

## **Innovative Verbunddeckensysteme mit stahlfaserbewehrten Betonen**

-Kurzbericht-

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des  
Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
gefördert.

(Aktenzeichen: Z6-10.07.03-06.09/II2-80 01 06-9)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Projektleiter: Prof.-Dr.-Ing. Jürgen Schnell

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Florian P. Ackermann

## **Inhalt**

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Begründung des Forschungsprojekts	1
1.2. Ziele des Forschungsprojekts	1
<b>2. Durchführung des Forschungsprojektes</b>	<b>2</b>
<b>3. Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>2</b>
<b>4. Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
<b>5. Literatur</b>	<b>8</b>

## 1. Einleitung

### 1.1. Begründung des Forschungsprojekts

Konventionelle Stahl-Verbunddecken haben sich als eine äußerst rationelle und kostengünstige Deckenvariante im Industrie- und Hochbau etabliert. Die wesentlichen Vorteile liegen in den niedrigen Baukosten und vor allem in der Zeitersparnis während des Herstellungsprozesses. Im Verbundhochbau hat sich nach *Bode 1998* die Verwendung möglichst langer Profiltafeln und damit die Herstellung durchlaufender Verbunddecken als besonders wirtschaftlich erwiesen. An der Technischen Universität Kaiserslautern wurden in der Vergangenheit zahlreiche Versuche und Forschungsvorhaben im Bereich des Stahl-Verbundbaus realisiert. Unter anderem wurde im Rahmen der DFG-Forscherguppe „Verbundbau“ das Tragverhalten von konventionell bewehrten durchlaufenden Stahl-Verbunddecken untersucht (*Sauerborn 1995*). Aufbauend auf diesen Untersuchungen entstand die Idee, die konventionelle Bewehrung bei Verbunddecken durch den Einsatz von Stahlfaserbeton zu reduzieren bzw. komplett zu ersetzen. Durch diese Substitution ergibt sich ein großes Einsparpotenzial. So entfallen sämtliche die Bewehrung betreffenden Arbeiten. Dementsprechend werden auch Bewehrungspläne und eine Abnahme der Bewehrung auf der Baustelle, die häufig zu Verzögerungen führt, überflüssig. Auch das arbeits- und zeitintensive Zuschneiden und Verlegen der Bewehrung entfällt. Durch den Wegfall der Bewehrungsarbeiten können ein enormer Zeitvorteil und damit eine kürzere Bauzeit und somit Kosteneinsparungen erreicht werden.

Im Falle von Ausführungsfehlern während der Herstellung, beispielsweise durch einen zu niedrigen Fasergehalt oder im schlimmsten Fall ein Weglassen der Fasern, wird die Decke durch das Verbundblech in ihrer Lage gehalten und es kann eine ausreichende Reststandsicherheit nachgewiesen werden. Dies ist aus Sicherheitsaspekten ein entscheidender Vorteil von stahlfaserbewehrten Verbunddecken im Vergleich zu stahlfaserbewehrten Flachdecken.

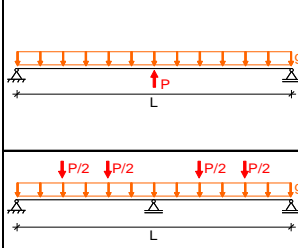
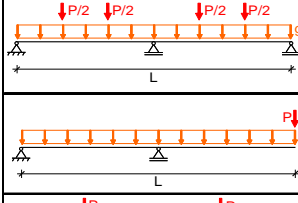
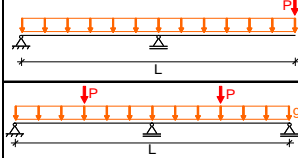
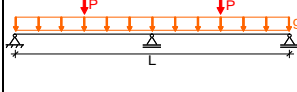
### 1.2. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen des Vorhabens werden einachsig gespannte, durchlaufende Stahlverbunddecken mit stahlfaserbewehrten Aufbetonen untersucht. Bei dem stahlfaserbewehrten Deckensystem wird auf eine konventionelle Betonstahlbewehrung gänzlich verzichtet, da das Stützmoment vom Faserbeton alleine aufgenommen werden soll. Weil reiner Stahlfaserbeton nicht in der Lage ist, Momente in der Größenordnung eines konventionell bewehrten Verbundquerschnittes aufzunehmen, wird sich im Vergleich zu diesen Decken ein anderes Tragverhalten einstellen. In den Versuchen sollten Aufschlüsse über das Trag- und Verformungsverhalten von stahlfaserbewehrten Verbunddecken sowohl im Gebrauchs- als auch im Bruchzustand gewonnen werden. Die Ergebnisse münden in Bemessungskonzepten, die es dem anwendenden Ingenieur möglich machen, das Deckensystem einfach und sicher zu berechnen. Das Forschungsprojekt soll als Ergebnis ein Verbunddeckensystem hervorbringen, das in der Praxis als wettbewerbsfähiges Deckensystem im innovativen Hochbau Anwendung findet. Dabei sollen die Untersuchungen die Voraussetzung für Zustimmungen im Einzelfall bzw. für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen schaffen.

## 2. Durchführung des Forschungsprojektes

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an durchlaufenden sowie an Ersatz-Einfeld-Verbunddecken durchgeführt. Dabei sollten Aufschlüsse über das Trag- und Verformungsverhalten der Decken gewonnen werden. Die Versuchskörperherstellung und die Durchführung der Versuche erfolgten im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern.

Insgesamt wurden vier verschiedene Versuchsserien (Serie S1 bis Serie S4) untersucht. Tab. 2-1 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Versuche. Dabei stellen die Großversuche an durchlaufenden Decken aus Serie S2 die Hauptversuche dar.

Versuch	System	Fasergehalt	Länge L [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [kg]	Blech	
	Einfeld	100 kg/m <sup>3</sup> TABIX 1.3/50	S1_SHR_51_V1	2000	700	160	575	durchlaufend
			S1_SHR_51_V2	2000	700	160	561	durchlaufend
			S1_HODY_V1	2000	700	160	502	durchlaufend
		S1_HODY_V2	2000	700	160	485	durchlaufend	
		S1_LEWIS_V1	1800	670	80	230	durchlaufend	
		S1_SHR_51_V3	2000	700	160	561	durchlaufend	
	Zweifeld	60 kg/m <sup>3</sup> HE+ 1.0/60	S2_SHR_51_V1	6000	700	160	1577	durchlaufend
			S2_SHR_51_V2	6000	700	160	1541	durchlaufend
			S2_HODY_V1	6000	700	160	1335	durchlaufend
			S2_HODY_V2	6000	700	160	1348	durchlaufend
	Einfeld mit Kragarm	65 kg/m <sup>3</sup> HFE 1.0/60	S3_SHR_51_V1	2000	700	160	500	durchlaufend
			S3_SHR_51_V2	2000	700	120	413	durchlaufend
			S3_SHR_51_V3	2000	700	200	704	durchlaufend
			S3_SHR_51_V4	2000	700	160	502	gestoßen
	Zweifeld	60 kg/m <sup>3</sup> HE 0.75/35	S4_LEWIS_V1	2000	670	80	245	durchlaufend
			S4_LEWIS_V2	2000	670	80	250	durchlaufend
			S4_LEWIS_V3	2000	670	60	182	durchlaufend
			S4_LEWIS_V4	2000	670	100	325	durchlaufend

Tab. 2-1: Übersicht über die durchgeführten Versuche

Bei den Versuchen wurden einzelne Parameter variiert. So kamen sowohl Bleche mit offener trapezförmiger als auch mit hinterschnittener Geometrie zum Einsatz. Des Weiteren wurden unterschiedliche Deckenstärken und unterschiedliche Stahlfaserbetonmischungen untersucht.

Für die Berechnung und Bemessung werden die im Verbundbau üblichen Nachweisverfahren aufgegriffen und modifiziert. Die Traganteile des Stahlfaserbetons werden über den Ansatz von Spannungsblöcken implementiert. Für die einzelnen Nachweise werden Bemessungsdiagramme und –tabellen erstellt. Die anhand der experimentellen und rechnerischen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse münden in Bemessungsmodellen, die es dem anwendenden Ingenieur möglich machen, das System einfach und sicher zu berechnen.

## 3. Darstellung der Ergebnisse

In Abb. 3-1 ist das Tragverhalten einer durchlaufenden stahlfaserbewehrten Verbunddecke schematisch dargestellt. Je nach Spannweite und Fasergehalt wird unter Gebrauchslast (Fall ①) über der Stütze das Rissmoment noch nicht erreicht. Die Decke ist in diesem Zustand noch rissfrei. Bei weiterer Laststeigerung (Fall ②) wird das Rissmoment  $M_{cr}$  erreicht und der Querschnitt reißt auf. Nun muss unterschieden werden, ob der Stahlfaserbeton die Risslast tragen kann oder nicht. Ist der Querschnitt „unterbewehrt“, so wird die Last nach dem Aufreißen auf den Wert abfallen, der vom Faserbeton aufgenommen

werden kann. Im Falle des untersuchten Deckensystems soll die Last nach dem Aufreißen aber mindestens gehalten bzw. noch etwas gesteigert werden können. Dies bedeutet, dass die Last nach Erreichen des Rissmomentes nicht abfällt. Vielmehr bildet sich ein plastisches Gelenk (1. Fließgelenk).

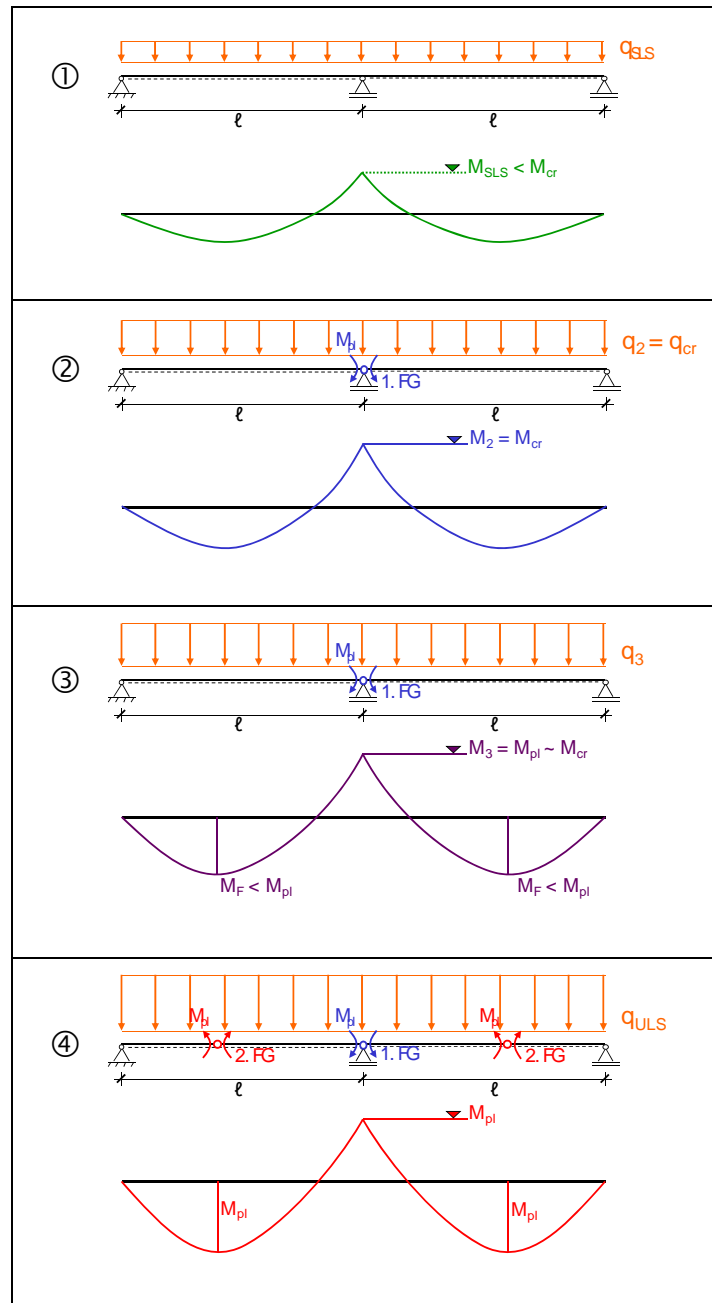


Abb. 3-1: Tragverhalten von durchlaufenden stahlfaserbewehrten Verbunddecken

Bei weiterer Laststeigerung (Fall ③) rotiert der Querschnitt im Fließgelenk und das Stützmoment bleibt bei  $M_{pl}$  erhalten. Die Momente werden in die Feldbereiche umgelagert, was zur Folge hat, dass die Feldmomente ansteigen. Wird die Last weiter erhöht (Fall ④), wird auch im Feld die maximale Tragfähigkeit ( $M_{pl}$ ) erreicht und es bildet sich dort ein weiteres Fließgelenk. Die Traglast des Systems ist zu diesem Zeitpunkt erreicht. Es entsteht eine kinematische Kette. Wichtig für die Funktionsweise des Systems ist eine genügend große Rotationsfähigkeit des Fließgelenkes über der Stütze. Bei den Großversuchen der

Hauptserie S2 an durchlaufenden Decken wurde das hier beschriebene Tragverhalten erreicht. In Abb. 3-2 ist exemplarisch der Verlauf der Momente für einen Versuch aus Serie S2 dargestellt, anhand dessen sich das eben vorgestellte Tragverhalten nochmals sehr gut verdeutlichen lässt. Das Diagramm enthält die Verläufe der Stütz- und Feldmomente, die im Versuch erreicht wurden. Diese wurden aus den gemessenen aufgetragenen Kräften und der gemessenen Auflagerreaktion des Mittelauglagers berechnet.

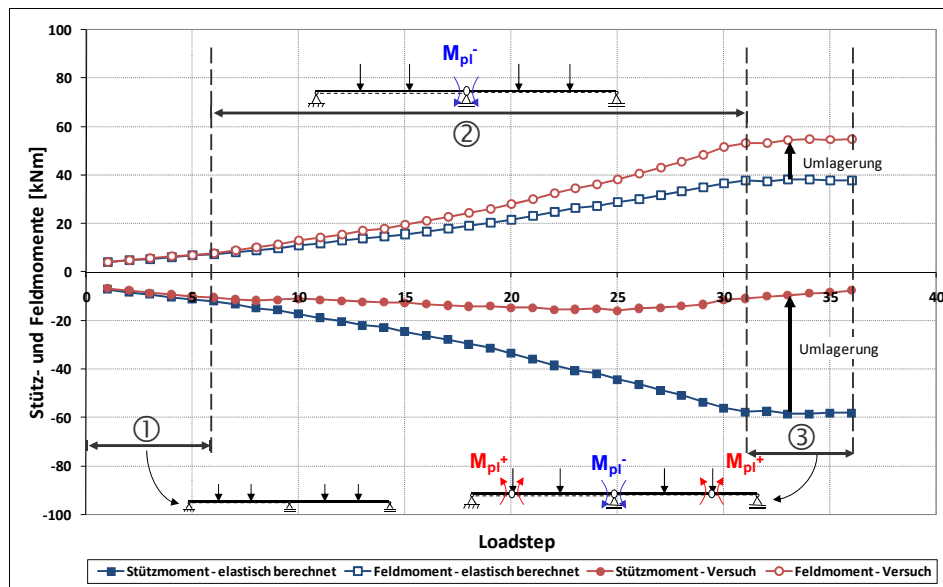


Abb. 3-2: Tragverhalten der durchlaufenden Decken aus Serie S2

Des Weiteren sind die linear-elastisch berechneten Verläufe der Stütz- und Feldmomente dargestellt. Diese wurden anhand von Tafeln für Durchlaufträger unter Ansatz der gemessenen aufgetragenen Lasten ermittelt. Im Bereich ① ist die Decke noch ungerissen. Die Versuchsmomente entsprechen hier noch den linear-elastisch berechneten. Bei weiterer Laststeigerung reißt die Decke dann über der Mittelstütze an. Je nach Stahlfasergehalt kann das Stützmoment nach dem Reißen noch gesteigert werden. Über der Stütze bildet sich ein Fließgelenk aus. Im Bereich ② können die Stützmomente annähernd konstant gehalten werden, während der Querschnitt am Fließgelenk rotiert. Der Wert des Stützmomentes entspricht der plastischen Momententragfähigkeit ( $M_{pl}^-$ ). Die Stützmomente werden ins Feld umgelagert, wodurch die Feldmomente sich vergrößern. Die Last kann so lange gesteigert werden bis auch im Feld die Tragfähigkeit erreicht ist und sich dort ein Fließgelenk einstellt (Bereich ③). Die Umlagerung kann sehr deutlich aus Abb. 3-2 abgelesen werden.

Vom Tragverhalten können die durchlaufenden stahlfaserbewehrten Verbunddecken als sehr duktil eingestuft werden. Die Belastung konnte so lange gesteigert werden, bis die Systemtragfähigkeit nach und nach durch Entstehen von Fließgelenken erschöpft war. Nach dem Anreißen konnte das Stützmoment bei allen Versuchen noch gesteigert werden. Dies ist eine Grundvoraussetzung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilversagens, d.h. der Stahlfaserbeton erfüllt die Voraussetzung einer Mindestbewehrung. Im Bereich des Mittelauglagers stellten sich immer mehrere Risse ein, vornehmlich jedoch im Bereich der Auflagerkanten. Das Rissverhalten kann als gutmütig und duktil beschrieben werden: die Rissweiten wachsen nicht abrupt mit steigender Belastung, sondern kontinuierlich. Mit fortschreitender Verdrehung am Auflager werden die Fasern langsam aus der Matrix herausgezogen.

Um die Tragfähigkeit von Verbunddecken mit Stahlfaseraufbeton abschätzen und berechnen zu können, wurden die im Verbundbau gebräuchlichen Verfahren (*DIN 18800-5 2007*) mit Spannungsblöcken aufgegriffen und um die Traganteile des Stahlfaserbetons erweitert. Im Zugbereich wurde der Stahlfaserbeton über einen Spannungsblock nach *DBV 2001* berücksichtigt, im Druckbereich wurde ebenfalls ein Spannungsblock nach *DIN 18800-5 2007* angesetzt. Für die Bestimmung der Zugtragwirkung des Stahlfaserbetons wird die Nachrisszugfestigkeit angesetzt, die entsprechend *DBV 2001* an Biegebalkenversuchen bestimmt wird. Berücksichtigt wird ebenfalls ein Maßstabs- und Geometriefaktor  $\alpha_{sys}$  sowie ein Dauerstandfaktor  $\alpha_c$ . Für den Ansatz eines Spannungsblockes im Druckbereich wird die Druckfestigkeit des Betons mit einem Faktor  $k_c$  von 0,8 in Anlehnung an *DASt 1994* abgemindert. In Abb. 3-3 sind die Traganteile dargestellt, die bei der Berechnung der Stützmomententragfähigkeit Berücksichtigung finden.

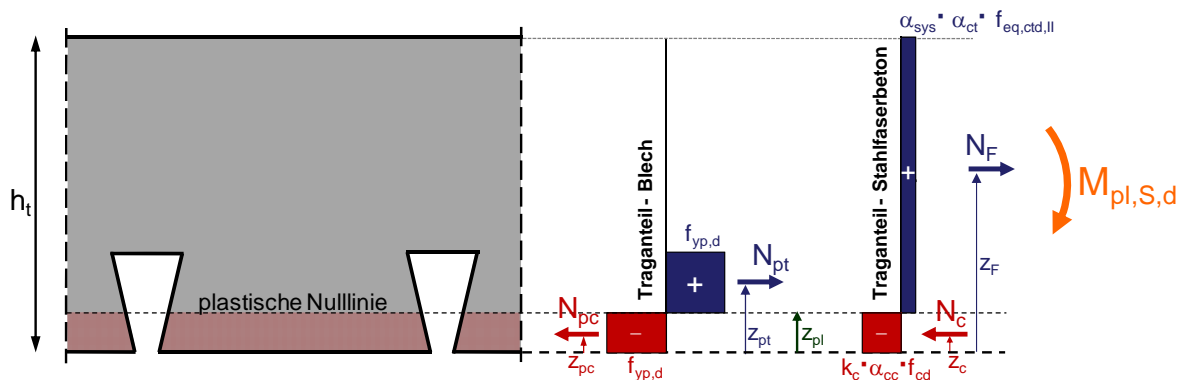


Abb. 3-3: Spannungsverteilung zur Berechnung der Stützmomententragfähigkeit

Bevor die einzelnen Traganteile ermittelt werden können, muss die Lage der plastischen Nulllinie iterativ geschätzt werden, bis die einzelnen im Querschnitt wirkenden Kräfte im Gleichgewicht stehen. Im Anschluss kann über Momentengleichgewicht die plastische Tragfähigkeit bestimmt werden.

Im Feldbereich kann bei Stahl-Verbunddecken im Regelfall nur teilweise Verdübelung erreicht werden, d.h. Blech und Aufbeton sind nicht vollständig schubfest miteinander verbunden. Die Bemessung nach *DIN 18800-5 2007* erfolgt dann mittels der Teilverbundtheorie. Die Spannungsverteilung bei teilweiser Verdübelung ist in Abb. 3-4 dargestellt.

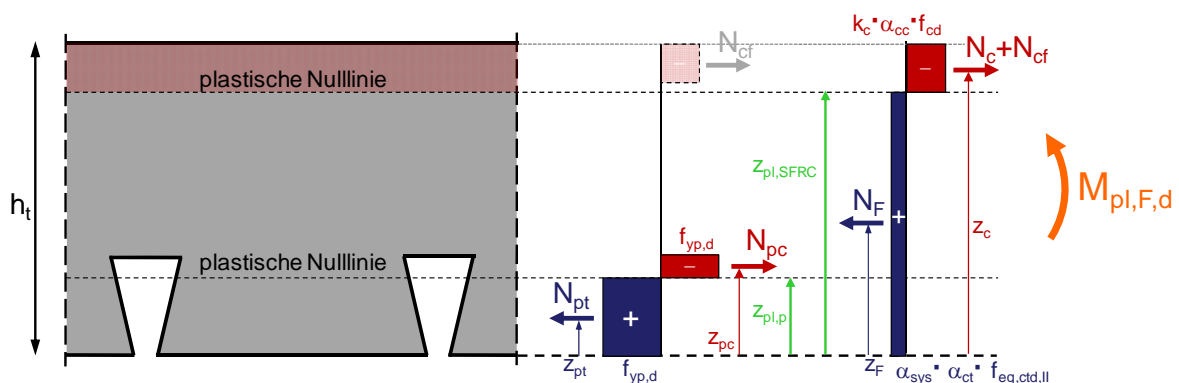


Abb. 3-4: Spannungsverteilung zur Berechnung der Feldmomententragfähigkeit bei teilweiser Verdübelung

Aufgrund des Teilverbundes steht das Blech nicht komplett unter Zugspannung. Die Verbundfuge ist nur in der Lage, die Kraft  $N_{cf}$  zu übertragen. Es existieren nun zwei plastische Nulllinien im Querschnitt, da im Blech ein zusätzlicher Anteil aus Biegung vorhanden ist. Die Lage der plastischen Nulllinie im Blech berechnet sich über die Bedingung, dass die Druck- und Zugkräfte im Blech mit der Kraft  $N_{cf}$  im Gleichgewicht stehen. Die Traganteile des Stahlfaserbetons werden auch hier durch den Ansatz von Spannungsblöcken berücksichtigt. Die Lage der zweiten plastischen Nulllinie berücksichtigt die zusätzliche Druckkraft aus dem Stahlfaserbetontraganteil  $N_c$  und den Anteil aus dem Blech  $N_{cf}$ . Mit dieser Spannungsverteilung können sämtliche Zustände vom Nichtzusammenwirken von Blech und Beton bis zum vollständigen Verbund beschrieben werden. Die für die Berechnung nach der Teilverbundtheorie benötigte Teilverbundkurve kann so iterativ ermittelt werden.

Bei der Nachrechnung der durchgeführten Versuche zeigte sich die Eignung der vorgestellten Rechenverfahren. Die Traglasten der Versuche konnten mit den angesetzten Spannungsverteilungen gut abgeschätzt werden. In einer Parameterstudie wurden Bemessungsdiagramme und -tabellen für baupraktisch auftretende Fälle berechnet. Als Parameter wurden die Betondruckfestigkeit  $f_{ck}$ , die Deckenstärke  $h$  und die Faserbetonklasse variiert. Der anwendende Ingenieur kann so sehr einfach die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von den verschiedenen Randbedingungen aus den Tabellen oder Diagrammen ablesen. In Abb. 3-5 ist exemplarisch ein Bemessungsdiagramm für die Stützmomenten­tragfähigkeit einer SUPERHOLORIB-Decke [Superholorib 2007] dargestellt.

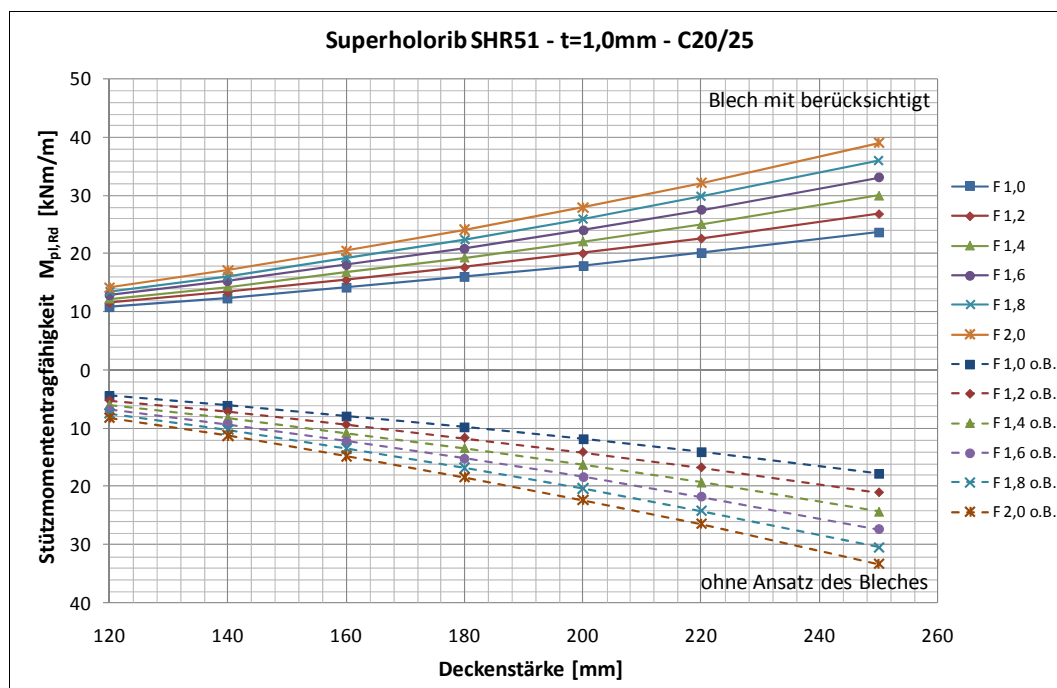


Abb. 3-5: Stützmomenten­tragfähigkeit – SUPERHOLORIB SHR51 –  $t=1,0$  mm – C20/25

Der Nachweis der Feldmomenten­tragfähigkeit erfolgt, wie oben beschrieben, nach der Teilverbundtheorie. Abb. 3-6 stellt exemplarisch die Teilverbundkurven für eine SUPERHOLORIB-Decke mit einer Deckenstärke von 160 mm dar.

Des Weiteren wurden Bemessungstabellen für den Nachweis der Querkraft­tragfähigkeit berechnet. Alle Einzelnachweise werden in Form von Bemessungsmodellen gebündelt. In



der Arbeit werden zwei verschiedene Verfahren vorgestellt, mit denen die Tragfähigkeit von stahlfaserbewehrten Verbunddecken nachgewiesen werden kann. In den Verfahren ist zusätzlich ein Nachweis implementiert, der den vollständigen Faserausfall über der Stütze berücksichtigt. Hierbei entsteht eine Kette von Einfeldträgern und das Blech hält die Decke in ihrer Lage. Dabei kann eine ausreichende Reststandsicherheit nachgewiesen werden.

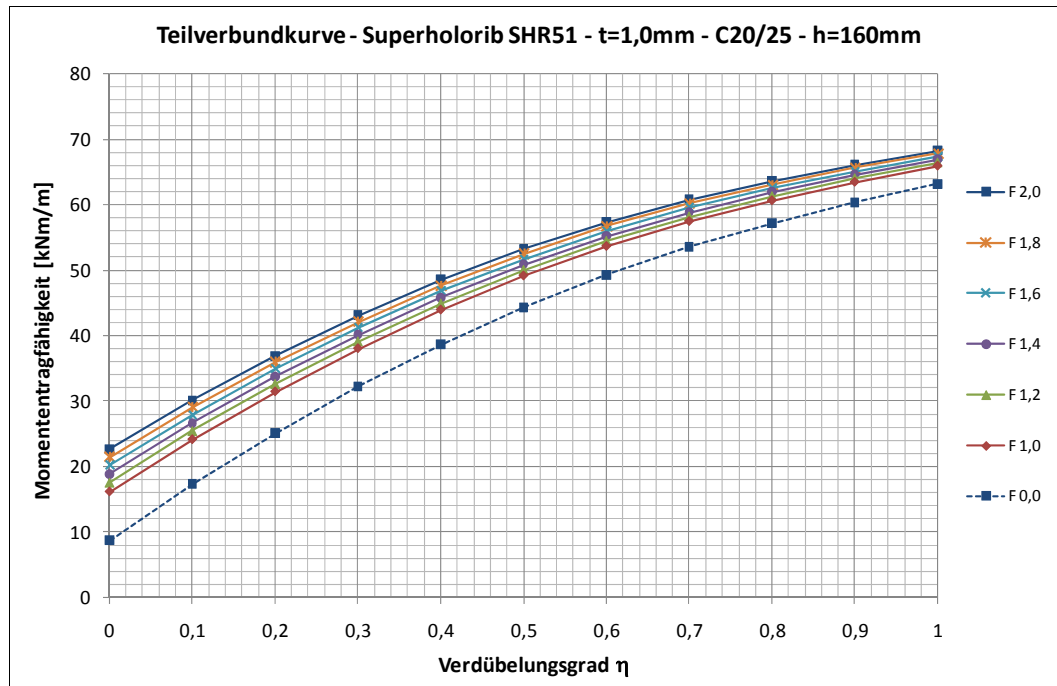


Abb. 3-6: Teilverbundkurven für SUPERHOLORIB SHR51 –  $t = 1,0 \text{ mm}$  – C20/25

Bei Bemessungsmodell I handelt es sich um ein elastisch-plastisches Nachweisverfahren für durchlaufende Verbunddecken. Das Verfahren beruht auf einer elastischen Schnittgrößenermittlung mit begrenzter Momentenumlagerung (max. 30 %), wobei die Querschnitte plastisch nachgewiesen werden. Da rein stahlfaserbewehrte Verbunddecken nur einen relativ niedrigen äquivalenten Stützbewehrungsgrad besitzen, sind nur begrenzte Stützweiten möglich. In den Parameterstudien wird ersichtlich, dass rein stahlfaserbewehrte Verbunddecken bei im Wohnungs- und Bürobau üblichen Verkehrslasten bis zu einer maximalen Stützweite von 5 m eingesetzt werden können, wobei die Deckenstärke bei einer Stützweite von 5 m schon 25 cm betragen muss. Größere Stützweiten werden aufgrund der dann erforderlichen Deckenstärken unwirtschaftlich. Ab einer Weite von 5 m sollte eine zusätzliche konventionelle Stahlbewehrung über dem Auflager als Verstärkung angeordnet werden, deren Tragwirkung bei der Berechnung der Stützmomententragfähigkeit nach Abb. 3-3 durch eine zusätzliche Kraft  $N_s$  (Stahlzugkraft der Bewehrung) berücksichtigt werden kann. Da der Feldbereich aufgrund des relativ niedrigen äquivalenten Stützbewehrungsgrades und der damit verbundenen begrenzten Momentenumlagerung nicht ganz ausgenutzt werden kann, bietet das System immer noch eine Tragreserve auch für den Fall, dass durch Herstellungsfehler über dem Auflagerbereich ein verminderter Fasergehalt vorhanden ist. Durch die Stützmomententragfähigkeit des Stahlfaserbetons und der damit vorhandenen Durchlaufwirkung werden die Durchbiegungen im Feldbereich im Vergleich zum Einfeldsystem wesentlich verringert. Für den in der Praxis anwendenden Ingenieur stellt das Bemessungsmodell I ein einfach anzuwendendes Verfahren dar, das einen schnellen und sicheren Nachweis von stahlfaserbewehrten Verbunddecken erlaubt.

Bei Bemessungsmodell II werden die durchlaufenden Verbunddecken nach der Fließgelenktheorie plastisch-plastisch nachgewiesen. Hierbei wird die nachgiebige Verdübelung berücksichtigt. Neben den plastischen Tragfähigkeiten der Querschnitte werden hier auch die Systemreserven ausgenutzt. Im Vergleich zu Bemessungsmodell I können die Decken so mehr ausgenutzt werden. Im Rahmen der eigenen Untersuchungen an stahlfaserbewehrten Verbunddecken mit den Blechtypen HODY [Hody 2008] und SUPERHOLORIB [Superholorib 2007] konnte gezeigt werden, dass für Stahlfaserbetone mit einem vergleichbaren Tragverhalten wie in den Versuchen die Fließgelenktheorie bis zu einer Stützweite von drei Metern angewendet werden kann. Die Momente wurden hier bis zum Erreichen der kinematischen Kette umgelagert. Für größere Stützweiten vergrößern sich die Verformungen und damit die Verdrehungen im Stützbereich überproportional, was dann zu einer sehr großen, nicht mehr aufnehmbaren erforderlichen Rotation am Auflager führt. In diesen Fällen kann Bemessungsmodell I angewendet werden.

#### 4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass stahlfaserbewehrte durchlaufende Verbunddecken mit Spannweiten bis fünf Meter ein innovatives und rationelles Deckensystem darstellen. Sollen größere Spannweiten realisiert werden oder sind lokal sehr hoch belastete Stellen im Tragwerk vorhanden, so kann für diese Fälle zusätzlich eine konventionelle Stützbewehrung angeordnet werden. Durch den Entfall der Bewehrungsarbeiten wird eine Arbeitserleichterung verbunden mit einem großen Zeitvorteil erreicht. Durch den Verbundbau und die nicht mehr notwendige Bewehrung kann ein enormer Platzbedarf auf der Baustelle eingespart werden, was sich gerade im innerstädtischen Bereich mit zumeist begrenzten Platzverhältnissen als sehr vorteilhaft erweisen kann. Für größere Deckenflächen ergibt sich durch die frühzeitigere Fertigstellung ein großer wirtschaftlicher Gewinn.

#### 5. Literatur

**Bode, H. 1998:** Euro-Verbundbau, Konstruktion und Berechnung, Werner-Verlag, 1998.

**DAST 1994:** Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DAST-Richtlinie 104; Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994 Teil 1-1. Februar 1994.

**DBV 2001:** Deutscher Beton- und Bautechnikverein e.V.: Merkblatt „Stahlfaserbeton“, Oktober 2001.

**DIN 1045-1 2008:** Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, August 2008.

**DIN 18800-5 2007:** Verbundtragwerke aus Stahl und Beton, Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2007.

**Hody 2008:** Deutsche Zulassung des HODY-Blechtes derzeit in Bearbeitung. Nähere Informationen unter [www.spillner-ssb.de/hody.htm](http://www.spillner-ssb.de/hody.htm), Stand: Dezember 2008

**Sauerborn, I. 1995:** Zur Grenztragfähigkeit von durchlaufenden Verbunddecken, Dissertation Technische Universität Kaiserslautern, 1995.

**Superholorib 2007:** Zulassungsbescheid Z-26.1-45: Super-Holorib SHR 51-Verbunddecke, Fa. Holorib (Deutschland) GmbH, DIBt, 2007