



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient

Michael Frenzel
Manfred Curbach

Institut für
Massivbau,
Technische
Universität Dresden

Betondeckenplatten sind material- und energieintensive Biegetragwerke, wenn sie – wie derzeit üblich – ebenflächig und aus einer Betonsorte hergestellt werden. Während der Projektlaufzeit wurde untersucht, in welcher Höhe das Eigengewicht und der Verbrauch an natürlichen Ressourcen reduziert werden kann, indem verschiedene, leistungsfähige Betonsorten sowohl über die Plattenhöhe als auch entlang ihrer Tragrichtung kraftflussgerecht angeordnet werden. Der Schwerpunkt der Forschung lag dabei auf der Entwicklung geeigneter Berechnungsmodelle, der Analyse maßgebender Versagensarten und der experimentellen Nachweisführung an einachsigen gespannten, dreischichtigen klein- und großformatigen Deckenplatten.

1 Theoretische Untersuchungen

1.1 Allgemeines

Bei Deckenplatten des üblichen Hochbaus kommen hauptsächlich Voll- oder Plattenbalkenquerschnitte mit konstanter Höhe zum Einsatz, da sie sehr wirtschaftlich hergestellt werden können. Diese Ausführung ist jedoch aus statischer Sicht sehr ineffizient, weil der bewehrte Beton nur an wenigen Stellen sowohl in Haupttragrichtung als auch über die Deckenhöhe voll ausgenutzt ist. Mit einer gleichmäßigeren 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 Tragbewehrung. Gering tragfähige, leichte Betone werden im mittleren Bereich, der wenig durch Zug und Druck beansprucht wird, angeordnet. Zur Übertragung von Schubkräften wurde, wie bei Deckenplatten gebräuchlich, keine Querkraftbewehrung vorgesehen. Die aufnehmbaren Kräfte in der Grenzschicht zweier Betonsorten hängen von der Haftzug- und Haftscherfestigkeit der Verbundfuge ab.

2. Formoptimierung: Die Trägerhöhe wird in Haupttragrichtung kraftflussgerecht verändert, so dass das Material in Deck- und Kernschichten gleichmäßig ausgenutzt ist. Aus funktionalen Gründen kann jedoch lediglich die Plattenunterseite angepasst werden – die Oberseite verläuft horizontal.

Unter Berücksichtigung der beiden Ansätze wurden zunächst verschiedene Einfeldträger analysiert, um die möglichen Gewinne quantitativ aufzuzeigen und geeignete Betonsorten zu bestimmen.

1.2 Betrachtungen am Einfeldträger – Wahl geeigneter Betonsorten

FRENZEL [1] und FRENZEL & KAHNT [2] zeigen rechnerisch am Beispiel einer gewöhnlichen einfeldrigen Platte mit einer Spannweite von 5,0 m die möglichen Gewichts- und Res-

sourcenersparnis. Hierzu wurden besonders die Vorgaben aus dem Eurocode 2 [3] zu der zulässigen Verformung von maximal 10 mm im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und der abzutragenden Last von 4 kN/m² im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) berücksichtigt.

Bild 1 stellt das Tragverhalten von parallelgurtigen Platten aus Normalbeton C20/25 (Nr. 1), konstruktivem Leichtbeton LC20/22 (Nr. 2), einer parallelgurtig und formoptimierten Platte aus LC20/22 und Infraleichtbeton (ILC – in Anlehnung an [4], Nr. 3 und 4) sowie aus C20/25 und Porenleichtbeton (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 Nr. 4 aus konstruktiven Leichtbetonen betragen das Gewicht lediglich 51 % und der Stahlbedarf 58 % der Referenzplatte.

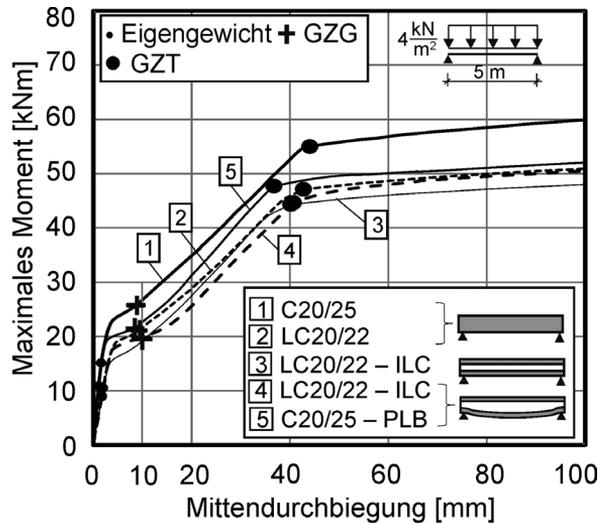


Bild 1: Tragverhalten verschiedener querschnitts- und formoptimierter Platten [2] mit einer Verkehrslast von 4 kN/m² und zulässiger Verformung von 10 mm im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Stahl- und Gewichtsgewinne geschichteter, einfeldriger Platten im Vergleich zur Referenzplatte Nr. 1 [2]

Platte Nr.	Trägerhöhe h [mm]	statische Höhe d [mm]	Bewehrungsmenge a _s		Eigengewicht g	
			[cm ² /m]	[%]	[t/m]	[%]
1	210	185	5,61	100	2,40	100
2	240	210	4,36	78	1,74	73
3	260	230	3,74	67	1,42	59
4	310	280	3,27	58	1,23	51
5	310	285	3,27	58	1,49	62

Zur Beurteilung der Ersparnis an natürlichen Ressourcen ist besonders die Betonzusammensetzung von großer Bedeutung. Um die Gewinne bestimmen zu können, wurden ökobilanzielle Betrachtungen zu den verschiedenen Betonsorten durchgeführt. Bilanziert wurde der Rohstoffabbau einschließlich der Materialaufbereitung bis zum Mischvorgang im Betonwerk. Maßgebende Parameter zur Beurteilung der Ressourcenersparnis und des Umwelteinflusses sind z. B. der Bedarf an Primärenergie und der CO₂-Ausstoß. Zur Bilanzierung des Primärenergiebedarfes (PE) der berechneten Platten wurden die Ökobilanzdatensätze aus der Software GaBi 4 PE INTERNATIONAL [5] verwendet. FRENZEL & KAHNT [2] stellen Betonrezepturen vor, die die benötigten und rechnerisch angesetzten Betonfestigkeiten und -steifigkeiten aufweisen und stellen beispielhaft für den Primärenergiebedarf die verschiedenen Betonsorten und Plattenausführungen einander gegenüber (Bild 2 und 3). Es ist ersichtlich, dass konstruktive Leichtbetone, wie der im Projekt betrachtete LC20/22, und Infraleichtbeton unter Verwendung von üblichen Blähtonzuschlägen deutlich mehr Energie pro Kubikmeter benötigen als Normal- und Porenleichtbetone (PLB). Damit sind geschichtete Deckenelemente in der Kombination C20/25 – PLB zur Einsparung von Ressourcen zu bevorzugen.

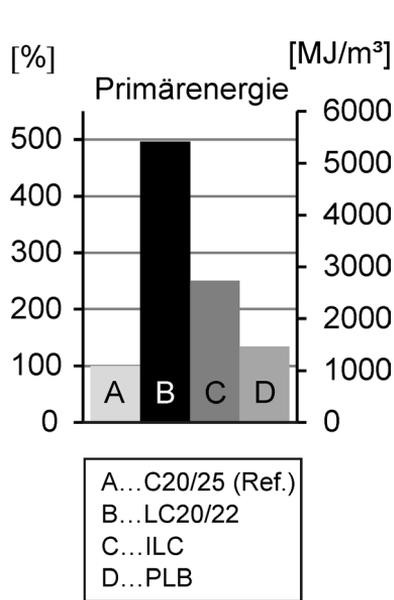


Bild 2: Primärenergieverbrauch der betrachteten Betonsorten [2]

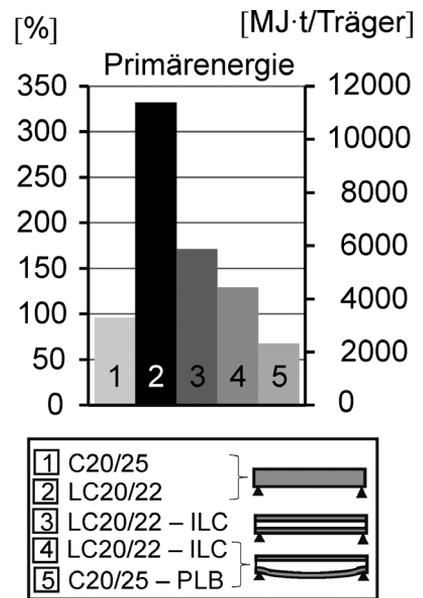


Bild 3: Gewichtsbezogener Primärenergieverbrauch geschichteter Deckenelemente [2]

Zusammengefasst wurde in FRENZEL [1] und FRENZEL & KAHNT [2] durch die Querschnitts- und Formoptimierung gezeigt, dass:

- Betone geringer Festigkeitsklassen (Druckfestigkeit $\sim 20 \text{ N/mm}^2$) für Deckschichten ausreichend tragfähig sind,
- mit konstruktiven Leichtbetonen das Plattengewicht bis auf 51 % und die benötigte Stahlmenge bis auf 58 % der Referenzplatte reduziert werden kann,
- gewichtsverminderte Träger nicht zwangsläufig schlanker sind, da leichte Kernbetone einen geringeren Elastizitätsmodul und damit größere Verformungen als Normalbetone aufweisen bzw. Steifigkeitsveränderungen durch veränderliche Querschnittshöhe zu einer partiell größeren Bauteildicke führen,
- die Querschnittsoptimierung zu einer deutlich höheren Einsparung von Stahl und Gewicht führt als die Formoptimierung (dies zeigt vor allem der Vergleich der Platte Nr. 3 mit Nr. 4),
- bei den Materialien für die Tragschichten der konstruktive Leichtbeton LC20/22 etwa das 5-Fache des Normalbetons C20/25 und bei den betrachteten Materialien für die leichte Kernschicht der Infralichtbeton etwa das Doppelte an Primärenergie des Porenleichtbetons bedarf,
- der formoptimierte, geschichtete Träger aus C20/25 und Porenleichtbeton (Nr. 5) auf das Trägergewicht bezogen etwa nur 60 % des Referenzträgers an Primärenergie benötigt (Bild 3). Bei dieser Materialkombination lässt sich das Gewicht auf 62 % des Referenzträgers reduzieren (Tabelle 1).

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden für experimentelle Untersuchungen an geschichteten Platten die ressourcensparende Kombination C20/25 – PLB und die minimalgewichtige Anordnung LC20/22 – ILC weiterverfolgt.

1.3 Entwicklung eines Verfahrens zur Querschnitts- und Formoptimierung

Während der Projektlaufzeit wurde ein Verfahren zur Querschnitts- und Formoptimierung geschichteter Träger entwickelt. Dabei werden Schnittgrößen, Verdrehungen und Verschiebungen nach allgemein bekannten Kraftgrößenverfahren der Baustatik nach Theorie I. Ordnung bestimmt. Bild 4 zeigt das statische System des berechneten Deckenelementes. Aufgrund der zur Feldmitte und zur Stützenachse symmetrischen Geometrie und Belastung lassen sich die Berechnungen an einer Hälfte eines Deckenfeldes durchführen. Durch Veränderung des Einspanngrades k_φ können Einfeldträger ($k_\varphi = 0$) und Endlosdurchlaufträger ($k_\varphi = \infty$) sowohl unter Eigengewicht und Streckenlast q als auch unter symmetrisch zur Feldmitte angeordneten Einzellasten Q kraftflussgerecht geformt werden. Zur Berechnung wird der Träger in n endliche Abschnitte eingeteilt, die gleiche oder unterschiedliche Längen l_s aufweisen. Durch die flexible Diskretisierung können besonders sensible Stellen, wie z. B. Bereiche von Querkraftsprüngen oder Momentennullpunkten, mit der notwendigen Genauigkeit untersucht werden.

Der beidseitig gelenkige Einfeldträger wurde als statisch bestimmtes Grundsystem zur Ermittlung der statisch Unbestimmten (Einspannmoment) gewählt, die mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte berechnet wird. Es ist dabei zu beachten, dass die zu bestimmende Relativverschiebungsgröße δ_{ik} aufgrund ihrer (vereinfachten) Berechnung mit

$$\delta_{ik} = \sum_s^n \frac{1}{EI_s} \int_0^{l_s} M_i M_k dx$$

von den Elementbiegesteifigkeiten EI_s und den Momentenverläufen bzw. -werten abhängig ist, die sich während des Formfindungsprozesses verändern. Damit sind iterative Berechnungen zur Findung der optimalen Form notwendig. Unter Zuhilfenahme numerischer Integrationsmethoden, wie z. B. der GAUSS'schen Quadraturformel, kann das aufgeführte Integral ausreichend genau gelöst werden. Es können damit jedoch nur bestimmte Integrale gelöst werden, d. h. die Form- und Querschnittsoptimierung kann nur für klar definierte Problemstellungen durchgeführt werden. Allgemeingültige Lösungen sind nicht möglich.

In dem Berechnungsverfahren kann zudem berücksichtigt werden, ob die Optimierung und Schnittgrößenermittlung an einer ungerissenen, einer teilweise oder einer komplett gerissenen Platte erfolgt. Entsprechend werden die Elementbiegesteifigkeiten entlang der Trägerlängsachse angepasst und die daraus resultierenden Einwirkungen bestimmt. Dem entgegen sind die möglichen Querschnittswiderstände zu definieren. Hier wurden die vier maßgebenden Nachweise zur Biegezug-, Schub- und Fugentragfähigkeit sowie der zulässigen Verformungen auf Gebrauchslastniveau erfasst. Grundsätzlich wurden die in den aktuellen Normen (besonders dem Eurocode 2 [3]) verankerten analytischen (für Biegezug) und empirischen Modelle (für Schub- und Fugentragfähigkeit) in das Berechnungsverfahren eingebunden. Dabei kann auch gewählt werden, ob die Formfindung ohne oder unter Berücksichtigung eines Teilsicherheitskonzeptes durchgeführt wird. Die Implementierung des Verfahrens erfolgte in einem herkömmlichen Tabellenkalkulationsprogramm. Für den Optimierungsprozess können unterschiedliche Zielgrößen bzw. -funktionen definiert werden, wie z. B. minimales Gewicht oder Volumen, Ausnutzungsgrad der einzelnen Nachweise oder minimaler Verbrauch natürlicher Ressourcen. Für die endgültige Trägergeometrie wurde ein gradientenbasiertes Optimierungsverfahren gewählt.

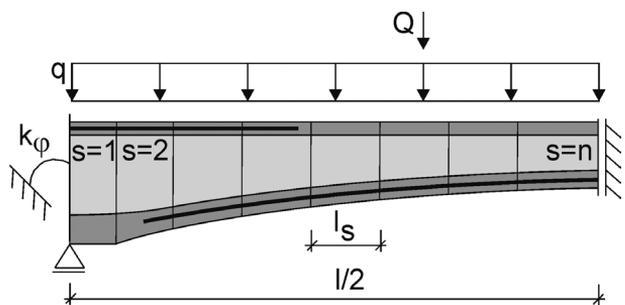


Bild 4: Modell für die Berechnung querschnitts- und formoptimierter Tragglieder

Um die Eignung des entwickelten Berechnungsverfahrens und die daraus resultierenden Ergebnisse zu überprüfen, wurden großformatige Träger – als Ausschnitte aus endlos durchlaufenden Platten – berechnet. Sie werden in der derzeit noch andauernden Abschlussphase der Projektphase I hergestellt und geprüft, siehe Kapitel 2.3.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen lagen auf der Bestimmung der Fugentragfähigkeit an Schubkörpern und der Analyse des Tragverhaltens kleinformatiger, parallelgurtig geschichteter Platten sowie querschnitts- und formoptimierter Großträger.

2.1 Untersuchung der Fugentragfähigkeit

Die Tragfähigkeit von geschichteten Deckenelementen ist signifikant von der schubsteifen Verbindung der Deck- und Kernschichten abhängig. Aus diesem Grund wurden die gewählten Betonsorten kombiniert und kleinteilige Versuche an geschichteten Prüfkörpern durchgeführt. Der Wahl einer geeigneten Prüfkörperform und des Versuchsaufbaus kam dabei besondere Bedeutung zu, wie beispielsweise ULAGA [6] und HORSTMANN [7] schon gezeigt und diskutiert haben.

Für die Bestimmung der Haftscherfestigkeit wurden doppelt symmetrische, statisch bestimmt gelagerte Druck-Druck-Körper in Anlehnung an die DIN EN 1052-3 [8] verwendet (Bild 5), da sie im Vergleich zu anderen bekannten Versuchsaufbauten, einfach und unter klar definierten statischen Verhältnissen geprüft werden können. Die Belastung der Prüfkörper mit Abmessungen von 12 × 28 × 21 cm erfolgte zentrisch und parallel zur Verbundfuge. Es wurden drei verschiedene Fugenausführungen glatt, gerecht, verzahnt und drei Materialkombinationen LC20/22 – ILC, C20/25 – ILC, C20/25 – PLB untersucht. Je Kombination wurden fünf Prüfkörper getestet, in Summe 45 Stück. Die ermittelten Haftscherfestigkeiten der verschiedenen Fugenausführungen und Materialkombinationen sind in Bild 5 zusammengefasst dargestellt.

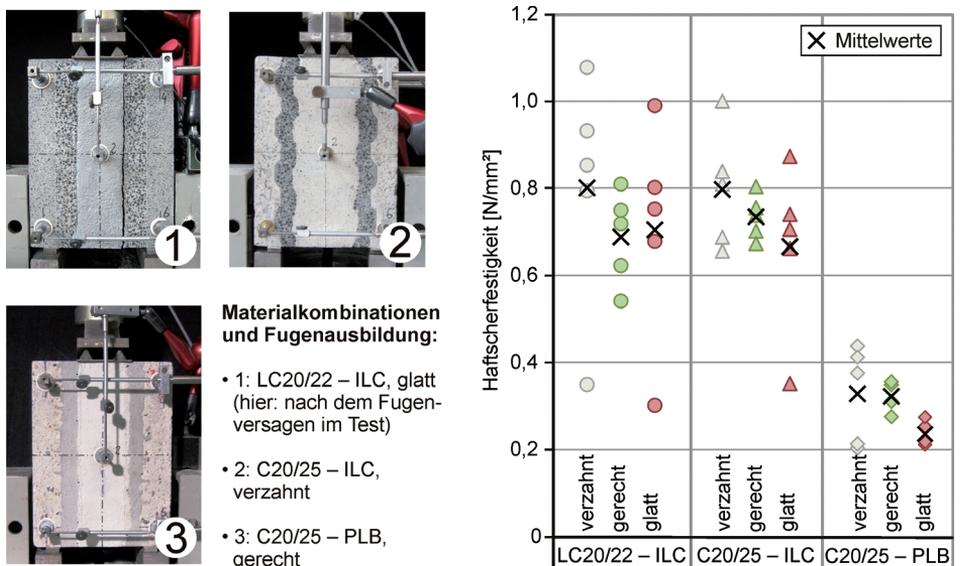


Bild 5: Schubkörper zur Bestimmung der Haftscherfestigkeit der Verbundfuge und Ergebnisse [Fotos: Michael Frenzel]

Die Versuche mit den verschiedenen ausgeführten Rauigkeiten (glatt, gerecht, verzahnt) verdeutlichten im Wesentlichen, dass:

- die Haftscherfestigkeit (erwartungsgemäß) relativ großen Streuungen unterliegt, wobei diese bei der Kombination C20/25 – PLB gerecht bzw. glatt am geringsten sind,
- die Kombinationen mit ILC deutlich größere Haftscherfestigkeiten als die mit PLB aufweisen,
- verzahnte und gerechte Fugen tendenziell tragfähiger als glatte sind,
- die Haftscherfestigkeit nahezu unabhängig vom Deckschichtmaterial ist und
- das Versagen je nach Materialwahl und Fugenausführung in der Kernschicht oder der Fuge auftritt. Bei glatter Fugenausführung versagte stets die Fuge.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Haftscherfestigkeit bildeten die Grundlage für die Abschätzung der Fugentragfähigkeit parallelgurtiger Sandwichelemente, deren Herstellung und Prüfung im Anschluss erfolgte.

2.2 Tragverhalten kleinformatiger, parallelgurtiger Platten

Durch Versuche an geschichteten, parallelgurtigen Platten wurden die möglichen Versagensformen Biegezug-, Schub- und Fugenversagen für die zwei gewählten Materialkombinationen C20/25 – PLB und LC20/22 – ILC in Abhängigkeit der Plattenschlankheit experimentell nachgewiesen und voneinander abgegrenzt. Es wurden jeweils 18 Platten mit 10 cm und 20 cm variierenden Plattenhöhen und Längen von 150 cm bis 250 cm im Vierpunktbiegeversuch geprüft (Tabelle 2 und Bild 6). Bei beiden Materialkombinationen betrug die Dicke der Deckschichten 20 mm bzw. 30 mm und die der Kernschicht 50 mm bzw. 150 mm (Bild 7). Die Zugzone war bei der Kombination C20/25 – PLB mit 4 Ø 6 mm und LC20/22 – ILC mit 5 Ø 6 mm Stabstahl B500 bewehrt; Schubbewehrung war nicht angeordnet. Die Verbundfugen zwischen den Schichten wurden aufbauend auf den Ergebnissen der Haftscherfestigkeitsuntersuchungen und im Hinblick auf eine gute praktische Umsetzbarkeit gerecht ausgeführt. Die Belastung wurde in den Viertelpunkten der Stützweite eingeleitet.

Tabelle 2: Übersicht über Geometrie, Anzahl, Schub- und Biegeschlankheiten der geprüften Platten pro Materialkombination

Prüfkörper	Höhe [cm]	Länge [cm]	Anzahl [Stück]	Schub- schlankheit a/d [-]	Biege- schlankheit l/d [-]
1	10	250	3	6,6	26,4
2	10	200	3	5,2	20,7
3	10	150	3	3,7	14,9
4	20	250	3	3,1	12,3
5	20	200	3	2,4	9,6
6	20	150	3	1,7	7,0

Die Bilder 6, 8 und 9 zeigen die typischen zum Bruch führenden Risse eines Schub-, Fugen- und Biegezugversagens. Während sich das Biegeversagen durch große plastische Verformungen ankündigte, traten das Schub- bzw. das Fugenversagen relativ schlagartig ein. In den Bildern 10 und 11 sind die Momenten-Mittendurchbiegungsverläufe für die getesteten Platten abgebildet. Aus den Diagrammen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:



Bild 6: Geschichtete Deckenplatte aus konstruktivem Leichtbeton LC20/22 und Infra-leichtbeton im Vierpunktbiegeversuch mit Schubversagen

[Foto: Michael Frenzel, s. a. [9]]



Bild 7: Schichtaufbau einer Platte für einen Vierpunktbiegeversuch, hier bestehend aus Normalbeton in den 2 bzw. 3 cm dicken Deckschichten und einer 5 cm dicken Schicht aus Porenleichtbeton in der Mitte

[Foto: Michael Frenzel]



Bild 8: Fugenversagen zwischen der Kernschicht aus Porenleichtbeton und den Deckschichten aus Normalbeton

[Foto: Michael Frenzel]



Bild 9: Durchriss der Stahlbewehrung (Biegezugversagen) einer 2,50 m langen, geschichteten Platte aus Normal- und Porenleichtbeton

[Foto: Michael Frenzel, s. a. [9]]

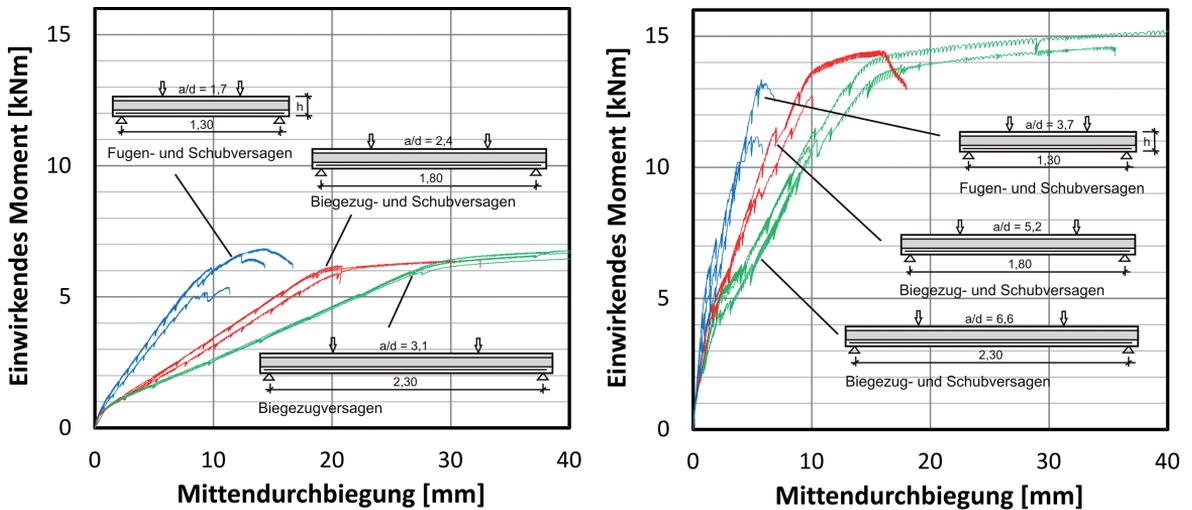


Bild 10: Tragverhalten von geschichteten Platten aus konstruktiven Leichtbetonen (LC20/22 – ILC)

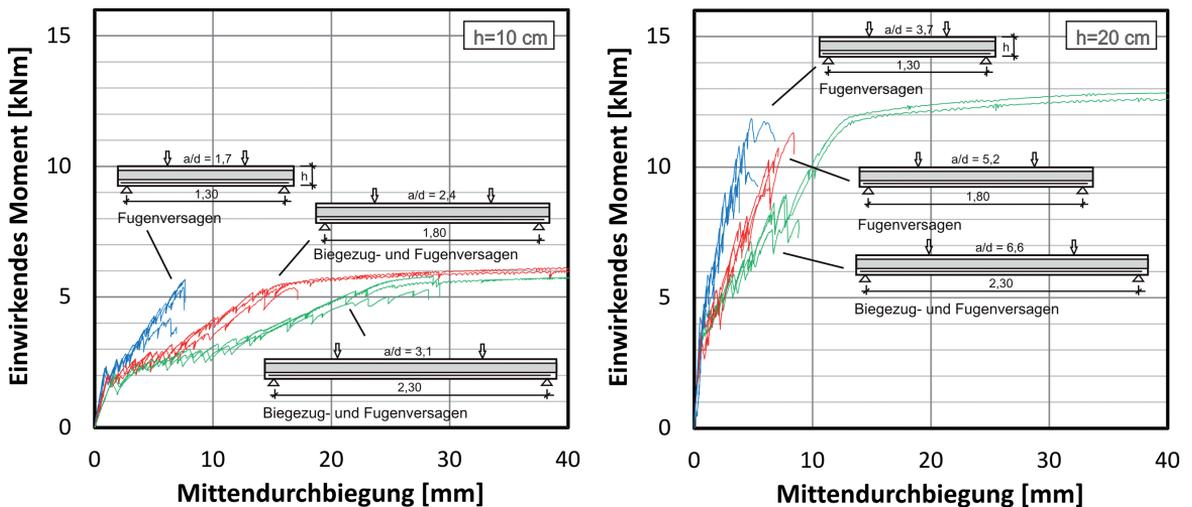


Bild 11: Tragverhalten von geschichteten Platten aus der Materialkombination C20/25 – PLB

- Die Platten aus konstruktiven Leichtbetonen waren tragfähiger als die der vergleichbaren Platten mit Porenleichtbeton.
- Die sich einstellenden Versagensarten sind bei beiden Materialkombinationen von der Plattenschlankheit abhängig, wobei mit zunehmender Schlankheit das Biegeversagen eintritt.
- Bei Platten aus LC20/22 – ILC trat bei kleinen Schubschlankheiten ein Schubversagen auf. Dies wurde durch die relativ große Haftscherfestigkeit der Verbundfuge bewirkt, so dass kein Fugerversagen eintrat. Bei allen Plattengeometrien mit Porenleichtbeton konnte aufgrund der geringeren Haftscherfestigkeiten der Materialgrenschichten nur fugennahes Versagen beobachtet werden.
- Die gewählten Betonfestigkeiten, Bewehrungsmengen und Plattengeometrien war gut aufeinander abgestimmt, da lediglich mit drei verschiedenen Plattelängen eines Sandwichtaufbaus verschiedene Versagensarten identifiziert werden konnten.

Ähnliche Versagensmodi haben Experimente anderer Forscher gezeigt. So wurden bei geschichteten Elementen vor allem das Schub- und Fugenversagen identifiziert (z. B. HERRMANN & HAASE [10], SALET [11]). Das Biegezugversagen konnte nach bisherigem Wissensstand experimentell nur von wenigen Forschern (z. B. HORSTMAN [7]) gezeigt werden, da bei der Materialwahl sehr bzw. zu gering tragfähige Kernmaterialien verwendet wurden. Das Biegezugversagen war jedoch häufig Bestandteil theoretischer Betrachtungen.

Die eigenen Experimente haben gezeigt, dass geschichtete Betonplattenelemente verschiedenen und komplexen Tragmechanismen unterliegen. Der Abstand zwischen den Deckschichten sowie die eingebaute Bewehrungsmenge beeinflussen die Biegetragfähigkeit maßgeblich, während die Zugfestigkeit des Kernschichtmaterials den Widerstand gegen das Schubversagen festlegt. Die Fugentragfähigkeit ist von der Haftschersfestigkeit der Grenzschicht abhängig und kann maßgeblich unter der Voraussetzung einer ausreichenden Verankerung der Zuschlagskörner in der Zementsteinmatrix über die Fugenrauigkeit beeinflusst werden.

Die experimentellen Versuche haben zudem demonstriert, dass die bei den theoretischen Betrachtungen eingebundenen Berechnungsmodelle grundsätzlich geeignet sind und geschichtete Deckenelemente leichter und effizienter als herkömmlich massiv ausgeführte.

2.3 Großversuche

Die Erkenntnisse aus den kleinteiligen Versuchen, die erfolgreiche Validierung der Berechnungsmodelle und die Bereitstellung eines Verfahrens zur Formfindung mündeten in die Berechnung, Herstellung und Prüfung von großformatigen Plattenstreifen. Ziel der derzeit noch andauernden Großversuche ist es, die praktische Umsetzbarkeit geschichteter Deckenelemente mit veränderlicher Querschnittshöhe einschließlich der damit verbundenen Gewichts-, Ressourcen- bzw. Tragfähigkeitsgewinne im Maßstab 1:1 zu demonstrieren. Die Untersuchungen werden an einem Mittelfeld eines Endlosdurchlaufträgers mit einer Spannweite von 7 m durchgeführt. Es werden drei Träger betrachtet: ein herkömmlicher Referenzträger aus Normalbeton C20/25 und zwei geschichtete, formoptimierte Träger aus C20/25 und Porenleichtbeton. Die geschichteten Träger weisen konstante Deckschichtdicken (ca. 45 mm) und eine veränderliche Querschnittshöhe entlang ihrer Spannrichtung auf. Der Referenzträger und ein geschichtetes Element werden dazu mit einer Einzellast in Feldmitte und der zweite optimierte Träger mit einer Streckenlast (durch acht Einzellasten aufgelöst) belastet. Bild 12 stellt die drei Träger einander gegenüber.

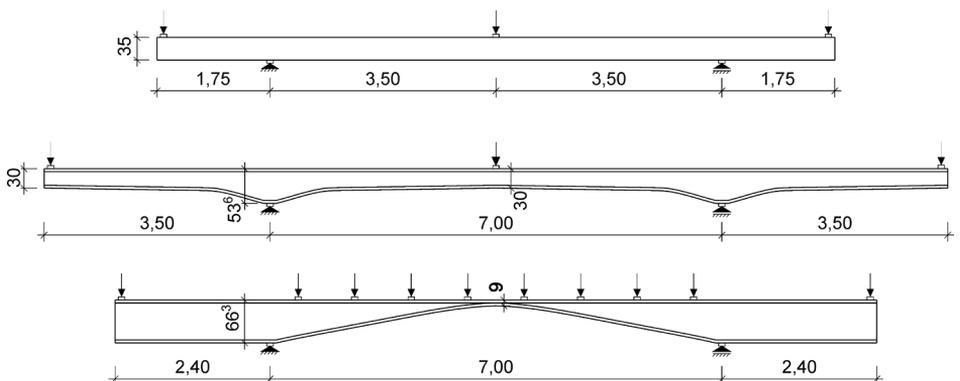


Bild 12: Planung der Großversuche: Referenz- und formoptimierter Träger unter Einzel- bzw. Streckenlast

Für der Wahl und Bestimmung der Geometrien wurden folgende grundlegende Festlegungen getroffen:

- ❑ Der Vergleich der Träger erfolgt auf Basis gleicher Betonvolumina zwischen den beiden Auflagerlinien.
- ❑ Die Stahlbewehrung wird nur in den Deckschichten geführt. Bei allen drei Trägern kommen sieben Stäbe mit einem Durchmesser von 10 mm zum Einsatz.
- ❑ Die Formfindung erfolgte für den Bruchzustand der Plattenstreifen. Dabei wurden die beiden, bei der gewählten Materialkombination C20/25 – Porenleichtbeton maßgebenden Versagensarten Biegezugversagen (Bewehrungsstahl erreicht die Fließgrenze) und Fugenträgung berücksichtigt.
- ❑ Die Träger waren so zu dimensionieren, dass sie unbeschadet transportiert und möglichst sowohl im ungerissenen als auch gerissenen Zustand analysiert werden können. Die zu erwartenden Bruchlasten sollte sich zudem auf einem möglichst realitätsnahen Niveau bewegen.
- ❑ Das Feld erhielt zwei Kragarme, damit die erforderlichen Einspannmomente durch am Ende angeordnete Einzellasten aufgebracht werden können.

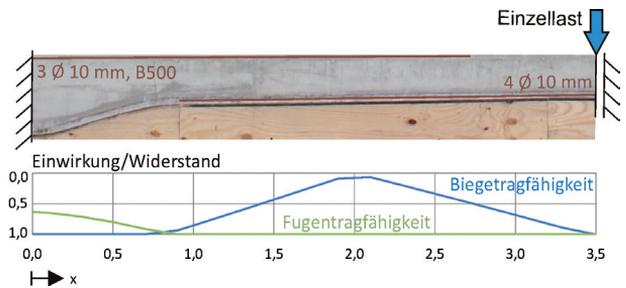


Bild 13: Theoretischer Ausnutzungsgrad (1 = 100 %) entlang der Trägerachse eines geschichteten, formoptimierten, 7 m langen Trägers unter Einzellast (am halben System)

Bild 13 zeigt beispielhaft die Ausnutzung der Querschnitte entlang der Stabachse des mit einer Einzellast belasteten Sandwichträgers. Er ist in Feldmitte und über dem gevouteten Stützbereich zu 100 % auf Biegezug und in weiten Teilen zu 100 % in der Fuge beansprucht. Es kann damit keine Aussage darüber getroffen werden, an welcher Stelle der Träger versagt. Die Ausnutzung des Stahls und damit der Biegezugtragfähig-

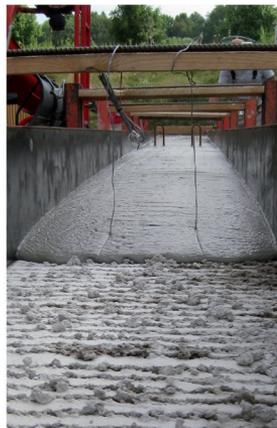


Bild 14: Herstellung eines formoptimierten geschichteten Deckenstreifens: Betonage der untersten und mittleren Schicht, während des Transportes und fertiger Träger [Fotos: Michael Frenzel]

keit könnte durch eine Abstufung der Bewehrung noch erhöht werden. Dies wurde im Rahmen der Großversuche nicht weiter verfolgt.

Im Vergleich zur Referenzplatte wird bei dem geschichteten Träger unter Einzellast eine Traglaststeigerung von mindestens 30 % und unter Streckenlast von mindestens 100 % bei ca. 35 % geringerer Masse erwartet. Die noch bevorstehenden Versuche werden zeigen, ob sich die berechneten Gewinne praktisch nachweisen lassen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Phase wurden ausführliche theoretische und praktische Untersuchungen zur Querschnitts- und Formoptimierung geschichteter, einachsig gespannter Deckenelemente getätigt. Es stehen sowohl geeignete, ingenieurmäßig einfach zu handhabende Berechnungsmodelle für die verschiedenen Versagensarten als auch Verfahren für die Bestimmung geeigneter Querschnittsausbildungen und Höhenverläufe in Plattenlängsrichtung zur Verfügung. Angrenzend an die Untersuchungen für einaxial gespannte Decken soll in der zweiten Projektphase die Anwendbarkeit der Erkenntnisse auf zweiachsig gespannte, geschichtete Decken untersucht werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Gewichts- und Ressourcenersparnisse durch den vorherrschenden zweiachsigen Lastabtrag noch weiter gesteigert werden können. Zudem werden geeignete Ausbildungen des Anschlusspunktes zur formoptimierten Stütze untersucht, um ein kraftflussgerecht geformtes Gesamtbauwerk entwickeln zu können.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1542 *Leicht Bauen mit Beton*.

Literatur

- [1] FRENZEL, M.: Numerical simulation of single-span lightweight concrete sandwich slabs. In: MÜLLER, H. S.; HAIST, M.; ACOSTA, F. (Hrsg.): Proceedings of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 309–315.
- [2] 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, Bochum, 07.–08.11.2013 in Bochum. Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 23–28.
- [3] EN 1992-1-1 & DIN EN 1992-1-1/NA: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau & Nationaler Anhang. Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, 01/2011.
- [4] SCHLAICH, M.; HÜCKLER, A.: Infralichtbeton 2.0. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 11, S. 757–766.
- [5] PE INTERNATIONAL GMBH (Hrsg.): GaBi Software Systems and Life Cycle Databases for Engineering. LBP und PE, Stuttgart und Leinfelden Echterdingen, 2011.
- [6] ULAGA, T.: Betonbauteile mit Stab- und Lamellenbewehrung: Verbund- und Zuggliedmodellierung. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2003.
- [7] HORSTMANN, M.: Zum Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textilbewehrtem Beton. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2010.
- [8] DIN EN 1052-3: Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit). Deutsche Fassung EN 1052-3:2002 + A1:2007.
- [9] CURBACH, M.; HÄUSSLER-COMBE, U. (Hrsg.): Jahresbericht 2013 des Instituts für Massivbau der TU Dresden, Dresden: Eigenverlag, 2014, 126 S.
- [10] HERRMANN, M.; HAASE, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 6, S. 382–394.
- [11] SALET, T. A. M.: Structural Analysis of sandwich beams composed of reinforced concrete faces and a foamed concrete core. Dissertation, TU Eindhoven, 1990.

Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Michael Frenzel

Projektlaufzeit

10/2011 – 10/2014

Web

<http://massivbau.tu-dresden.de>