

Verbunddecken nach EC4.
Bericht zum Forschungsvorhaben
"Trapezblech-Verbunddecken mit
Endverankerung"

T 2582

T 2582

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Prof. Dr.-Ing. H. Bode
Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Stahlbau

Verbunddecken nach EC4

von

H. Bode/F. Minas/I. Sauerborn

Bericht zum Forschungsvorhaben
"Trapezblech-Verbunddecken
mit Endverankerung"

im Auftrag des DIBt
(Deutsches Institut für Bautechnik)

Kaiserslautern, im Dezember 1993

Verbunddecken nach EC 4

H. Bode, F. Minas, I. Sauerborn
Universität Kaiserslautern

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines zum Forschungsauftrag des DIBt
2. Untersuchungsprogramm insgesamt
3. Versuche der 1. Serie
 - 3.1 Versuchsbeschreibung
 - 3.1.1 Versuchskörper
 - 3.1.2 Versuchsaufbau und Meßeinrichtung
 - 3.1.3 Versuchsdurchführung
 - 3.2 Versuchsergebnisse
 - 3.2.1 Werkstoffkennwerte
 - 3.2.2 Plattenabmessungen und Rißverteilung
 - 3.2.3 Tragverhalten
 - 3.3 Auswertung der Versuche ohne Endverankerung
 - 3.3.1 Teilverbund
 - 3.3.2 Statistische Auswertung
 - 3.3.3 Vereinfachte Abminderung nach EC 4
 - 3.4 Versuche der 1. Serie mit Endverankerung

4. Versuche der 2. Serie mit Endverankerung
 - 4.1 Versuchsbeschreibung
 - 4.2 Versuchsergebnisse
 - 4.2.1 Werkstoffkennwerte
 - 4.2.2 Plattenabmessungen und Rißverteilung
 - 4.3 Auswertung der Versuche mit Endverankerung
 - 4.3.1 Biegetragfähigkeit und Versagensarten
 - 4.3.2 Auswertung nach der Teilverbundtheorie
 - 4.3.3 Statistische Auswertung der Versuche (mit EV)
 - 4.3.4 Vergleich mit der Dübeltragfähigkeit nach EC 4
 - 4.4 Kontrollberechnung und Ausnutzbarkeit
 - 4.5. Auswertung von Versuch COF 1 ohne Endverankerung
5. Empfehlungen für die Bauaufsicht
 - 5.1 Erfahrungen mit der 1. Serie (Flächenverbund)
 - 5.2 Erfahrungen mit der 2. Serie (mit Endverankerung)
6. Zusammenfassung und Ausblick
7. Literatur

Anhang A.1 Auswertung mit L_R

Anhang A.2: Fotos zur 2. Versuchsserie

1. Allgemeines zum Forschungsauftrag des DIBt

Vom Deutschen Institut für Bautechnik in Berlin wurde der Auftrag erteilt, durch gemeinsame Auswertung alter und neuer Traglastversuche mit COFRADAL-Verbunddecken, die erst durch Endverankerungsmaßnahmen duktil werden, die Anwendung des EC4 und dabei insbesondere des Annex E "Teilverbundtheorie" für Verbunddecken zu überprüfen und gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten.

Ebenfalls im Auftrag des DIBt waren bereits im Jahre 1989 insgesamt 10 Traglastversuche an Verbunddecken mit dem trapezförmigen COFRADAL-Profilblech durchgeführt worden, das nur einen schwachen mechanischen Verbund infolge eingepprägter Stegrillen (Schrägsicken) ermöglicht (siehe Bild 1.1). Das COFRADAL-Blech wurde dabei stellvertretend für alle Trapezblech-Verbunddecken ohne Hinterschnitt verwendet. Die erforderlichen Profilblechtafeln wurden uns kostenlos von der Firma Sollac, Frankreich zur Verfügung gestellt.

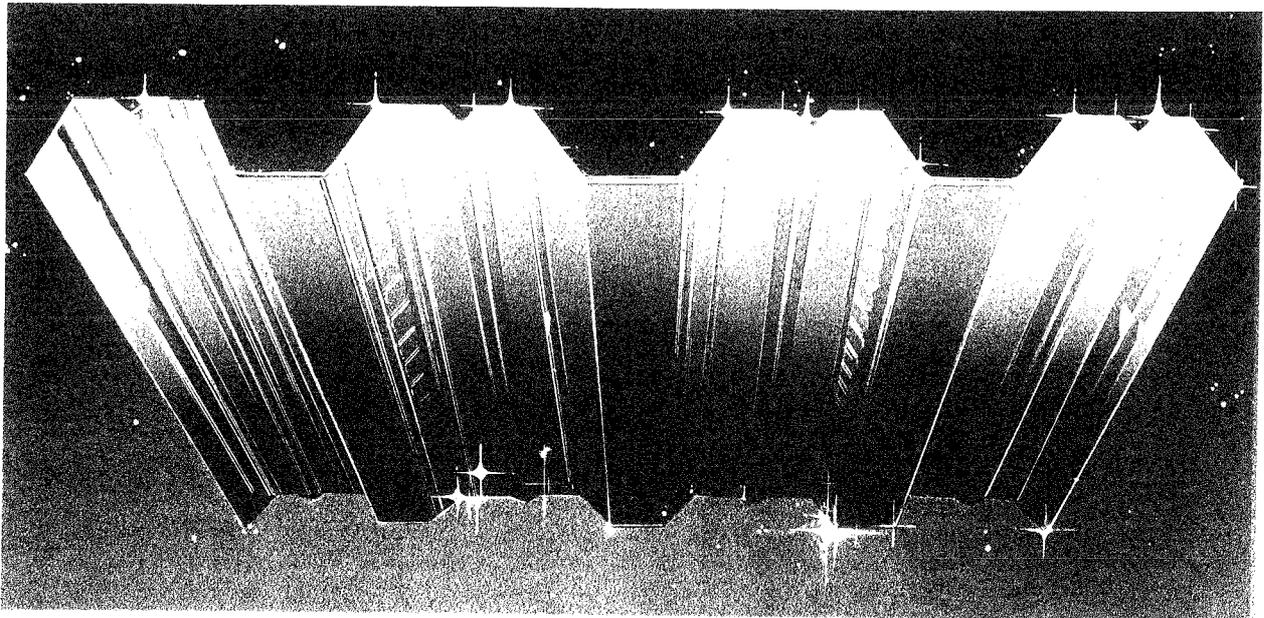


Bild 1.1: Isometrie COFRADAL-Profilblech

Der Schwerpunkt der damaligen Untersuchungen lag darin, für Bleche mit schlechten Verbundeigenschaften die im EC4 für Längsschubversagen als Standardbemessungsverfahren enthaltene $m+k$ -Methode zu beurteilen, Alternativen dazu aufzuzeigen und Empfehlungen zur Durchführung von Verbunddeckenversuchen zu erarbeiten.

In Ergänzung zu bereits im SPRINT-Programm in Delft [5] und in Salford [6] durchgeführten Untersuchungen waren 8 Versuche ohne zusätzliche Endverankerungsmaßnahmen unter Variation der Schublänge und der Plattendicke durchgeführt worden (siehe Tabelle 3.3). Anschließend wurde mit 2 Tastversuchen der Einfluß einer Endverankerung mit durchgeschweißten Kopfbolzendübeln auf Tragfähigkeit und Tragverhalten überprüft. Diese 10 Versuche werden im folgenden als Serie 1 bezeichnet, sie werden im Abschnitt 3 behandelt.

Inzwischen sind von uns weitere 6 Versuche mit endverankerten COFRADAL-Blechen als Serie 2 durchgeführt worden. Sie dienen der Ermittlung des Trag- und Versagensverhaltens mit Endverankerung, der Ermittlung der Tragfähigkeit der Endverankerungsmaßnahmen und des Zusammenwirkens von Flächenverbund und Endverankerung beim o. g. COFRADAL-Blech. Diese Versuche werden im Abschnitt 4 behandelt.

2. Untersuchungsprogramm insgesamt

Insgesamt werden in diesem Bericht 16 Traglastversuche mit COFRADAL 60/0.75-Profillechen behandelt. Davon dienen neun Versuche der Ermittlung der Verbundfestigkeit τ_U und sieben der Ermittlung der Dübeltragfähigkeit $P_{pb,R}$ der Endverankerung.

Die Versuche der 2. Serie (COF1 bis COF6) sind eine Fortsetzung der 1. Serie, bei der die Parameter Deckendicke und Schublänge variiert wurden. Bereits in der 1. Serie waren zwei Tastversuche mit durchgeschweißten Kopfbolzendübeln als Endverankerung (EV) durchgeführt worden (16EA und 16EB).

Alle Versuchskörper waren insgesamt 3.000 mm lang und hatten grundsätzlich den gleichen Versuchsaufbau.

	Versuch	LS	h_t	$\frac{L_S+L_0}{h_t}$	Anzahl KD Ø 19 mm
1. Serie	11 A	1100	114	10.5	-
	11 B	1100	114	10.5	-
	16LA	1100	160	7.5	-
	16LB	1100	160	7.5	-
	16KA	550	162	4.0	-
	16KB	550	162	4.0	-
	20 A	1100	202	5.9	-
	20 B	1100	202	5.9	-
	16EA	1100	164	7.3	3
	16EB	1100	164	7.3	3
2. Serie	COF1	1100	164	7.4	-
	COF2	1100	162	7.4	3
	COF3	1100	164	7.3	5
	COF4	700	163	4.9	3
	COF5	900	163	6.1	3
	COF6	1400	162	9.3	3

Tabelle 2.1: Zusammenstellung der Versuche und Versuchsparameter

In der zweiten Serie wurde insbesondere der Einfluß der Anzahl der Kopfbolzendübel (KD) und der Schublänge untersucht. Es sollte gezeigt werden, wie allein die Anordnung von KD, die zur Sicherstellung des Trägerverbundes im allgemeinen sowieso erforderlich sind, die Tragfähigkeit steigert und aus einer ohne EV spröde versagenden Decke eine duktil versagende Verbunddecke wird (Bild 2.1). Aufgrund seiner relativ geringen Verbundfestigkeit eignet sich gerade das offene, trapezförmige COFRADAL-Profil für diese Untersuchung. Tabelle 2.1 zeigt das gesamte Versuchsprogramm mit den wesentlichen Parametern.

Je Versuch wurde immer nur ein Parameter geändert.

Es wurden keine Rißeinleitungsbleche verwendet [EC4, 10.3.1.3 (3)], da die Versuche der ersten Serie ebenfalls ohne Rißeinleitungsbleche durchgeführt worden waren.

Die in diesem Bericht verwendeten Bezeichnungen entsprechen denen des EC4.

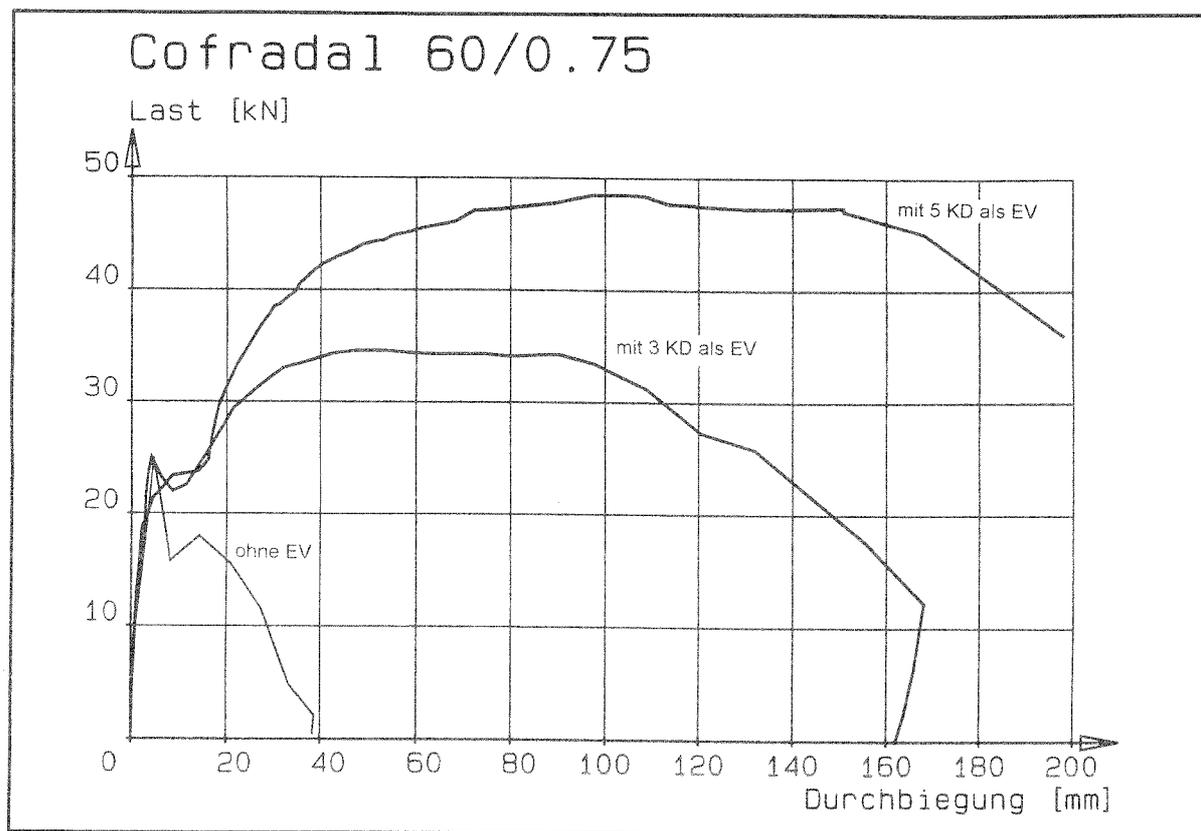


Bild 2.1: Zum Tragverhalten ohne und mit Endverankerung

3. Versuche der 1. Serie

3.1 Versuchsbeschreibung

3.1.1 Versuchskörper

Der Querschnitt der Versuchskörper ist in Bild 3.1 dargestellt. Sie bestehen aus 3.0 m langen Profilblechen COFRADAL 60/0.75 mit einer Profilhöhe von 59 mm und einer Nennblechdicke von 0.75 mm einschließlich 0.04 mm Verzinkung sowie dem Aufbeton der Dicke h_f , die zwischen 11 und 20 cm variiert wurde. Auf das Einlegen einer Schwind- oder Transportbewehrung wurde verzichtet.

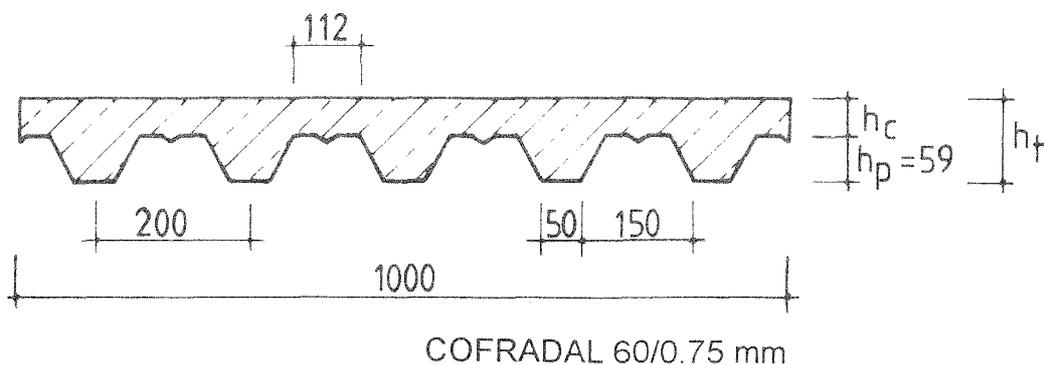


Bild 3.1: Querschnitt der Versuchskörper

Zwei 16 cm dicke Versuchsplatten (16EA und 16EB) erhielten direkt über den Auflagern eine Endverankerung aus je 3 Kopfbolzendübeln $\varnothing 19$ mm, $l = 150$ mm gemäß Bild 3.2. Die Kopfbolzen wurden dabei 10 cm vom Plattenende durch das Profilblech direkt auf ein Lagerblech durchgeschweißt.

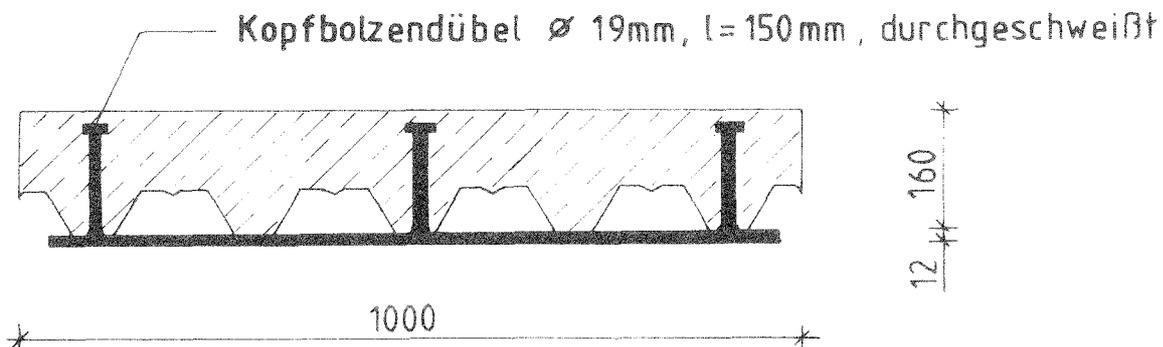


Bild 3.2: Schnitt durch die Endverankerung (Versuche 16EA und 16EB)

Die Profilbleche wurden "wie angeliefert" verwendet, ohne daß eventuelle Fettrückstände von der Oberfläche entfernt wurden, um die Verbundeigenschaften unter "Baustellenbedingungen" zu untersuchen. Die Verbunddecken wurden voll unterstützt betoniert, was den ungünstigsten Fall für die Beanspruchung der Verbundfuge im Versuch darstellt. Auf Rißeinleitungsbleche an den Lasteinleitungsstellen, wie sie in EC4, 10.3.1.3 (3) zur genaueren Definition der Schublänge gefordert sind, wurde ganz bewußt verzichtet, um die tatsächliche Lage der Hauptversagensrisse zu bestimmen. Größere Streuungen der Versuchsergebnisse werden dabei in Kauf genommen.

3.1.2 Versuchsaufbau und Meßeinrichtung

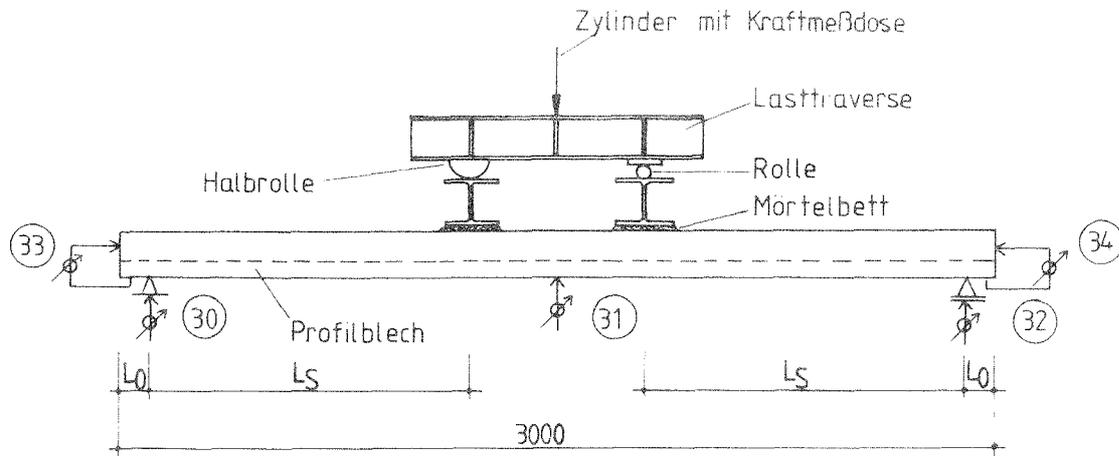
Die Untersuchungen wurden als 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt, damit die Schublänge L_S genau festgelegt ist. Dazu wurden die Deckenstreifen mit einem Prüfzylinder über eine Lastverteilungskonstruktion belastet. Dabei überschritten die Lastquerverteilungsträger mit einer Auflagerbreite von ca. 140 mm (HEA 140 auf Mörtelbett) die in EC4, 10.3.1.2 (5) genannte Maximalbreite von 100 mm.

Die Deckenversuche ohne zusätzliche Endverankerungsmaßnahmen wurden mit einer 50kN-Lukaspresse gefahren. Die Prüflast wurde mit einer 50kN-Kraftmeßdose kontrolliert, um die Versuche trotz der erwarteten, niedrigen Deckentraglasten möglichst genau steuern zu können.

Die Verbunddecken mit durchgeschweißten Kopfbolzendübeln wurden mit einem servohydraulisch gesteuerten Prüfzylinder (Bauart Plunger der Firma MFL, $F_{\max} = 1000 \text{ kN}$) belastet, und die Prüflast wurde mit einer 250kN-Kraftmeßdose aufgenommen.

Zur Erfassung des Endschlupfes, der Mittendurchbiegung und der Nachgiebigkeit des Prüfrahmens wurden induktive Wegaufnehmer der Firma Hottinger-Baldwin-Meßtechnik gemäß Bild 3.3 angeordnet. Für die Endschlupfmessung wurde die Wegaufnehmerhalterung an der mittleren Betonrippe angeklebt, etwa in der Höhe der Schwerachse des Profilbleches, und die Verschiebung wurde gegenüber einem am Profilblech-Untergurt angeklebten Winkel gemessen.

Zusätzlich wurden bei jedem zweiten Deckenversuch (Versuche "B") Dehnungsmeßstreifen unter den Lasteinleitungen und in Feldmitte auf dem Profilblech appliziert, und zwar je einer an der Blechunterseite und in der Sicke.



Meßstellen:

- (30) (32) Lagerverformung
- (31) Mittendurchbiegung
- (33) (34) Endschlupf

Bild 3.3: Versuchsaufbau und Meßeinrichtung

Zur Datenerfassung waren die verschiedenen Meßstellen an eine Umschaltanlage UPH 3200 der Firma HBM angeschlossen. Ein Personalcomputer übernahm die Aufnahme der Meßdaten.

3.1.3 Versuchsdurchführung

Die Verbunddeckenversuche wurden grundsätzlich weggeregelt gefahren, um möglichst viele Informationen über das Tragverhalten - wie z. B. auch Lastabfälle - aufzeichnen zu können. Nach jedem Belastungsschritt wurde vor Ablesen und Speichern der Meßwerte der Weg solange angehalten, bis die Last praktisch nicht mehr abfiel (quasi "statische" Festigkeit, d. h. unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit). Bild 3.4 enthält beispielhaft einen Original-Versuchsmitschrieb, aus dem sich die Größe des Lastabfalls abschätzen läßt.

Um relativ frühzeitig den Haftverbund zwischen Stahlblech und Aufbeton zu lockern und um die Rißbildung im Beton zu beschleunigen, wurden bei jedem Versuch mindestens 20 Lastwechsel gefahren, bevor der eigentliche Traglastversuch durchgeführt wurde. Die in EC4, 10.3.1.4 (4) geforderten 5000 Lastwechsel konnten in dieser 1. Serie mit der gewählten Belastungseinrichtung (Lukaspressen)

allerdings nicht gefahren werden. In der 2. Serie konnte dieser Forderung jedoch Rechnung getragen werden.

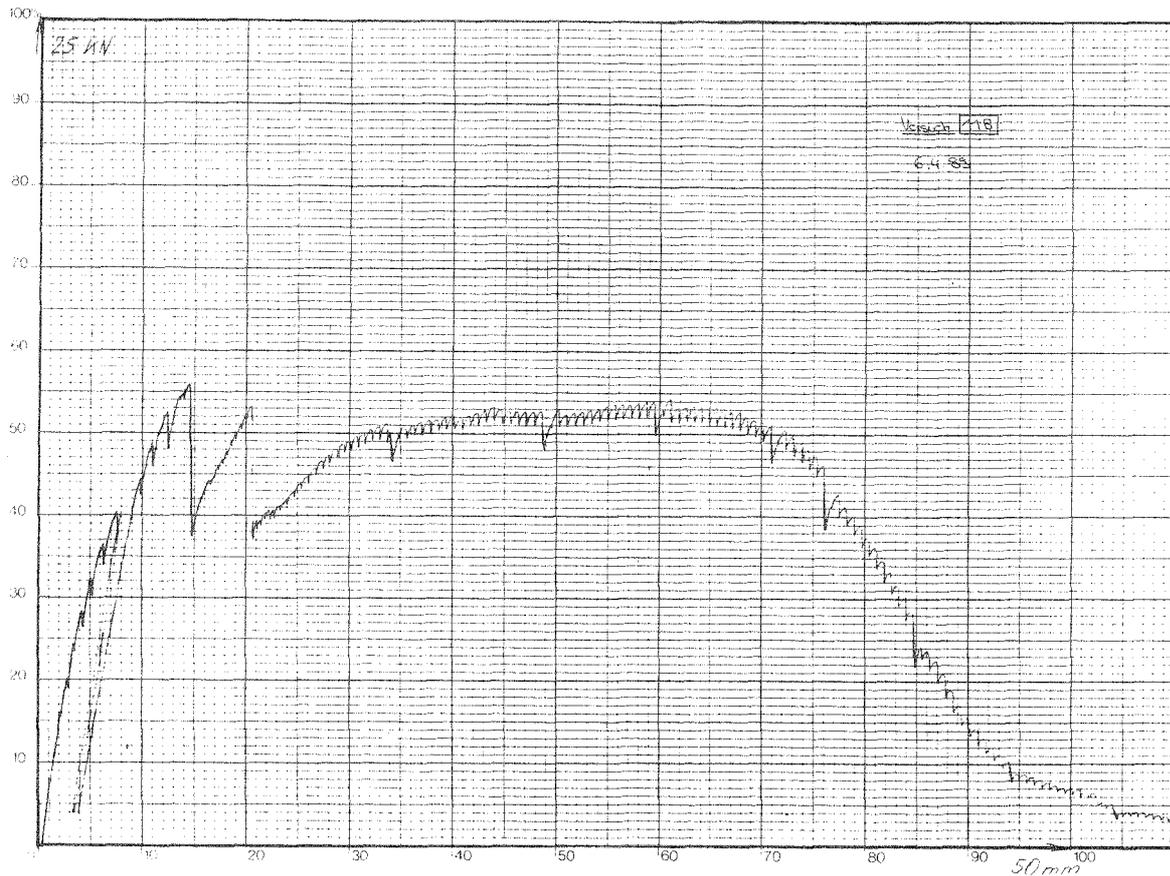


Bild 3.4: Versuchsmitschrieb von Versuch 11B (ohne Endverankerung)

Die Versuche wurden erst dann abgebrochen, wenn die aufnehmbare Last bei weiterer Wegsteigerung stark abfiel, ungeachtet der in EC4, 10.3.1.5 (1) angegebenen Begrenzung der Mittendurchbiegung auf $L/50$. Ein deutlicher Lastabfall trat jedoch immer erst bei erheblich größeren Durchbiegungen auf.

3.2 Versuchsergebnisse

3.2.1 Werkstoffkennwerte

Stahlblech:

Für die Zugversuche wurden aus den seitlich abgeschnittenen Blechrändern 12 Coupons entnommen. Die mittlere Streckgrenze und die Zugfestigkeit ergaben sich wie folgt:

Stahlblech COFRADAL 60/0.75 mm	$f_{yp} = 35.4 \text{ kN/cm}^2$
	$f_{up} = 46.3 \text{ kN/cm}^2$

Tabelle 3.1: Werkstoffkennwerte Profilblech

Beton:

Der Beton wurde als Transportbeton der Festigkeitsklasse B25 mit 16 mm Größtkorn (gemäß der in EC4, 7.2.2 geforderten Grenze für die Größe des Zuschlages) und in der Konsistenz K2 bestellt. An 3 Probewürfeln mit 20 cm Kantenlänge nach DIN 1048 wurde jeweils kurz vor dem Deckenversuch die mittlere Betondruckfestigkeit bestimmt.

Für die Auswertung nach EC4 wird die Würfeldruckfestigkeit in die mittlere Zylinderdruckfestigkeit wie folgt umgerechnet:

$$f_{cm} = 0.85 \cdot \beta_{wm}$$

Versuche	$f_{cm} \text{ [kN/cm}^2\text{]}$
11A, 16LA	4.36
11B, 16LB	4.31
16KA, 16KB	4.42
20A, 20B	3.74
16EA, 16EB	3.68

Tabelle 3.2: Betondruckfestigkeit

3.2.2 Plattenabmessungen und Rißverteilung

Für die Versuchskörper wurden, wie bereits oben erwähnt, grundsätzlich Profilbleche mit 3.0 m Länge verwendet. Damit ist bei einem konstanten beidseitigen Plattenüberstand von $L_0 = 10 \text{ cm}$ die Stützweite für alle Versuche auf $L = 2.8 \text{ m}$ festgelegt. Um die Schublänge L_S zu variieren, mußten die Lasteinleitungsstellen über die Spannweite verschoben werden. EC4, 10.3.1.2 (3) fordert dagegen, die Lasten an den Stellen $L/4$ und $3L/4$ anzuordnen. Das bedeutet aber auch, daß für die Untersuchung unterschiedlicher Schublängen die gesamte Verbunddeckenlänge zu variieren ist, was die Herstellung der Versuchskörper und den Versuchsaufbau erschwert.

Eingehalten wurde jedoch die Forderung des EC4, 10.3.1.2 (6), daß die Schublänge L_S mindestens der dreifachen Plattendicke h_t entsprechen muß, damit nicht bei auflagnahen Lasten, die zum Teil direkt ins Auflager gehen, ohne den Verbund zu beanspruchen, die vorhandene Verbundfestigkeit überschätzt wird. Dann würde sich durch die größere Querpressung im Auflagerbereich auch der Anteil des Reibungsverbundes erhöhen.

Versuch	h_t [mm]	L_0 [mm]	L_S [mm]	L_R [mm]	$\frac{L_S}{h_t}$
11A	114	100	1100	1018	9.6
11B	114	100	1100	1134	9.6
16LA	160	100	1100	1290	6.9
16LB	160	100	1100	1383	6.9
16KA	162	100	550	841	3.4
16KB	162	100	550	1325	3.4
20A	202	100	1100	1283	5.4
20B	202	100	1100	1384	5.4
16EA	164	100	1100	1320	6.7
16EB	164	100	1100	1286	6.7

Tabelle 3.3: Versuchsdaten

mit: h_t = Plattendicke

L_0 = Plattenüberstand am Blechende

L_S = Abstand Lasteinleitung - Auflager

L_R = Abstand Hauptversagensriß - Auflager

Da keine Rißeinleitungsbleche verwendet wurden, stellten sich die Hauptversagensrisse nicht unter den Lasteinleitungsstellen ein, sondern es trat i. d. R. nur ein einziger klaffender Riß zwischen den Lasteinleitungspunkten ein (siehe [3], Bilder A.4 und A.8). Eine weitere Rißbildung bzw. Rißverteilung fand aufgrund der schwachen Verbundwirkung des COFRADAL-Blechtes und wegen der fehlenden Bewehrung nicht statt.

3.2.3 Tragverhalten

COFRADAL-Verbunddecken zeigen grundsätzlich sehr unterschiedliche Trag- und Versagensverhalten, je nach dem, ob eine zusätzliche Endverankerung vorliegt oder nicht.

Bild 3.5 zeigt den typischen Last-Durchbiegungs-Verlauf einer COFRADAL-Decke ohne Endverankerung. Zunächst steigt die Last-Verformungs-Kurve bis zur maximalen Prüflast F_U steil an, ein Zeichen für die starre Verdübelung infolge der Haftung zwischen Profilblech und Beton. Bei Eintreten des ersten Endschlupfes wird der ohnehin unzuverlässige Haftverbund zerstört, und die aufnehmbare Prüflast fällt plötzlich stark ab. Auch bei größeren Relativverschiebungen kann die Prüflast nicht mehr auf das Niveau vor Schlupfbeginn gesteigert werden, sondern nur noch auf eine Resttragfähigkeit F_r [3]. Die schwache mechanische Verdübelung des trapezförmigen Profilbleches ist nicht in der Lage, eine Verbundwirkung aufzubauen, die annähernd so leistungsfähig ist wie die bloße Adhäsion zwischen Stahlblech und Aufbeton ist. Ein solches Verhalten wird als spröde bezeichnet.

Cofradal Versuch 16LA

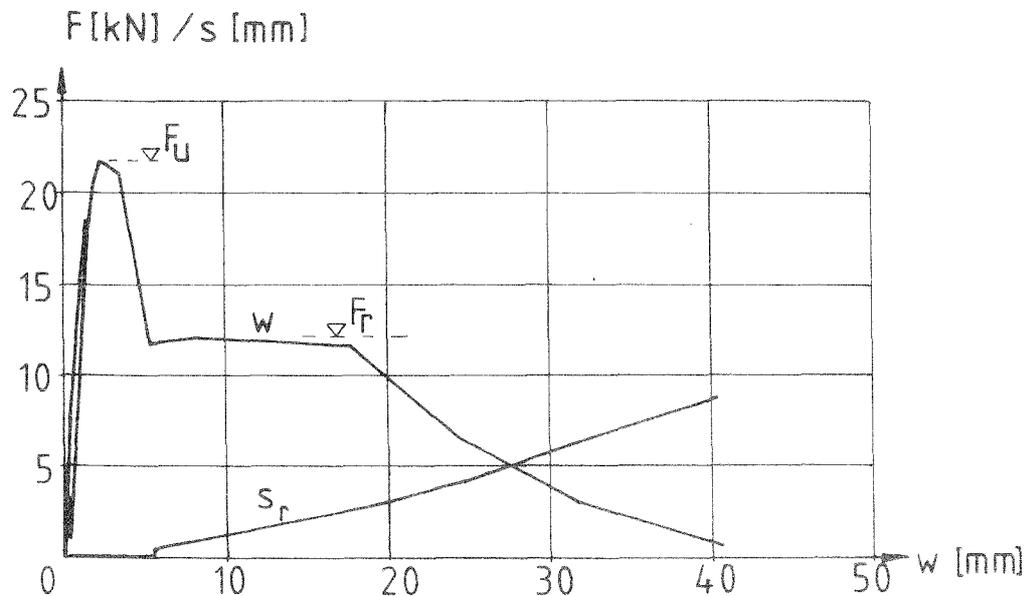


Bild 3.5: Last-Durchbiegungs-/Schlupf-Durchbiegungs-Verläufe für sprödes Verhalten (ohne Endverankerung) bei Versuch 16LA

Bild 3.6 zeigt anhand von Versuch 16EA, daß durch zusätzliche Endverankerungsmaßnahmen nicht nur die Tragfähigkeit gesteigert werden kann, sondern daß auch statt des vorher spröden nun ein duktileres Tragverhalten vorliegt. Nach Überschreitung der Haftfestigkeit und durch den damit verbundenen Schlupf werden die Kopfbolzendübel zum Mittragen herangezogen. Dadurch kann bei dem in Bild 3.6 gezeigten Beispiel nach Eintreten des Schlupfes bei einer Belastung von 18,8 kN die Prüflast um 84% auf eine Traglast von 34,6 kN gesteigert werden. Nach EC4, 10.3.1.5 (1) gilt eine Verbunddecke bereits als duktil, wenn die Versuchstraglast die Prüflast bei Schlupfbeginn um nur 10% überschreitet.

Cofradal Versuch 16EA

F [kN] / s [mm]

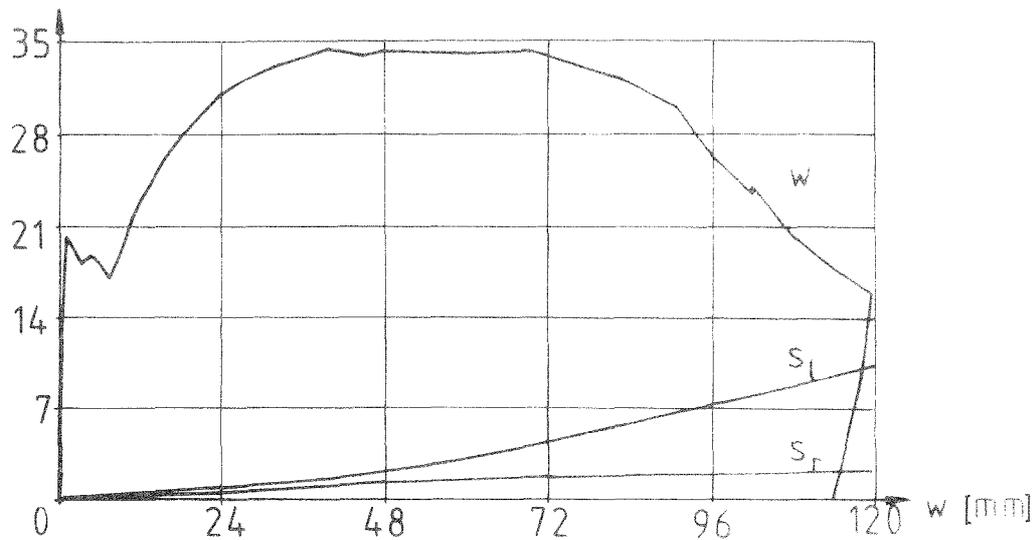


Bild 3.6: Last-Durchbiegungs-/Schlupf-Durchbiegungs-Verläufe für duktiles Verhalten (mit Endverankerung) bei Versuch 16EA

Allen Versuchen gemeinsam war einerseits der einzelne Hauptversagensriß ohne weitere Rißverteilung über die gesamte Stützweite und andererseits die frühzeitige Ablösung der seitlichen Blechränder (siehe [3], Bilder A.2, A.3, A.4, A.6 und A.8). Daher wurden als Verbesserungsmaßnahme bei den Versuchskörpern der 2. Serie die Blechränder durch seitliche "Betonnasen" zurückgehalten, was in EC4 10.3.1.3 (4) ausdrücklich erlaubt ist.

3.3 Auswertung der Versuche ohne Endverankerung

3.3.1 Teilverbund

Wie bereits erwähnt, zeigten die Versuche ohne Endverankerung ein sprödes Trag- und Versagensverhalten. Dabei hängt die Haftverbundspitze (F_U in Bild 3.5) stark von den Herstellungsbedingungen ab. So ist zum Beispiel bei den Versuchen "B", bei denen zum Applizieren der Dehnungsmeßstreifen die bereits betonierten Versuchskörper gedreht werden mußten, die Haftverbundspitze grundsätzlich niedriger als bei den Versuchen "A". Als zuverlässiges Maß für die aufnehmbare Belastung kann damit lediglich die Resttragfähigkeit bei größeren Relativverschiebungen, hervorgerufen durch den mechanischen Verbund zwischen Stegblechrillen und Beton, herangezogen werden. In Tabelle 3.4 wird die maximale Prüflast F_U der Resttragfähigkeit F_r gegenübergestellt.

Versuch	F_U [kN]	F_r [kN]
11A	15.06	12.34
11B	12.47	12.47
16LA	21.89	12.15
16LB	18.66	12.96
16KA	43.00	24.80
16KB	38.12	30.65
20A	31.14	12.31
20B	30.78	16.66

Tabelle 3.4: maximale Prüflast F_U und Resttragfähigkeit F_r

Abweichungen zu den Werten in [3] bei den Versuchen 16KB und 20A sind darin begründet, daß zunächst grundsätzlich die höchste Resttragfähigkeit nach Lösen des Haftverbundes ausgewertet worden war. Bei diesen beiden Versuchen trat jedoch stark verzögert Schlupf auch am anderen Blechende auf, und damit sank das aufnehmbare Lastniveau weiter ab. Diese Versuche wurden hier deshalb mit einer niedrigeren und damit sichereren Resttragfähigkeit ausgewertet als in [3].

Bereits im ersten Forschungsbericht [3] wurde vorgeschlagen, duktile Verbunddeckenversuche nach der Teilverbundtheorie - wie sie inzwischen auch in EC4, Annex E Eingang gefunden hat - auszuwerten, da ihr ein verständliches mechanisches Modell zugrunde liegt. So können nicht nur unterschiedliche Deckenstärken und Materialfestigkeiten berücksichtigt werden. Auch Endverankerungsmaßnahmen und Zulagebewehrung können, sofern ihr Mitwirken in wenigen Zusatzversuchen überprüft wird, in Teilverbundberechnungen miteinbezogen werden. Läßt man die unzuverlässige Haftverbundspitze F_U der COFRADAL-Decken außer acht und betrachtet nur den zuverlässigen Wert F_r der Resttragfähigkeit nach größeren Relativverschiebungen, so ist es möglich, auch diese an sich spröden Verbunddecken nach der Teilverbundmethode auszuwerten. Dazu ist es erforderlich, für jeden Versuch das zugehörige Teilverbunddiagramm mit den IST-Werten der Materialfestigkeiten und der nachgemessenen Versuchskörpergeometrie zu ermitteln.

Die der Versuchsauswertung zugrunde liegenden Teilverbunddiagramme wurden mit dem Programm NG-Verbund [7] unter Berücksichtigung der exakten Momenten-Normalkraft-Interaktion für das Profilblech ermittelt. Die in EC4, 7.6.1.6 und Annex E angegebenen, vereinfachten Näherungsformeln für die reduzierte Biegemomenten-tragfähigkeit M_{pr} des Profilbleches und für den Hebelarm z der Normalkräfte ergeben hier eine sehr gute Übereinstimmung mit der genau berechneten Teilverbundkurve. Dabei wurde im Unterschied zu EC4, E.2 für den Beton die mittlere Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} ohne zusätzlichen Abminderungsfaktor angesetzt. Der Abminderungsbeiwert $\alpha = 0.85$ steht nach EC2, 4.2.1.3.3 für Langzeitwirkungen auf die

Druckfestigkeit, die bei der Durchführung von üblichen Verbunddeckenversuchen aber keine Rolle spielen. Diese Abminderung sollte daher in Annex E für die Versuchsauswertung gestrichen werden.

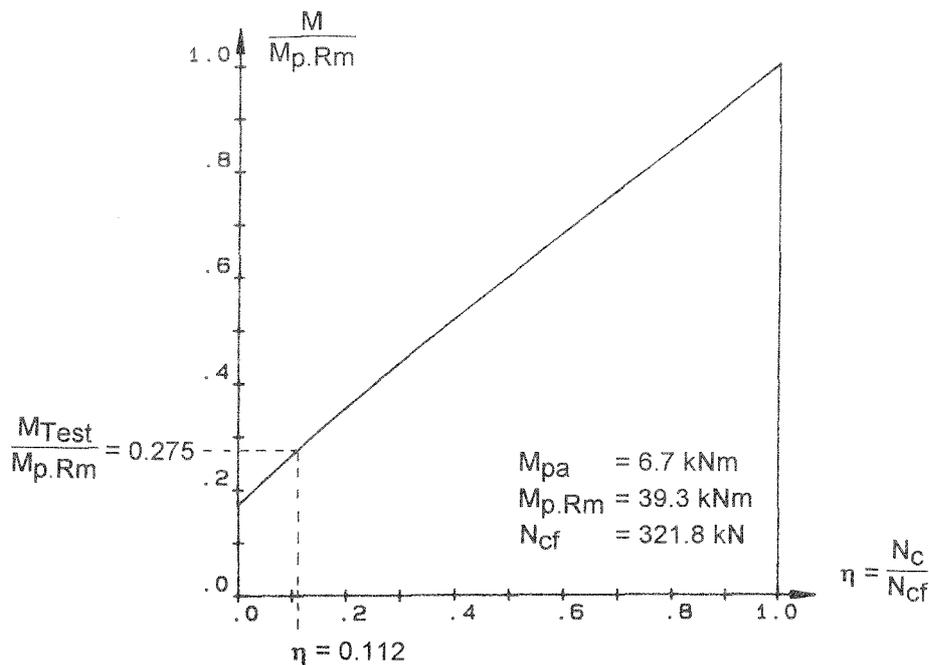


Bild 3.7: Teilverbunddiagramm und Versuchsauswertung für Versuch 16LA

Für die Versuchsauswertung wird der kritische Schnitt an der Lasteinleitungsstelle betrachtet. Dort tritt das Biegemoment M_{Test} auf, das, wie in Bild 3.7 exemplarisch für Versuch 16LA gezeigt, über die Teilverbundkurve des Versuchsquerschnitts den zugehörigen Verdübelungsgrad η liefert.

In Tabelle 3.5 ist diese Versuchsauswertung für alle 8 COFRADAL-Versuche ohne Endverankerung zusammengestellt.

Test	F_r [kN]	G [kN]	g [kN/m]	M_{Test} [kNm]	$\frac{M_{Test}}{M_{p.Rm}}$	η	N_c [kN]	L_S+L_0 [mm]	b [mm]	τ_u [kN/m ²]	$\ln \tau_u$
11A	12.34	2.10	2.05	9.85	0.402	0.141	45.34	1200	989	38.20	3.643
11B	12.47	2.10	2.05	9.92	0.405	0.145	46.63	1200	989	39.29	3.671
16LA	12.15	2.10	3.19	10.80	0.275	0.112	36.01	1200	982	30.56	3.420
16LB	12.96	2.10	3.16	11.22	0.287	0.123	39.55	1200	980	33.63	3.515
16KA	24.80	3.18	3.21	9.66	0.244	0.079	25.40	650	980	39.88	3.686
16KB	30.65	3.18	3.21	11.27	0.284	0.123	39.58	650	980	62.13	4.129
20A	12.31	2.10	4.22	11.85	0.228	0.103	33.14	1200	989	27.93	3.329
20B	16.66	2.10	4.23	14.25	0.275	0.154	49.52	1200	991	41.64	3.729
										39.16	3.640

Tabelle 3.5: Versuchsauswertung nach der Teilverbundtheorie

- mit: F_r = Resttragfähigkeit bei größeren Relativverschiebungen
- G = Eigengewicht der Lasteinleitungskonstruktion
- g = Eigengewicht der Verbunddecke
- $$M_{\text{Test}} = \frac{(F_r + G + g * (L + 2 * L_0)) * L_S - g * (L_S + L_0)^2}{2}$$
- η = Verdübelungsgrad im kritischen Schnitt unter der Lasteinleitung
- N_c = $\eta * N_{cf}$ = Normalkraft im Betonteil
- $$\tau_u = \frac{N_c}{b * (L_S + L_0)} = \text{Verbundfestigkeit}$$
- = Flächenverbund bezogen auf die Grundfläche

In Tabelle 3.5 wird deutlich, daß der Verdübelungsgrad η zwischen 0.08 und 0.15 liegt (siehe auch Bild 3.7). In EC4, 10.3.1.2 wird jedoch gefordert, daß mindestens 3 Versuche im Bereich $0.7 < \eta < 1.0$ gefahren werden. Die dazu erforderlichen Schublängen sind allerdings für Bleche mit schlechter Verbundwirkung nicht zu realisieren.

Wie Tabelle 3.5 ebenfalls zeigt, ist bei kurzer Schublänge L_S die ermittelte Verbundfestigkeit τ_u höher als bei Versuchen mit großer Schublänge. Das liegt daran, daß ein Teil der Lasten direkt vom Auflager aufgenommen wird und den Verbund durch Reibung infolge höherer Querpressung verbessert. Der gravierende Unterschied der ermittelten Verbundfestigkeiten der beiden identischen Versuchsplatten 16KA und 16KB liegt wahrscheinlich darin begründet, daß, wie aus Tabelle 3.3 ersichtlich ist, der Hauptversagensriß bei Versuch 16KA wesentlich näher am Auflager auftrat. Eine Auswertung an der Rißstelle würde hier zu geringeren Streuungen führen (s. Anhang A1).

3.3.2 Statistische Auswertung

Im folgenden wird die statistische Auswertung zur Bestimmung der charakteristischen Verbundfestigkeit $\tau_{u,Rk}$ (5%-Fraktile) aus dem Mittelwert τ_{um} unter Berücksichtigung des begrenzten Stichprobenumfangs durchgeführt [11]. Der Bemessungswert der Horizontalschubtragfähigkeit ergibt sich daraus durch eine weitere Reduktion mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_V .

Mittelwert: $\bar{X} = \tau_{um} = 39.16 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ (siehe Tabelle 3.5)

Standardabweichung: $S_x = 10.46$

Variationskoeffizient: $v = S_x / \bar{X} = 0.27 > 0.10$

\Rightarrow logarithmische Normalverteilung ($Y_i = \ln X_i$)

$$\bar{Y} = 3.640$$

$$S_y = 0.242$$

Fraktalfaktor: $\left. \begin{array}{l} n = 8, v = n - 1 = 7 \\ \text{Aussagewahrscheinlichkeit } p = 75\% \\ \text{5\%-Fraktile} \end{array} \right\} K_S = 2.188$

charakteristischer Wert: $X_k = \tau_{u.Rk} = \exp(3.640 - 2.188 \cdot 0.242) = 22.42 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Bemessungswert: $\tau_{u.Rd} = \tau_{u.Rk} / \gamma_V = 22.42 / 1.25 = 17.94 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Das hohe Versuchsergebnis bei Versuch 16KB verbessert zwar den Mittelwert, verschlechtert aber aufgrund der sich ergebenden größeren Streuung den charakteristischen Wert. Zur Veranschaulichung der Tatsache, daß ein überdurchschnittlich hohes Versuchsergebnis den Bemessungswert nicht verbessert, werden im folgenden zusätzlich nur die restlichen 7 Versuche (außer 16KB) ausgewertet.

Mittelwert: $\bar{X} = \tau_{um} = 35.88 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Standardabweichung: $S_x = 5.208$

Variationskoeffizient: $v = S_x / \bar{X} = 0.145 > 0.10$

\Rightarrow logarithmische Normalverteilung ($Y_i = \ln X_i$)

$$\bar{Y} = 3.570$$

$$S_y = 0.152$$

Fraktalfaktor: $\left. \begin{array}{l} n = 7, v = n - 1 = 6 \\ \text{Aussagewahrscheinlichkeit } p = 75\% \\ \text{5\%-Fraktile} \end{array} \right\} K_S = 2.250$

charakteristischer Wert: $X_k = \tau_{u.Rk} = \exp(3.570 - 2.250 \cdot 0.152) = 25.26 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Bemessungswert: $\tau_{u.Rd} = \tau_{u.Rk} / \gamma_V = 25.26 / 1.25 = 20.21 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

3.3.4 Vereinfachte Abminderung nach EC4

Nach EC4, E.2 (4) kann die statistische Auswertung dadurch ersetzt werden, daß der charakteristische Wert zu 90% des niedrigsten Versuchsergebnisses angenommen wird.

charakteristischer Wert nach EC4: $\tau_{u,Rk} = 0.9 \cdot 27.93 = 25.14 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

mit $\min\tau_u = 27.93$ aus Tabelle 3.5

Dieser Wert stimmt sehr gut mit der Auswertung der 7 weniger streuenden Versuche überein. Bei größeren Streuungen könnte allerdings eine stärkere Reduktion erforderlich sein. Abminderungsfaktoren von 90% und weniger haben sich auch bei der Auswertung anderer Versuchsserien bewährt, und trotz stark vereinfachter Versuchsauswertung erhält man mit diesem Reduktionsfaktor vergleichbare Ergebnisse.

3.4 Versuche der 1. Serie mit Endverankerung

Die Versuche mit einer Endverankerung aus 3 durchgeschweißten Kopfbolzendübeln über den Auflagern zeigten ein eindeutig duktilen Tragverhalten, denn die maximale Prüflast wurde erst nach Auftreten von deutlichem Schlupf in der Verbundfuge erreicht. Für die Auswertung der Versuche 16EA und 16EB wurden die zugehörigen Teilverbunddiagramme mit NG-Verbund genau bestimmt und das maximale Biegemoment M_{Test} am kritischen Schnitt an der Lasteinleitungsstelle ermittelt. In Bild 3.8 wird exemplarisch für Versuch 16EA der zugehörige Verdübelungsgrad η bestimmt. Daraus ergibt sich dann bei bekanntem Anteil des Profil-Flächenverbundes N_τ an der Längsschubtragfähigkeit die Leistungsfähigkeit der Endverankerung V_I sowie die Tragfähigkeit des einzelnen Kopfbolzendübel $P_{pb,R}$ (s. a. Tabelle 3.6).

Test	F_u [kN]	M_{Test} [kNm]	$\frac{M_{Test}}{M_{p,Rm}}$	η	N_c [kN]	L_S+L_0 [mm]	b [mm]	N_τ [kN]	V_I [kN]	$P_{pb,R}$ [kN]
16EA	34.58	23.27	0.578	0.473	152.20	1200	991	46.57	105.63	35.21
16EB	29.94	20.71	0.515	0.396	127.42	1200	990	46.52	80.90	26.97
									93.27	31.09

Tabelle 3.6: Ermittlung der Tragfähigkeit eines Kopfbolzendübel

mit: F_U = maximale Prüflast

$$N_\tau = \tau_{um} * b * (L_S + L_0)$$

mit $\tau_{um} = 39.16 \text{ kN/m}^2$ = Profil-Flächenverbund nach Tabelle 3.5

V_I = Tragfähigkeit der gesamten Endverankerung

$P_{pb,R}$ = Tragfähigkeit eines Kopfbolzendübels

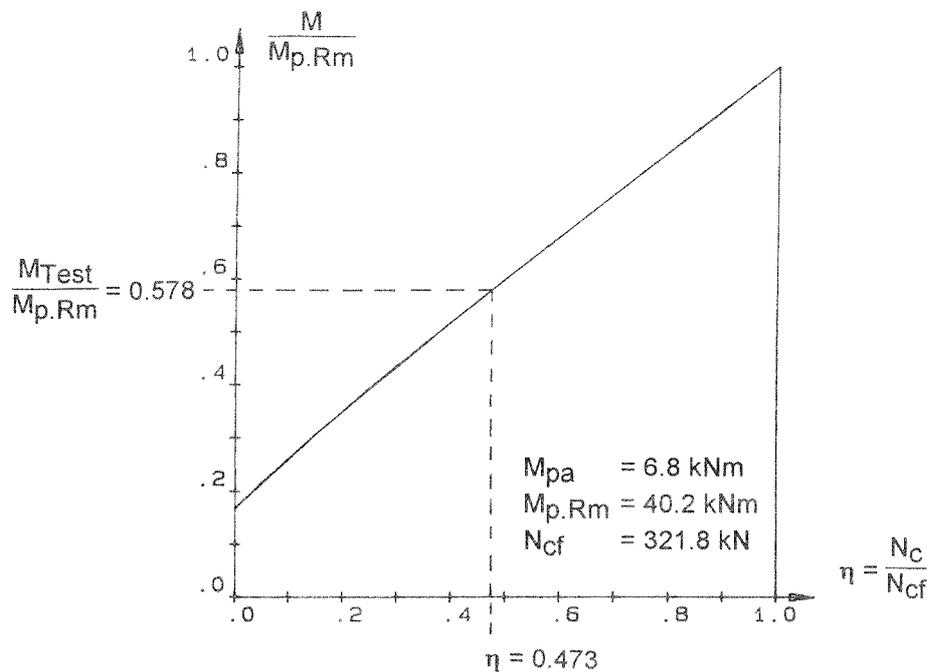


Bild 3.8: Teilverbunddiagramm und Versuchsauswertung für Versuch 16EA (mit EV)

Der in Tabelle 3.6 ermittelte Verdübelungsgrad liegt mit $\eta = 0.40$ bzw. 0.48 immer noch deutlich unter dem in EC4, 10.3.1.2 geforderten Bereich von $0.7 < \eta < 1.0$. Das bedeutet, daß auch diese Versuche mit starker Endverankerung und deutlich duktilem Tragverhalten außerhalb des im EC4 stark eingegrenzten Anwendungsbereiches liegen. Nur durch eine Endverankerung mit einem durchgeschweißten Kopfbolzen in jeder Sicke - das entspricht bei 1 m breiten COFRADAL-Versuchsplatten einer Endverankerung mit 5 Kopfbolzendübeln - wird es überhaupt möglich sein, diese Anforderungen zu erfüllen.

Eine statistische Auswertung ist mit diesen 2 Tastversuchen mit Endverankerungsmaßnahmen nicht möglich. Nach EC4, E.4 (3) ergibt sich der charakteristische Wert der Dübeltragfähigkeit jedoch durch folgende Abschätzung:

charakteristischer Wert nach EC4: $P_{pb.Rk} = 0.90 * 26.97 = 24.27 \text{ [kN]}$

mit $\min P_{pb.R} = 29.97$ aus Tabelle 3.6

Im Vergleich dazu kann die charakteristische Dübeltragfähigkeit nach EC4, 7.6.1.4 auch wie folgt direkt berechnet werden (vgl. 4.3.4):

$$P_{pb.Rk} = k_{\varphi} * d_{do} * t * f_{yp}$$

mit: $d_{do} = 1.1 * \varnothing_{KD} = 1.1 * 19 = 20.9 \text{ mm}$

$a = 100 \text{ mm} = \text{Abstand Kopfbolzen - Blechende}$

$t = 0.71 \text{ mm} = \text{Stahlblechdicke ohne Verzinkung}$

$f_{yp} = 330 \text{ N/mm}^2$

$k_{\varphi} = 1 + a / d_{do} = 1 + 100 / 20.9 = 5.78 \leq 4.0$

$$P_{pb.RK} = 4.0 * 20.9 * 0.71 * 330 = 19.6 \text{ kN}$$

Damit liegt die nach EC4, Abschnitt 7.6.1.4 errechnete Dübeltragfähigkeit gegenüber dem Versuchsergebnis (2 Tests) deutlich auf der sicheren Seite. Grundsätzlich sind jedoch immer zusätzliche Versuche mit Endverankerung erforderlich, um das Zusammenwirken von Flächenverbund und Endverankerungsmaßnahmen zu untersuchen. Eine Addition der Verbundfestigkeiten ist nämlich nur dann möglich, wenn die Verformungscharakteristiken in etwa übereinstimmen und die maximalen Tragfähigkeiten bei ungefähr gleichem Schlupf auftreten.

4 Versuche der 2. Serie mit Endverankerung

4.1 Versuchsbeschreibung

Die Versuchskörper der zweiten Serie entsprechen aus Vergleichsgründen im wesentlichen denen der ersten Serie. Variiert wurden lediglich die Anzahl der Kopfbolzendübel und die Schublänge L_S .

Alle sechs Versuchskörper der zweiten Serie waren 3.000 mm lang, 1.100 mm breit und 160 mm dick; siehe Bild 4.1.

Bei den Versuchskörpern der 2. Serie wurden die Profilblechränder durch seitliche Betonnasen gestützt, die ein Ausweichen der Blechränder nach dem Lösen des Haftverbundes verhindern sollten. Dadurch wird auch der Reibungsverbundanteil im Überlappungsbereich benachbarter Bleche erfaßt. Dies wird in EC4, 10.3.1.3 (4) ausdrücklich erlaubt.

Die Profilblechtafeln vom Typ COFRADAL 60/0.75 waren mit einer Verzinkung von 0.04 mm versehen. Die Bleche wurden "wie angeliefert" eingebaut, in einem geschlossenen Raum bei etwa konstanter Temperatur voll unterstützt betoniert und nach einer Woche ausgeschalt. Schwindbewehrung wurde nicht eingelegt.

Als Endverankerung wurden Kopfbolzendübel $\varnothing 19$, $h = 150$ mm, die in einem Abstand von 100 mm vor dem Blechrand durchgeschweißt wurden, verwendet (siehe Bild A.2.1).

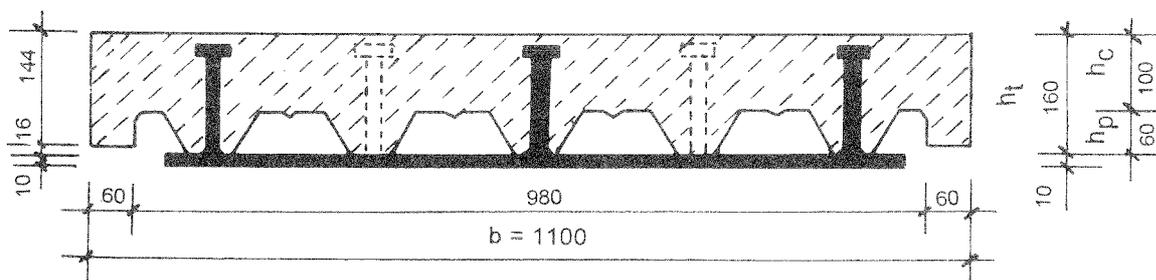


Bild 4.1: Querschnitt der Versuchskörper

Die Deckenplatten COF1 bis COF5 wurden durch 2 Einzellinienlasten belastet. Versuch COF6 wurde mit einer Einzellinienlast gefahren. Dadurch wurde eine möglichst große Schublänge L_S erreicht.

Versuch	L_S	$\frac{L}{L_S}$	Anzahl Kopfbolzendübel $\varnothing 19, h = 150 \text{ mm}$
COF1	1100	2.6	ohne EV
COF2	1100	2.6	3
COF3	1100	2.6	5
COF4	700	4.0	3
COF5	900	3.1	3
COF6	1400	2.0	3

Tabelle 4.1: Versuchsparameter der 2. Serie, Laststellung und Schublänge

Im Gegensatz zur 1. Serie wurden die Lasten mit einem servohydraulisch gesteuerten Prüfzylinder der Firma Schenck (max $F = 250 \text{ kN}$, max $S = 250 \text{ mm}$) aufgebracht. Endschlupf, Durchbiegungen in Feldmitte sowie unter den Lasten und Lagerverschiebungen wurden mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer gemäß Bild 4.2 gemessen.

Zur Endschlupfmessung wurden die Wegaufnehmer bei den Versuchen COF4 bis COF6 über die Deckenbreite verteilt. Als Meßwert wurde der Mittelwert aus fünf Messungen (5 Rippen auf 0.98 m Blechbreite) angenommen. Bei der Endschlupfmessung ist die Position der Wegaufnehmer nicht unerheblich, denn infolge der relativ großen Endverdrehungen ergeben sich über die Deckendicke unterschiedliche Endschlupfwerte. Eine einheitliche Festlegung (z.B. Messung der Relativverschiebung zwischen der plastischen Nulllinie der Decke und der Unterkante des Profilblechs) wäre sinnvoll.

Schlupfmessungen längs des Profilbleches wurden nicht durchgeführt, weil eine Öffnung (Langloch erforderlich) im Profilblech die geringe Verbundfestigkeit und die übertragbare Stahlzugkraft hätte beeinflussen können.

Durch den Prüfzylinder wurde die Belastung über die Lastverteilungskonstruktion (s. Bild 4.2) aufgebracht, die Steuerung erfolgte weggeregelt.

Da die Belastungsgeschwindigkeit des manuell geregelten Prüfcylinders relativ hoch war, fiel die Last nach jedem Wegschritt deutlich ab. Gemessen wurde erst, wenn die Last praktisch nicht mehr abfiel (s. Bild 3.4). Ermittelt werden also "quasi statische" und damit niedrige Werte.

Nach dem Vermessen des Versuchskörpers und der Meßstellen wurden letztere abgeglichen. Dadurch enthalten die Meßwerte nicht die Anteile aus dem Eigengewicht der Decke und der Lasteinleitungsstruktur.

Nach Versuchsbeginn wurde die Last in 5 kN-Schritten bis zur 1,5fachen rechnerischen Gebrauchslast gesteigert. Alle auftretenden Risse wurden markiert. Alle Meßstellen wurden gleichzeitig abgefragt, die Ergebnisse wurden simultan ausgedruckt und auf Magnetdisketten gespeichert.

Zur Lösung des Haftverbundes und Simulation der Alterung wurden vorweg 2 x 2.500 Lastwechsel zwischen 0,5- und 1,5facher rechnerischer Gebrauchslast gefahren, allerdings in weniger als 3 Stunden [EC 4, 10.3.1.4 (4)]. Dabei war zur Vorbemessung die Tragfähigkeit der EV mit 30 kN je Dübel angenommen worden. Danach wurde der Weg zunächst in 1mm-, später in 5mm-Schritten gesteigert. Die Versuche wurden beendet, sobald die Last nach Erreichen der Maximallast bei Steigerung des Weges wieder nennenswert abfiel. Der Wert $L/50$ zur Festlegung der Traglast wurde dabei regelmäßig überschritten.

Der Versuchsaufbau entspricht im wesentlichen den Anwendungsregeln in EC 4, 10.3.1.2, vgl. Bild 4.2. Abweichungen davon gab es in folgenden Punkten:

- Da die 5.000 Lastwechsel mit einer Frequenz von 3Hz gefahren wurden, dauerte diese Belastungsphase nur etwa 45 Minuten statt der geforderten 3 Stunden. Nach unserer Erfahrung würde eine länger andauernde dynamische Belastungsphase mit geringerer Frequenz aufgrund der langen "Erholungsphasen" die Versuchsergebnisse aber eher günstig beeinflussen, d.h. höhere Traglasten liefern.
- Da der Einfluß der Schublänge L_S untersucht wurde und die Versuchskörperlänge mit 3.000 mm konstant gehalten werden sollte, wurden die Lasten nicht in den Viertelpunkten aufgebracht (s. Tabelle 4.1). Dadurch wurde gewährleistet, daß je Versuch immer nur ein Parameter geändert wurde.
- In EC 4, 10.3.1.2 (8) wird gefordert, daß zur Bestimmung der Dübeltragfähigkeit mindestens drei weitere Versuche durchgeführt werden müssen. Einer davon mit $L_S = 3h_t$, die beiden anderen mit einem Verdübelungsgrad von $0.7 \leq \eta \leq 1.0$. Der

zweite Teil dieser Regelung dient dazu, ungünstige (niedrige) Werte für τ_u zu erhalten.

Bei auflagenahen Lasten ($L_S \leq 3h_t$) geht ein Teil der Auflast über Druckstreben direkt ins Auflager, ohne die Verbundfuge oder die Endverankerung zu beanspruchen. Zusätzlich wirkt am Auflager ein hoher Querdruck, welcher die am Blechende vorhandene Gleitreibung erhöht. Die Schubfestigkeit nimmt demzufolge mit abnehmender Schublänge L_S zu.

Versuch	L_S [mm]	$3h_t$ [mm]	L_S/h_t	η_{test}
COF2	1100	480	6.9	0.494
COF3	1100	480	6.9	0.735
COF4	700	480	4.4	0.397
COF5	900	480	5.6	0.435
COF6	1400	480	8.8	0.481

Tabelle 4.2: Zum Versuchsprogramm der 2. Serie mit EV

Porter und Ekberg [12] haben bereits 1976 empfohlen, daß die Schublänge mindestens 457.2 mm betragen soll.

- Außerdem wurden keine Reißeinleitungsbleche verwendet, welche die Versuchsergebnisse und das tatsächliche Tragverhalten beeinflussen könnten. Reißeinleitungsbleche sollen nach EC4 angewendet werden, um die Schublänge L_S genau zu definieren und die Mitwirkung des Betons auf Zug auszuschließen.
- Bei der Versuchsauswertung wurde sowohl die Schublänge L_S , als auch der Abstand L_R (Abstand Auflager-auflagernächster Reiß) berücksichtigt (s. Anhang A.1).

4.2 Versuchsergebnisse

4.2.1 Werkstoffkennwerte

Beton:

Verwendet wurde ein Transportbeton B15, Körnung 0-32, PZ35F mit Regelkonsistenz. Die Versuchskörper und die Probewürfel der Versuche COF1 bis COF3 wurden am 4.2.92 betoniert. Die Versuchskörper COF4 bis COF6 wurden am 21.5.92 betoniert. Die beiden Chargen ergaben sehr unterschiedliche Festigkeiten. Dadurch konnte aber auch untersucht werden, ob die Betondruckfestigkeit einen Einfluß auf die Versuchsergebnisse hat.

Der Wert f_{cm} der Betondruckfestigkeit wurde nach EC4, 10.3.1.3 (9) als Mittelwert der Ergebnisse des Würfeldruckversuches nach DIN 1048 aus je drei Probewürfeln $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ ermittelt. Die Würfeldruckversuche wurden am gleichen Tag wie die jeweiligen Deckenversuche durchgeführt.

Stahlblech:

Zugfestigkeit f_u und Streckgrenze f_y der 2. Charge der Profilbleche wurden in Zugversuchen ermittelt.

Stahlblech COFRADAL 60/0.75 mm 2. Charge		$f_{y.k} = 32.4 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$ $f_{u.k} = 43.7 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$
Beton		
Versuch	Versuchsdatum	$f_{cm}^{*1} \text{ [kN/cm}^2\text{]}$
COF1	24.3.92	2.047
COF2	20.3.92	1.999
COF3	18.3.92	1.999
COF4	16.7.92	4.071
COF5	14.7.92	4.201
COF6	9.7.92	4.132

Tabelle 4.3: Werkstoffkennwerte

*1 Mit f_{cm} nach EC4, 10.3.1.3 (9) als Mittelwert der im Würfeldruckversuch gemessenen Werte, multipliziert mit dem Faktor 0.85 zur Umrechnung der Würfeldruckfestigkeit in die Zylinderdruckfestigkeit.

4.2.2 Plattenabmessungen und Rißverteilung

Versuch	h_t [mm]	L_0 [mm]	L_S [mm]	L_R [mm]	$\frac{L_S}{h_t}$
COF1	164	100	1100	952	6.71
COF2	162	100	1100	1097	6.79
COF3	164	100	1100	911	6.71
COF4	163	100	700	308	4.29
COF5	163	100	900	498	5.52
COF6	162	100	1400	712	8.64

Tabelle 4.4: Plattenabmessungen und Riabstand

mit: L_S = Abstand Lasteinleitung - Auflager (Schublänge)

L_0 = Abstand Auflager - Plattenende (Überstand) = 100 mm (konstant)

L_R = tatsächlich auftretender Abstand auflagernchster Riß - Auflager

h_t = gesamte Deckendicke

Das Verhältnis $\frac{L_S}{h_t}$ variiert zwischen 4.3 und 8.6.

Da keine Rißeinleitungsbleche verwendet wurden, stellten sich die Risse nicht zwangsläufig unter den Lasten ein. Eine Auswertung der Versuche auf der Grundlage von L_R befindet sich im Anhang A.1.

4.3 Auswertung der Versuche mit Endverankerung

4.3.1 Biegetragfähigkeit und Versagensarten

In der folgenden Tabelle 4.5 wird die rechnerische Traglast $F_{p.Rm}$ unter der Annahme ermittelt, daß die volle Biegetragfähigkeit $M_{p.Rm}$ erreicht wird. Diese theoretische Last $F_{p.Rm}$ wird der Versuchstraglast F_{Test} gegenübergestellt.

Versuch	$M_{p.Rm}$ [kNm]	L_S [mm]	$L + 2L_0$ [mm]	G [kN]	g [kN/m]	$F_{p.Rm}$ [kN]	F_{Test} [kN]	$\frac{F_{Test}}{F_{pl}}$
COF1	38.35	1100	3000	1.278	3.45	62.62	18.00	0.29
COF2	37.73	1100	3000	1.278	3.43	61.52	34.60	0.56
COF3	38.36	1100	3000	1.278	3.48	62.58	48.50	0.78
COF4	39.40	700	3000	2.425	3.45	102.95	48.90	0.47
COF5	39.31	900	3000	1.278	3.46	79.54	40.20	0.51
COF6	39.25	1400	3000	1.078	3.46	50.17	27.04	0.54

Tabelle 4.5: Biegetragfähigkeit und im Versuch erreichte Last

mit: G = Eigengewicht der Lasteinleitungskonstruktion
g = Eigengewicht der Decke

$$F_{p.Rm} = \frac{2 \cdot M_{p.Rm} + g \cdot (L_S + L_0)^2}{L_S} - G - g \cdot (L + 2 \cdot L_0)$$

Aus Tabelle 4.5 wird deutlich, daß im Mittel nur etwa 50% der vollen Biegetragfähigkeit erreicht wurde: bei allen Versuchen war Längsschubversagen maßgebend, so daß die zur vollen Biegetragfähigkeit $M_{p.Rm}$ gehörende Druckkraft N_{cf} im Betonteil nicht eingeleitet werden konnte.

Bild 2.1 zeigte bereits deutlich, wie mit Hilfe der zur Sicherstellung des Trägerverbundes ohnehin erforderlichen Kopfbolzendübel aus einer spröde versagenden Verbunddecke eine Decke mit sehr duktilem Verhalten wird. Die Klassifizierung in "duktile" oder "spröde" ist in EC4, Abschnitt 10.3.1.5 (1) geregelt. Dieser Abschnitt regelt eigentlich nur die Bestimmung der Werte m und k. Die Definition, wann das Verhalten duktil und wann spröde ist, sollte deshalb allgemeingültig in EC4, 10.3.1.1 aufgeführt werden.

Versuch	F_U [kN]	zug s [mm]	F_S [kN]	zug s [mm]	max s [mm]	$1.1 \cdot F_S$ [kN]	duktil oder spröde	F_{50} [kN]	$\frac{F_U - F_{50}}{F_{50}}$ [%]	$\frac{F_U - F_S}{F_S}$ [%]
COF1	18.00	1.81	24.8	0.60	9.5	27.3	s	-	-	-
COF2	34.60	1.01	25.6	0.11	4.6* ¹	28.2	d	34.4	0.6	35.2
COF3	48.50	3.96	25.0	0.14	4.5* ¹	27.5	d	45.5	6.6	94.0
COF4	48.90	0.16* ²	41.4	0.10	0.24* ²	45.5	d	47.0	4.0	18.1
COF5	40.20	0.28* ²	33.9	0.12	0.28* ²	37.3	d	39.9	0.8	18.6
COF6	27.04	3.43	21.4	0.21	3.5	23.5	d	25.2	7.3	26.4

Tabelle 4.6: Zur Klassifizierung in duktilen/sprödes Verhalten nach EC4

*1 Endschlupfwegaufnehmer abgefallen

*2 Befestigung der Schlupfwegaufnehmer am Auflagerblech

mit: F_U = max. Zylinderlast im Versuch

s = Endschlupf

F_S = Höchstlast vor Schlupfbeginn (causing first recorded end slip)

F_{50} = Last bei der Mittendurchbiegung $w = L/50 = 3000/50 = 60$ mm

Duktilen Versagen liegt nach EC4 vor, wenn die Versagenslast F_U die Last bei Schlupfbeginn F_S um mehr als 10% übersteigt. Dies war bei allen Versuchen mit Kopfbolzendübeln als Endverankerung der Fall. Die Last wird um mindestens 18.1% bei Versuch COF4 mit 3 KD und kurzer Schublänge und um maximal 94.0% bei Versuch COF3 mit 5 KD und $L_S = 1100$ mm gesteigert (siehe die letzte Spalte in Tabelle 4.6).

Eine Begrenzung der Maximalwerte auf die Größe der Last bei einer Mittendurchbiegung von $w = L/50$ erscheint uns bei heutigen Traglastversuchen nicht sinnvoll. Aus Tabelle 4.6, vorletzte Spalte, wird deutlich, daß die Last noch um bis zu 7.3% gesteigert werden kann.

Die Bilder 4.3 und 4.4 zeigen exemplarisch die Last/Schlupf-Durchbiegungsverläufe zweier Versuche. Deutlich wird, daß bei Versuch COF3 mit einem Verhältnis von $L_S/h_t = 6.7$ und mit fünf KD als Endverankerung nach Lösen des Haftverbundes und auftretendem Endschlupf die Zylinderlast noch weiter gesteigert werden konnte, während bei Versuch COF6, mit großer Schublänge ($L_S/h_t = 8.6$) und mit nur drei KD als Endverankerung, die Steigerung der Zylinderlast wesentlich kleiner ausfällt.

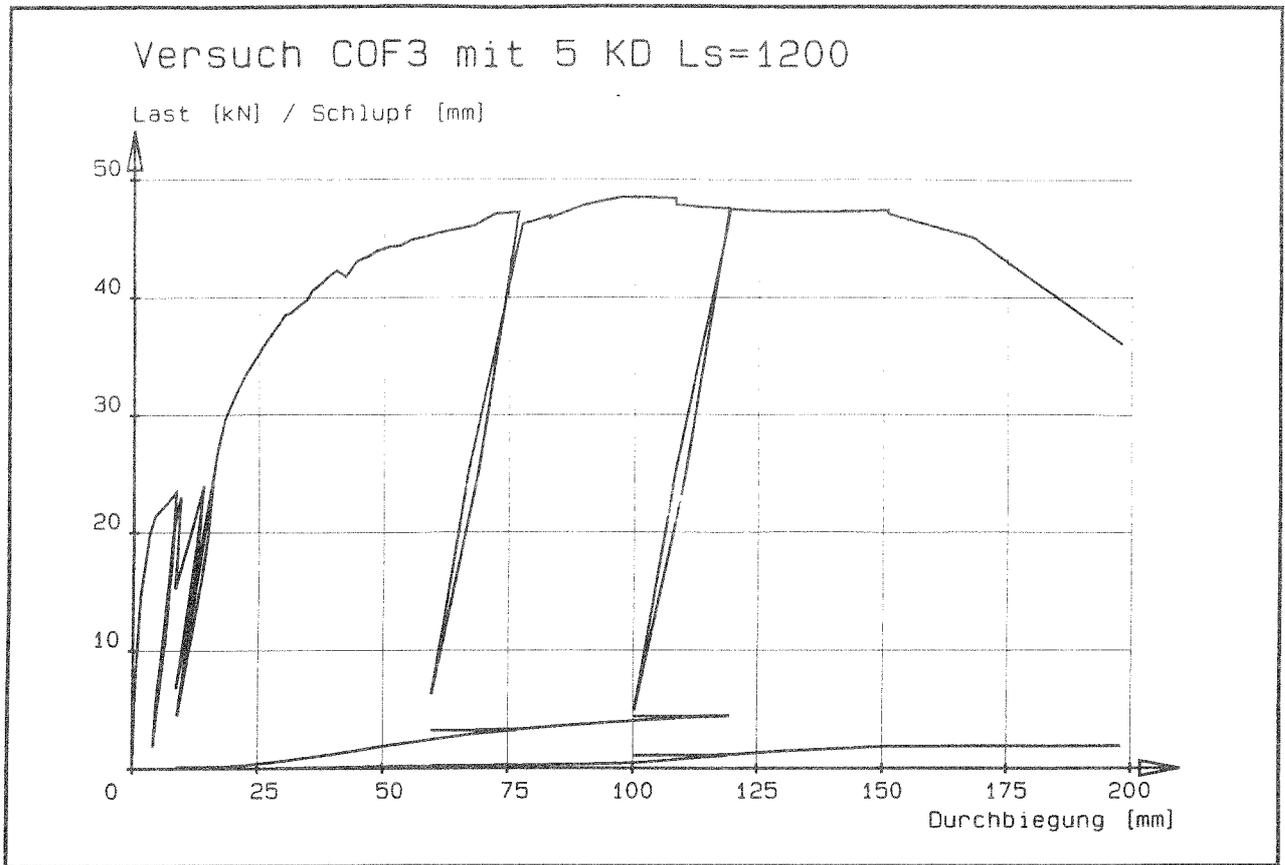


Bild 4.3: Last/Schlupf - Durchbiegungsverlauf Versuch COF 3

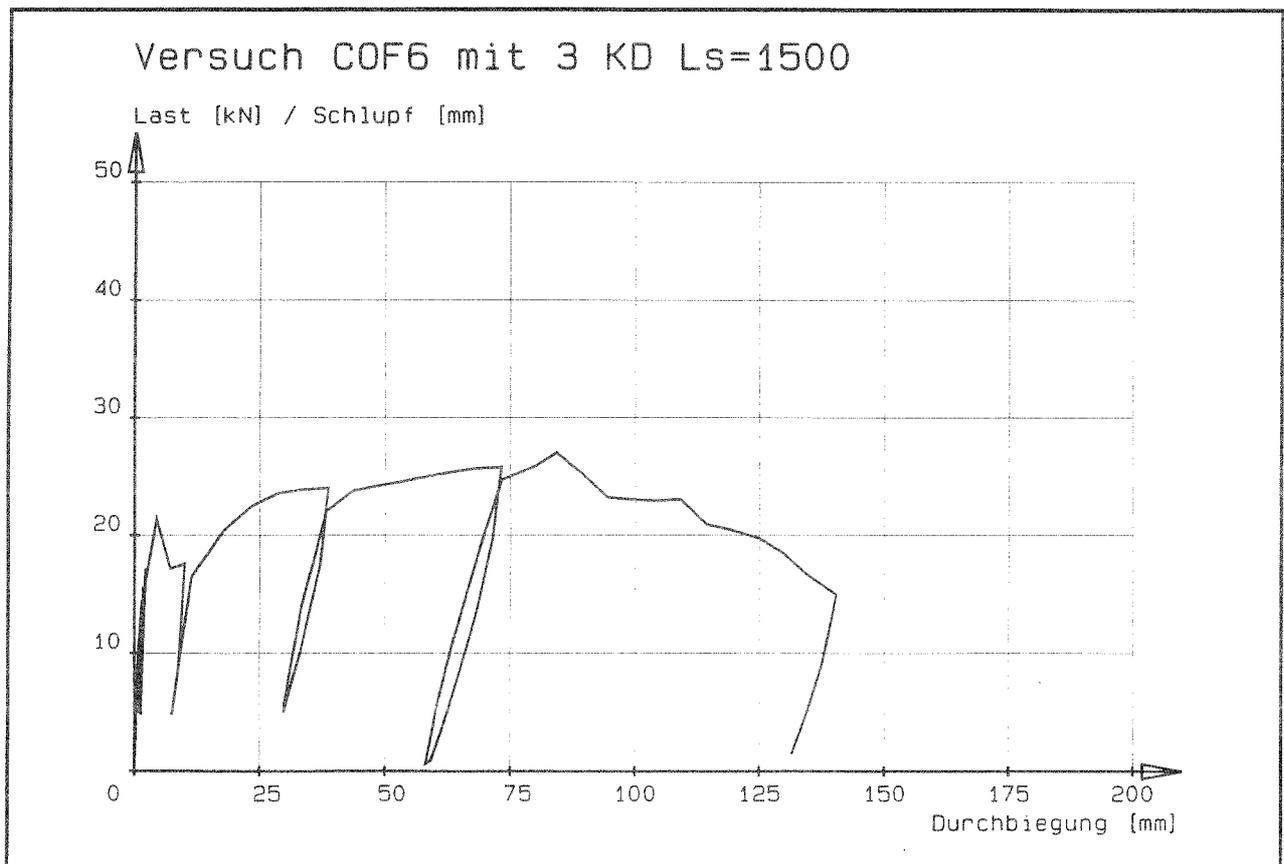


Bild 4.4 Last/Schlupf - Durchbiegungsverlauf Versuch COF 6

Die Halterungen der Wegaufnehmer zur Endschlupfmessung waren bei den Versuchen COF1 bis COF3 an der Stahlblechunterkante festgeklebt worden. Infolge der großen Stahlblechdehnungen im Bereich der KD fielen diese Halterungen der Schlupfwegaufnehmer bei größeren Dehnungen und Schlupfwerten aufgrund der starren Verklebung ab. Bei den Versuchen COF4 und COF5 wurden deshalb die Halterungen an den Auflagerblechen angeschweißt. Damit erhält man die Relativverschiebung zwischen Beton und Kopfbolzendübeln, welche kleiner ist als die zwischen Beton und Profilblech. Diese ist erforderlich, wenn man die Ergebnisse aus Pull-Out- oder Slip-Block- Versuchen auf Deckenversuche übertragen will, denn dazu muß man die Größe des Endschlupfes bei Höchstlast vergleichen. Der Versuchskörper COF5 wurde nach dem Versuch im Bereich eines KD längs einer Profiblechrippe vorsichtig aufgetrennt. Es zeigte sich wiederum, daß die Betonfestigkeit keinen Einfluß auf die Verbundfestigkeit haben dürfte: der Beton war unzerstört, die Oberfläche ein unverändertes Abbild des Profilbleches (s. Bild A.2.4). Auch der Kopfbolzendübel zeigte keinerlei sichtbare Verformungen. Deutlich war aber die Zerstörung der Stahlblechs im Bereich hinter den KD (zur Lastseite hin): das Blech war am Kopfbolzenfuß beginnend eingerissen, das Profilblech hatte auf Lochleibung versagt (s.Bild A.2.5).

Trägt man den Schlupf für diskrete Belastungszyklen über die Deckenbreite b auf, so wird deutlich, daß der Endschlupf in den Rippen ohne Kopfbolzendübel bei Schlupfbeginn etwa 10mal, später etwa 3mal so groß ist wie in den Rippen mit KD (s. Bild.4.5). In Bild 4.5 wurden die Endschlupfwerte für die mittlere Rippe ($b/l = 0.5$) als arithmetisches Mittel der Endschlupfwerte der beiden äußeren Rippen ($b/l = 0.1$ und $b/l = 0.9$) sinnvoll angenommen, da der Wegaufnehmer nach beginnendem Endschlupf abgefallen war.

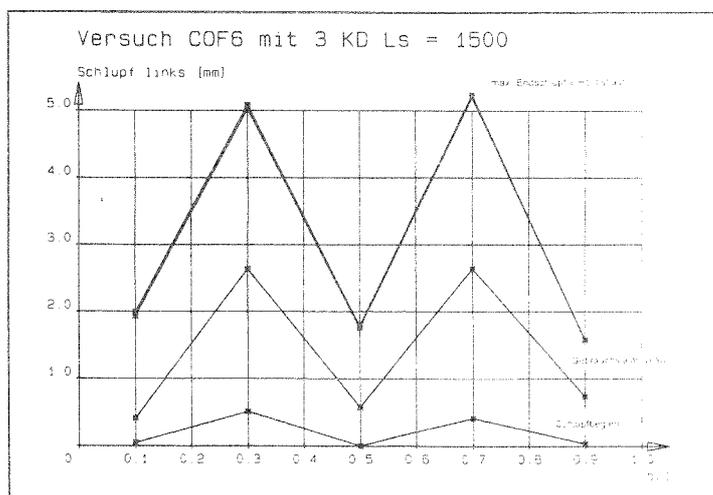


Bild 4.5: Endschlupf links aufgetragen über die Deckenbreite

4.3.2 Auswertung nach der Teilverbundtheorie

Für jeden Versuchskörper wurde mit den Ist-Werten der Materialfestigkeiten und Abmessungen ein Teilverbunddiagramm ermittelt. Damit wird der Verdübelungsgrad η bestimmt (siehe z.B. Bild.4.6). Bei der Versuchsauswertung wurde die ermittelte Würfeldruckfestigkeit mit dem Faktor 0.85 auf die Zylinderdruckfestigkeit umgerechnet. Abweichend zu EC4 wurde keine weitere Abminderung (z. B. wegen der Verwendung von Spannungsblöcken) vorgenommen. Diese Reduktion sollte aber bei der Bemessung von Verbunddecken zur Berücksichtigung einer Dauerbeanspruchung angesetzt werden.

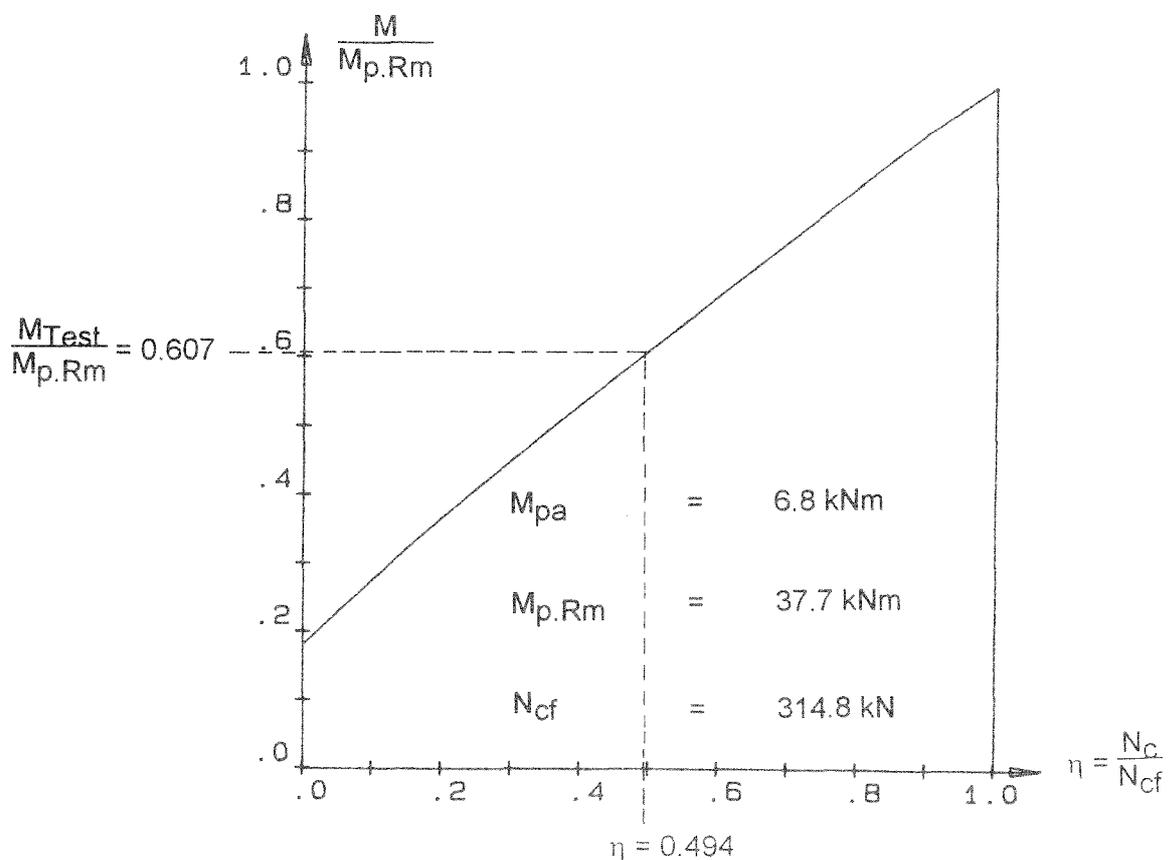


Bild 4.6: Teilverbunddiagramm zur Auswertung von Versuch COF2

Versuch	F_U [kN]	M_{Test} [kNm]	$M_{p.Rm}$ [kNm]	M_{Test} $M_{p.Rm}$	η	N_C [kN]	L_S+L_0 [mm]	N_τ [kN]	V_I [kN]	$P_{pb.R}$ [kN]
COF2	34.60	22.92	37.73	0.607	0.494	155.51	1200	46.05	109.46	36.49
COF3	48.50	30.61	38.36	0.798	0.735	231.37	1200	46.05	185.32	37.06
COF4	48.90	20.48	39.40	0.520	0.397	124.97	800	30.70	94.27	31.42
COF5	40.20	21.61	39.31	0.550	0.435	136.93	1000	38.38	98.55	32.85
COF6	27.04	23.06	39.25	0.587	0.481	151.41	1500	57.57	93.84	31.28
									Mittelwert	33.82

Tabelle 4.7: Bestimmung der Endverankerungskraft $P_{pb.R}$

In Tab. 4.7 bedeuten:

$$M_{Test} = \frac{(F_U + G + g * (L + 2 * L_0)) * L_S - g * (L_S + L_0)^2}{2}$$

F_U = max. Zylinderlast im Versuch

g = Eigengewicht der Verbunddecke

G = Eigengewicht der Lasteinleitungsstruktur

τ_{um} = 39.16 kN/m² (Hier wurde der höhere Wert für τ_{um} aus Tab. 3.5 angenommen, der durch Auswertung aller Versuche der 1. Serie ermittelt wurde. Wegen der beobachteten seitlichen Blechablösung bei diesen Versuchen infolge fehlender Blechrandumfassung, liegt dieser Wert für τ_{um} ohnehin auf der sicheren Seite).

b = 0.98 m

N_C = $\eta * N_{cf}$

N_τ = $\tau_{um} * b * (L_S+L_0)$

V_I = $\eta * N_{cf} - N_{Verb} = N_C - N_{Verb}$ Endverankerungskraft insgesamt

$P_{pb.R} = V_I / n$ Tragfähigkeit eines KD

Da der Umfang der Stichprobe (nur 5 Traglastversuche) relativ klein ist, wird zunächst keine statistische Auswertung vorgenommen. Vielmehr wird der niedrigste

Wert minus 10% verwendet, um den charakteristischen Wert der Dübeltragfähigkeit der Endverankerung zu bestimmen.

$$\Rightarrow P_{pb.Rk} = 31.28 * 0.9 = 28.15 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow P_{pb.Rd} = 28.15/1.25 = 22.52 \text{ kN}$$

mit 31.28 [kN] aus Tabelle 4.7 und $\gamma_V = 1.25$

Zwei Verbunddeckenversuche mit Endverankerung sind bereits früher in der 1. Serie durchgeführt worden, siehe Abschnitt 3. Damit stehen insgesamt sieben Dübeltragfähigkeiten zur Verfügung, die zusammen ausgewertet werden können.

Die Ergebnisse der 1. Serie sind in Tabelle 3.6 aufgeführt.

Werden nun alle 7 Versuche mit Endverankerungen ausgewertet, so erhält man den Mittelwert der Dübeltragfähigkeit zu $P_{pb.R} = 33.04 \text{ kN}$ anstelle von 33.82 kN.

Unter Berücksichtigung aller sieben Versuche mit Endverankerungen ergibt sich nach EC4 (kleinster Wert minus 10%):

$$\Rightarrow \boxed{P_{pb.Rk} = 26.97 * 0.9 = 24.3 \text{ kN}}$$

$$\Rightarrow P_{pb.Rd} = 24.3/1.25 = 19.4 \text{ kN}$$

Wertet man die Versuche statt mit der Schublänge L_S mit dem tatsächlich aufgetretenen Hauptrissabstand L_R aus, ergibt sich ein höherer Mittelwert:

$$P_{pb.R} = 37.98 \text{ kN (s. Anhang A.1).}$$

Aus Tabelle 4.7 läßt sich auch ablesen, wieviel Prozent der vollplastischen Blechzugkraft am Blechende verankert sind. Mit $N_{cf} = N_{a,pl} = 314.8 \text{ kN}$ ergibt sich:

COF3	5 KD \varnothing 19 mm	$V_l = 185.3 \text{ kN} \cong \eta = 59\%$
------	--------------------------	--

COF2,4,5,6	3 KD \varnothing 19 mm	$V_l = 93.84 \text{ kN} \cong \eta = 30\%$
------------	--------------------------	--

Vergleicht man die Bilder 4.3 und 4.4, muß man eigentlich folgern, daß die Endverankerung aus mindestens 3 KD \varnothing 19 mm bestehen muß, damit duktiler Schubversagen auftritt. Das wird in Tabelle 4.6 bestätigt: der Zuwachs an Prüflast nach dem ersten Schlupf beträgt z. T. nur 18% und ist damit nicht viel größer als die in EC4 geforderten mindestens 10% für duktilen Schubversagen.

Wäre die Kraft, die am Blechende mindestens verankert werden muß, hier bei diesem COFRADAL-Blech also 30% der plastischen Blechzugkraft?

4.3.3 Statistische Auswertung der Versuche (mit EV)

Im folgenden wird der charakteristische Wert der Dübeltragfähigkeit unter Berücksichtigung des Stichprobenumfangs ($n=7$) als 5%-Fraktile mittels der Gauß'schen Normalverteilung statistisch ermittelt:

Mittelwert : $\bar{x} = 33.04 \text{ kN}$

Standardabweichung: $S_x = 3.544 \text{ kN}$

Variationskoeffizient: $V = S_x / \bar{x} = 0.107$

⇒ Normalverteilung genügend genau

Fraktilenfaktor $\left. \begin{array}{l} n = 7, \nu = n - 1 = 6 \\ \text{Aussagewahrscheinlichkeit } p = 75\% \\ \text{5\%-Fraktile} \end{array} \right\} \Rightarrow K_S = 2.25$

charakteristischer Wert: $x_k = \bar{x} - K_S \cdot S_x$

$$x_k = 33.04 - 2.25 \cdot 3.544$$

$x_k = 25.07 \text{ kN}$	$= P_{pb.Rk} \approx 25.1 \text{ kN}$
--------------------------	---------------------------------------

Es zeigt sich, daß die "10%-Regel" eine recht gute, auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung mit der statistischen Auswertung liefert (s.o.): die charakteristischen Werte 24.3 kN und 25.1 kN unterscheiden sich nur minimal!

4.3.4 Vergleich mit der Dübeltragfähigkeit nach EC4

Nach EC4 7.6.1.4 ergibt sich die Dübeltragfähigkeit zu (vgl. Abschnitt 3):

$$P_{pb.Rd} = k_{\phi} d_{d0} t f_{yp} / \gamma_{ap}$$

$$\text{mit } k_{\phi} = 1 + a/d_{d0} \leq 4.0$$

$$d_{d0} = 1.1 \cdot 1.9 \text{ cm} = 2.09 \text{ cm}$$

$$a = 10 \text{ cm} \geq 2d_{d0} = 4.2 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow k_{\phi} = 1 + 10/2.09 = 5.77 > 4.0$$

mit $\gamma_{ap} = 1.0$ erhält man den charakteristischen Wert:

$$\Rightarrow P_{pb.Rk} = 4.0 \cdot 2.09 \cdot 0.071 \cdot 32.4 / 1.0 = 19.23 \text{ kN}$$

$$\boxed{P_{pb.Rk} = 19.23 \text{ kN}}$$

Die Formel zur Berechnung der Dübeltragfähigkeit nach EC4 stellt eine Art Grenzlochleibungskraft dar. Sie liegt zumindest in diesem Fall (COFRADAL 60/0.75-Bleche) deutlich auf der sicheren Seite.

$$\frac{P_{k,EC4}}{P_{k,statistisch}} = \frac{19.23}{25.07} \approx 0.8$$

4.4 Kontrollberechnung und Ausnutzbarkeit

Führt man nun umgekehrt mit den erhaltenen Werten der Dübeltragfähigkeit eine Traglastberechnung durch, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den COF-Versuchen und der Berechnung, siehe Tabelle 4.8. Außerdem wird deutlich, daß die Abweichungen der rechnerischen Traglasten voneinander infolge der Krümmung der Teilverbundkurve geringer werden als es die unterschiedlichen Dübeltragfähigkeiten vermuten lassen. Dies zeigt Tabelle 4.8, in der mit den verschiedenen Dübeltragfähigkeiten für jeden Versuchskörper die rechnerische Traglast ermittelt wurde.

Versuchskörper COF2:

Dübeltragfähigkeit $P_{pb.R}$ (n=7)		N_c [kN]	η	$\frac{M_{U1}}{M_{p.Rm}}$	$F_{u.calc}$ [kN]	$\frac{F_{u.calc}}{F_{u.Test}}$
Mittelwert: $P_{pb.R,m}$	33.04	145.17	0.461	0.581	32.78	0.95
charakt. Wert: $P_{pb.Rk,s}$ (statistisch)	25.07	101.57	0.323	0.469	25.10	0.73
kleinster Wert - 10%: $P_{pb.Rk,10\%}$	24.30	99.27	0.315	0.463	24.69	0.71
EC4: $P_{pb.Rk,EC4}$	19.23	84.06	0.267	0.423	21.94	0.63

Versuchskörper COF3:

$P_{pb.R}$	$F_{u.calc}$ [kN]	$\frac{F_{u.calc}}{F_{u.Test}}$
33.04	44.93	0.93
25.07	34.33	0.71
24.30	33.64	0.69
19.23	29.10	0.60

Versuchskörper COF4:

$P_{pb.R}$	$F_{u.calc}$ [kN]	$\frac{F_{u.calc}}{F_{u.Test}}$
33.04	50.27	1.03
25.07	39.46	0.81
24.30	38.78	0.79
19.23	34.28	0.70

Versuchskörper COF5:

$P_{pb.R}$	$F_{u.calc}$ [kN]	$\frac{F_{u.calc}}{F_{u.Test}}$
33.04	40.31	1.00
25.07	31.32	0.78
24.30	30.71	0.76
19.23	27.30	0.68

Versuchskörper COF6:

$P_{pb.R}$	$F_{u.calc}$ [kN]	$\frac{F_{u.calc}}{F_{u.Test}}$
33.04	27.80	1.03
25.07	20.85	0.77
24.30	20.45	0.76
19.23	18.27	0.68

Tabelle 4.8: Kontrollberechnung der COF-Versuche

Tabelle 4.8 läßt folgendes erkennen:

Der Abstand zwischen dem statistisch ermittelten charakteristischen Versuchswert $P_{pb.Rk,s}$ und dem kleinsten Versuchswert minus 10% $P_{pb.Rk,10\%}$ ist vernachlässigbar klein, wenn man die rechnerischen Tragfähigkeiten der Verbunddecken untereinander vergleicht. Die Dübeltragfähigkeit nach EC4, Gl. 7.7 führt zu Traglasten, die im Mittel noch um weitere 10% niedriger liegen.

Die Kontrollberechnung nach Tabelle 4.8 beinhaltet auch den Flächenverbund τ_u . In der 1. Zeile wird jeweils der Mittelwert $\tau_{um} = 39.16 \text{ kN/m}^2$ verwendet, in den drei anderen Zeilen die zugehörige charakteristische Verbundfestigkeit $\tau_{u,Rk} = 22.42 \text{ kN/m}^2$. (vgl. Tabelle 3.5 und die statistische Auswertung in Abschnitt 3.3.2). Die letzte Spalte in Tab. 4.8 liefert dann den bezogenen Mittelwert (1. Zeile) und die bezogenen charakteristischen Werte für die Traglasten der Verbunddecken, bezogen auf das Versuchsergebnis, siehe Tabelle 4.9:

Versuch	Mittelwert F_{calc} / F_{Test}	charakteristische Werte		
		statistisch	min - 10%	EC4
COF2	0.95	0.73	0.71	0.63
COF3	0.93	0.71	0.69	0.60
COF4	1.03	0.81	0.79	0.70
COF5	1.00	0.78	0.76	0.68
COF6	1.03	0.77	0.76	0.68
Mittelwert	0.99	0.76	0.74	0.66
Standardabw.	0.046	0.040	0.041	0.041
Variationskoeff.	0.046	0.053	0.055	0.063

Tabelle 4.9: Gegenüberstellung der Bemessungswerte, bezogen auf das Versuchsergebnis

Tabelle 4.9 zeigt zweierlei:

- Die Traglast der Versuchsplatten wird im Mittel richtig berechnet (0.99).
- der charakteristische Wert der rechnerischen Versuchstraglasten liegt - je nach Wahl von $P_{pb,Rk}$ - zwischen 66% und 76% der Versuchstraglasten

Das Verhältnis $F_{pb,Rk}/F_{Test}$ beträgt im Mittel 0.76, siehe Tabelle 4.9: Der Bemessungswert $F_{pb,Rd}$ ergibt sich daraus zu $0.76/1.25 = 0.608$. Das heißt, der Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite beträgt insgesamt $\gamma = 1/0.61 = 1.64$ gegenüber dem zu erwartenden mittleren Wert der Tragfähigkeit.

Bei den Versuchen mit EV traten, im Gegensatz zu den Versuchen ohne Endverankerung, mehrere, gleichmäßig verteilte Risse auf (siehe Bild A.2.3). Dennoch bildeten sich immer zwei Hauptversagensrisse mit großen Rißweiten unter den Lasten.

Bei größer werdenden Durchbiegungen lösten sich die Profilblechobergurte vom Beton ab. Die durch Betonnasen gefaßten Ränder lösten sich jedoch in keinem Fall.

4.5 Auswertung von Versuch COF 1 ohne Endverankerung

Versuch	F_u [kN]	M_{Test} [kNm]	$M_{p,R}$ [kNm]	$\frac{M_{Test}}{M_{p,R}}$	η	τ_u [kN/m ²]
COF1	18.00	13.81	38.35	0.360	0.198	53.00

Tabelle 4.10: Bestimmung von τ_u nach der Teilverbundtheorie

$$\text{mit } \tau_u = \frac{\eta_{Test} * N_{cf}}{b * L_s}$$

Es zeigt sich wie schon bei der 1. Serie, daß bei sprödem Verhalten das Ablesen der Versuchsergebnisse (Resttragfähigkeit) schwieriger ist als bei duktilem Verhalten.

Der Haftverbund wurde bei einer Last von 24.8 kN gelöst. Danach fiel die aufgebrachte Last schnell auf 15.8 kN ab, und es wurde ein deutlicher Endschlupf gemessen. Der nachfolgende "Peak" von 18.0 kN wurde als maximale Versuchslast angenommen.

Es stellte sich nur ein Hauptversagensriß unmittelbar vor der Lasteinleitung (Richtung Auflager) ein. Weitere Risse wie bei den Versuchen mit Endverankerung waren nicht vorhanden.

5. Empfehlungen für die Bauaufsicht

5.1 Erfahrungen mit der 1. Serie (Flächenverbund)

Aus den bisherigen Versuchserfahrungen mit COFRADAL-Verbunddecken ohne Endverankerung lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Grundsätzlich sollten Deckenversuche im Maßstab 1:1 gefahren werden, um Einflüsse wie Querpressung, Reibung und Krümmung mit einbeziehen zu können. Pull-Out-Versuche und Slip-Block-Tests können nur qualitative, ergänzende Ergebnisse liefern.
- Bei Versuchen mit nur einer Blechtafelbreite sollten die seitlichen Blechränder durch "Betonnasen" zurückgehalten werden, damit auch die äußeren Profilblechstege voll zur mechanischen Verdübelung beitragen. Eine andere Alternative wäre die Prüfung von mehreren überlappenden Blechtafeln in einem breiteren Deckenfeld.
- Für Verbunddeckenversuche mit Profilblechen mit so geringer Verbundfestigkeit wie bei dem hier untersuchten COFRADAL-Blech sollte auf Rißeinleitungsbleche verzichtet werden, damit der einzelne Hauptversagensriß beobachtet werden kann (Lage, Rißweite). Die Ergebnisse streuen dann aber auch stärker als bei Verwendung von Rißeinleitungsblechen.
- Als Versagenslast sollte grundsätzlich die größte Prüflast gelten, ungeachtet der Begrenzung auf die Belastung bei $L/50$ nach EC4, 10.3.1.5 (1). Die Prüflast bei $L/50$ lag bei allen unseren Versuchen auf der sicheren Seite.
- Verbunddeckenversuche mit geringer Verbundfestigkeit werden bisher durch die Forderung $0.7 < \eta < 1.0$ praktisch ausgeschlossen. Für solche Verbundplatten könnte der Anwendungsbereich alternativ durch eine Begrenzung der Schublänge auf etwa $7 \div 10 h_f$ festgelegt werden.
- Der Annex E "Teilverbundtheorie" ist grundsätzlich auch auf Verbunddecken mit sprödem Tragverhalten anwendbar, wenn nicht die unzuverlässige Haftverbundspitze, sondern die verbleibende Resttragfähigkeit bei größeren Relativverschiebungen ausgewertet wird. Das Ablesen ist jedoch trotzdem schwierig, da sich kein gleichmäßiges Niveau mit der Resttragfähigkeit F_r einstellt.
- Bei der Versuchsauswertung nach Annex E ist der Faktor $\alpha = 0.85$, der für die Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Betonfestigkeit gedacht ist, zu streichen.
- Ein zusätzlicher Abminderungsfaktor von 0.8 zur Berücksichtigung der vereinfachten Berechnung mit plastischen Spannungsblöcken analog zu EC2,

4.2.1.3.3 (12) würde zu einer etwas geringeren Biegemomententragsfähigkeit $M_{p,Rm}$ führen. Das liegt für den Nachweis bei Biegeversagen auf der sicheren Seite. Beim Längsschubversagen - das i. d. R. bei Verbunddecken maßgebend wird - erhöht sich dadurch das Verhältnis $M_{Test} / M_{p,Rm}$ und damit auch der Verdübelungsgrad η . Das führt in der Auswertung nach der Teilverbundtheorie zu einer etwas höheren Verbundfestigkeit τ_U . Deshalb kann der Abminderungsfaktor 0.8 für Verbunddecken entfallen.

5.2 Erfahrungen mit der 2. Serie (mit Endverankerungen)

Zusammenfassend können folgende Empfehlungen für Verbunddecken aus den Erfahrungen mit COFRADAL 60/0.75 - Profilblechen mit durchgeschweißten Kopfbolzendübeln als Endverankerung gegeben werden.

- EC4, Annex E ist auch auf Verbunddecken anwendbar, die erst durch Endverankerungen duktil werden.
- Die in EC4, 10.3.1.5 (1) angegebene Definition und Abgrenzung duktil/spröde hat sich bewährt, gehört aber in Abschnitt 10.3.1.1 (sie gilt allgemein).
- In der Regel reichen drei zusätzliche Versuche aus, um den Einfluß eines Parameters auszuwerten (kleinster Wert - 10%).
- Zur Erfassung aller linearen und nichtlinearen Einflüsse sind nur großmaßstäbliche 1/1-Versuche wirklich brauchbar.
- Rißeinleitungsbleche sind nicht erforderlich und liefern "beeinflusste" Versuchsergebnisse. Sie legen in vielen Fällen aber den Hauptriß genau fest und führen daher zu geringeren Streuungen der Verbundfestigkeit.
- Die Mindestbelastungsdauer von drei Stunden für die Lastwechsel ist nicht erforderlich. Aus unserer Erfahrung, auch mit anderen Profilblechen, führen schnell durchgeführte Lastwechsel mit hoher Frequenz (wir haben bereits Lastwechsel mit einer Frequenz von 5 Hz gefahren) eher zu einer niedrigeren denn zu einer höheren Tragfähigkeit der Verbunddecke (lange "Erholungsphasen" \Rightarrow Umlagerungen, Verfestigung).
- Einen Verdübelungsgrad von $\eta \approx 1.0$ konnten wir aufgrund der geringen mechanischen Verbundwirkung des COFRADAL-Blechs auch mit Endverankerung bei weitem nicht erreichen ($\eta \leq 0.735$).
- Die Bezeichnung für die Deckendicke ist im EC4 nicht einheitlich geregelt. Manchmal wird sie mit h , manchmal mit h_t bezeichnet.
- Weitere Versuche sind zukünftig noch erforderlich, um
 - den Einfluß der Profilblechdicke (Lochleibung der EV),
 - den Einfluß von Leichtbeton,
 - den Einfluß aus der Lastanordnung (Gleichstreckenlast, hohe, konzentrierte Einzellast und dynamische Belastung),
 - das Tragverhalten als vierseitig gelagerte Platte,

- die Gebrauchstauglichkeit,
 - das Schwingungsverhalten,
- und anderes mehr zu untersuchen.
- Gerade bei Verbunddecken mit Endverankerungen besteht noch Forschungsbedarf. Unter anderem sollten folgende Fragen noch genauer geklärt werden:
- Reicht ein KD als Endverankerung pro Meter Deckenbreite aus? Nach Bild 4.3 und 4.4 müßten es mindestens drei KD sein, damit das Versagen noch duktil ist.
 - Wie groß muß die durch die EV aufgenommene Blechzugkraft V_1 mindestens sein? Bei der 2. Serie wurden mit 3 KD \varnothing 19 mm mindestens 30% der plastischen Blechzugkraft verankert.
 - Kann man durchgeschweißte KD durch KD im Vorloch oder hinter dem Blech in Kombination mit Schrauben oder Setzbolzen (entsprechend der zur Zeit häufigsten Ausführung von Geschoßdecken mit Holorib-Profilblechverbunddecken) ersetzen und die im Bericht [13] genannten Dübeltragfähigkeiten auf solche Fälle übertragen?
 - Können die Versuchsergebnisse der COF-Versuche mit den Werten aus den Verbunddeckenversuchen mit Endverankerungen mit HOESCH- und HOLORIB- Profilblechen an der Ruhr-Universität Bochum [13] verglichen werden? Welche Dübeltragfähigkeiten ergeben sich, wenn man diese Versuche nach EC4, Annex E auswertet?
 - Welche Dübeltragfähigkeit ergeben sich für Kopfbolzendübel mit anderen Durchmessern (13, 16, 22 mm), und welchen Einfluß haben die Dübel-länge und die Vorblechlänge?
 - Wie weit läßt sich die Tragfähigkeit steigern und wie ändert sich die Gebrauchstauglichkeit, wenn man zusätzlich zu Endverankerungsmaß-nahmen auch noch Bewehrung einlegt?
 - Welche Dübeltragfähigkeiten ergeben sich bei durchlaufenden Verbund-decken an den Blechtafelenden? Welchen Einfluß hat die Stützweite?
 - Welchen Einfluß haben Deckenöffnungen, die ja bevorzugt in Stützen-nähe (am Deckenrand) angeordnet werden und verhindern könnten, daß die Zugkraft auf die Endverankerung übertragen werden kann?

Infolge der fortschreitenden Erfahrungen mit Versuchen an Profilblech-Verbunddecken (Deckenversuche, Pull-Out-Versuche, Slip-Block-Versuche) an der Universität Kaiserslautern konnten Versuchsaufbau und Versuchsauswertung immer weiter optimiert werden. Ein weiterer Erfahrungsaustausch und weitergehende Beratungen mit dem DIBt und seinem SVA wären nützlich.

Die sogenannte $m + k$ - Methode nach Eurocode 4, Abschnitt 7, wurde nicht verwendet, da sie nicht für Verbunddeckenplatten mit Endverankerung gedacht und ausgearbeitet ist. Sie wurde deshalb in diesem Forschungsbericht überhaupt nicht in Betracht gezogen, weil es ein wesentliches Ziel war, die COFRADAL-Verbunddecke durch Endverankerungen so zu verbessern, daß neben der höheren Tragfähigkeit ein merklich duktileres Versagensverhalten auftritt. Dieses Ziel konnte erreicht werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Bericht bezieht sich auf Verbunddeckenversuche mit dem trapezförmigen COFRADAL-Profilblech 60/0.75. Sie wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität Kaiserslautern durchgeführt. Er enthält die Auswertung von Deckenversuchen mit und ohne Endverankerung unter Berücksichtigung von Eurocode 4, Abschnitte 7 und 10 sowie der Anhänge E und F.

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Ohne Endverankerung ergibt sich kein duktiler Längsschubversagen. Wenn man nur die Resttragfähigkeit F_r verwendet, kann man diese Versuche trotzdem nach der Teilverbundtheorie des EC4 auswerten. Bei der Auswertung mit der Schublänge L_S ergeben sich folgende Werte für den Flächenverbund ($n=7$):

$$\tau_{u,m} = 39.16 \text{ kN/m}^2 \text{ (s. Tab. 3.5)}$$

$$\tau_{u,Rk} = 22.42 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_v = 1.25 \text{ nach EC4}$$

Wertet man dieselben Versuche an der Rißstelle L_R aus (s. Anhang A.1), so ergeben sich die Werte für die Verbundfestigkeit wie folgt:

$$\tau_{u,m} = 31.89 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{u,Rk} = 23.00 \text{ kN/m}^2$$

2. Mit Endverankerung, bestehend aus drei bzw. fünf durchgeschweißten Kopfbolzen $\varnothing 19 \text{ mm}$, findet duktiler Längsschubversagen statt. Die Bestimmung der Tragfähigkeit der Endverankerung kann nach der Teilverbundtheorie erfolgen, wie sie im Anhang E.4 des EC4 beschrieben ist. Bei der Auswertung mit der Schublänge L_S ergeben sich mit $\tau_{u,m} = 39.16 \text{ kN/m}^2$ folgende Werte für die Endverankerung ($n=7$) (s. 4.33):

$$P_{pb,Rm} = 33.04 \text{ kN / KD } \varnothing 19 \text{ mm}$$

$$P_{pb,Rk} = 25.07 \text{ kN / KD } \varnothing 19 \text{ mm}$$

$$\gamma_v = 1.25 \text{ nach EC4}$$

Bei der Auswertung an der Reißstelle (s. Anhang A.1) ergeben sich aufgrund des niedrigeren Mittelwertes für den Flächenverbund $\tau_{u,m} = 31.89 \text{ kN/m}^2$ deutlich höhere Dübeltragfähigkeiten:

$$P_{pb.Rm} = 37.98 \text{ kN / KD } \varnothing 19 \text{ mm}$$

$$P_{pb.Rk} = 29.60 \text{ kN / KD } \varnothing 19 \text{ mm}$$

Für die Auswertung ist jedoch zu beachten, daß konsequent Flächenverbund und EV entweder für L_S oder L_R ermittelt werden müssen. Die Auswertung an der Reißstelle L_R wurde nur zu Vergleichszwecken durchgeführt. Für die Anwendung von Verbunddecken sind allein die mit L_S bestimmten Werte praktikabel, da bei der Bemessung nur die Schublänge L_S bekannt ist.

Die charakteristischen Werte der statistischen Auswertung unterscheiden sich nur geringfügig von der Vereinfachung "kleinster Wert - 10%".

Diese EV-Tragfähigkeiten gelten zunächst nur im Zusammenwirken mit dem COFRADAL-Blech 60/0.75.

3. Der EC4 gibt im Abschnitt 7.6.1.4 eine Formel zur Berechnung der Dübeltragfähigkeit als Endverankerung an. Sie liegt - soweit wir Vergleiche aufstellen konnten - immer auf der sicheren Seite:

$$P_{pb.Rk} = 19.23 \text{ kN / KD } \varnothing 19 \text{ mm} < 25.07 \text{ kN / KD } \varnothing 19 \text{ mm}$$

4. Berechnet man für die durchgeführten Deckenversuche mit Endverankerung die charakteristische Tragfähigkeit mit den obigen Werten (Ziff. 1 und 2), dann ergibt sich auf der Widerstandsseite eine Teilsicherheit von $\gamma = 1.64$. Dies ist das Verhältnis der Versuchstraglast (Mittelwert) zum Bemessungswert (einschließlich $\gamma_V = 1.25$).
5. Eurocode 4, Anhang E, ist auch auf Verbunddeckenversuche mit dem COFRADAL 60/0.75-Blech anwendbar. Mit Endverankerung entstehen jedoch ein deutlich besseres Tragverhalten und eine nennenswert erhöhte Tragfähigkeit.
6. Das COFRADAL-Profilblech hat eine Nenndicke von insgesamt 0.75 mm. Abzüglich der Verzinkung beträgt die Kerndicke nur 0.71 mm und ist damit kleiner als nach EC4, Abschnitt 3.4.1 (2) gefordert. Wir sehen keinen Grund, diese in der Nähe der bisherigen unteren Grenze liegende Blechdicke nicht für Verbunddecken im Endzustand zu verwenden. Der Montagezustand müßte gesondert untersucht werden.

7. Einige Versuche hatten wir bereits durchgeführt, bevor die Bearbeitung des EC4 abgeschlossen war. Das ist ein Grund dafür, daß wir uns nicht in allen Punkten streng an den jetzigen Wortlaut von EC4 gehalten haben. Um vergleichbare Versuche zu erhalten, haben wir den einmal eingeschlagenen Weg beibehalten.

Wie wir in diesem Bericht dargelegt haben, gibt es einige weitere Gründe dafür, EC4 nicht in jedem Punkt streng zu beachten, weil es manchmal schwierig ist, die dort niedergelegten Bedingungen 100%ig zu erfüllen. Die genaue Einhaltung aller Versuchsbedingungen könnte weitere Versuche erforderlich machen, die Geld kosten, aber nicht viel Neues bringen dürften.

Daraus läßt sich folgern, daß es durchaus sinnvoll ist, am Zulassungsverfahren für Verbunddecken festzuhalten.

8. Das gilt sinngemäß auch für Firmen, die ältere Versuche jetzt neu auswerten, um eine Zulassung auf der Basis des EC4 zu erhalten: die Versuche müssen nicht wiederholt werden, es genügt sie neu auszuwerten. Der Teilverbund stellt dafür ein geeignetes Modell dar!
9. Die $m + k$ - Methode spielt bei Platten mit Endverankerungen keine Rolle, sie ist dafür nicht gedacht und auch nicht ausgearbeitet. Für die Versuchsplatten ohne Endverankerung hätten wir dieses halbempirische Verfahren anwenden können. Dies Vorgehen ist in unserem 1. Forschungsbericht /3/ beschrieben. Die größte Schwierigkeit ist und bleibt dabei allerdings folgende: Welchen Wert der Last-Durchbiegungs-Kurve übernimmt man in das Rechenmodell $m + k$ - Methode? Den Spitzenwert, der beim Lösen des Haftverbundes auftritt und der durch die Vorbelastung und Vorgeschichte vermutlich zu beeinflussen ist? Oder die Resttragfähigkeit auf niedrigerem Niveau, die aber keineswegs ein einheitliches Plateau darstellt?

Mit Endverankerungen hatten wir diesbezüglich keine Schwierigkeiten bei der Auswertung nach der Teilverbund-Theorie. Es stellt sich auch ein günstigeres mechanisches Verhalten ein. Dies scheint ein gutes Beispiel zu sein, wie man ein in unserem Sinne "gute" Decke herstellen kann, und EC4, Anhang E unterstützt dieses Bestreben.

Danksagung

Wir danken dem Deutschen Institut für Bautechnik für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsarbeit, ohne die sie nicht hätte durchgeführt werden können. Wir danken insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Buche für die kritischen Anmerkungen und für die insgesamt sehr gute Zusammenarbeit.

Wie danken aber auch der Firma SOLLAC für die kostenlose Bereitstellung der COFRADAL-Profilbleche.



Prof. Dr.-Ing. H. Bode



Dipl.-Ing. I. Sauerborn

(Sachbearbeiterin)



Dipl.-Ing. F. Minas

(Sachbearbeiter)

Kaiserslautern, den 14. Dezember 1993

Literatur

- [1] ENV 1994-1-1: "Eurocode 4", Design of composite and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, October 1992.
- [2] ENV 1992-1, "Eurocode 2", Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, 1992.
- [3] Bode, H. und Storck, I.: Zur Tragfähigkeit und Bemessung von Verbunddecken nach der m+k-Methode des EC4, unveröffentlichter Forschungsbericht im Auftrag des IfBt, Kaiserslautern, Oktober 1989.
- [4] Bode, H. und Sauerborn, I.: Zur Bemessung von Verbunddecken nach der Teilverbundtheorie, Stahlbau 61 (1992).
- [5] Brekelmans, J. W. P. M.: Cross experimental investigation on shear bond failure of a composite slab as part of SPRINT-project RA31 and in connection with COFRADAL 60/0.75mm from laminoirs de Strasbourg (F), IBBC-TNO, Report B-88-149, March 1988.
- [6] O'Leary, D. C.; Thomas, D. A. B. and Duffy, C. T.: Results of shear bond capacity tests on composite slabs with COFRADAL, Report 88/216, University of Salford, Department of civil engineering, April 1988.
- [7] Schanzenbach, J.: Zum Einfluß von Dübelnachgiebigkeit und Unterverdübelung auf das Tragverhalten von Verbunddurchlaufträgern im Hoch- und Industriebau, Diss. Universität Kaiserslautern, 1988.
- [8] Bode, H. und Schanzenbach, J.: Hintergrundbericht zu Eurocode 4, Abschnitte 7 und 12.3: Verbunddecken, Bericht EC4/7/88, Kaiserslautern, Oktober 1988.
- [9] Bode, H. und Storck, I.: Hintergrundbericht zu Eurocode 4 (Fortsetzung), Abschnitte 7 und 12.3: Verbunddecken, Herleitung von Nachweisverfahren zum Tragverhalten von Verbunddecken, Kaiserslautern, Juni 1990.
- [10] Roik, K.; Bergmann, R.; Haensel, J. und Hanswille, G.: Verbundkonstruktionen, Bemessung auf der Grundlage des Eurocode 4 Teil 1, Betonkalender 1993, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.
- [11] IfBt: Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren, Fassung Mai 1986.
- [12] Porter, M. L. and Ekberg, C. E.: Design recommendations for steel deck floor slabs, ASCE, Reprint 3783, 1976.

- [13] Roik, K.; Bode, H. und Hanenkamp, W.: Endverankerungen bei HOESCH- und HOLORIB-Verbunddecken, Bericht Nr. 8001, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, März 1980.
- [14] ENV 1993-1-1, "Eurocode 3", Design of steel structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings, Annex Z: Procedure for the determination of design resistance from tests, Draft September 1993.

Anhang A1: Auswertung an der Rißstelle L_R

Versuche der 1. Serie ohne Endverankerung

Test	F _r [kN]	G [kN]	g [kN/m]	M _{Test} [kNm]	$\frac{M_{Test}}{M_{p,Rm}}$	η	N _c [kN]	L _R +L ₀ [mm]	b [mm]	τ_u [kN/m ²]	ln τ_u
11A	12.34	2.10	2.05	9.20	0.375	0.110	35.40	1118	989	32.01	3.466
11B	12.47	2.10	2.05	9.94	0.406	0.146	46.98	1234	989	38.49	3.651
16LA	12.15	2.10	3.19	10.93	0.278	0.115	37.00	1390	982	27.11	3.300
16LB	12.96	2.10	3.16	11.36	0.291	0.128	41.19	1483	980	28.34	3.344
16KA	24.80	3.18	3.21	10.32	0.260	0.096	30.89	941	980	33.50	3.511
16KB	30.65	3.18	3.21	12.42	0.313	0.155	49.88	1425	980	35.71	3.576
20A	12.31	2.10	4.22	12.01	0.232	0.108	34.75	1383	989	25.41	3.235
20B	16.66	2.10	4.23	14.44	0.278	0.158	50.84	1484	991	34.57	3.543
										31.89	3.453

Tabelle A.1: Versuchsauswertung an der Rißstelle L_R nach der Teilverbundtheorie

mit: F_r = Resttragfähigkeit bei größeren Relativverschiebungen

G = Eigengewicht der Lasteinleitungsstruktur

g = Eigengewicht der Verbunddecke

η = Verdübelungsgrad im kritischen Schnitt unter der Lasteinleitung

N_c = $\eta \cdot N_{cf}$ = Normalkraft im Betonteil

$$\tau_u = \frac{N_c}{b \cdot (L_S + L_0)} = \text{Verbundfestigkeit}$$

= Flächenverbund bezogen auf die Grundfläche

Liegt der Riß außerhalb der Lasteinleitungen gilt:

$$M_{Test} = \frac{(F_r + G + g \cdot (L + 2 \cdot L_0)) \cdot L_R - g \cdot (L_R + L_0)^2}{2}$$

Liegt der Riß zwischen den Lasteinleitungen gilt:

$$M_{Test} = \frac{(F_r + G) \cdot L_R + g \cdot (L + 2 \cdot L_0) \cdot L_R - g \cdot (L_R + L_0)^2}{2}$$

Statistische Auswertung:

Mittelwert: $\bar{X} = \tau_{um} = 31.89 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Standardabweichung: $S_X = 4.557$

Variationskoeffizient: $v = S_X / \bar{X} = 0.143 > 0.10$

\Rightarrow logarithmische Normalverteilung ($Y_i = \ln X_i$)

$$\bar{Y} = 3.453$$

$$S_Y = 0.145$$

Fraktalfaktor:
$$\left. \begin{array}{l} n = 8, v = n - 1 = 7 \\ \text{Aussagewahrscheinlichkeit } p = 75\% \\ \text{5\%-Fraktile} \end{array} \right\} K_S = 2.188$$

charakteristischer Wert: $X_k = \tau_{u.Rk} = \exp(3.543 - 2.188 * 0.145) = 23.00 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Bemessungswert: $\tau_{u.Rd} = \tau_{u.Rk} / \gamma_V = 23.00 / 1.25 = 18.40 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

charakteristischer Wert nach EC4:

$$\tau_{u.Rk} = 0.9 * 25.41 = 22.87 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

mit $\min \tau_U = 25.41$ aus Tabelle A.1

Der Vergleich mit den Ergebnissen in 3.3.2 zeigt, daß bei der Auswertung an der Rißstelle L_R die errechneten Verbundfestigkeiten niedriger sind als bei der Auswertung mit der Schublänge L_S . Aufgrund der geringeren Streuung erhält man bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse aller Versuche der 1. Serie dennoch annähernd die gleichen Bemessungswerte.

Versuche der 2. Serie mit Endverankerung

Versuch	F_u [kN]	M_{Test} [kNm]	$M_{p.Rm}$ [kNm]	$\frac{M_{Test}}{M_{p.Rm}}$	η	N_c [kN]	L_R+L_0 [mm]	N_τ [kN]	V_I [kN]	$P_{pb.R}$ [kN]
COF2	34.60	22.92	37.73	0.607	0.494	155.51	1197	37.41	118.10	39.37
COF3	48.50	30.61	38.36	0.798	0.735	231.37	1011	31.60	199.77	39.95
COF4	48.90	20.48	39.40	0.520	0.397	124.97	408	12.75	112.22	37.41
COF5	40.20	21.61	39.31	0.550	0.435	136.93	598	18.69	118.24	39.41
COF6	27.04	23.06	39.25	0.587	0.481	151.41	812	25.38	126.03	42.01
16EA	34.58	23.41	40.22	0.582	0.478	153.81	1420	45.28	108.53	36.18
16EB	29.94	21.90	40.26	0.544	0.431	138.69	1386	44.20	94.49	31.50
									Mittelwert	37.98

Tabelle A.1.1: Bestimmung der Endverankerungskraft $P_{pb.R}$

mit $\tau_{um} = 31.89 \text{ kN/m}^2$ (Mittelwert der Verbundfestigkeit ohne EV aus Tab. 3.5)

Mittelwert : $\bar{x} = 37.98 \text{ kN}$

Standardabweichung: $S_x = 3.407 \text{ kN}$

Variationskoeffizient: $V = S_x / \bar{x} = 0.090$

\Rightarrow Normalverteilung genügend genau

Fraktilefaktor $\left. \begin{array}{l} n = 5, \nu = n - 1 = 4 \\ \text{Aussagewahrscheinlichkeit } p = 75\% \\ \text{5\%-Fraktile} \end{array} \right\} \Rightarrow K_s = 2.46$

charakteristischer Wert: $x_k = \bar{x} - K_s \cdot S_x$

$$x_k = 37.98 - 2.46 \cdot 3.407$$

$$\boxed{x_k = 29.60 \text{ kN} = P_{pb.Rk,s}}$$

Die statistische Auswertung mit L_S ergab einen Mittelwert von 33.04kN und einen charakteristischen Wert von 25.07kN. Daraus folgt, daß die Auswertung an der Rißstelle nicht zu wesentlich anderen Ergebnissen führt.

Anhang A.2: Fotos zur 2. Versuchsserie



Bild A.2.1: Schalung mit durchgeschweißtem Kopfbolzendübel



Bild A.2.2: Typisches Rißbild bei Versuch mit mittlerer Schublänge (Versuch COF5)

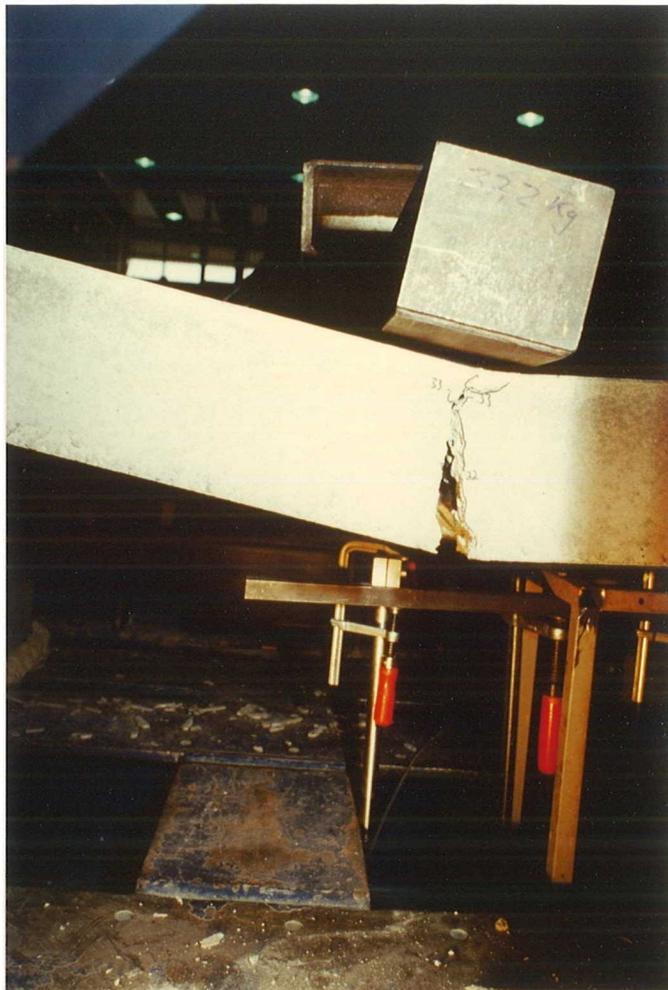


Bild A.2.3: Typischer Hauptversagensriß unter der Lasteinleitung (Versuch COF5)



Bild A.2.4: Unzerstörte Betonrippe nach Zerlegung des Versuchskörpers (COF5)



Bild A.2.5: Deutlicher Blechriß vor dem Kopfbolzendübel nach Zerlegung des Versuchskörpers (COF5)

Summary

By order of the "Deutsches Institut für Bautechnik" the applicability of Eurocode 4 and in particular of Annex E "Partial Connection Method for Composite Slabs" had to be checked by evaluating two test series with the COFRADAL sheeting, which is able to achieve ductile behaviour only in combination with additional end anchorage means. In addition proposals for improvements to the regulations on composite slabs had to be worked out.

A This paper reports about 16 slab tests with the COFRADAL 60/0.75 mm sheeting. Nine of these tests had the purpose to determine the horizontal shear strength τ_u . The seven remaining test specimens were used to derive the bearing resistance of the end anchorage $P_{pb.R}$.

It is shown that headed studs welded through the steel sheet, which are commonly provided for the beam connection, are able to enhance the resistance of composite slabs and to transform a (without end anchorage means) brittle slab into a ductile composite slab.

The main result is that Annex E can also be applied to composite slabs with brittle behaviour, if only the remaining resistance at considerable slip at the steel-concrete-interface is evaluated instead of the unreliable peak of adhesion bond.

From the experience with tests on COFRADAL composite slabs recommendations concerning the application of Eurocode 4 are determined for the national authorities. The need for future research in the field of composite slabs becomes evident. ^h

Zusammenfassung

Vom Deutschen Institut für Bautechnik in Berlin wurde der Auftrag erteilt, durch gemeinsame Auswertung alter und neuer Traglastversuche mit COFRADAL-Verbunddecken, die erst durch Endverankerungsmaßnahmen duktil werden, die Anwendung des EC4 und dabei insbesondere des Annex E "Teilverbundtheorie" für Verbunddecken zu überprüfen und gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten.

R Ingesamt werden in diesem Bericht 16 Traglastversuche mit COFRADAL 60/0.75 mm Profilblechen behandelt. Davon dienten neun Versuche der Ermittlung der Verbundfestigkeit τ_u und sieben der Ermittlung der Dübeltragfähigkeit $P_{pb.R}$ der Endverankerung.

Es wird gezeigt, daß allein die Anordnung von Kopfbolzendübeln, die zur Sicherstellung des Trägerverbundes im allgemeinen sowieso erforderlich sind, die Tragfähigkeit steigert und aus einer ohne Endverankerungsmaßnahmen spröde versagenden Decke eine duktil versagende Verbunddecke wird.

Als wesentliches Ergebnis kann gezeigt werden, daß Annex E auch auf spröde Verbunddecken angewendet werden kann, wenn nicht die unzuverlässige Haftverbundspitze sondern die verbleibende Resttragfähigkeit bei deutlichem Schlupf in der Verbundfuge ausgewertet wird.

Aus den Versuchserfahrungen mit den COFRADAL-Verbunddecken werden Empfehlungen für die Bauaufsicht über die Anwendung von Eurocode 4 abgeleitet und der weitere Forschungsbedarf zum Thema Verbunddecken aufgezeigt.