verliehen vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein. E. V. (DBV) am 08.03.2019 zum Thema „Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient“ | Innovation Award for Construction Technology, awarded by the Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein. E. V. (DBV) on 08.03.2019 on the topic "Slab structures made of layered concretes – light and efficient".
- 2019–2021: Realisierung eines Demonstrators, ausgestellt im Deutschen Museum München | Realisation of a demonstrator for long-term use in the Deutsches Museum in Munich