

Institut für Konstruktion und Entwurf
Stahl- Holz- und Verbundbau
Universität Stuttgart



Effiziente Dimensionierung niedriger Verbundträger

**Ulrike Kuhlmann
Gunter Hauf
Andreas Rieg**

Effiziente Dimensionierung niedriger Verbundträger

**Ulrike Kuhlmann
Gunter Hauf**

Forschungsvorhaben Nr. S 668

Stiftung Industrieforschung
Lindenallee 39a
50968 Köln

Schlussbericht

Oktober 2006



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| VORWORT | 1 |
| 1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG..... | 3 |
| 1.1 Grundsätzliches | 3 |
| 1.2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung | 3 |
| 1.3 Zielsetzung des Forschungsvorhabens..... | 5 |
| 1.4 Zulassung für Slim-Floor Träger..... | 6 |
| 2 BEGRIFFSBESTIMMUNG - NIEDRIGE VERBUNDTRÄGER UND SLIM-FLOOR TRÄGER | 7 |
| 2.1 Grundsätzliches | 7 |
| 2.2 Trag- und Verformungsverhalten..... | 7 |
| 2.3 Abgrenzung zu normalen Verbundträgern | 8 |
| 2.4 Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbereich..... | 9 |
| 3 VERFORMUNGSBERECHNUNG NIEDRIGER VERBUNDTRÄGER UND SLIM-FLOOR TRÄGER..... | 12 |
| 3.1 Ausgangssituation | 12 |
| 3.2 Linearelastische Ansätze | 14 |
| 3.3 Materiell nichtlineare Ansätze | 15 |
| 3.3.1 Grundsätzliches | 15 |
| 3.3.2 Momenten-Krümmungs-Beziehungen (M- κ -Linien) | 15 |
| 3.3.3 Berechnung mit M-N- κ -Linien an den Teilquerschnitten | 17 |
| 3.4 Schlussfolgerung | 17 |
| 4 STAND DER TECHNIK ZUR MITTRAGENDEN BETONGURTBREITE..... | 18 |
| 4.1 Tragverhalten von Gurten in Plattenbalken | 18 |
| 4.2 Definition der mittragenden Breite | 19 |
| 4.2.1 Allgemeines..... | 19 |
| 4.2.2 Mittragende Breite b_m für die Spannungsberechnung..... | 19 |
| 4.2.3 Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ | 20 |
| 4.3 Vergleich verschiedener Normen | 20 |
| 4.4 Stand der bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen | 22 |
| 4.4.1 Grundsätzliches | 22 |
| 4.4.2 Untersuchungen zur Scheibentragwirkung des Betongurts | 24 |
| 4.4.3 Untersuchungen unter Berücksichtigung des Biegezustands des Betongurts..... | 25 |
| 4.4.4 Schlussfolgerungen aus den bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen..... | 26 |
| 4.5 Die mittragende Breite für den linear-elastischen Fall | 26 |
| 4.5.1 Grundsätzliches | 26 |



| | | |
|-------------|---|-----------|
| 4.5.2 | Reiner Scheiben- und Biegezustand des Betongurts | 27 |
| 4.5.2.1 | Allgemeines | 27 |
| 4.5.2.2 | Einflüsse auf die mittragende Breite des Scheibenzustands..... | 28 |
| 4.5.2.3 | Einflüsse auf die mittragende Breite des Biegezustands | 29 |
| 4.5.3 | Kombinierte Wirkung des Scheiben- und Biegezustands | 31 |
| 4.5.3.1 | Grundsätzliches..... | 31 |
| 4.5.3.2 | Einflüsse auf die mittragende Breite..... | 34 |
| 4.5.3.3 | Verformungsbezogene mittragende Breite für elastisches Materialverhalten | 37 |
| 4.5.4 | Schlussfolgerungen aus den linear-elastischen Untersuchungen | 39 |
| 4.6 | Weiteres Vorgehen..... | 40 |
| 5 | EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN | 41 |
| 5.1 | Grundsätzliches | 41 |
| 5.2 | Versuchsprogramm | 42 |
| 5.2.1 | Geometrie der Träger und Variation der Parameter | 42 |
| 5.2.2 | Versuchsträger VT 3 und VT 4 unter Querbiegung..... | 44 |
| 5.3 | Herstellung der Versuchsträger..... | 44 |
| 5.4 | Versuchsaufbau | 46 |
| 5.5 | Messeinrichtung..... | 47 |
| 5.5.1 | DMS und DMS-Rosetten..... | 47 |
| 5.5.2 | Wegaufnehmer..... | 47 |
| 5.5.3 | Setzdehnungsmesser | 48 |
| 5.5.4 | Messpunkte..... | 49 |
| 5.6 | Versuchsdurchführung..... | 50 |
| 5.6.1 | Versuchsträger VT 1 bis VT 5 | 50 |
| 5.6.2 | Versuchsträger VT 6 | 51 |
| 5.7 | Werkstoffkennwerte | 51 |
| 5.8 | Versuchsergebnisse | 51 |
| 5.8.1 | Trag- und Verformungsverhalten | 51 |
| 5.8.1.1 | Allgemeines | 51 |
| 5.8.1.2 | Traglast- und Verformungsverhalten VT 1 | 54 |
| 5.8.1.3 | Traglast- und Verformungsverhalten VT 2 | 54 |
| 5.8.1.4 | Traglast- und Verformungsverhalten VT 3 und VT 4 | 54 |
| 5.8.1.5 | Traglast- und Verformungsverhalten VT 5 | 54 |
| 5.8.1.6 | Traglast- und Verformungsverhalten VT 6 | 54 |
| 5.8.2 | Schlupfverhalten | 54 |
| 5.8.3 | Rissverhalten | 55 |
| 5.8.4 | Rissverhalten des Versuchsträgers unter Querbiegung | 56 |
| 5.8.5 | Messung der Betondehnungen auf der Trägeroberseite | 56 |
| 5.8.6 | Trag- und Verformungsverhalten unter Einwirkung eines Stützmomentes... 58 | |
| 5.9 | Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsergebnisse | 59 |
| 5.10 | Experimentelle Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern..... | 59 |
| 6 | VERFORMUNGSBEZOGENE MITTRAGENDE BREITE..... | 61 |
| 6.1 | Einführung | 61 |
| 6.1.1 | Allgemeines..... | 61 |



| | | |
|------------|---|-----------|
| 6.1.2 | Ausgangssituation..... | 61 |
| 6.1.3 | Vorgehen zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ | 62 |
| 6.2 | Analytisches Berechnungsmodell zur Verformungsberechnung | 64 |
| 6.2.1 | Allgemeines..... | 64 |
| 6.2.2 | Beschreibung des analytischen Berechnungsmodells..... | 65 |
| 6.2.2.1 | Grundsätzliches..... | 65 |
| 6.2.2.2 | Bisherige Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern..... | 66 |
| 6.2.2.3 | System..... | 66 |
| 6.2.2.4 | Implementierte Materialmodelle | 67 |
| 6.2.2.5 | M- κ -Linien und Breite des Betongurts | 68 |
| 6.2.2.6 | Verformungsberechnung | 71 |
| 6.2.3 | Voraussetzungen und Vereinfachungen | 71 |
| 6.2.4 | Verifikation des analytischen Berechnungsmodells für Slim-Floor Träger | 72 |
| 6.2.4.1 | Grundsätzliches..... | 72 |
| 6.2.4.2 | Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen | 72 |
| 6.2.4.3 | Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen [Kuhlmann, Fries 2001a]..... | 74 |
| 6.2.4.4 | Vergleich mit weiteren Slim-Floor Trägerversuchen..... | 75 |
| 6.2.4.5 | Fazit der Vergleiche mit Versuchsergebnissen | 77 |
| 6.2.5 | Ergebnisse aus der Untersuchung mit niedrigen Verbundträgern | 77 |
| 6.3 | Parameterstudie im Anwendungsbereich des Hochbaus | 79 |
| 6.3.1 | Allgemeines..... | 79 |
| 6.3.2 | Untersuchter Parameterbereich | 79 |
| 6.3.2.1 | Parametervariation | 79 |
| 6.3.2.2 | Träger nach Zulassung für Slim-Floor Träger | 80 |
| 6.3.3 | Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ | 80 |
| 6.3.3.1 | Allgemeines | 80 |
| 6.3.3.2 | Ausnutzungsgrad des Verbundträgers M/Mu | 80 |
| 6.3.3.3 | Betonzugfestigkeit f_{ct} | 82 |
| 6.3.3.4 | Streckgrenze des Baustahls..... | 83 |
| 6.3.3.5 | Einfluss der Betongurtdicke h_c | 83 |
| 6.3.3.6 | Seitenverhältnis des Betongurts b/L..... | 84 |
| 6.3.3.7 | Einfluss des Baustahlquerschnitts..... | 85 |
| 6.3.3.8 | Einfluss des Längsbewehrungsgehalts A_s | 86 |
| 6.3.3.9 | Druckfestigkeit des Betongurts | 86 |
| 6.4 | Vergleich mit bestehenden Normregelungen..... | 87 |
| 6.4.1 | Allgemeines..... | 87 |
| 6.4.2 | Vergleich mit EN 1994-1-1 bzw. DIN 18800-5 | 87 |
| 6.4.2.1 | Vergleichsrechnung für Versuchsträger | 87 |
| 6.4.2.2 | Statistische Auswertung der Parameteranalyse | 89 |
| 6.4.3 | Schlussfolgerung aus dem Vergleich mit den bestehenden Normregelungen | 89 |
| 6.5 | Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite | 90 |
| 6.5.1 | Grundsätzliches | 90 |
| 6.5.2 | Unterschiedlicher Berechnungsansatz für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger | 92 |
| 6.5.3 | Genauer Berechnungsansatz (Stufe 1)..... | 92 |
| 6.5.3.1 | Bestimmung der maßgebenden Faktoren | 92 |
| 6.5.3.2 | Statistische Auswertung des Berechnungsansatzes | 94 |
| 6.5.4 | Vereinfachter Berechnungsansatz (Stufe 2) | 95 |



| | |
|---|------------|
| 6.5.4.1 Bestimmung der maßgebenden Faktoren | 95 |
| 6.5.4.2 Statistische Auswertung des Berechnungsansatzes | 96 |
| 6.5.5 Schlussfolgerung aus dem entwickelten Berechnungsansatz | 97 |
| 6.6 Berechnungsansätze für niedrige Verbundträger | 97 |
| 6.6.1 Grundsätzliches | 97 |
| 6.6.2 Genauer Berechnungsansatz (Stufe 1)..... | 98 |
| 6.6.3 Vereinfachter Berechnungsansatz (Stufe 2) | 99 |
| 6.7 Zusammenfassung..... | 101 |
| 7 VORSCHLAG ZUR QUASI-ELASTISCHEN VERFORMUNGSBERECHNUNG | 102 |
| 7.1 Grundsätzliches | 102 |
| 7.2 Bestehende Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern | 103 |
| 7.3 Beschreibung des quasi-elastischen Berechnungsvorschlags | 103 |
| 7.3.1 Allgemeines..... | 103 |
| 7.3.2 Effektives Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ | 103 |
| 7.3.3 Quasi-elastische Verformungsberechnung | 104 |
| 7.3.4 Voraussetzungen und Annahmen..... | 104 |
| 7.4 Abminderungsfaktor α_c zur quasi-elastischen Verformungsberechnung | 105 |
| 7.4.1 Allgemeines..... | 105 |
| 7.4.2 Einflüsse auf den Abminderungsfaktor α_c | 107 |
| 7.4.2.1 Grundsätzliches..... | 107 |
| 7.4.2.2 Ausnutzungsgrad M/M_u | 107 |
| 7.4.2.3 Betonzugfestigkeit f_{ct} | 107 |
| 7.4.2.4 Streckgrenze f_y des Stahlträgers | 108 |
| 7.4.2.5 Dicke des Betongurts h_c | 109 |
| 7.4.2.6 Seitenverhältnis des Betongurts b/L | 109 |
| 7.5 Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor α..... | 110 |
| 7.5.1 Herleitung des Berechnungsansatzes | 110 |
| 7.5.2 Vergleich mit analytischen Berechnungsmodell..... | 112 |
| 7.5.3 Vergleich mit Versuchsträger VT 1 | 115 |
| 7.5.4 Schlussfolgerungen aus dem quasi-elastischen Berechnungsansatz | 115 |
| 7.6 Berechnungsansatzes für niedrige Verbundträger..... | 116 |
| 7.7 Zusammenfassung..... | 117 |
| 8 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN | 118 |
| 8.1 Grundsätzliches | 118 |
| 8.2 Numerisches Modell | 118 |
| 8.3 Untersuchung des Tragverhaltens | 119 |
| 8.3.1 Allgemeines..... | 119 |
| 8.3.2 Versuchsträger VT 1 – mittige Belastung..... | 120 |
| 8.3.3 Versuchsträger VT 4 – exzentrische Belastung..... | 121 |
| 9 SYSTEMOPTIMIERUNG UND ANSCHLUSSKONSTRUKTIONEN FÜR SLIM-FLOOR KONSTRUKTIONEN | 122 |
| 9.1 Allgemeines | 122 |
| 9.2 Konstruktionsgrundsätze..... | 122 |



| | |
|---|------------|
| 9.2.1.1 Allgemeines | 122 |
| 9.2.1.2 Anschlusswahl und Montage | 122 |
| 9.3 Anschlüsse an Stützen | 123 |
| 9.3.1 Allgemeines..... | 123 |
| 9.3.2 Stirnplattenanschluss | 123 |
| 9.3.2.1 Gelenkige Anschlusskonstruktion..... | 123 |
| 9.3.2.2 Anschlusskonstruktion – Ausbildung einer Durchlaufwirkung | 125 |
| 9.3.3 Knaggenanschluss..... | 126 |
| 9.3.3.1 Gelenkige Anschlusskonstruktion..... | 126 |
| 9.3.3.2 Anschlusskonstruktion – Ausbildung einer Durchlaufwirkung | 129 |
| 9.4 Anschlüsse an Wände | 130 |
| 9.4.1 Gelenkige Anschlusskonstruktion | 130 |
| 9.4.2 Anschlusskonstruktion – Ausbildung einer Durchlaufwirkung..... | 132 |
| 10 BEISPIEL EINER DURCHBIEGUNGSBERECHNUNG | 133 |
| 10.1 Allgemeines | 133 |
| 10.2 System und Querschnitt des Beispielträgers | 133 |
| 10.3 Durchbiegungsberechnung mit analytischen Berechnungsmodell..... | 134 |
| 10.4 Durchbiegungsberechnung nach dem elastischen Ansatz | 135 |
| 10.5 Nicht-lineare Berechnung (Berechnungsstufe 1 und 2)..... | 137 |
| 10.6 Berechnung nach [EN 1994-1-1] bzw. [DIN V 18800-5] | 137 |
| 10.7 Vergleich der Ergebnisse | 138 |
| 11 ZUSAMMENFASSUNG | 140 |
| 11.1 Allgemeines | 140 |
| 11.2 Analytische Modellbildung..... | 140 |
| 11.3 Experimentelle Ergebnisse | 141 |
| 11.4 Ausblick | 141 |
| 11.5 Danksagung..... | 142 |
| 12 LITERATURVERZEICHNIS | 143 |
| 13 ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 150 |
| 14 TABELLENVERZEICHNIS | 154 |



Vorwort

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung und Förderung von Verbundträgersystemen niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern durch eine effiziente Dimensionierung. Durch eine genaue Erfassung der mittragenden Breite des Betongurts soll u. a. die Berechnung realistischer Steifigkeits- und Durchbiegungswerte für diese neuen wirtschaftlich interessanten Verbundträgerformen ermöglicht werden, da bisher rechnerisch zu groß ermittelte Verformungen die Verbreitung der angeblich zu „weichen“ Träger entscheidend behindern. Insbesondere für Verbundflachdecken mit Slim-Floor Trägern soll die Konkurrenzsituation gegenüber konventionellen Stahlbeton-Flachdecken durch die Entwicklung einfacher Bemessungskonzepte für den Nachweis der Verformungen verbessert werden.

Das Forschungsvorhaben wurde **gefördert** von der

Stiftung Industrieforschung
Lindenallee 39a
50968 Köln

sowie durch die **Barspenden** folgender Ing.-Büros und Firmen

Fa. Haller Industriebau GmbH (Villingen-Schwenningen),
Fa. Köster & Co. GmbH (Ennepetal),
Harrer Ingenieure GmbH, Beratende Ingenieure VBI (Karlsruhe),
Leonhardt, Andrä und Partner GmbH, Beratende Ingenieure VBI (Stuttgart),
Ingenieurbüro Kuhlmann - Gerold - Kraus – Eisele (Nellingen),
Ingenieurgruppe Bauen (Karlsruhe),
Spannverbund GmbH (Waldems),
stahl+verbundbau gmbh (Dreieich)

und durch **Materialspenden** folgender Firmen

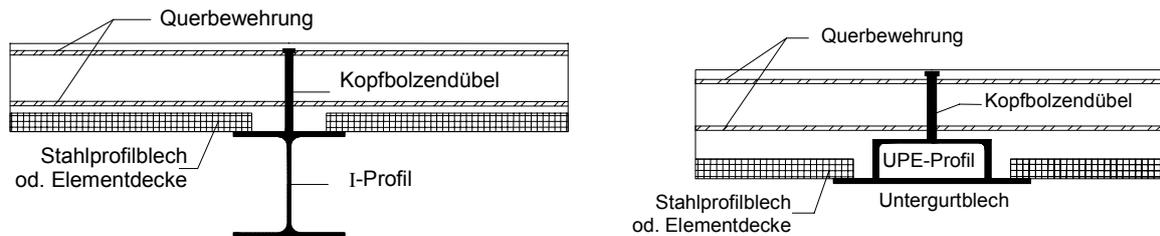
Fa. Haller Industriebau GmbH (Villingen-Schwenningen),
Fa. Köster & Co. GmbH (Ennepetal),
Fa. Peiner Träger GmbH (Peine)



1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Grundsätzliches

Wirtschaftliche Vorteile als auch architektonische Bedürfnisse führen vermehrt zum Einsatz von Verbundträgern mit niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern, siehe Abbildung 1.1. Diese stellen eine wirtschaftliche Alternative zu herkömmlichen Stahlbetonträgern und -decken dar. Im Vergleich zu diesen haben die hier betrachteten Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger entscheidende Vorteile wie eine schnelle Montage, eine hohe Tragfähigkeit, eine geringe Bauhöhe etc.



(a) Verbundträger niedriger Bauhöhe

(b) Slim-Floor Träger

Abbildung 1.1: Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger

Die Planung und Dimensionierung dieser Träger in der Praxis wird i. d. R. entsprechend dem Vorgehen bei normal hohen Verbundträgern durchgeführt. Aufgrund der geringen Bauhöhe bzw. des vergleichsweise dicken Betongurts haben Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger jedoch ein anderes Trag- und Verformungsverhalten als normal hohe Verbundträger. Deshalb sind die bekannten Verfahren zur Dimensionierung von Verbundträgern, die für hohe Verbundträger abgeleitet wurden, für niedrige Verbundträger besonders hinsichtlich der mittragenden Betongurtbreite unzutreffend. Auf Basis dieser Verfahren berechnete Verformungen sind unrealistisch groß und werden in dieser Größe in der Realität nicht beobachtet. Zur Einhaltung der gängigen Verformungsgrenzwerte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind deshalb in vielen Fällen größere Querschnitte erforderlich, als für den Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderlich sind. Die hohe Wirtschaftlichkeit dieser Trägerformen kann dann nicht ausgenutzt werden.

Im Gegensatz zur Planungspraxis von Stahlbetonträgern und -decken ist der Berechnungsaufwand von Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern vergleichsweise hoch. Hierdurch entsteht diesen Bauweisen und den beteiligten mittelständischen Stahlbauunternehmen ein Wettbewerbsnachteil.

1.2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Verbundträger niedriger Bauhöhe und v. a. Slim-Floor Träger stellen im Vergleich zu normal hohen Verbundträgern schlanke Bauwerke dar. Die größere Schlankheit und die große Tragfähigkeit dieser Bauteile führen dazu, dass für die Nutzung die Verformungen dieser Träger grundsätzlich eine größere Bedeutung haben als bei hohen Trägern. Im Zusammenhang mit unzutreffenden Annahmen der verwendeten Berechnungsverfahren wird bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern daher häufig der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und insbesondere der Nachweis der Durchbiegung für die Dimensionierung der Verbundträger maßgebend [Kuhlmann, Fries 2001a], [Kuhlmann, Fries 2001b] und [Rieg 2004 a]. Die hohe Tragfähigkeit dieser Verbundträger kann dann nicht ausgeschöpft werden.

In der Planungspraxis werden die Durchbiegungen der betrachteten Verbundträger i. d. R. mit den üblichen elastischen Rechenverfahren des Verbundbaus, wie z. B. dem Gesamtquerschnitts- oder Teilquerschnittsverfahren [Haensel 1975], [Trost 1968], [Sattler 1959] ermittelt. Die Voraussetzungen dieser Verfahren sind [Rieg 1998]:

- Die Teilquerschnitte Beton und Baustahl verhalten sich linear elastisch.
- Der Betongurt ist ungerissen (Zustand I).
- Die Biegesteifigkeit des Betongurts $I_{c,0}$ ist vernachlässigbar.

Im Falle von Verbundträgern mit niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern sind diese Voraussetzungen jedoch nicht eingehalten [Rieg 1998].

Aufgrund der geometrischen Verhältnisse ist die Biegesteifigkeit des Betongurts $I_{c,0}$ so groß ($I_{c,0} \approx 0,3 \div 0,6 \cdot I_{i,0}$), dass sie nicht vernachlässigt werden kann und der Betongurt ein so großes Biegemoment M_c anzieht, dass bereits im Gebrauchszustand unter vergleichsweise kleinen Lasten Risse auch im Feldbereich des Betongurts entstehen, siehe Abbildung 1.2. Der Betongurt befindet sich im Zustand II und die Elastizitätstheorie verliert ihre Gültigkeit.

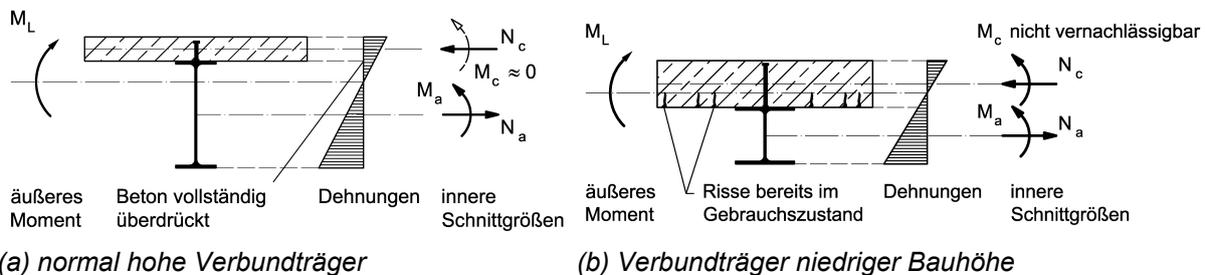


Abbildung 1.2: Tragverhalten von Verbundträgern [Rieg 2004 a]

Großen Einfluss auf die berechnete Durchbiegung hat hierbei u. a. die mittragende Breite des Betongurts. In den Normen [EN 1994-1-1], [DIN V 18800-5] und der einschlägigen Literatur [Haensel 1975], [Trost 1968], [Sattler 1959] wird die mittragende Breite sehr konservativ, d. h. zu klein, und pauschal abgeschätzt. Dadurch ergeben sich große rechnerische Durchbiegungen, die die realen Verformungen sehr stark überschätzen und bei ausgeführten Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern in der Realität nicht beobachtet werden. Wie erste Untersuchungen zeigen, ist die mittragende Breite dabei sehr stark von der Rissbildung im Beton und der Biegesteifigkeit des Betongurts abhängig [Kuhlmann, Rieg 2004a]. Diese Einflüsse werden von den bestehenden Regelungen der Verbundbaunormen und der einschlägigen Literatur jedoch nicht berücksichtigt.

Die Fehleinschätzung bzgl. der mittragenden Breite bei der Verformungsberechnung der betrachteten Verbundträger führt in vielen Fällen dazu, dass die Verformungen dieser Träger deutlich zu groß berechnet werden. Zur Einhaltung der bestehenden Verformungsgrenzwerte muss dann aus diesem Grund häufig ein steiferer Querschnitt ausgeführt werden, als dies für den Nachweis der Tragfähigkeit erforderlich ist. Der Einfluss der mittragenden Breite nimmt dabei mit abnehmender Höhe des Verbundträgers bzw. zunehmender Dicke des Betongurts zu. Dies liegt daran, dass in beiden Fällen der Steifigkeitsanteil des Betongurts an der Gesamtsteifigkeit des Betongurts relativ zunimmt. Bei sehr niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern, die den Extremfall niedriger Verbundträger darstellen, wirkt sich somit die Fehleinschätzung der mittragenden Breite stärker aus als bei hohen Verbundträgern [Kuhlmann, Rieg 2004a].

Die dargestellte Problemstellung bei Verbundträgern herkömmlicher Bauart mit niedriger Bauhöhe trifft um so mehr auf Slim-Floor Träger zu, da hier der Einfluss der Biegesteifigkeit

des Betongurts $I_{c,0}$ und des Betonmoments M_c auf das Tragverhalten des Verbundträgers noch größer ist. Untersuchungen zur optimierten Bemessung von deckengleichen Verbundträgern mit Hutprofilen nach Abbildung 1.1 (b) zeigen, dass die Missachtung dieser Einflüsse zur Fehleinschätzung bei der Ermittlung realistischer Verformungen führen und eine wirtschaftlich optimale Bemessung dieser Trägerformen verhindern [Kuhlmann, Fries 2001a], [Kuhlmann, Fries 2002], [Fries 2001].

Die in der praktischen Planung verwendeten Verfahren zur Verformungsberechnung von Verbundträgern sind dabei im Vergleich zu denjenigen bei Stahlbetontragwerken mit einem großen Aufwand verbunden. Bei Stahlbetonträgern und -decken wird der Nachweis, dass deren Verformungen die ordentliche Nutzung der damit gebildeten Gebäude nicht behindern, i. A. durch die simple Einhaltung von Schlankheitskriterien vorgenommen. Dadurch erfahren Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger bereits in der Planung Nachteile. Dies wirkt sich direkt negativ auf die Marktchancen kleiner und mittlerer Stahlbauunternehmen aus.

1.3 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Förderung von Verbundträgern niedriger Bauhöhe durch eine effiziente Dimensionierung. Durch eine genaue Erfassung der mittragenden Breite des Betongurts soll u. a. die Berechnung realistischer Steifigkeits- und Durchbiegungswerte für diese betrachteten Verbundträgerformen ermöglicht werden. Die Entwicklung eines einfachen Bemessungskonzepts für den Verformungsnachweis insbesondere von Verbundflachdecken mit Slim-Floor Trägern soll den Planungsaufwand dieser Bausysteme vereinfachen und so zu deren weiteren Verbreitung beitragen.

Für Verbundträger niedriger Bauhöhe soll ein anwenderfreundliches Verfahren zur realistischen Ermittlung der mittragenden Betongurtbreite für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung der Eigenbiegesteifigkeit und der Rissbildung des Betongurts entwickelt werden, das es erlaubt, die hohe Wirtschaftlichkeit von Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern auszunutzen. Die Anwendung der Schlankheitskriterien von Stahlbeton-Flachdecken zum einfachen Verformungsnachweis bei Verbundflachdecken mit Slim-Floor Trägern soll geprüft werden.

Auf Basis der angestrebten Forschungsergebnisse kann die mittragende Betongurtbreite von Verbundträgern niedriger Bauhöhe im Gebrauchszustand realistischer, d. h. größer, bestimmt werden. Damit lassen sich die Steifigkeit und die Verformungen dieser Verbundträger wirklichkeitsnah erfassen. Die rechnerischen Verformungen werden im Vergleich zu den bestehenden Regelungen geringer und der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit in vielen Fällen für die Dimensionierung des Querschnitts dieser Verbundträger nicht mehr maßgebend. Eine optimale Abstimmung zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit wird damit ermöglicht. Die Vorteile in der Fertigung und der Montage sowie die gute Wirtschaftlichkeit dieser Verbundträgerformen können dann ausgenutzt werden. Eine rasche und weite Verbreitung dieser Verbundträgerformen sowie die Automatisierung im Bauablauf werden gefördert.



1.4 Zulassung für Slim-Floor Träger

Für Verbundflachdecken mit UPE-Profilen (als System der Peiner Träger GmbH) wurde 2005 eine Zulassung [DIBt 2005] eingeführt, die die Anwendung und Verbreitung dieses Deckensystems vereinfachen und unterstützen soll.

Da die Bemessung für Verbundträger in Bezug auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit im Vergleich zu Stahlbetonkonstruktionen relativ umfangreich ist, (so gibt es z.B. keine vereinfachten Nachweise für Grenzschlankheiten für den Nachweis der Durchbiegung), sind in der Zulassung Bemessungstabellen angegeben, die nach Auswahl des Systems, der Stützweite und der Belastung Querschnittsangaben und -abmessungen liefern. Die Aufbereitung ist somit sehr anwenderfreundlich gestaltet und bietet gegenüber der Bemessung nach Norm große Vorteile durch die einfache Querschnittsbestimmung.

Als Grundlage für die Erstellung der Zulassung gilt [DIN V 18800-5] sowie [DIN 1045-1]. Die Durchbiegungsberechnungen liegen daher durch die konservative Abschätzung der mittragenden Breite nach Norm auf der sicheren Seite, neuere Kenntnisse [Rieg 2006] jedoch zeigen, dass für Verbundflachdecken die Durchbiegungsberechnung weiter optimiert und damit die Wirtschaftlichkeit weiter gesteigert werden kann.

2 Begriffsbestimmung - niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger

2.1 Grundsätzliches

Die Definition von niedrigen Verbundträgern kann nicht exakt gefasst werden. Der Übergang von hohen Verbundträgern zu niedrigen ist fließend. In [Kuhlmann, Fries 2001b] werden zwei Kriterien für die Abgrenzung von niedrigen und hohen Verbundträgern genannt. Verbundträger niedriger Verbundträger liegen dann vor, wenn

1. der Betongurt im Bereich positiver Momente bereits unter Gebrauchslasten gerissen ist oder
2. die Biegesteifigkeit I_c des Betongurts nicht vernachlässigbar ist.

Gerade zuletzt genanntes Kriterium unterliegt der Auslegung des Anwenders. Aber auch das erst genannte Kriterium stellt keine scharfe Trennung dar, denn der Einfluss der Rissbildung auf das Verformungsverhalten und die mittragende Breite ist von der Intensität der Rissbildung abhängig.

Einfacher ist die Definition von Slim-Floor Trägern. Hierbei handelt es sich um so genannte deckengleiche Träger, bei denen der Stahlträger im Betongurt integriert ist. Generell kann hierbei zwischen Slim-Floor Trägern in Stahl- und Verbundbauweise unterschieden werden [Kuhlmann, Rieg 2003]. Bei der Verbundbauweise wird zwischen Stahlträger und Beton durch Anordnung von Verbundmittel eine planmäßige Verbundwirkung aktiviert. Der Slim-Floor Träger wirkt hierbei als Verbundträger. Bei der Stahlbauweise werden zwischen dem Slim-Floor Träger und der quergespannten Decke keine Verbundmittel angeordnet und somit keine planmäßige Verbundwirkung in Ansatz gebracht. Der Slim-Floor Träger wirkt hier mehr oder weniger als reiner Stahlträger. Bei der Stahlbauweise werden i. d. R. großformatige Stahlbeton- oder Spannbetonfertigteile (z. B. Spannbetonhohldielen) verwendet, die auf der Baustelle durch einen Fugenverguss miteinander und dem Slim-Floor Träger verbunden werden. Bei der Verbundbauweise wird die quergespannte Decke im Gegensatz dazu in Ortbeton oder mit Halbfertigteilen und ergänzendem Ortbeton ausgeführt, so dass die Verbundwirkung zwischen Slim-Floor Träger und Beton hergestellt wird.

Die Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben beziehen sich größtenteils auf Slim-Floor Träger. Bereits bestehende und entwickelte Ergebnisse [Kuhlmann, Rieg 2004a] für niedrige Verbundträger werden aber ebenfalls zusammengefasst und dargestellt.

2.2 Trag- und Verformungsverhalten

Bei normal hohen Verbundträgern wird im Gebrauchszustand das äußere Moment hauptsächlich durch das innere Kräftepaar aus der Verbundwirkung (Druckkraft N_c im Beton und Zugkraft N_a im Baustahl) und ein Biegemoment M_a im Baustahl abgetragen. Das Biegemoment M_c und die Biegesteifigkeit I_c des Betongurts sind hierbei vernachlässigbar. Der Betongurt ist – zumindest im Gebrauchszustand – in Bereichen positiver Momente vollständig überdrückt und frei von Rissen (Zustand I), siehe Abbildung 1.2 (a).

Im Gegensatz dazu ist bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern die Biegesteifigkeit I_c des Betongurts so groß, dass sie nicht vernachlässigt werden kann und der Betongurt so große Biegemomente M_c erhält, dass er bereits im Gebrauchszustand Risse bekommt, siehe Abbildung 1.2 (b). Das Tragverhalten von niedrigen Verbundträgern

und Slim-Floor Trägern liegt somit zwischen dem hoher Verbundträger und dem gewöhnlicher Stahlbetonträgern. Tabelle 2.1 zeigt die Verteilung der Schnittgrößen bei hohen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse hat bei niedrigen Verbundträgern und v. a. Slim-Floor Trägern die untere Längsbewehrung des Betongurts einen nennenswerten Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten des Verbundträgers.

Folgende zwei Gründe sind neben weiteren hauptsächlich für das vergleichsweise große Betonmoment M_c von niedrigen Verbundträgern verantwortlich:

- Zur Begrenzung der Rissbreite und evtl. für einen integrierten Brandschutz haben die betrachteten Träger einen größeren Längsbewehrungsgrad als hohe Verbundträger.
- Der Hebelarm der unteren Längsbewehrung ist bei den betrachteten Trägern vergleichsweise groß. Der Beitrag der Längsbewehrung zur Momententragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundquerschnitts ist somit größer.

Tabelle 2.1: Vergleich der Teilschnittgrößen von Verbundträgern und Slim-Floor Trägern

| Teilschnittgrößen | | M_c | M_a | $M_v = N_a \cdot a_{st}$ |
|-------------------|--------------------|-------|-------|--------------------------|
| GZT ¹⁾ | hohe Verbundträger | 5 % | 5 % | 90 % |
| | Slim-Floor Träger | 30 % | 5 % | 65 % |
| GZG ²⁾ | hohe Verbundträger | 5 % | 30 % | 65 % |
| | Slim-Floor Träger | 30 % | 10 % | 60 % |

¹⁾ Grenzzustand der Tragfähigkeit

²⁾ Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Aufgrund der ausgeprägten Rissbildung des Betongurts bei niedrigen Verbundträgern bereits im Gebrauchszustand muss für eine realistische Berechnung von Verformungen das nicht-lineare Verhalten des Betongurts berücksichtigt werden. Elastische Berechnungsverfahren [Haensel 1975], [Trost 1968] und [Sattler 1959] können hier nur Näherungslösung sein, da sie bei den betrachteten Querschnittsformen i. A. zu einer Unterschätzung der Verformungen führen [Kuhlmann, Fries 2001a].

2.3 Abgrenzung zu normalen Verbundträgern

Verbundträger niedriger Bauhöhe liegen bzgl. ihres Trag- und Verformungsverhaltens zwischen normal hohen Verbundträgern und Stahlbetonträgern. Vergleichbar liegt das Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern zwischen dem von normalen Verbundträgern und Stahlbetonflachdecken [Fries 2001]. Es gibt jedoch keine scharfe Grenze zwischen diesen Tragelementen. Der Übergang ist fließend.

In [Kuhlmann, Fries 2001b] werden zur Abgrenzung zwei Kriterien vorgeschlagen. Verbundträger niedriger Bauhöhe liegen dann vor, wenn

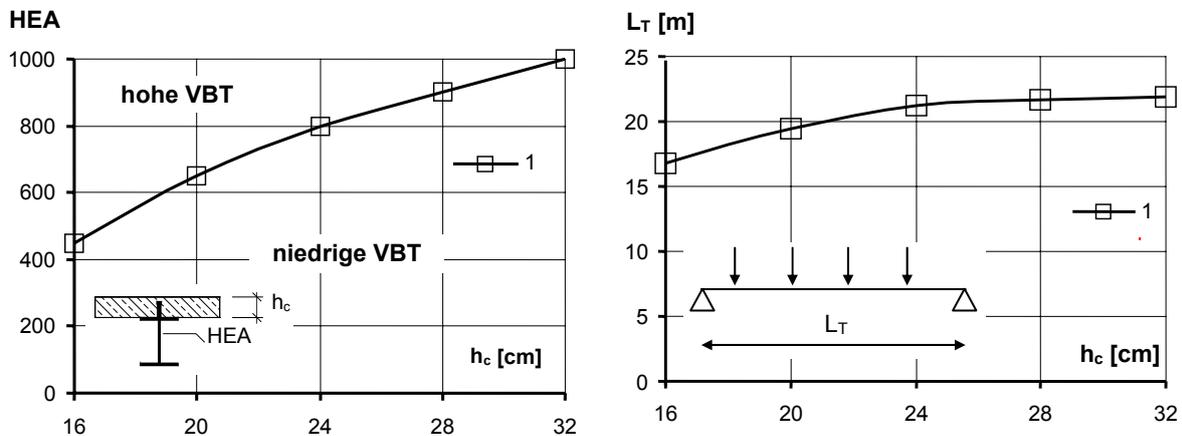
- der Betongurt bereits unter Gebrauchslasten im Bereich positiver Momente Risse an der Unterseite aufweist, siehe Linie 1 in Abbildung 2.3 (a).

In Abbildung 2.3 (a) ist die Abgrenzung zwischen niedrigen und hohen Verbundträgern für konventionelle Verbundquerschnitte mit Stahlträgern der Profilverihe HEA in Abhängigkeit der

Dicke des Betongurts h_c dargestellt. Bei Querschnitten, die auf Linie 1 liegen, ist im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit an der Unterseite des Betongurts gerade die Zugfestigkeit des Betons erreicht. Querschnitte, die darunter liegen, haben im Gebrauchszustand Risse, Querschnitte darüber bleiben rechnerisch im Zustand I.

Somit sind unterhalb der Linien niedrige Verbundträger angeordnet und oberhalb hohe Verbundträger. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um eine strikte Trennung dieser Trägerformen entlang dieser Linien handelt, sondern vielmehr eine Größenordnung der Querschnitte niedriger Verbundträger angeben soll.

Abbildung 2.3 (b) zeigt die möglichen Spannweiten im Grenzzustand der Tragfähigkeit der in Teilbild (a) durch die Linie 1 beschriebenen Querschnitte für hochbautypische Randbedingungen: Nutzlast $p = 3,5 \text{ kN/m}^2$, Beton C 30/37, Baustahl S 355. Der Trägerabstand entspricht der maximalen Deckenspannweite für die gewählte Deckenstärke unter den beschriebenen Randbedingungen. Wie zu erkennen ist, erreichen Verbundträger niedriger Bauhöhe Spannweiten von $10 \div 15 \text{ m}$. Das Anwendungsgebiet dieser Träger im Hochbau ist entsprechend groß [Kuhlmann, Fries 2001b].



(a) Abgrenzung in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrie

(b) mögliche Spannweiten

Linie 1: beginnende Rissbildung im GZG

Abbildung 2.3: Abgrenzung zwischen niedrigen und hohen Verbundträgern

2.4 Wirtschaftlichkeit und Anwendungsbereich

Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger werden im Büro- und Industriebau sehr effektiv eingesetzt [Bauberatung Stahl 1996], [Muess 1996], [Baehre, Pepin 1995], [Tschemmerneegg, Huber 1996], [Lu, Mäkeläinen 1996], [Müller, Feldmann 1997], [Huber, Obholzer 1999], [Arbed 1997], [Baumgärtner et al 1997]. Sie kombinieren die Vorteile der Stahl- und Stahlbetonbauweise. Durch den Vorteil der flexiblen Grundrissgestaltung und den freien architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten (keine Unterzüge, geringe Bauhöhe, ebene Deckenuntersicht, etc.) können gerade Verbundflachdecken sehr effizient eingesetzt werden. Welche große Chancen die Industrie in diesen neuen Deckensystemen sieht, zeigen eine ganze Reihe von Systementwicklungen und Zulassungsverfahren in diesem Bereich, die auch bereits zu ersten Anwendungen geführt haben.

Verbundträger niedriger Bauhöhe bzw. Verbundflachdecken besitzen im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbeton-Unterzugsdecken entscheidende Vorteile [Kuhlmann, Fries 2001a], [Fries 2001] und [Kuhlmann, Fries 2000]:

- Der hohe Grad der Vorfertigung der Baustahlträger und Elementdecken bzw. Profilbleche ermöglicht eine schnelle Montage und eine geringe Bauzeit.
- Ein wirtschaftlich günstiger Einsatz von Betonfertigteileplatten und Stahlprofilblechen vereinfacht die Herstellung der Schalung und Rüstung.
- Die Vorfertigung im Werk besteht zu großen Teilen aus automatischen Fertigungsprozessen und fördert dadurch die Automatisierung des Bauablaufs.
- Ein einfacher Anschluss an Stahlskelettkonstruktionen ohne spezielle Einleitungsstrukturen wie Dübelleisten oder ähnlichem ist möglich.
- Die geringere Bauhöhe des Deckensystems bedeutet eine geringere Geschoßhöhe, d. h. geringere Fassadenflächen bzw. unter Umständen zusätzliche Geschosse.
- Die höhere Tragfähigkeit ermöglicht größere Spannweiten.
- Ein geringeres Eigengewicht der Deckenkonstruktion ermöglicht Ersparnisse bei der Ausführung von Stützen, Wänden und Fundamenten.

Verbundflachdecken, wie in Abbildung 1.1 (b) dargestellt, besitzen darüber hinaus weitere Vorteile gegenüber Stahlbeton-Flachdecken [Kuhlmann, Fries 2001a], [Fries 2001], [Kuhlmann, Fries 2000], [Bauberatung Stahl 1996], [Muess 1996], [Baehre, Pepin 1995], [Tschemmerneegg, Huber 1996], [Lu, Mäkeläinen 1996], [Müller, Feldmann 1997], [Huber, Obholzer 1999], [Arbed 1997], [Baumgärtner et al 1997]:

- Die ebene Deckenunterseite bietet freie architektonische Gestaltungsmöglichkeiten und kann als Raumabschluss belassen werden.
- Die geringe Stahlprofilhöhe des Querschnitts in Abbildung 1.1 (b) ermöglicht die Anordnung von Stützbewehrung zur Ausnutzung der sehr wirtschaftlichen Durchlaufwirkung der quergespannten Decke.

Ein Wirtschaftlichkeitsvergleich [Haas 1999] unterschiedlicher Systeme der Verbundflachdecke mit einer konventionellen Stahlbeton-Flachdecke zeigt, dass zwar die Herstellungskosten der Verbundflachdecken nahezu identisch sind, jedoch besitzen die möglichen Varianten der Verbunddeckensysteme eine Zeitersparnis auf der Baustelle von bis zu 20 %. Diese immer wichtiger werdende Zeitersparnis bei der Herstellung und Montage macht das Verbundflachdeckensystem in einer Gesamtbetrachtung (geringere Finanzierungskosten, frühere Mieteinnahmen, etc.) gegenüber der herkömmlichen Stahlbetonbauweise wirtschaftlicher. Mögliche Rationalisierungseffekte durch eine weitergehende Automatisierung der Vorfertigung im Werk sind dabei noch nicht berücksichtigt. Ähnliche Werte sind auch für Verbundträger niedriger Bauhöhe zu erwarten.

Die möglichen Spannweiten von Verbundträgern niedriger Bauhöhe betragen in Abhängigkeit von der Stützweite der quer verlaufenden Decke, der Belastungshöhe und der verwendeten Beton- und Stahlgüte für übliche Fälle des Hochbaus 10 ÷ 15 m. Slim-Floor Träger erreichen Spannweiten von bis zu 10 m, bei einer Beschränkung der Deckenstärke auf 32 cm.

Abbildung 2.4 zeigt die möglichen Stützweiten von Verbundträgern niedriger Bauhöhe in Abhängigkeit von der Stützweite der Decke und des Baustahlprofils für einen Einfeldträger. Die Dicke des Betongurts ist hierbei auf 32 cm begrenzt.

| L_T [m] | | HEA | | | | |
|--------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| Stützweite der Decke [m] | 5 | 7 | 11 | 15 | 17 | 20 |
| | 6 | 5 | 11 | 13 | 16 | 18 |
| | 7 | 4 | 9 | 12 | 14 | 16 |
| | 8 | | 7 | 11 | 13 | 15 |
| | 9 | | 6 | 10 | 12 | 14 |
| | 10 | | 5 | 9 | 12 | 14 |

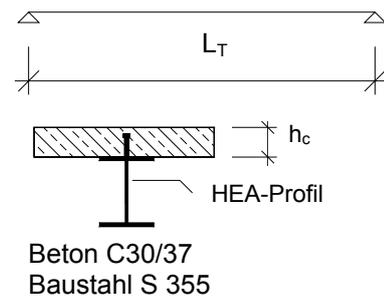


Abbildung 2.4: Mögliche Stützweiten von niedrigen Verbundträgern
Einfeldträger, Verkehrslast $p = 3,5 \text{ kN/m}^2$

Abbildung 2.5 zeigt die möglichen Stützweiten von Verbundträgern niedriger Bauhöhe in Abhängigkeit von der Stützweite der Decke und des Baustahlprofils für einen Einfeldträger. Die Dicke des Betongurts ist hierbei ebenfalls auf 32 cm begrenzt.

| L_T [m] | | UPE | | | | | |
|--------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 200 | 240 | 270 | 300 | 360 | 400 |
| Stützweite der Decke [m] | 5 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 |
| | 6 | 5 | 6 | 6 | 8 | 8 | 9 |
| | 7 | | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 |
| | 8 | | | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | 9 | | | | 5 | 6 | 6 |
| | 10 | | | | | 5 | 6 |

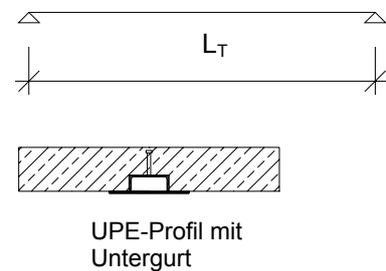


Abbildung 2.5: Mögliche Stützweiten von Slim-Floor Trägern
Einfeldträger, Verkehrslast $p = 3,5 \text{ kN/m}^2$ nach Zulassung [DIBt 2005]

Wie aus Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 ersichtlich, lässt sich mit Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern somit ein weiter Anwendungsbereich des normalen Geschossbaus abdecken.



3 Verformungsberechnung niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger

3.1 Ausgangssituation

Die Verformungsberechnung von Verbundträgern ist auf Grund der nichtlinearen Einflüsse wie z. B. der Rissbildung, Kriechen und Schwinden des Beton, etc. sehr aufwändig. Aus diesem Grund werden bei der Berechnung in der Planungspraxis im Allgemeinen Näherungslösungen verwendet, wie das Gesamtquerschnittsverfahren [Haensel 1975], [Kindmann, Xia 2000], [Roik et al 1999], das auf elastischen Ansätzen basiert. Bei niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern stellt dies aufgrund der ausgeprägten Rissbildung bereits unter Gebrauchslasten eine in vielen Fällen nicht akzeptable Näherung dar. Ohne die Berücksichtigung der Rissbildung wird die Steifigkeit der Träger überschätzt und somit kommt es zu einer Unterschätzung der Verformungen. Diesem Effekt steht eine Überschätzung der Verformung durch zu klein angesetzte b_m gegenüber. In jedem Fall stellt sich die Frage nach realistischen Steifigkeiten und Verformungen.

Im Sinne einer sauberen ingenieurmäßigen Lösung sollte die Verformungsberechnung jedoch dem speziellen Verformungsverhalten von Verbundträgern und den entsprechenden Einflüssen ausreichend genau Rechnung tragen.

Im Allgemeinen wird bei der Verformungsberechnung für den Betongurt dieselbe mittragende Breite angesetzt wie beim Nachweis der Tragfähigkeit. Dieser Wert ist dabei in vielen Fällen sehr viel kleiner als die tatsächliche mittragende Breite, wie die Untersuchungen dieser und vorausgehender Arbeiten [Rieg 2006] zeigen. Dies führt zu einer zu kleinen rechnerischen Steifigkeit der Verbundträger und zu großen rechnerischen Verformungswerten.

Die nachfolgende Abbildung [Rieg, Hauf 2006] zeigt den Einfluss der mittragenden Breite auf die Tragfähigkeit von gängigen Verbundquerschnitten. Hierbei ist die Momententragfähigkeit des dargestellten Querschnitts in Abhängigkeit der mittragenden Breite auf der x-Achse für verschiedene Stahlprofile dargestellt.

Dabei handelt es sich um eine bezogene Tragfähigkeit und nicht um absolute Werte der Tragfähigkeit. Wie zu erkennen ist, ändert sich die Tragfähigkeit der Querschnitte durch Variation der mittragenden Breite nur in einer vernachlässigbaren Größenordnung, so dass die mittragende Breite auf die Tragfähigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Grund hierfür ist, dass sich zwar die Druckzonenhöhe im Beton ändert, dies aber bezogen auf den Gesamtquerschnitt Verbund kaum eine Änderung des Hebelarms im Verbundquerschnitt hervorruft.

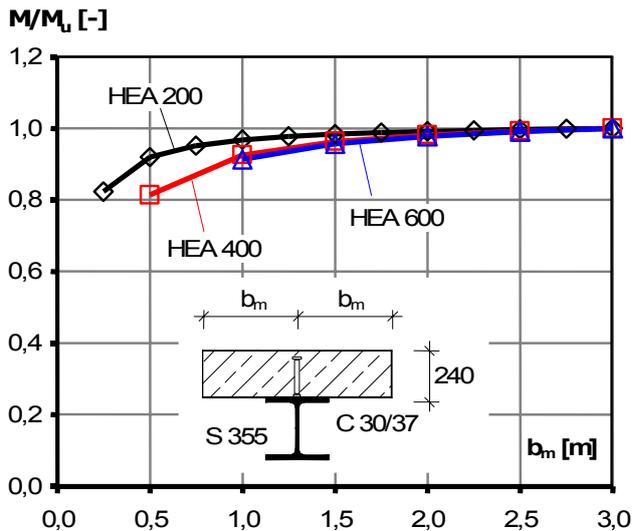


Abbildung 3.6: Einfluss der mittragenden Breite auf Momententragfähigkeit

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft den Einfluss der mittragenden Breite auf die Steifigkeit von gängigen Verbundquerschnitten. Das Bild [Rieg, Hauf 2006] zeigt im Gegensatz zur vorhergehenden Abbildung, dass die Steifigkeit und damit auch die Verformungen der betrachteten Verbundträger sehr stark von der mittragenden Breite abhängen. Der Einfluss ist dabei bei niedrigen Trägern sehr viel größer als bei hohen Trägern. Ebenso nimmt der Einfluss mit zunehmender Dicke des Betongurts zu.

Da bei niedrigen Verbundträgern für die Querschnittsdimensionierung die Verformungen entscheidend sind, ist somit die mittragende Breite ein wesentlicher Einflussparameter für die wirtschaftliche Bemessung dieser Träger und sollte realistisch bestimmt werden.

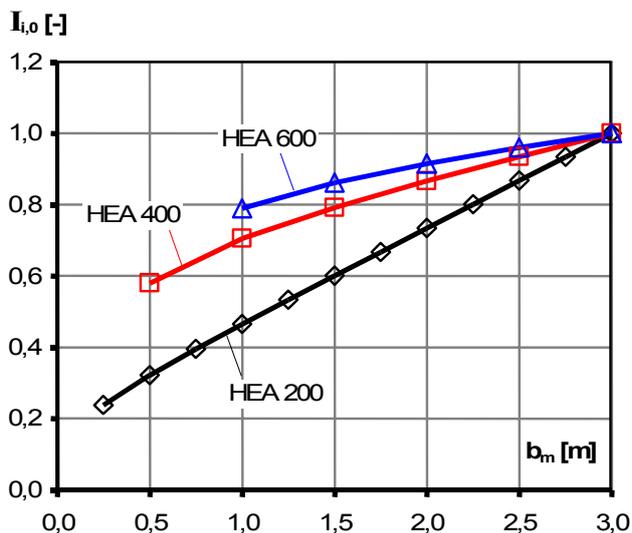


Abbildung 3.7: Einfluss der mittragenden Breite auf Gesamtträgersteifigkeit

Folgende Einzelfragen stellen sich bei der Ermittlung realistischer Verformungen darüber hinaus auch noch:

Im Konzept des Gesamtquerschnittsverfahrens wird der Betongurt über die gesamte Höhe als wirksam für Kriechen und Schwinden betrachtet. Tatsächlich ist dieser Einfluss jedoch nur in den nicht gerissenen bzw. überdrückten Bereichen des Betongurts vorhanden [Kuhlmann, Fries 2001b], [Rieg 1998]. Dies führt im Allgemeinen zu einer rechnerischen



Überschätzung der Kriech- und Schwindverformungen. Darüber hinaus sind das tatsächliche Kriech- und Schwindverhalten aufgrund einer guten Nachbehandlung des Betons häufig vor Ort geringer als in der Berechnung angenommen.

Zur Vereinfachung der Bemessung von Verbundträgern und ihrer Anschlüsse werden diese in der Planungspraxis in sehr vielen Fällen trotz durchlaufender Betongurte als Einfeldträger ohne Durchlaufwirkung berechnet, siehe hierzu auch Abschnitt 8. Die tatsächlich vorhandene Durchlaufwirkung führt im Vergleich zur Berechnung als Einfeldträger jedoch zu deutlich kleineren Verformungen. Infolge des negativen Momentes reißt die Platte über der Stütze auf und verliert damit an Steifigkeit, durch die eingelegte Bewehrung bleibt aber dennoch eine Einspannwirkung vorhanden.

Eine nachgiebige bzw. teilweise Verdübelung führt auf Grund des unvollständigen Zusammenwirkens der Teilquerschnitte Beton und Stahl zu einer Vergrößerung der Verformungen im Vergleich zu einem entsprechenden Verbundträger mit vollständiger und starrer Verdübelung. Da die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbundmittel im Bauwerk im Allgemeinen höher ist als in der Berechnung angenommen und die verwendeten Näherungslösungen diesen Einfluss häufig überschätzen, wird die Verformung der Verbundträger mit teilweiser Verdübelung überschätzt, siehe Abschnitt 5.8.2.

Im Folgenden werden die verschiedenen gebräuchlichen Ansätze zur Verformungsberechnung von Verbundträgern sowie ihre Anwendungsgrenzen und ihre Anwendbarkeit kurz vorgestellt [Rieg 2006], [Kuhlmann, Rieg 2004a].

3.2 Linearelastische Ansätze

Die Berechnung von Verbundträgern in der Planungspraxis erfolgt in der Regel mit dem Gesamtquerschnittsverfahren [Haensel 1975], [Kindmann, Xia 2000], [Roik et al 1999] seltener mit dem Verfahren nach Sattler [Trost 1968], [Sattler 1959]. Beide Verfahren beruhen auf modifizierten elastischen Ansätzen. Der entscheidende Vorteil vor allem des Gesamtquerschnittsverfahrens ist die vergleichsweise einfache Berechnung, die Anwendbarkeit des Superpositionsprinzips sowie die Möglichkeit zur einfachen Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden des Betons. Für die verschiedenen Lastfälle wie ständige Last, kurzzeitig wirkende Last, Schwinden etc. wird jeweils ein ideelles Trägheitsmoment $I_{i,L}$ des Verbundquerschnitts bestimmt, mit dessen Hilfe die Verformungen einzeln berechnet und aufaddiert werden können.

Für hohe Verbundträger mit vergleichsweise dünnem Betongurt liefern diese Verfahren im Allgemeinen wirklichkeitsnahe Verformungswerte.

Bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und vor allem für Slim-Floor Träger führen diese Verfahren jedoch auf Grund der frühen Rissbildung im Beton bereits unter Gebrauchslasten zu einer zu großen rechnerischen Steifigkeit. Eine realistische Verformungsberechnung auf Grundlage elastischer Ansätze ist daher in der Regel nicht möglich.

3.3 Materiell nichtlineare Ansätze

3.3.1 Grundsätzliches

Für eine realistische Bestimmung des Last-Verformungs-Verhaltens von Verbundträgern mit ausgeprägter Rissbildung des Betongurts, im Besonderen von niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern, muss das nichtlineare Materialverhalten von Beton und Stahl berücksichtigt werden, vor allem die Rissbildung im Beton, die bereits bei geringen Lasten auftreten, siehe hierzu auch Abschnitt 5.8.3. Ein Plastizieren des Stahls tritt unter Gebrauchslasten in der Regel noch nicht auf.

Eine Möglichkeit zur Berechnung von Verformungen bei Verbundträgern mit ausgeprägter Rissbildung im Beton stellen Momenten-Krümmungs-Beziehungen des Gesamtquerschnitts, auch M - κ -Linien genannt, dar [Kuhlmann, Fries 1998b], [Rieg 1998], [Schlaich, Schäfer 1997], [Hanswille 1986], [Heft 525]. Die Berücksichtigung einer nachgiebigen Verdübelung und eines Schlupfs in der Verbundfuge ist hierbei jedoch nicht möglich. Dies kann mit Momenten-Normalkraft-Krümmungs-Beziehungen (M - N - κ -Linien) an den Teilquerschnitten Betongurt und Baustahl erfolgen [Fries 2001], [Rybinski 2000].

3.3.2 Momenten-Krümmungs-Beziehungen (M - κ -Linien)

Momenten-Krümmungs-Beziehungen stellen den Zusammenhang des äußeren Moments des Gesamtquerschnitts und dessen Krümmung her. Die Berechnung erfolgt iterativ. Zunächst wird die Krümmung κ des Querschnitts vorgegeben. Durch Variation des Dehnungszustands, aus dem der Spannungszustand des Verbundquerschnitts mit Kenntnis der Materialgesetze berechnet werden kann, wird das innere Kräftegleichgewicht im Verbundquerschnitt hergestellt. Bei der Berechnung der M - κ -Linien können dabei unterschiedliche Materialgesetze berücksichtigt werden: Zum Beispiel kann beim Beton die Mitwirkung auf Zug berücksichtigt oder vernachlässigt werden. Weitere Informationen können [Rieg 2006] und [Schlaich, Schäfer 1997] entnommen werden. Abbildung 3.8 zeigt beispielhaft die M - κ -Linie eines niedrigen Verbundträgers.

Eine Vereinfachung zur kontinuierlichen Berechnung der M - κ -Linie stellt die Linearisierung zwischen den maßgebenden Punkten dar. Diese sind:

- Beginn der Rissbildung im Beton ($M_{\text{Riss}} / \kappa_{\text{Riss}}$), die Zugspannung im Beton überschreitet die Betonzugfestigkeit
- Beginn des Plastizierens des Baustahls ($M_{\text{el}} / \kappa_{\text{el}}$), an der Randfaser des Baustahls erreicht die Dehnung die Streckgrenze
- Vollständiges Plastizieren des Baustahls ($M_{\text{pl}} / \kappa_{\text{pl}}$)
- Betonversagen auf Druck bzw. Zugversagen des Baustahls ($M_{\text{u}} / \kappa_{\text{u}}$)

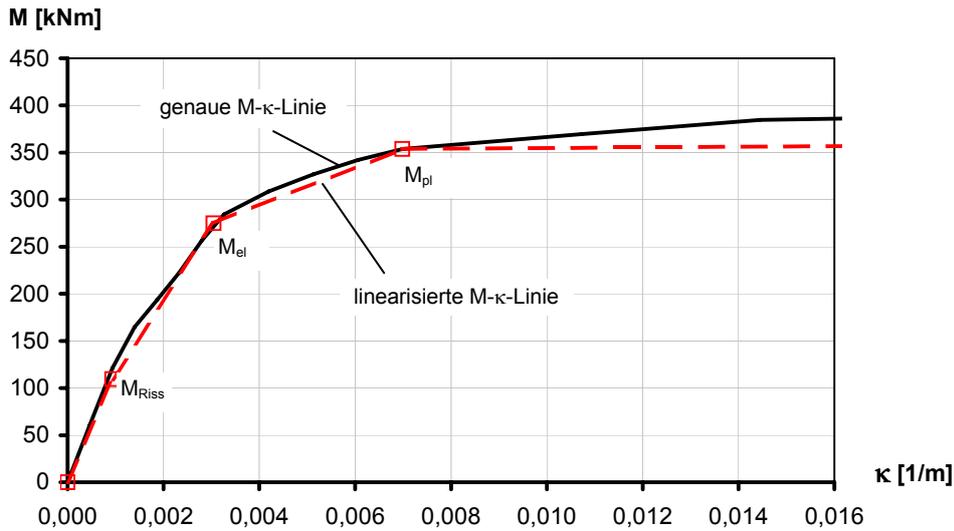
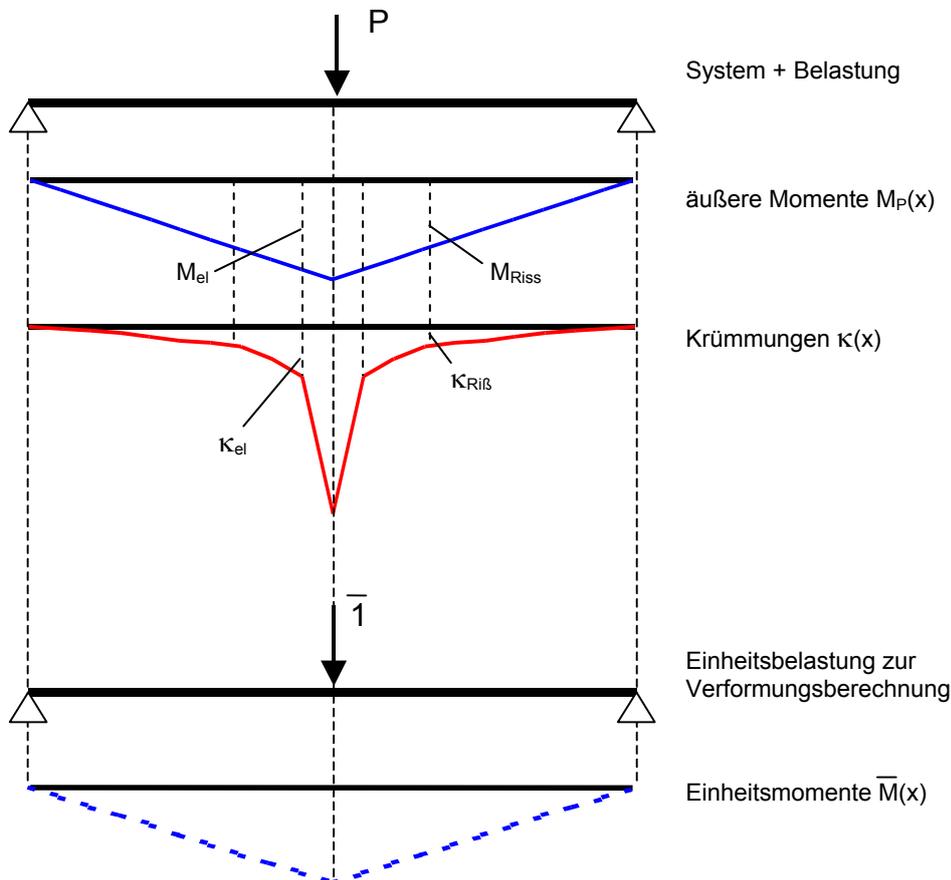

 Abbildung 3.8: Charakteristischer Verlauf der M- κ -Linie eines niedrigen Verbundträgers


Abbildung 3.9: Vorgehen bei der Verformungsberechnung von Verbundträgern

Mit Kenntnis der M- κ -Linie des Querschnittes und des äußeren Momentenverlaufs kann der Krümmungsverlauf entlang der Trägerachse bestimmt und durch dessen Integration die Verformung des Verbundträgers berechnet werden, siehe Abbildung 3.9.

Die Gleichungen zur Berechnung von M- κ -Linien und das Vorgehen bei der Verformungsberechnung von Verbundträgern sind ausführlich in [Rieg 1998] beschrieben.



3.3.3 Berechnung mit M-N- κ -Linien an den Teilquerschnitten

Für Verbundträger, die einen ausgeprägten Schlupf zwischen Beton und Baustahl aufweisen, kann das in [Fries 2001], [Rybinski 2000] vorgestellte Verfahren zur Berechnung von Verformungen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens angewendet werden. Hierbei wird die Berechnung an den Teilquerschnitten Stahlbetongurt und Baustahlträger anstatt am Gesamtquerschnitt vorgenommen.

Für eine genaue Beschreibung des Vorgehens bei der Berechnung sei an dieser Stelle auf [Fries 2001], [Rybinski 2000] verwiesen.

3.4 Schlussfolgerung

Aufgrund der Rissbildung im Betongurt von Slim-Floor Trägern und niedrigen Verbundträgern bereits im Gebrauchslastzustand ist eine realistische Berechnung der Trägerdurchbiegung nur unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens möglich. Dies kann z. B. mit M- κ -Linien oder M-N- κ -Linien erfolgen. Für eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung muss zusätzlich noch die Querkraftverformung berücksichtigt werden, siehe hierzu auch Abschnitt 5.8.1.

4 Stand der Technik zur mittragenden Betongurtbreite

4.1 Tragverhalten von Gurten in Plattenbalken

Plattenbalken im weiteren Sinn sind Tragwerke, die aus einem oder mehreren schmalen Trägern und einem oder mehreren Gurten, die kraftschlüssig an diese Träger angeschlossen sind, bestehen. Bei Verbundträgern im Geschossbau bestehen diese im Allgemeinen aus einem Stahlträger mit aufliegender Betonplatte, die über Verbundmittel schubfest miteinander verbunden sind. Abbildung 4.8 zeigt eine Auswahl an möglichen Plattenbalkenquerschnitte [Schmidt, Peil 1976].

Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich auf Verbundträger mit nur einer Gurtplatte an der Oberseite des Stahlträgers.

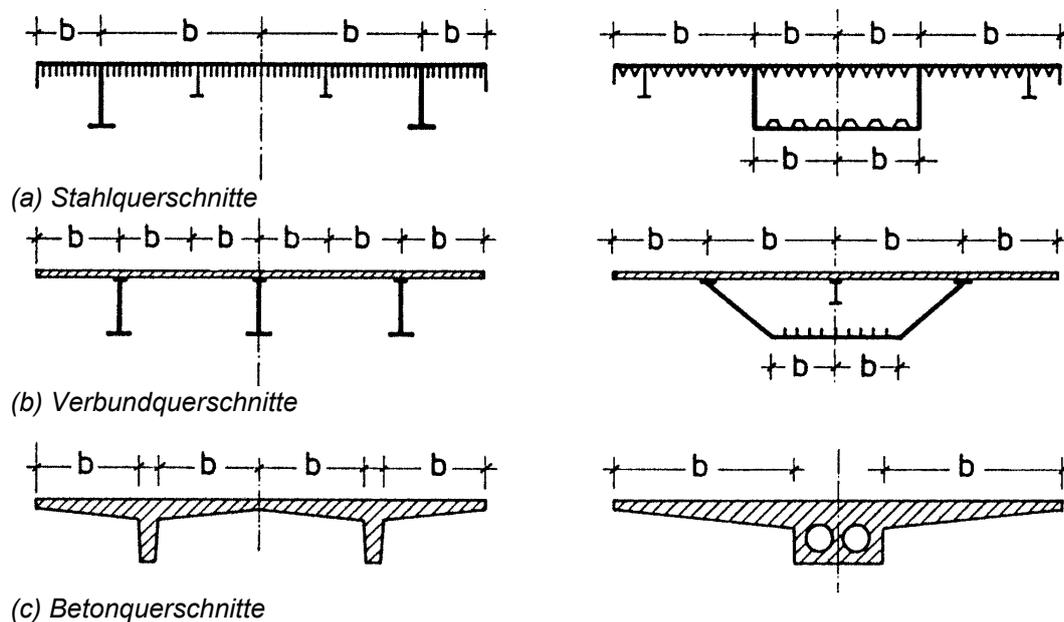


Abbildung 4.10: Mögliche Plattenbalkenquerschnitte

Das Tragverhalten des Gurtes lässt sich grundsätzlich in einen Scheibenzustand und einen Biegezustand unterscheiden, siehe Abbildung 4.9 [Rieg 2004 a], [Rieg 2006]. Der Scheibenzustand resultiert aus der Dehnsteifigkeit des Gurtes und der schubfesten Verbindung mit dem Stahlträger. Die Gurtnormalkraft ist Teil des inneren Kräftepaars im Verbundquerschnitt. Beim Scheibenzustand wird der Gurt als biegeschlaffe Scheibe betrachtet. Der Biegezustand resultiert aus der Biegesteifigkeit des Gurtes und der Kopplung der vertikalen Verformungen des Gurtes und des Stahlträgers. Hieraus ergibt sich ein Biegemoment M_c im Gurtquerschnitt.

Die alleinige Betrachtung des Scheibenzustands unter Vernachlässigung der Biegesteifigkeit des Gurtes ist beispielsweise für reine Stahlträger oder hohe Verbundträger mit dünnen Betongurten eine gute Näherung des tatsächlichen Tragverhaltens. Bei niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern ist die Biegesteifigkeit des Betongurts jedoch so groß, dass dieser für eine realistische Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens dieser Träger nicht vernachlässigt werden kann [Kuhlmann, Fries 2001b], [Rieg 2004 a], [Rieg 2006].

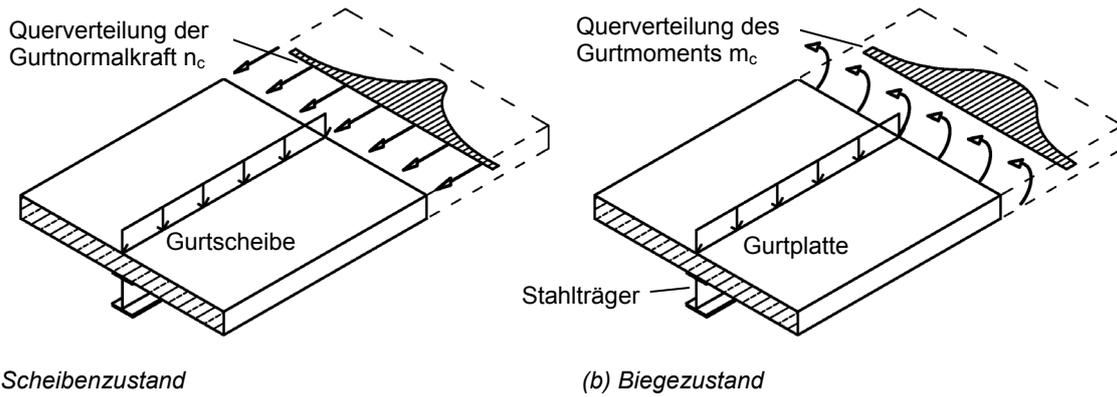


Abbildung 4.11: Scheiben- und Biegezustand des Gurtes von Verbundträgern

4.2 Definition der mittragenden Breite

4.2.1 Allgemeines

Aufgrund der Schubweichheit der Gurtscheibe ist die Spannungsverteilung in Querrichtung des Gurtes nicht konstant, sondern nimmt vom Steg des Plattenbalkens nach außen hin ab, siehe Abbildung 4.10. Somit wirkt nicht die gesamte Gurtscheibe im Plattenbalken mit. Plattenbalken zeigen daher ein ausgeprägtes dreidimensionales Tragverhalten.

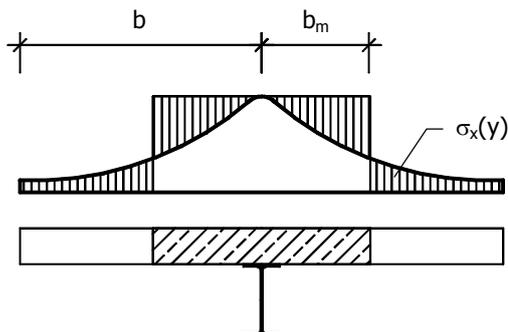


Abbildung 4.12: Querverteilung der Längsspannungen eines Plattenbalkengurtes

Um dennoch die technische Biegelehre verwenden zu können, wird die mittragende Breite eingeführt. Die mittragende Breite ist hierbei eine fiktive Größe, mit deren Hilfe der Plattenbalken auf einen voll wirksamen Querschnitt reduziert wird und als eindimensionaler Balken berechnet werden kann.

4.2.2 Mittragende Breite b_m für die Spannungsberechnung

In der üblichen Definition wird die mittragende Breite auf die Querverteilung der Längsspannungen im Gurtquerschnitt bezogen: Bei einer Berechnung des Plattenbalkens unter Ansatz der mittragenden Breite nach der technischen Biegelehre (eindimensionale Berechnung) wird im Gurt die gleiche Spannungsergebnisse ermittelt wie mit einer genauen zwei- bzw. dreidimensionalen Berechnung, die den nichtlinearen Spannungszustand der Gurtscheibe berücksichtigt [Sedlacek, Bild 1990]. In [Kuhlmann, Rieg 2004a] wird die so definierte mittragende Breite als spannungsbezogene mittragende Breite b_m bezeichnet. Die so definierte spannungsbezogene mittragende Breite ist in Trägerlängsrichtung i. A. ein sich verändernder Wert, siehe Abbildung 4.11 [Schmidt, Peil 1976].

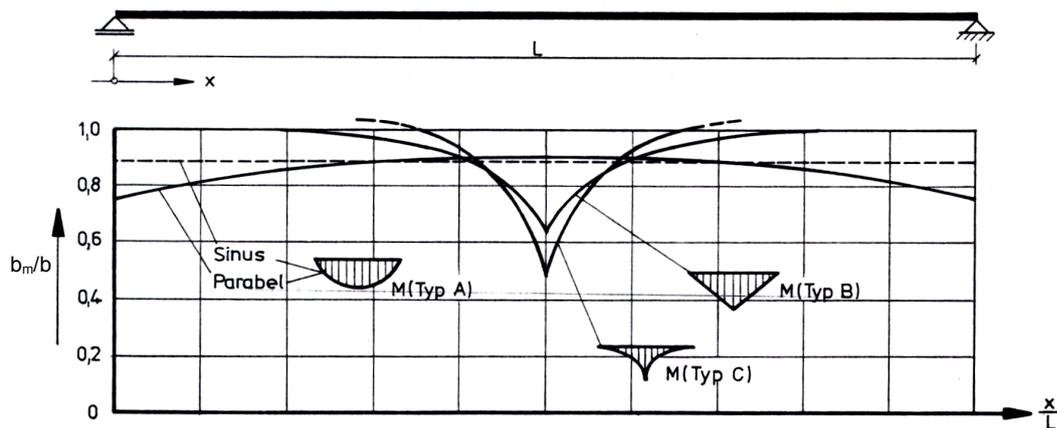


Abbildung 4.13: Verlauf der mittragenden Breite in Trägerlängsrichtung (elast. Material)

$$b_m = \frac{1}{\max \sigma_x} \cdot \int \sigma_x(y) dy \quad (4.1)$$

4.2.3 Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$

In [Rieg 2006] wird darüber hinaus eine Definition der mittragenden Breite mit Bezug auf die Verformung des Plattenbalkens eingeführt, die so genannte verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$: Die an einem eindimensionalen Ersatzbalken der Breite $b_{m,v}$ berechnete Durchbiegung ist gleich der tatsächlichen Durchbiegung des Plattenbalkens. Die verformungsbezogene mittragende Breite ist hierbei ein in Trägerlängsrichtung konstanter Wert.

Zur Unterscheidung werden in dieser Arbeit der Index "m" als Hinweis auf den Spannungsbezug und der Index "m,v" für den Verformungsbezug verwendet.

Der Einfluss der mittragenden Breite auf die rechnerische Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist im Allgemeinen vergleichsweise gering, da sich durch eine Änderung der mittragenden Breite b_m der innere Hebelarm des Verbundquerschnitts nur wenig ändert. Auf die rechnerische Steifigkeit und damit auf die Verformung hat die mittragenden Breite jedoch einen vergleichsweise großen Einfluss, da die rechnerische Steifigkeit des Betonquerschnitts linear von dieser abhängt. Dieser Einfluss ist umso größer je niedriger der Verbundträger ist und umso größer daher der Anteil der Biegesteifigkeit des Betongurts an der Gesamtsteifigkeit des Verbundquerschnitts ist.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines realistischen Berechnungsansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ zur wirklichkeitsnahen Verformungsbeurteilung niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger.

4.3 Vergleich verschiedener Normen

In den nationalen und europäischen Normen des Stahlbeton- und Verbundbaus im Hoch- und Brückenbau ist die mittragende Breite von Betongurten unterschiedlich geregelt, wie die folgende Zusammenfassung für den Feldbereich von Plattenbalken mit parabelförmigem Momentenverlauf zeigt, siehe Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16.

Eine Unterscheidung in die spannungsbezogene mittragende Breite b_m und die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ wird dabei mit Ausnahme von DIN 1075 nicht vorgenommen.

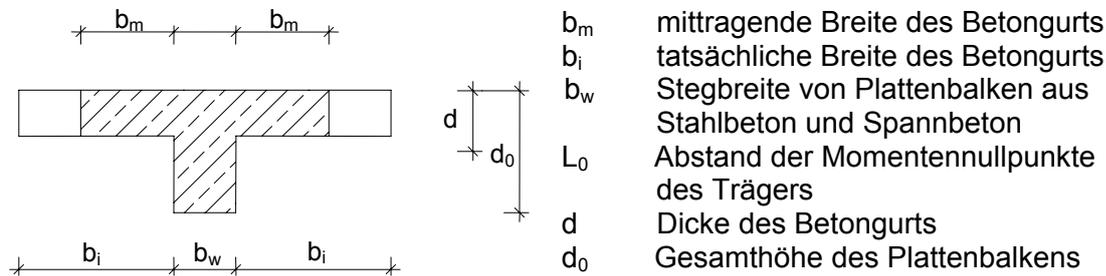


Abbildung 4.14: Bezeichnungen zur mittragenden Breite

Der Vergleich von EN 1994-1-1 mit den unterschiedlichen nationalen Regelungen zeigt eine große Bandbreite an „möglichen“ Werten für die mittragende Breite, siehe Abbildung 4.15. EN 1994-1-1 liefert sehr viel kleinere Werte für die mittragende Breite vor allem gegenüber den Regeln für Stahlbetonplattenbalken in Heft 240, vergleiche hierzu auch Bezeichnungen in Abbildung 4.14. Hierbei ist eine starke Abhängigkeit von der Dicke des Betongurts, ausgedrückt durch das Verhältnis d/d_0 , erkennbar. Je dicker der Betongurt (d/d_0 wird größer) desto größer ist die mittragende Breite. Dies liegt daran, dass bei den Regeln in Heft 240 der Einfluss der Biegetragwirkung und -steifigkeit des Betongurts auf die mittragende Breite berücksichtigt wird. Im Vergleich zu EN 1994-1-1 ergibt sich für $d/d_0 = 0,3$ eine um 50-160 % größere mittragende Breite. Ein ähnlicher Einfluss der Dicke des Betongurts auf die mittragende Breite ist auch bei den betrachteten Verbundträgern niedriger Bauhöhe zu erwarten. Da der Betongurt hier jedoch bereits unter Gebrauchslasten im Zustand II ist, sind diese Regeln nicht ohne Weiteres übertragbar.

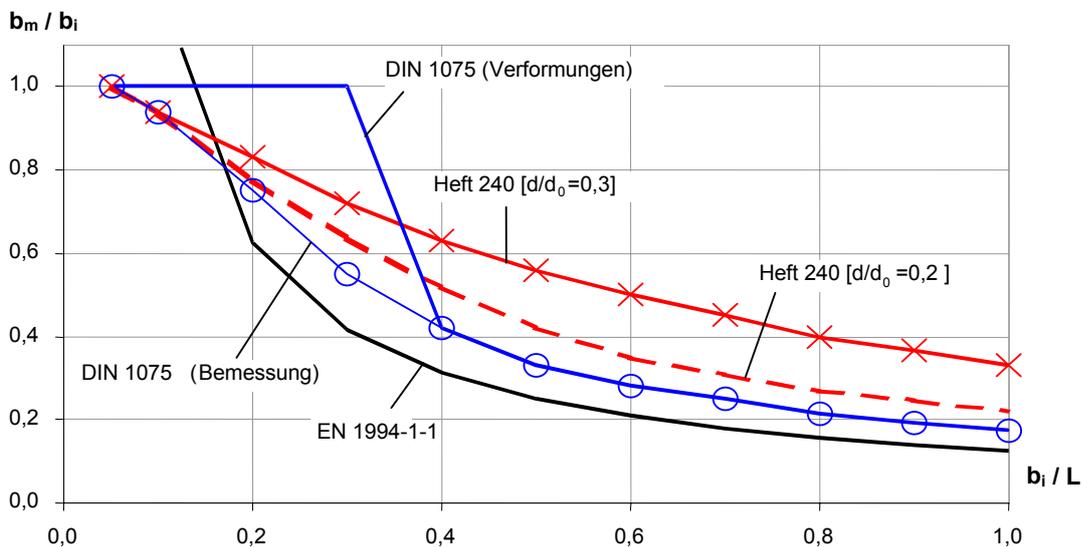


Abbildung 4.15: Vergleich der mittragenden Betongurtbreite: nationale Regelungen (Feldbereiche von Plattenbalken mit parabelförmigem Momentenverlauf)

Der Vergleich der unterschiedlichen europäischen Normen in Abbildung 4.16 zeigt ebenfalls eine große Bandbreite an „möglichen“ Werten für die mittragende Breite. [EN 1994-1-1], [EN 1994-2] und [DIN V ENV 1992-1-1] ergeben für die mittragende Breite die kleinsten Werte.

Ob die in [DIN V ENV 1992-2] zur Verformungs-, Schnittgrößen- und Schwingungsberechnung angegebene Regel $b_m = b$ realistische Werte liefert, ist zumindest für große Verhältnis-

se b_i/L (also kurze Träger mit sehr breiten Gurten) zweifelhaft. Dies würde unterstellen, dass der Betongurt überhaupt keiner Schubverformung unterliegt.

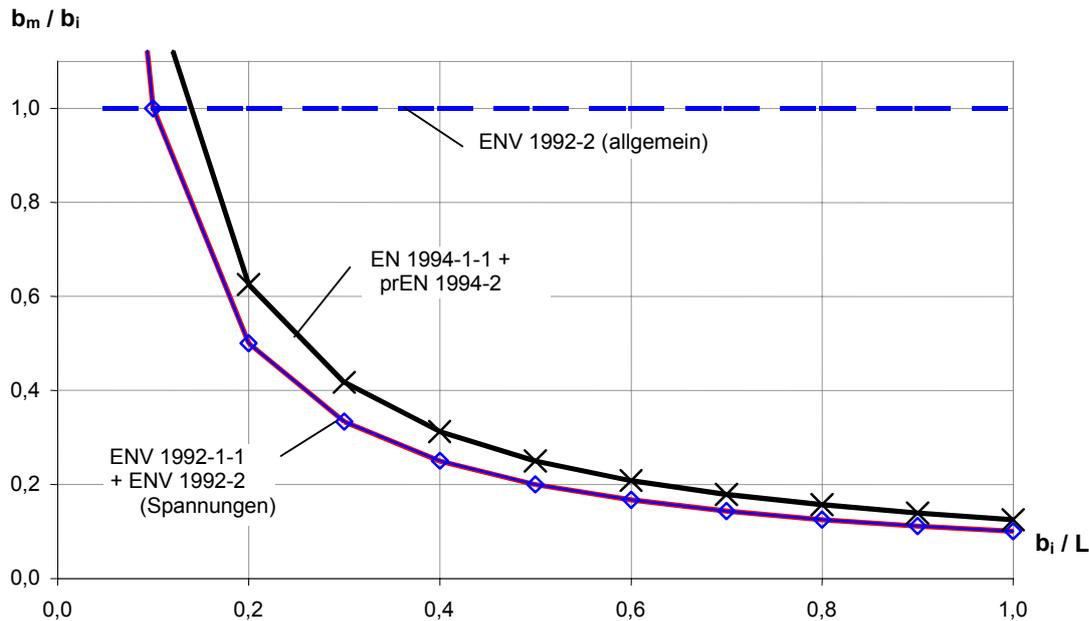


Abbildung 4.16: Vergleich der mittragenden Betongurtbreite: europäische Normen
 Feldbereiche von Plattenbalken mit parabelförmigem Momentenverlauf

Die bestehenden Regeln sind vor allem wegen der Rissbildung im Betongurt und der großen Dicke des Betongurts bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern nicht ohne weitere Untersuchungen auf diese übertragbar.

4.4 Stand der bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen

4.4.1 Grundsätzliches

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben setzt sich das Tragverhalten von Betongurten in Plattenbalken grundsätzlich aus einem Scheiben- und einem Biegezustand zusammen. Für elastisches Materialverhalten können diese beiden Zustände nach dem Prinzip der Superposition voneinander getrennt werden, siehe u. a. [Rieg 2004 a], [Rieg 2006]. Für beide Zustände kann dann getrennt eine entsprechende mittragende Breite bestimmt werden: $b_{m,S}$ für den Scheibenzustand bzw. $b_{m,B}$ für den Biegezustand, die gänzlich unterschiedliche Werte ergeben. Die mittragende Breite des reinen Biegezustands ist deutlich größer als die des reinen Scheibenzustands, siehe Abbildung 4.17.

Der überwiegende Teil der bekannten Untersuchungen zur mittragenden Breite berücksichtigt den reinen Scheibenzustand unter Vernachlässigung der Biegesteifigkeit und Biegetragwirkung des Gurtes. Dabei werden in erster Linie Träger untersucht die ein sehr kleines Verhältnis Gurtdicke zu Trägerhöhe aufweisen, z. B. reine Stahlträger, hohe Verbundträger oder hohe Stahlbeton-/Spannbetonträger. In diesen Fällen ist die Biegetragwirkung des Betongurts und dessen Biegesteifigkeit in der Tat so gering, dass diese im Vergleich zur Scheibentragwirkung vernachlässigt werden können. Für niedrige Verbundträger trifft dies jedoch nicht zu. Die Vernachlässigung der Biegetragwirkung des Betongurts stellt hier eine unzureichende Näherung des tatsächlichen Tragverhaltens dar [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006].

Forschungsarbeiten, die den Einfluss der Biegetragwirkung des Gurtes auf die mittragende Breite berücksichtigen, beschränken sich im Wesentlichen auf elastisches Materialverhalten. Eine Rissbildung im Betongurt wird hierbei nicht berücksichtigt. Gerade diese ist für das Trag- und Verformungsverhalten niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger von entscheidender Bedeutung [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006]. Die bekannten Arbeiten zur mittragenden Breite unter Berücksichtigung der Biegetragwirkung des Betongurtes zeigen jedoch qualitativ, dass mit zunehmender Biegetragwirkung und Biegesteifigkeit des Gurtes die mittragende Breite zunimmt [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006], [Haslacher 2001].

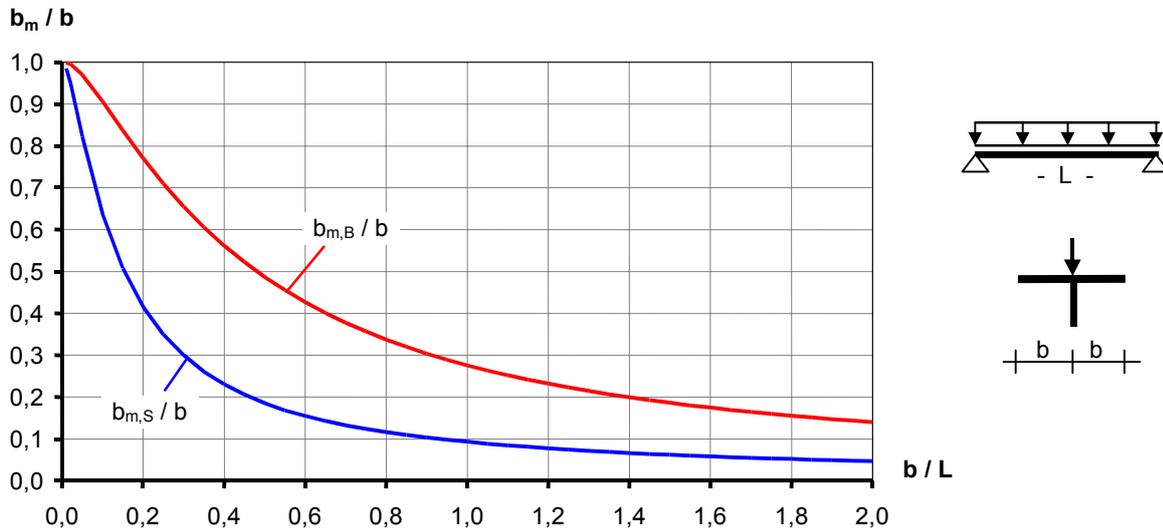


Abbildung 4.17: Mittragende Breite $b_{m,B}$ und $b_{m,S}$ eines Plattenbalkens unter Gleichlast

In [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] wird ein erster Schritt auf dem Weg zur integrativen Berücksichtigung der Einflüsse der Biegetragwirkung des Betongurtes und dessen Rissbildung im Bereich positiver Momente auf die mittragende Breite gemacht. Diese Untersuchungen zeigen unter anderem, dass

- die mittragende Breite niedriger Verbundträger für hochbautypische Randbedingungen i. A. deutlich größer ist als in den entsprechenden Normen gegeben,
- die mittragende Breite niedriger Verbundträger stark von der Rissbildung bzw. von der Belastungshöhe abhängt,
- der Einfluss der Biegetragwirkung des Betongurtes bei niedrigen Verbundträgern größer ist als bei hohen.

Der in [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] entwickelte Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite beschränkt sich jedoch auf niedrige Verbundträger herkömmlicher Bauart, vgl. Abbildung 1.1 (a), und kann ohne weitere Untersuchungen nicht auf Slim-Floor Träger übertragen werden.

Es liegt nahe, aufgrund der geometrischen und statischen Übereinstimmungen niedrige Verbundträger hinsichtlich der mittragenden Breite des Betongurtes mit Stahlbeton-Plattenbalken zu vergleichen. In beiden Systemen wirkt der Betongurt zum einen als quergespannte Decke und zum anderen als breiter Flansch des Trägerquerschnitts. Dennoch gibt es entscheidende Unterschiede zwischen beiden Querschnitten:

- Da bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern der Betongurt im Vergleich zur Gesamthöhe des Trägers sehr viel dicker ist ($d/d_0 > 0,3$) als bei Stahlbeton-Plattenbalken trägt dieser hier stärker auf Biegung ab und erfährt eine stärkere Rissbildung als der Betongurt von Stahlbeton-Plattenbalken.

- Im Vergleich zu Stahlbetonträgern ergeben sich bei Verbundträgern i. A. größere Druckkräfte im Betongurt. Dies liegt zum einen an der größeren Normalkraft der Stahlträger (von Verbundträgern) im Vergleich zur Bewehrung von Stahlbetonträgern und der gedrungeneren Ausführung von Verbundträgern.

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die wesentlichen Arbeiten zur mittragenden Breite von Plattenbalken gegeben und daraus resultierende Schlussfolgerungen auf die mittragende Breite niedriger Verbundträger gezogen.

4.4.2 Untersuchungen zur Scheibentragwirkung des Betongurts

Hierbei handelt es sich um Arbeiten, die die Biegetragwirkung des Gurtes entweder vollständig vernachlässigen oder Systeme mit vernachlässigbarer Biegetragwirkung behandeln. Es wird angenommen, dass der Betongurt nur durch eine Normalkraft N_c aus dem inneren Kräftepaar beansprucht wird.

In den Untersuchungen u. a. von [Karmann 1924], [Metzer 1929], [Chawalla 1936], [Koeppke, Denecke 1967], [Schmidt, Peil 1976], [Schmidt, Born 1978], [Sedlacek, Bild 1990], [Hofmann, Ramm 1993] wird die mittragende Breite b_m auf Basis der Elastizitätstheorie für verschiedene Randbedingungen bestimmt. Dabei stellen die Autoren eine Abhängigkeit der mittragenden Breiten von u. a. den folgenden wesentlichen Faktoren fest:

- Seitenverhältnis b/L des Betongurts
- Statisches System des Trägers (Einfeld-, Durchlauf-, Kragträger)
- Belastung (Gleichlast, Einzellasten, antimetrisch, symmetrisch etc.)
- Querschnittsausbildung (einseitiger oder zweiseitiger Gurt, Orthotropie des Gurtes, Versteifungsrippen, etc.)
- Veränderlichkeit des Querschnitts in Trägerlängsrichtung
- Berücksichtigung von Endquerträgern

Die Untersuchungen unterscheiden sich hierbei u. a. in der Modellbildung des Stegs des Plattenbalkens, der entweder als Stab oder als Scheibe betrachtet wird. Als maßgebende Einflussfaktoren auf die mittragende Breite stellen die Autoren u. a. das Verhältnis Gurtbreite zu Trägerstützweite, die Form der Belastung bzw. der globale Momentenverlauf, die betrachtete Trägerstelle und den Orthotropiefaktor fest.

In neueren Untersuchungen wird die Beschränkung auf die Elastizitätstheorie aufgegeben. Untersuchungen von [Albrecht 1976] über Stahlgurte berücksichtigen im Hinblick auf die Anwendung der Plastizitätstheorie ein zunehmendes Plastizieren ausgehend von der Stelle der maximalen Spannungen und Dehnungen am Steg in vom Steg weiter entfernte Bereiche. Dabei wird eine Vergrößerung der mittragenden Breite mit zunehmender Plastizierung festgestellt.

In den Arbeiten von [Holtkamp 1991] sowie [Weyer, Uhlendahl 1995] wird der Einfluss der Rissbildung im Stützbereich des Betongurts auf die mittragende Breite an einigen Beispielen untersucht. Es zeigt sich, dass die Rissbildung bzw. die Belastungshöhe einen nennenswerten Einfluss auf die mittragende Breite hat. Durch die Rissbildung wird die Querverteilung der Spannungen der Längsbewehrung ausgeglichener und damit die mittragende Breite größer. Eine Aussage über den Einfluss der Rissbildung auf die mittragende Breite im Bereich positiver Momente, wie dies bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern charakteristisch ist, wird jedoch nicht gemacht.

In den Arbeiten von [Stegbauer 1978] und [Grünberg 1978] wird der Einfluss der Rissbildung von Stahlbeton-Plattenbalken im Bereich positiver Momente exemplarisch auf Basis nichtlinearer FE-Berechnungen bestimmt. An ausgewählten Beispielen stellt Grünberg einen Einfluss der Rissbildung des Betongurts bei Stahlbeton-Plattenbalken auf die mittragende Breite fest, deren Größe von der Querschnittsform abhängt. Für typische Plattenbalken des Hochbaus wird eine geringfügige Steigerung der mittragenden Breite im Vergleich zum Zustand I festgestellt. Für andere Randbedingungen können sich jedoch kleinere mittragende Breiten ergeben. Stegbauer stellt bei seinen Untersuchungen eine Steigerung der mittragenden Breite mit zunehmender Belastung fest. Eine Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger ist u. a. aufgrund folgender Gründe nicht möglich: Die Arbeiten beschränken sich auf exemplarische Untersuchungen weniger Systeme ohne systematische Analyse aller Einflussfaktoren. Die Untersuchungen beschränken sich auf Systeme mit dünnen Gurten und vernachlässigbarer Biegetragwirkung. In den Gurtquerschnitten der untersuchten Systeme ergibt sich somit nur eine vergleichsweise geringe Rissbildung. Diese Arbeiten zeigen jedoch, dass die Rissbildung einen nennenswerten Einfluss auf die mittragende Breite hat und nicht vernachlässigt werden kann.

4.4.3 Untersuchungen unter Berücksichtigung des Biegezustands des Betongurts

Erste Untersuchungen zur mittragenden Breite von Betongurten unter Berücksichtigung des Biegezustands des Betongurts sind in den Arbeiten von [Marguerre 1952] und [Langendock van 1958], [Brendel 1960], [Severn 1964] und [Rose 1965] beschrieben. Diese Untersuchungen beschränken sich auf Fälle, in denen sich der Plattenbalken idealelastisch verhält. Es werden Lösungen für verschiedene Systeme, Querschnitte und Belastungsfälle aufgezeigt. Hierzu wird der Scheibenzustand des Gurtes vom Biegezustand gelöst und für beide Zustände getrennt durch Lösung der jeweiligen Differentialgleichung der Spannungszustand und die mittragende Breite bestimmt. Die Untersuchungen zeigen, dass die mittragende Breite des Biegezustands deutlich größer ist als diejenige des Scheibenzustands. Die mittragende Breite des Plattenbalkens nimmt somit mit zunehmendem Verhältnis Gurtstärke zu Trägerhöhe zu.

Von [Loo-Ywe-Chaye 1986] wird die mittragende Breite von Stahlbeton-Plattenbalken auf Basis eines linearen FE-Modells für verschiedene Systeme bestimmt und mit verschiedenen internationalen Normen verglichen. Sie stellen fest, dass die mittragende Breite für eine gleichmäßige, flächenmäßige Belastung der Träger teilweise sehr viel größer ist als in den betrachteten Normen angegeben und mit zunehmendem Verhältnis Gurtstärke zu Trägerhöhe zunimmt.

Untersuchungen von [Amadio et al 2004] an Verbundträgern zeigen eine starke Abhängigkeit der mittragenden Breite von der Belastungshöhe. Bei der experimentellen Untersuchung eines Verbundträgers mit einem Seitenverhältnis $b/L = 0,21$ unter positiver Belastung ergibt sich eine deutlich größere mittragende Breite als nach EN 1994-1-1. Mit zunehmender Belastung nimmt die mittragende Breite zu, bis mit Erreichen des Bruchzustands nahezu die gesamte Breite des Betongurts mitwirkt. Die Untersuchungen beschränken sich jedoch auf Träger mit vergleichsweise dünnen Betongurten.

In [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] werden Untersuchungen zur verformungsbezogenen mittragenden Breite niedriger Verbundträger beschrieben. Die sowohl experimentellen als auch numerischen Untersuchungen zeigen, dass die verformungsbezogene mittragende Breite niedriger Verbundträger deutlich größer ist als in den Verbundbaunormen [EN 1994-1-1] und [DIN V 18800-5] angegeben. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der mittragenden Breite u. a. von der Rissbildung im Betongurt, der Belastungshöhe, dem Verhältnis Plattendicke zu Trägerhöhe, der Betonzugfestigkeit, etc. Diese Untersuchungen können auf Slim-Floor Träger jedoch ohne Weiteres nicht übertragen werden, da die Steifigkeitsverteilung und

Lastverteilung innerhalb des Querschnitts unterschiedlich sind und diese einen nennenswerten Einfluss auf die mittragende Breite hat. Eine systematische Berücksichtigung des Einflusses einer teilweisen Verdübelung auf die mittragende Breite ist nicht gegeben.

4.4.4 Schlussfolgerungen aus den bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen

Die vorliegenden Untersuchungen zur mittragenden Breite von Betongurten bei Verbundträgern beschränken sich im Wesentlichen auf die Elastizitätstheorie oder die reine Scheibentragwirkung. Diese Arbeiten beziehen sich nahezu ausschließlich auf die spannungsbezogene mittragende Breite. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass folgende Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die mittragende Breite haben:

- Biegetragwirkung des Betongurts
- Rissbildung im Betongurt
- Belastungshöhe
- Zugfestigkeit des Betons

Die vorliegenden systematischen Untersuchungen zur verformungsbezogenen mittragenden Breite [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] zeigen, dass die verformungsbezogene mittragende Breite i. d. R. wesentlich größer ist als die spannungsbezogene und i. A. sehr viel größer als in [EN 1994-1-1] und [DIN V 18800-5] gegeben. Diese Untersuchungen an Verbundträger niedriger Bauhöhe sind jedoch aufgrund der anderen geometrischen und statischen Verhältnisse auf Slim-Floor Träger nicht ohne Weiteres übertragbar. Auch fehlt hierzu noch eine systematische Untersuchung der Einflüsse einer teilweisen Verdübelung und einer Querbiegung im Betongurt.

Für ein anwenderfreundliches Verfahren zur realistischen Ermittlung der mittragenden Betongurtbreite für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern sind die innerhalb dieses Forschungsvorhabens angestrebten Untersuchungen somit erforderlich.

4.5 Die mittragende Breite für den linear-elastischen Fall

4.5.1 Grundsätzliches

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, weisen niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger bereits unter Gebrauchslasten ein ausgeprägtes nichtlineares Tragverhalten durch das Reißen des Betons auf.

Zum besseren Verständnis wird die mittragende Breite jedoch zunächst für linear-elastisches Materialverhalten betrachtet, um in einem ersten Schritt den Einfluss der Biegetragwirkung des Betongurts zu erklären. Zunächst werden die mittragende Breite des reinen Scheiben- und des reinen Biegezustands, daran anschließend deren kombinierte Wirkung vorgestellt. Die Berechnungen orientieren sich dabei zum großen Teil an den Untersuchungen von [Rose 1965]. Eine ausführliche Darstellung der Berechnungen ist in [Kuhlmann, Rieg 2004a] enthalten.

Die nachfolgenden Darstellungen und Erläuterungen fassen die Ergebnisse der Untersuchungen nach [Haslacher 2001], [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] zusammen.

Elastizitätstheorie bedeutet dabei, dass Dehnungen so klein sind, dass

- der Beton auf Zug keine Risse bekommt (Zustand I), die Einwirkung also unterhalb der Betonzugfestigkeit bleiben
- der Beton auf Druck sich näherungsweise linear verhält,
- der Beton keinen Langzeiteinflüssen (also Kriechen und Schwinden) unterliegt und
- der Beton- bzw. Baustahl nicht plastiziert, also die Stahlstreckgrenze nicht erreicht wird.

In den nachfolgenden Kapiteln werden nun die linear-elastischen Werte der mittragenden Breite des reinen Scheibenzustands und des reinen Biegezustands für die wichtigsten Belastungsfälle im Hochbau angegeben und anschließend die kombinierte Wirkung aus Scheiben- und Biegezustands diskutiert.

4.5.2 Reiner Scheiben- und Biegezustand des Betongurtes

4.5.2.1 Allgemeines

Unter Annahme, dass die Elastizitätstheorie gültig ist, kann durch Anwendung des Superpositionsprinzips der Scheibenzustand des Gurtes vom Biegezustand getrennt werden. Für beide Zustände können der Spannungs- und Dehnungszustand des Gurtes unter Beachtung der Randbedingungen aus der Differentialgleichung der Scheibe bzw. Platte bestimmt werden. In diesem Zusammenhang wird auf die Arbeit von [Haslacher 2001] hingewiesen. Für Verbundträger im Hochbau ist dabei die Annahme eines isotropen und elastischen Materialverhaltens ausreichend genau, solange der Betongurt im Zustand I ist.

Der Scheibenzustand resultiert aus der Dehnsteifigkeit des Gurtes und der schubfesten Verdübelung mit dem Steg des Plattenbalkens. Der Gurt trägt dabei die Druckkomponente des inneren Kräftepaars ab. Im Biegezustand wirkt alleine der Betongurt eines Plattenbalkens als Platte. Er resultiert aus der vorhandenen Biegesteifigkeit des Gurtes und der Kopplung der vertikalen Verformungen von Gurt und Steg. Dabei trägt der Gurt entsprechend dem Verhältnis seiner Biegesteifigkeit zur Gesamtsteifigkeit des Trägers einen Anteil der äußeren Belastung über Biegung ab. Für normal hohe Verbundträger ist der Biegetraganteil der Betonplatte so gering, dass diese vernachlässigt werden kann. Für niedrige Verbundträger und besonders Slim-Floor Träger kann die Biegetragwirkung nicht ohne Weiteres vernachlässigt werden.

Gleichung (4.2) stellt die Differentialgleichung der isotropen Scheibe dar, Gleichung (4.3) diejenige der isotropen Platte.

$$\frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} = 0 \quad (4.2)$$

mit Φ Airysche Spannungsfunktion
 x Koordinate der Gurtscheibe in Längsrichtung des Trägers
 y Koordinate der Gurtscheibe in Querrichtung des Trägers

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (4.3)$$

mit w Durchbiegung der Gurtplatte
 x Koordinate der Gurtplatte in Längsrichtung des Trägers
 y Koordinate der Gurtplatte in Querrichtung des Trägers

Eine exakte Lösung der Differentialgleichungen ist im Allgemeinen nicht möglich. Die Lösungen können näherungsweise numerisch oder mittels Fourierreihenentwicklung erfolgen. Dies führt auf vergleichsweise komplizierte Formeln [Kuhlmann, Rieg 2004a].

4.5.2.2 Einflüsse auf die mittragende Breite des Scheibenzustands

Aus den Berechnungen der mittragenden Breite des reinen Scheibenzustands durch Lösung der Scheibendifferentialgleichung können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden, die mit den Angaben in der zuvor beschriebenen Literatur übereinstimmen [Kuhlmann, Rieg 2004a]:

Der Haupteinflussparameter für die mittragende Breite $b_{m,S}$ ist das Seitenverhältnis der Gurtscheibe b/L . Für zunehmende Werte b/L nimmt die bezogene mittragende Breite $b_{m,S}/b$ rasch ab, siehe z. B. Abbildung 4.18.

- Die Belastungsfunktion hat einen nennenswerten Einfluss auf die mittragende Breite. Die mittragende Breite $b_{m,S}$ für Gleichlast ist an der maßgebenden Trägerstelle deutlich größer als bei mittiger Einzellast, siehe z. B. Abbildung 4.18 und Abbildung 4.19.
- Die mittragende Breite $b_{m,S}$ im Rahmen der im normalen Hoch- und Geschossbau üblichen Querschnitte ist nur unwesentlich vom Querschnittstyp abhängig. Die mittragende Breite bei Querschnitten mit einer Behinderung der Querverschiebung an den Längsrändern ist geringfügig größer als ohne.
- Die mittragende Breite $b_{m,S}$ variiert in Trägerlängsrichtung, siehe Abbildung 4.19. Bei Belastung des Trägers mit einer Gleichlast ist die mittragende Breite in Feldmitte maximal und nimmt hin zu den Auflagern stetig ab. Bei einer Belastung des Trägers mit einer konzentrierten Einzellast kommt es auf Grund der Spannungsspitze an der Stelle der Einzellast zu einer starken Einschnürung der mittragenden Breite. Einen Sonderfall stellt die einfach harmonische Belastung dar, für die die mittragende Breite in Trägerlängsrichtung konstant ist.
- Die mittragende Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands ist unabhängig von der Höhe der äußeren Belastung des Plattenbalkens. Dies gilt jedoch nur, solange sich die Gurtscheibe linearelastisch verhält und im Zustand I ist. Bei nicht linear-elastischem Materialverhalten ist die mittragende Breite zusätzlich von der Belastungshöhe abhängig.
- Die mittragende Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands ist unabhängig von der Dicke der Gurtscheibe h_c . In der kombinierten Wirkung mit dem immer vorhandenen Biegezustand des Betongurts ist die mittragende Breite jedoch von der Dicke des Betongurts bzw. der Steifigkeitsverteilung im Gesamtquerschnitt abhängig.

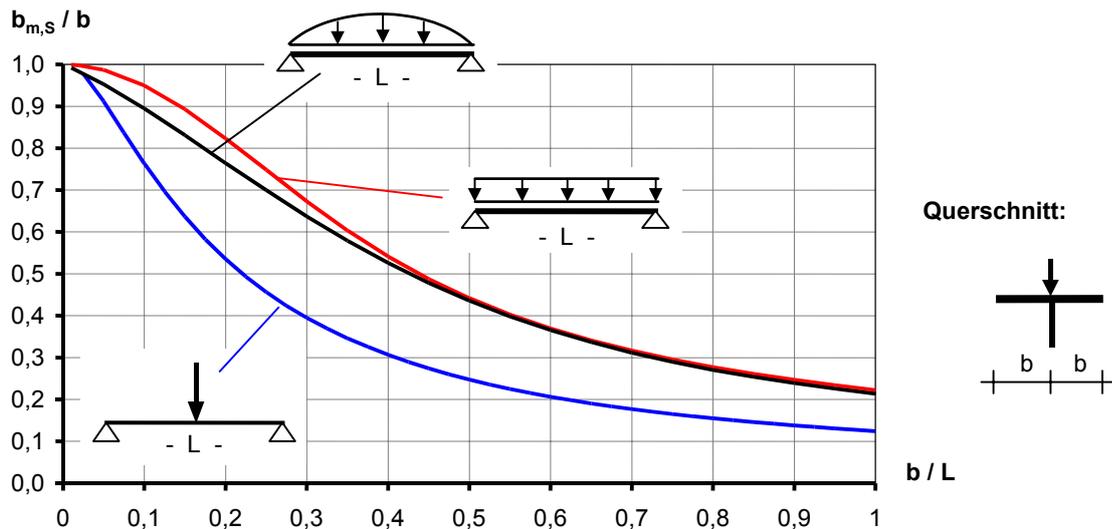


Abbildung 4.18: Mittragende Breite $b_{m,S}$ der Gurtscheibe des einsteigigen Plattenbalkens in Feldmitte für verschiedene Belastungsfunktionen [Rieg 2006]

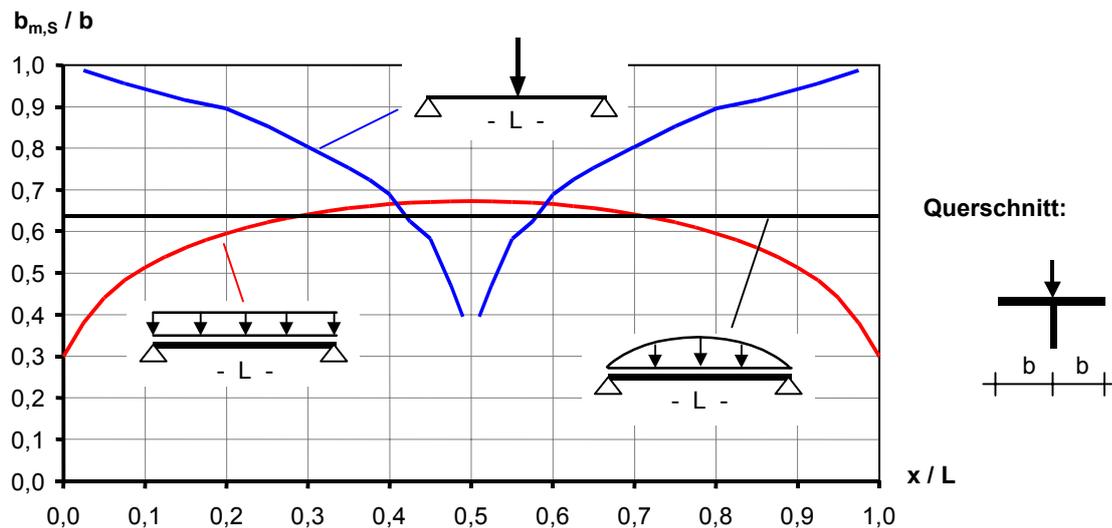


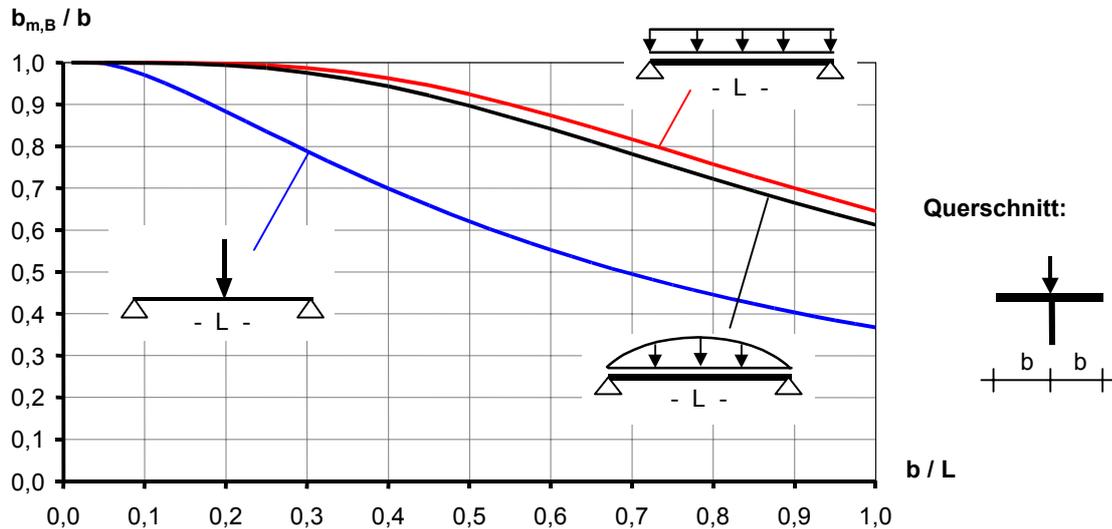
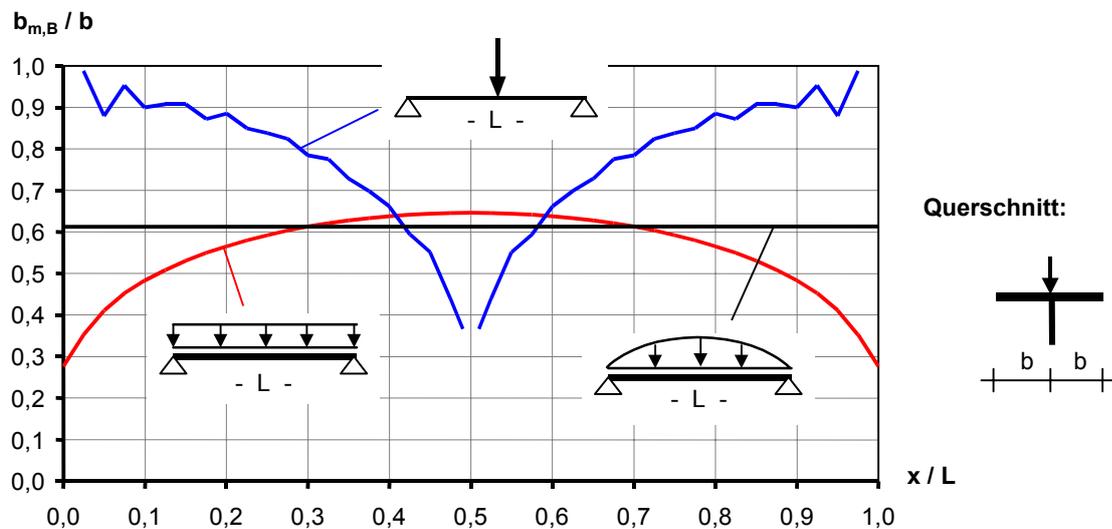
Abbildung 4.19: Verlauf der mittragenden Breite $b_{m,S}$ der Gurtscheibe des einsteigigen Plattenbalkens in Trägerlängsrichtung [Rieg 2006]

4.5.2.3 Einflüsse auf die mittragende Breite des Biegezustands

Aus den Berechnungen der mittragenden Breite des reinen Biegezustands durch Lösung der Plattendifferentialgleichung [Hasslacher 2001] können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden, die mit den Angaben in der zuvor beschriebenen Literatur übereinstimmen [Kuhlmann, Rieg 2004a]:

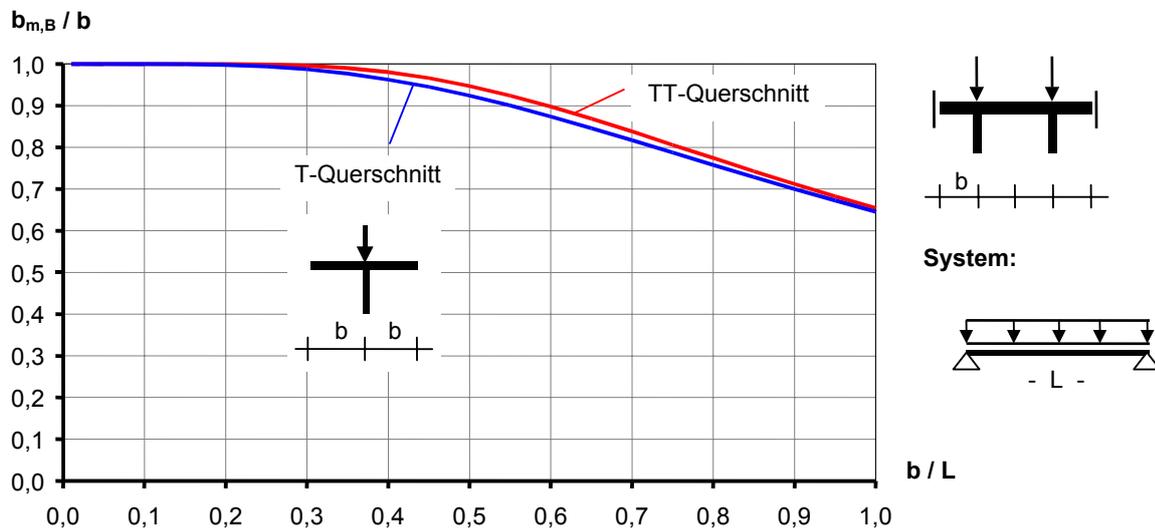
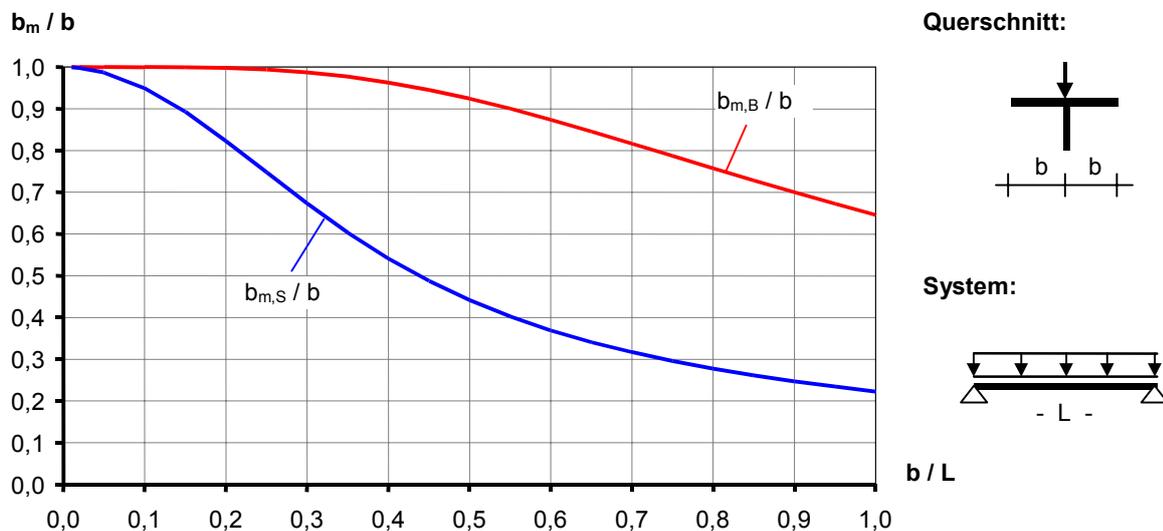
- Der Haupteinflussparameter für die mittragende Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands ist das Seitenverhältnis des Gurts b/L . Für zunehmende Werte b/L nimmt die bezogene mittragende Breite $b_{m,B}/b$ rasch ab, siehe Abbildung 4.20.
- Der Belastungstyp des Trägers hat einen nennenswerten Einfluss auf die mittragende Breite. Die mittragende Breite $b_{m,B}$ für Gleichlast ist an der maßgebenden Trägerstelle deutlich größer als bei mittiger Einzellast, siehe Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21.

- Die mittragende Breite $b_{m,B}$ variiert in Trägerlängsrichtung, siehe Abbildung 4.21. Bei Belastung des Trägers mit einer Gleichlast ist die mittragende Breite in Feldmitte maximal und nimmt in Richtung zu den Auflagern stetig ab. Bei einer Belastung des Trägers mit einer konzentrierten Einzellast kommt es aufgrund der Spannungsspitze an der Stelle der Einzellast zu einer Einschnürung der mittragenden Breite. Ein Sonderfall stellt die einfach harmonische Belastung dar: Hier ist die mittragende Breite in Trägerlängsrichtung konstant.


 Abbildung 4.20: Mittragende Breite $b_{m,B}$ der Gurtplatte eines Plattenbalkens in Trägermitte

 Abbildung 4.21: Verlauf der mittragenden Breite $b_{m,B}$ (Plattenbalken) in Längsrichtung

- Die mittragende Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands ist unabhängig von der Höhe der äußeren Belastung des Plattenbalkens. Dies gilt jedoch nur, solange sich die Gurtplatte linearelastisch verhält und sich im Zustand I befindet. Bei nicht-linearelastischem Materialverhalten ist die mittragende Breite zusätzlich von der Belastungshöhe abhängig.
- Die mittragende Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands ist unabhängig von der Dicke h_c der Gurtplatte. In der kombinierten Wirkung mit dem immer vorhandenen Scheibenzustand des Betongurts ist die mittragende Breite jedoch von der Dicke des Betongurts bzw. der Steifigkeitsverteilung im Gesamtquerschnitt abhängig, siehe Abschnitt 4.5.3. Mit steigender Betonplattendicke nimmt das Verhältnis der Biegetragwirkung der Gurtplatte zur Gesamtbeigetragfähigkeit zu.

- Der Querschnittstyp des Trägers (einstegig oder mehrstegig) hat auf die mittragende Breite $b_{m,B}$ nur einen geringfügigen Einfluss. Die mittragende Breite bei Behinderung der Querverdrehung an den Längsrändern des Betongurts (mehrstegiger Querschnitt) ist geringfügig größer als ohne, siehe Abbildung 4.22.
- Die mittragende Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands ist im Allgemeinen deutlich größer die des reinen Scheibenzustands $b_{m,S}$, siehe Abbildung 4.23.


 Abbildung 4.22: Mittragende Breite $b_{m,B}$ in Abhängigkeit des Querschnittstyps

 Abbildung 4.23: Mittragende Breite $b_{m,B}$ der Gurtplatte und $b_{m,S}$ eines Plattenbalkens

4.5.3 Kombinierte Wirkung des Scheiben- und Biegezustands

4.5.3.1 Grundsätzliches

Das Tragverhalten von breiten Gurten in Plattenbalken und Verbundträgern kann in einen Scheibenzustand und einen Biegezustand unterteilt werden, siehe Abschnitt 4.5.1. Solange der Betongurt im Zustand I ist und sich Beton und Stahl linear-elastisch verhalten, kann der Scheiben- vom Biegezustand durch Anwendung des Superpositionsprinzip getrennt berech-

net werden werden. Mit Kenntnis der mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands kann die Biegesteifigkeit $I_{i,0}$ des Verbundquerschnitts im elastischen Fall nach Gleichung (4.4) berechnet werden. Die Eigenbiegesteifigkeit I_c des Betongurts wird dabei mit der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands und der Steiner-Anteil $S_{i,0} \cdot a_{St}$ der Teilquerschnitte mit der mittragenden Breite $b_{m,S}$ des Scheibenzustands berechnet.

$$I_{i,0} = I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}$$

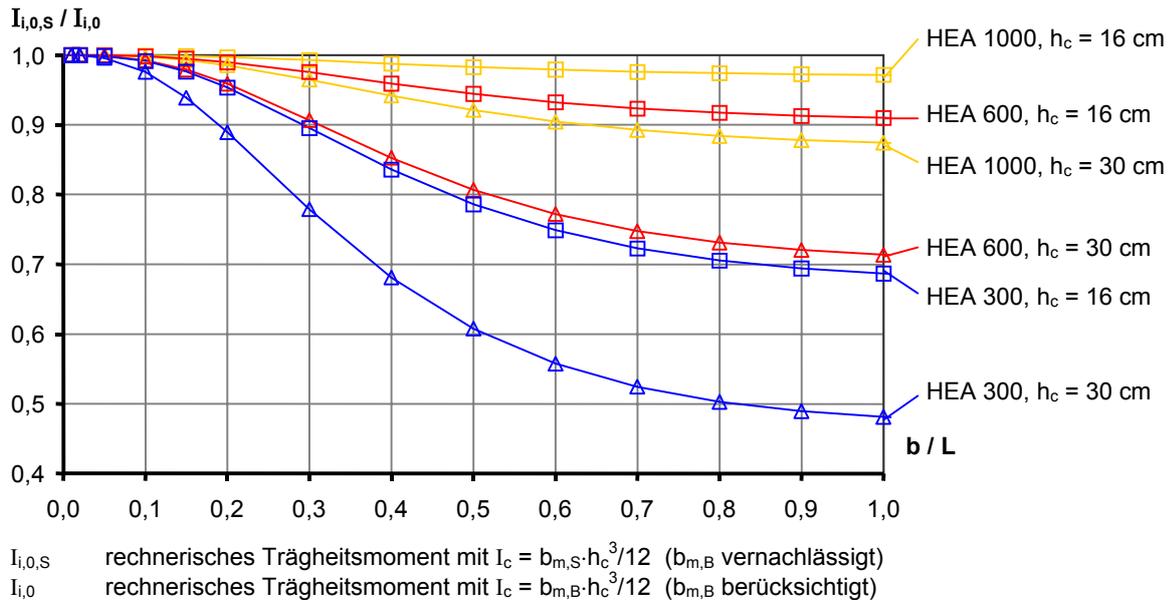
$$I_{i,0} = I_a + \frac{b_{m,B} \cdot h_c^3}{12 \cdot n_0} + \frac{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} \cdot A_a}{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} + A_a} \cdot a_{St}^2 \quad (4.4)$$

| | | |
|-----|----------------------|---|
| mit | $I_{i,0}$ | Gesamtträgheitsmoment des Verbundquerschnitts |
| | I_a | Trägheitsmoment des Stahlquerschnitts |
| | $I_{c,0}$ | Trägheitsmoment des Betonquerschnitts (reduziert um Steifigkeitsverhältnis E_a / E_{cm}) |
| | $S_{i,0}$ | statisches Moment des Betonquerschnitts |
| | A_a | Querschnittsfläche des Stahlquerschnitts |
| | $n_0 = E_a / E_{cm}$ | Reduktionszahl ($E_a = E$ -Modul von Stahl, $E_{cm} = E$ -Modul von Beton) |
| | $b_{m,S}, b_{m,B}$ | mittragende Breite des Betongurts für den reinen Scheiben- bzw. Biegezustand |
| | h_c | Dicke des Betongurts |
| | a_{St} | Schwerpunktastand zwischen Beton- und Stahlquerschnitt |

Im Gegensatz dazu wird in der Ingenieurpraxis im Allgemeinen die Eigenbiegesteifigkeit I_c des Betongurts mit der mittragenden Breite $b_{m,S}$ des Scheibenzustands berechnet. Im Vergleich zu dieser Praxis ergibt sich mit Gleichung (4.4) ein realistischerer Rechenwert für die Biegesteifigkeit des Verbundquerschnitts, der für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger deutlich größer ist als die heute übliche Praxis, siehe Abbildung 4.24.

In Abbildung 4.24 ist das Verhältnis der rechnerischen Trägheitsmomente des Verbundquerschnitts dargestellt, wenn die mittragende Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands bei der Berechnung berücksichtigt wird (Wert $I_{i,0}$ nach Gleichung (4.4)) bzw. nicht (Wert $I_{i,0,S}$ berechnet mit $I_c = b_{m,S} \cdot h_c^3 / 12$). Es zeigt sich, dass die Vernachlässigung der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands ($\rightarrow I_{i,0,S}$) bei hohen Verbundträgern mit dünnen Betongurten keine nennenswerte Abweichung ergibt. Die Werte $I_{i,0,S}$ und $I_{i,0}$ sind ungefähr gleich groß.

Dies liegt daran, dass bei hohen Verbundträgern mit einem vergleichsweise dünnen Gurt der Anteil der Biegesteifigkeit I_c des Betongurts an der Gesamtsteifigkeit $I_{i,0}$ des Verbundträgers sehr klein ist. Somit stellt die Vernachlässigung des Biegezustands bei hohen Trägern eine ausreichend genaue Näherung dar. Bei den bekannten Verfahren zur Verbundträgerbemessung z. B. dem Gesamtquerschnittsverfahren [Roik et al 1999] wird deshalb in guter Näherung zur Berechnung der Biegesteifigkeit I_c des Betongurt anstatt der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands der kleinere Wert $b_{m,S}$ verwendet.


 Abbildung 4.24: Einfluss der mittragenden Breite $b_{m,B}$ auf die Biegesteifigkeit

Bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Trägern ist der Anteil der Biegesteifigkeit I_c des Betongurtes an der Gesamtsteifigkeit des Verbundquerschnitts jedoch sehr groß, so dass der Fehler bei Verwendung von $b_{m,S}$ anstatt $b_{m,B}$ bei der Berechnung der Biegesteifigkeit I_c sehr groß wird (ca. 15÷50 % für den Verbundquerschnitt: HEA 300, $h_c = 30$ cm), siehe Abbildung 4.24. Die Vernachlässigung des Einflusses des Biegezustands auf die mittragende Breite führt daher bei niedrigen Verbundträgern zu einer nicht akzeptablen Abweichung. Der Unterschied, der durch Vernachlässigung der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands entsteht, wird dabei größer, wenn

- die Dicke h_c des Betongurtes (und damit der Biegetraganteil des Gurtes im Verhältnis zur Gesamtbiegetragfähigkeit des Verbundträgers) zunimmt,
- die Höhe h_a des Stahlträgers kleiner wird,
- die Steifigkeit I_a des Stahlquerschnitts kleiner wird und
- das Seitenverhältnis b/L größer wird, siehe Abbildung 4.24.

Eine realistische Berechnung der Biegesteifigkeit $I_{i,0}$ von niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern kann daher nur unter Berücksichtigung des Einflusses des Biegezustands des Betongurtes auf die mittragende Breite erfolgen, da der Biegezustand des Betongurtes einen wesentlichen Einfluss auf die mittragende Breite hat.

Da für Slim-Floor Träger der Biegetraganteil des Betongurtes noch größer ist, gelten die hier getroffenen Aussagen natürlich auch für diesen Typ von Verbundträgerquerschnitt.

Über die Biegesteifigkeit $I_{i,0}$ des Verbundquerschnitts können die unterschiedlichen Werte der mittragenden Breite des reinen Scheiben- und Biegezustands in einen „mittleren“ Wert für die mittragende Breite b_m durch Gleichsetzen der Gleichungen (4.4) und (4.5) umgerechnet werden. Der Wert der „mittleren“ mittragenden Breite b_m liegt dabei zwischen den beiden Grenzkurven des reinen Scheiben- und reinen Biegezustands. Wie nahe er dabei an den jeweiligen Grenzkurven liegt, hängt vom Verhältnis der Steifigkeiten der Teilquerschnitte ab, siehe Abbildung 4.25. Für hohe Verbundträger mit dünnen Betongurten ist der Einfluss der Biegesteifigkeit I_c des Betongurtes auf die Gesamtsteifigkeit des Verbundquerschnitts klein. Die „mittlere“ mittragende Breite b_m liegt daher sehr nahe an der Grenzkurve des reinen Scheibenzustands. Bei Verbundträgern niedriger Bauhöhe ist der Anteil der Biegesteifigkeit

I_c des Betongurts jedoch sehr groß, so dass der Wert der „mittleren“ mittragenden Breite b_m näher an der Grenzlinie des reinen Biegezustands liegt. Mit zunehmender Dicke des Betongurts h_c und abnehmender Steifigkeit des Stahlquerschnitts wird die mittragende Breite größer und nähert sich zusehends der Grenzkurve des reinen Biegezustands an.

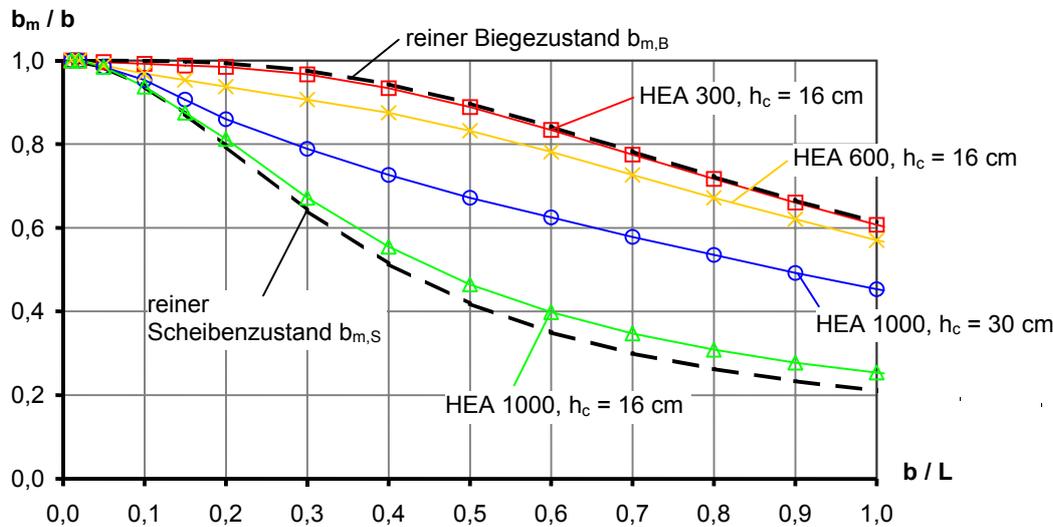


Abbildung 4.25: Einfluss der Dicke des Betongurts auf die „mittlere“ mittragende Breite b_m

Diese Überlegungen zeigen, dass für die wirklichkeitsnahe Berechnung der Steifigkeit von niedrigen Verbundträgern der Einfluss des Biegezustands des Betongurts auf die mittragende Breite berücksichtigt werden muss. Die vereinfachende Annahme, die (mittlere) mittragende Breite b_m des Betongurts mit der des reinen Scheibenzustands $b_{m,S}$ gleichzusetzen und den Einfluss des Biegezustands auf die mittragende Breite zu vernachlässigen, führt bei diesen Trägern auf eine sehr große Unterschätzung der tatsächlichen Steifigkeit und damit einer zu großen Berechnung der Verformung.

$$I_{i,0} = I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}$$

$$I_{i,0} = I_a + \frac{b_m \cdot h_c^3}{12 \cdot n_0} + \frac{\frac{b_m \cdot h_c}{n_0} \cdot A_a}{\frac{b_{m,s} \cdot h_c}{n_0} + A_a} \cdot a_{St}^2 \quad (4.5)$$

mit $I_{i,0}$ effektives Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts
 b_m „mittlere“ mittragende Breite des Verbundquerschnitts
 sonstige Bezeichnungen siehe Gleichung (4.4)

4.5.3.2 Einflüsse auf die mittragende Breite

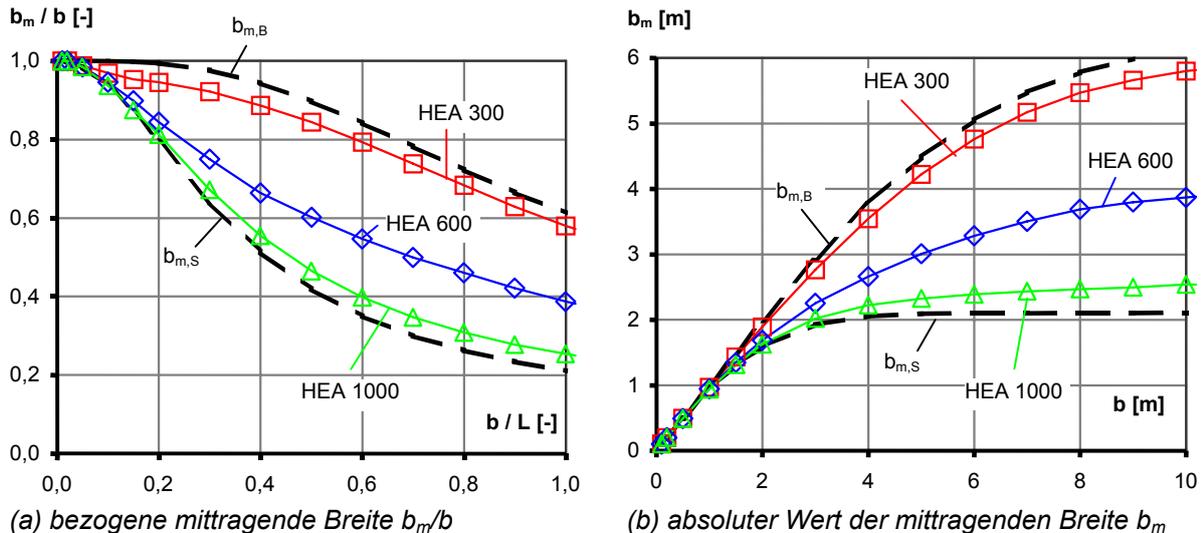
Im nachfolgenden Abschnitt werden die Einflüsse auf die mittragende Breite aufgeführt. Genauere Erläuterungen und Hinweise sind in der Literatur von [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] zu finden.

Der maßgebende Einfluss auf die mittragende Breite ist das Seitenverhältnis b/L des Betongurts [Schmidt, Peil 1976]. Mit zunehmendem Verhältnis b/L nimmt die bezogene „mittlere“ mittragende Breite b_m/b rasch ab. Bei gleichbleibender Stützweite L und größer werdender Breite b des Betongurts nimmt dabei zwar das Verhältnis b_m/b ab, der absolute Wert der mittragenden Breite b_m wird jedoch größer, siehe Abbildung 4.26. Die mittlere mittragende

Breite b_m nimmt bei gleichbleibendem Seitenverhältnis b/L aber auch mit der Stützweite L zu, siehe Abbildung 4.27.

Grund hierfür ist: Bei konstantem Verhältnis b/L bleiben zwar die bezogenen Werte der mittragenden Breite für den Scheibenzustand $b_{m,S}/b$ und den Biegezustand $b_{m,B}/b$ gleich, aber da die tatsächliche Breite b zunimmt, werden auch die Einzelwerte $b_{m,S}$ und $b_{m,B}$ größer.

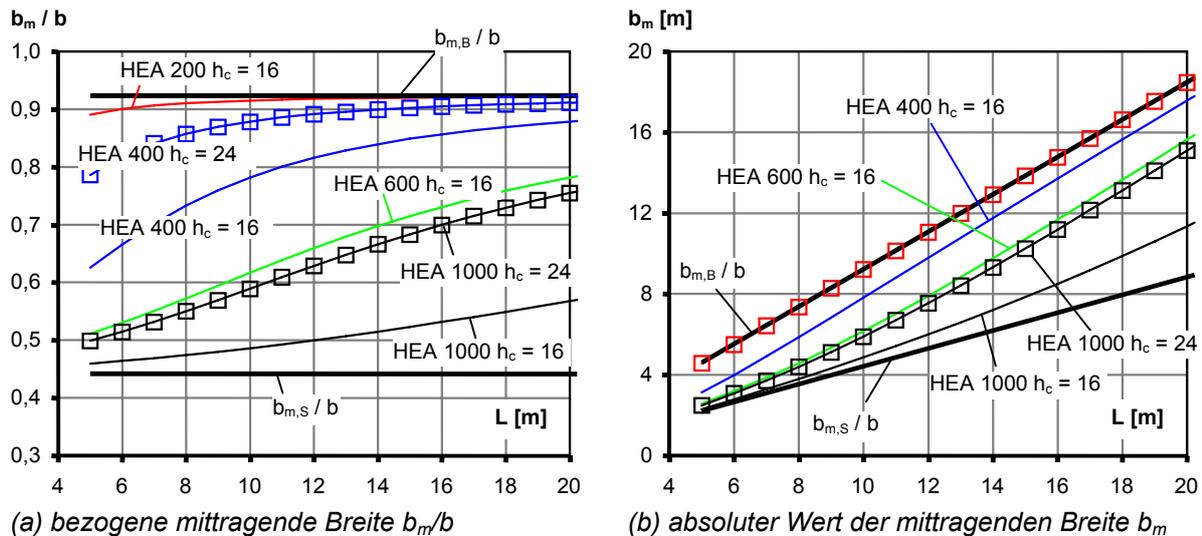
Bei gleichem Baustahlprofil nimmt dadurch die Biegesteifigkeit des Betongurts und damit der Einfluss des Biegezustands auf die Gesamtsteifigkeit des Verbundquerschnitts sowie letztlich der Wert der mittleren mittragenden Breite b_m zu. Für größere Stützweiten L nähert sich daher die mittragende Breite dem Grenzwert des reinen Biegezustands an, siehe Abbildung 4.27.



System- und Querschnittswerte: $L = 10 \text{ m}$, $h_c = 16 \text{ cm}$, $E_c = 3200 \text{ kN/cm}^2$

Abbildung 4.26: Mittlere mittragende Breite b_m in Abhängigkeit der Breite b für verschiedene Stahlträgerhöhen bei gleichbleibender Stützweite und Plattendicke

Die Untersuchungen der vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass zwar die mittragende Breite für den reinen Scheibenzustand und den reinen Biegezustand jeweils für sich unabhängig von der Dicke des Betongurts sind, der mittlere Wert der mittragenden Breite b_m ist jedoch deutlich von der Dicke h_c des Betongurts abhängig, siehe Abbildung 4.27. Dies liegt daran, dass die mittragende Breite des reinen Biegezustands deutlich größer ist als die des reinen Scheibenzustands. Da für größere Gurticken h_c die Biegesteifigkeit I_c des Betongurts stärker anwächst als die Dehnsteifigkeit, wird der Einfluss der mittragenden Breite des Biegezustands auf die mittlere mittragende Breite b_m und damit auch der Wert b_m größer.



Systemwerte: $b/L = 0,5$, $E_c = 3200 \text{ kN/cm}^2$, h_c [cm]

Abbildung 4.27: Mittlere mittragende Breite b_m in Abhängigkeit der Stützweite L für verschiedene Stahlträgerhöhen und Plattendicken h_c bei gleichbleibendem Seitenverhältnis b/L

Wie den Ausführungen zur mittragenden Breite des reinen Scheiben- bzw. Biegezustands zu entnehmen ist, ist die mittragende Breite von der Querdehnzahl μ des (Beton-)Gurts abhängig. Für größere Werte der Querdehnzahl nimmt die mittragende Breite geringfügig ab. Da die Querdehnzahl für Beton jedoch unabhängig von der Betongüte ist, hat dies bei baupraktischen Verbundträgern keinen Einfluss auf die mittragende Breite.

Wie den Gleichungen (4.4) und (4.5) zu entnehmen ist, ist das Trägheitsmoment $I_{i,0}$ des Verbundquerschnitts vom Verhältnis der E-Moduli des Stahlträgers und des Betongurts abhängig. Abbildung 4.28 zeigt den Einfluss des E-Moduls des Betons auf die mittragende Breite b_m des Verbundquerschnitts. Es zeigt sich, dass die mittragende Breite mit zunehmendem E-Modul des Betons größer wird. Dies liegt daran, dass bei größerem E-Modul des Betons die Reduktion der Betonquerschnittswerte ($I_c \rightarrow I_{c,0}$ und $A_c \rightarrow A_{c,0}$) geringer wird und dadurch der Anteil der Biegesteifigkeit $I_{c,0}$ des Betongurts an der Gesamtsteifigkeit des Verbundquerschnitts größer ist. Dies gilt somit auch für die mittragende Breite. Der Einfluss des E-Moduls des Betons ist dabei bei Querschnitten mit vergleichsweise kleinem Biegeanteil des Betongurts größer als bei solchen mit großem Biegeanteil des Betongurts. Für die beispielhaft untersuchten Querschnitte liegt der Einfluss des E-Moduls auf die mittlere mittragende Breite bei maximal 11% und im Rahmen baupraktischer Verhältnisse bei weniger als 4%.

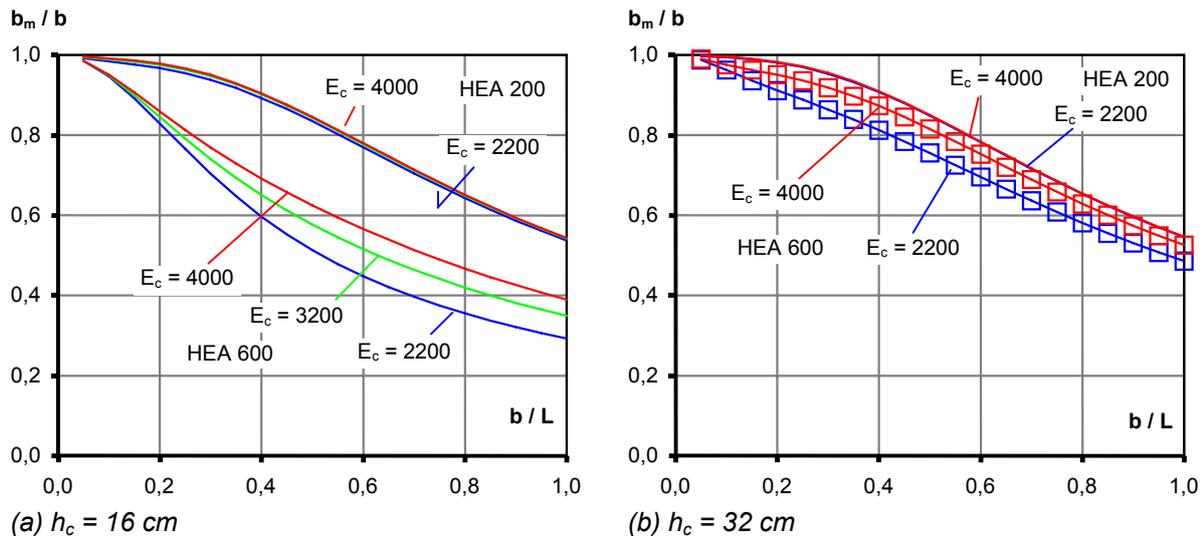


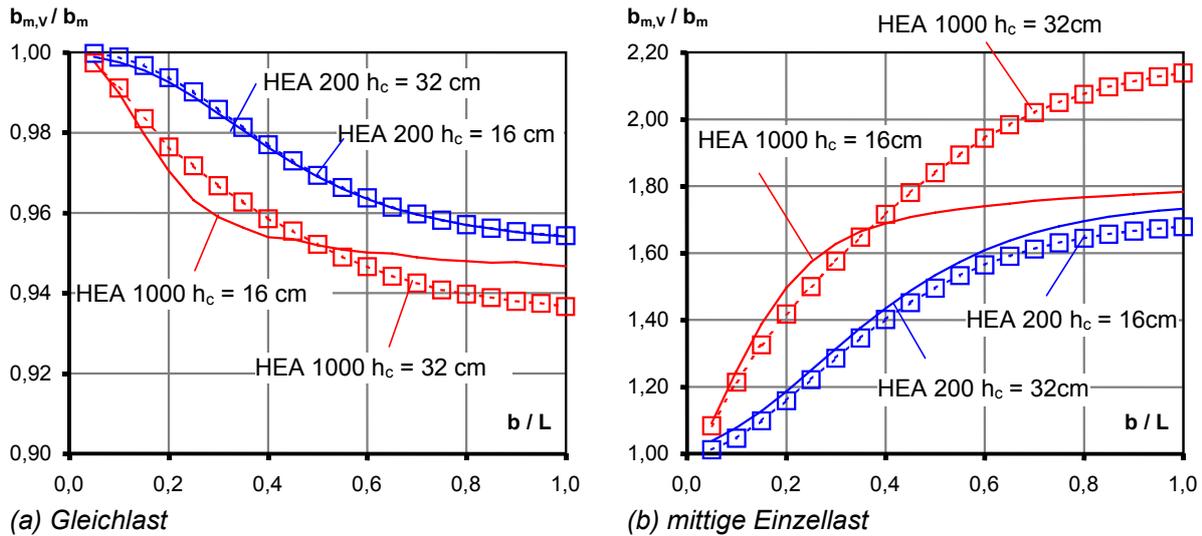
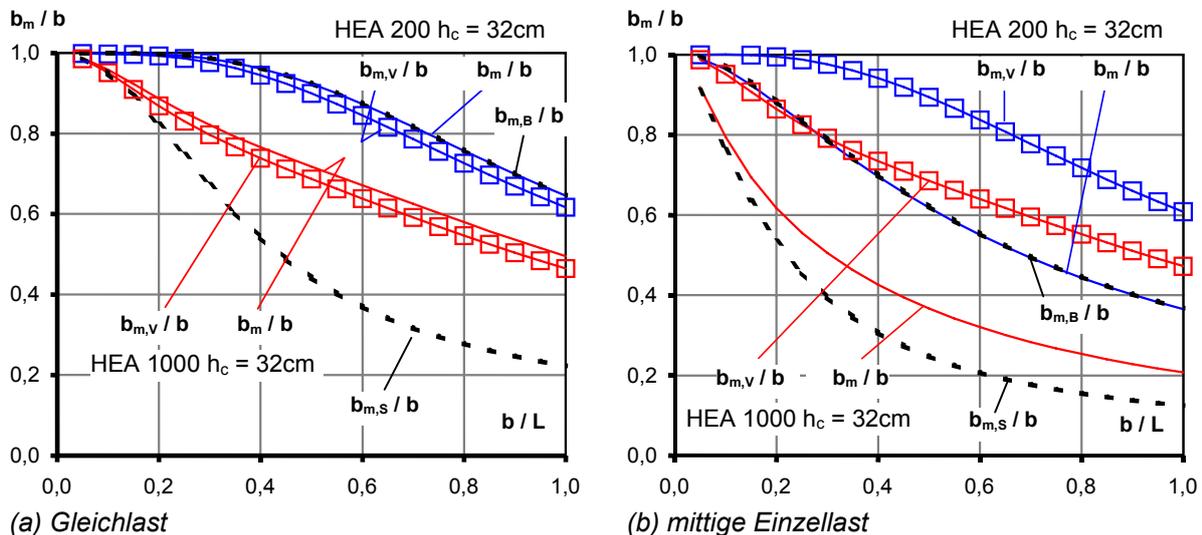
Abbildung 4.28: Einfluss des E-Moduls des Betons auf die mitttragende Breite b_m

4.5.3.3 Verformungsbezogene mitttragende Breite für elastisches Materialverhalten

Wie die voran beschriebenen Untersuchungen zeigen, ist die spannungsbezogene mitttragende Breite entlang der Trägerlängsrichtung im Allgemeinen nicht konstant, siehe z. B. Abbildung 4.21. Dadurch ist ebenso das Trägheitsmoments $I_{i,0}$ des Verbundträgers in Trägerlängsrichtung veränderlich. Für eine Verformungsberechnung bedeutet dies, dass strenggenommen nicht mit einer konstanten Steifigkeit und einer konstanten mitttragenden Breite in Trägerlängsrichtung gerechnet werden kann. Um eine solch aufwändige Berechnung zu vermeiden, wurde die verformungsbezogene mitttragende Breite $b_{m,v}$ eingeführt, siehe Abschnitt 4.2.3. Auf die verformungsbezogene mitttragende Breite haben die oben beschriebenen Parameter einen vergleichbaren Einfluss wie auf die spannungsbezogene mitttragende Breite.

Darüber hinaus hat die Form der Belastung einen deutlichen Einfluss darauf, wie sehr die verformungsbezogene mitttragende Breite $b_{m,v}$ von der spannungsbezogenen mitttragenden Breite b_m im maßgebenden Querschnitt abweicht, siehe Abbildung 4.29 und Abbildung 4.30.

Für Träger unter Gleichlast ist der Unterschied zwischen der verformungsbezogenen mitttragenden Breite $b_{m,v}$ und der spannungsbezogenen mitttragenden Breite b_m in Feldmitte vernachlässigbar klein. Im Beispiel in Abbildung 4.29 liegt die Abweichung zwischen beiden Werten für hochbautypische Querschnitte bei weniger als 5 %. Grund hierfür ist, dass für eine Gleichlast die mitttragende Breite in Trägerlängsrichtung vergleichsweise ausgeglichen ist. In guter Näherung können daher bei elastischem Materialverhalten und Einfeldträgern unter Gleichlast Verformungen unter der Annahme berechnet werden, dass die spannungsbezogene mitttragende Breite b_m in Feldmitte über die gesamte Trägerlänge konstant ist.


 Abbildung 4.29: Vergleich der mittragenden Breite $b_{m,V}$ und b_m ($x/L = 0,5$)

 Abbildung 4.30: Vergleich mittragenden Breite b_m zur geometrischen Breite

Für eine mittige Einzellast ist der Unterschied zwischen der verformungsbezogenen mittragenden Breite und der spannungsbezogenen mittragenden Breite in Feldmitte jedoch deutlich. Im Beispiel in Abbildung 4.29 beträgt der Unterschied zwischen den Werten $b_{m,V}$ und b_m bis zu 100 %. Die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ ist dabei deutlich größer als die spannungsbezogene mittragende Breite b_m in Feldmitte, siehe Abbildung 4.30, da für die mittige Einzellast der Verlauf der mittragenden Breite in Trägerlängsrichtung stark variiert, siehe z. B. Abbildung 4.19 und Abbildung 4.21. Im Fall einer Einzellast in Trägermitte ist die vereinfachende Annahme $b_{m,V} = b_m$ daher im Allgemeinen unzureichend.

Wie Abbildung 4.31 zeigt, ist die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ für Gleichlast und mittige Einzellast am Einfeldträger in der Regel ungefähr gleich groß. Der große Unterschied, wie er für die spannungsbezogene mittragende Breite b_m in Feldmitte für diese Belastungsformen vorhanden ist, besteht bei der verformungsbezogenen mittragenden Breite nicht. Dies liegt daran, dass bei mittiger Einzellast die spannungsbezogene mittragende Breite in Feldmitte zwar sehr viel kleiner ist als bei Gleichlast, die spannungsbezogene mittragende Breite bei mittiger Einzellast mit zunehmendem Abstand von der Feldmitte jedoch sehr schnell größer wird und die entsprechenden Werte bei Gleichlast übersteigen, siehe Abbildung 4.19 und Abbildung 4.21. Da die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

ein integraler Wert der spannungsbezogenen mittragenden Breite über die Trägerlänge ist, werden bei diesem die Unterschiede zwischen den Werten der spannungsbezogenen mittragenden Breite bei mittiger Einzellast und Gleichlast verschmiert.

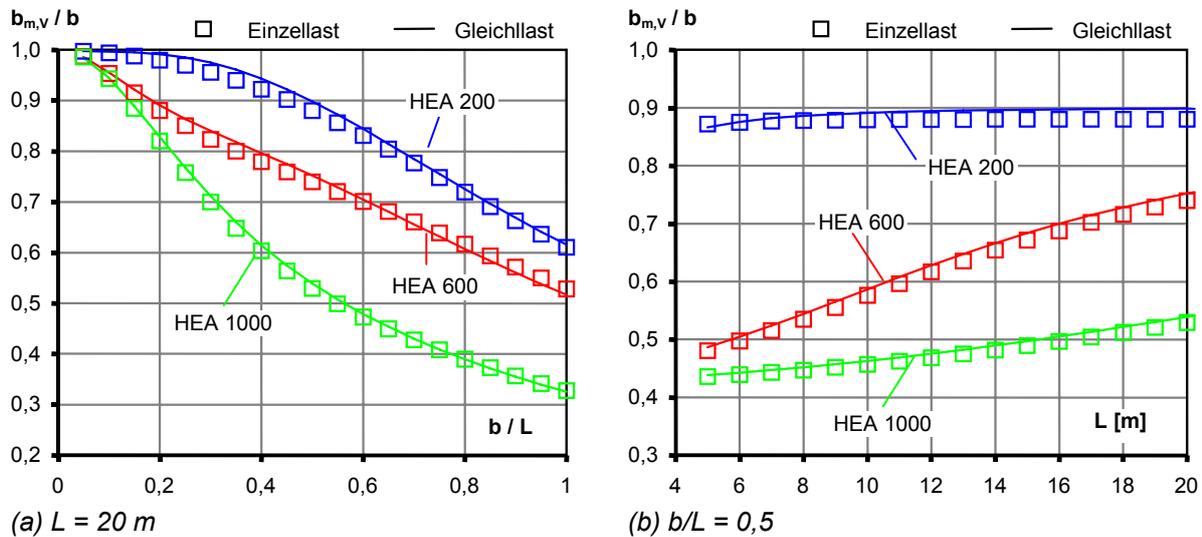


Abbildung 4.31: Verformungsbezogene mittragende Breiten $b_{m,v}$ für Verbundquerschnitte

Generell gilt, dass die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ im Wesentlichen denselben Einflüssen unterliegt wie die spannungsbezogene mittragende Breite b_m . Die maßgebenden Einflüsse sind somit:

- Mit zunehmendem Seitenverhältnis b/L wird der bezogene Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}/b$ kleiner.
- Mit zunehmender Biegetragwirkung des Betongurts, zunehmender Plattendicke h_c , abnehmender Trägerhöhe, etc. wird die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ größer.

4.5.4 Schlussfolgerungen aus den linear-elastischen Untersuchungen

Das Tragverhalten von Betongurten in Verbundträgern setzt sich aus einem Scheiben- und einem Biegezustand zusammen. Bei Annahme linear-elastischen Materialverhaltens lassen sich diese beiden Zustände durch Anwendung des Superpositionsprinzips voneinander trennen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die mittragende Breite des reinen Biegezustands deutlich größer ist als die des reinen Scheibenzustands. Der Einfluss des Biegezustands nimmt dabei mit größer werdender Dicke des Betongurts und mit kleiner werdender Gesamthöhe des Verbundträgers bzw. Steifigkeit des Stahlquerschnitts zu.

Bei dem gängigen Vorgehen in der Ingenieurpraxis wird der Einfluss des Biegezustands des Betongurts auf die mittragende Breite vernachlässigt. Der Fehler, der dabei bei der Berechnung der Biegesteifigkeit des Verbundträgers gemacht wird, ist zwar bei hohen Verbundträgern mit im Verhältnis zur Stützweite kleinem Achsabstand vernachlässigbar, bei niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern kann er jedoch 15÷50 % betragen und sollte daher nicht vernachlässigt werden. Der Einfluss des Biegezustands auf die rechnerische Steifigkeit und die mittragende Breite des Verbundträgers nimmt dabei mit zunehmender Dicke des Betongurts und kleiner werdender Trägerhöhe zu.



Von den hier vorgestellten elastischen Untersuchungen zur mittragenden Breite von Verbundträgern lässt sich folgern, dass der Biegezustand des Betongurts einen wesentlichen Einfluss auf die mittragende Breite und die rechnerische Biegesteifigkeit niedriger Verbundträger hat. Der Einfluss nimmt mit zunehmender Dicke und Breite des Betongurts sowie kleiner werdender Gesamthöhe des Verbundträgers zu. Für einen realistischen Berechnungsansatz für Slim-Floor Träger und niedrige Verbundträger müssen daher diese Faktoren berücksichtigt werden.

4.6 Weiteres Vorgehen

In der weiteren Arbeit werden Versuche an Slim-Floor Trägern beschrieben und nachgerechnet. Das in Abschnitt 6.1 beschriebene numerische Modell und das in Abschnitt 6.2 beschriebene analytische Berechnungsmodell werden auf Slim-Floor Träger übertragen und an den Ergebnissen der geplanten Versuchen und weiterer in der Literatur beschriebener Versuche, z. B. [Kuhlmann, Rieg 2004a], verifiziert. Auf Basis des verifizierten analytischen Modells wird eine umfangreiche Parameterstudie unter den Randbedingungen des normalen Geschossbaus durchgeführt, die Einflüsse auf die mittragende Breite analysiert und ein einfacher Berechnungsansatz entwickelt, der es erlaubt, die Verformungen von niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern wirklichkeitsnah zu berechnen.

5 Experimentellen Untersuchungen

5.1 Grundsätzliches

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden sechs Versuche mit Slim-Floor Trägern mit breiten Betongurten am Otto-Graf-Institut (MPA), Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen an der Universität Stuttgart durchgeführt.

Die Versuche wurden hierbei unter der Einhaltung folgender Randbedingungen konzipiert und durchgeführt:

- Verwendung praxisgerechter Abmessungen im Maßstab 1:1
- Verwendung von Slim-Floor Trägern, bei denen die elastische Nulllinie im Beton liegt. D. h., bereits unter geringen Lasten im Gebrauchszustand entstanden Risse auf der Betonunterseite.
- Verwendung eines sehr breiten Betongurts (deutlich breiter als die mittragende Breite), um eine klare Aussage über den Verlauf der Betonspannungen und -dehnungen in Querrichtung des Betongurts zu erhalten sowie einen deutlichen Einfluss der Schubverformung des Betongurts auf das Trag- und Verformungsverhalten der Versuchsträger zu gewährleisten.
- Verwendung statisch bestimmter Systeme, um klare Aussagen durch die Kenntnis des Verlaufs der Gesamtschnittgrößen und Auflagerreaktionen allein aus den Lagerungs- und Belastungsbedingungen ohne Kenntnis der Steifigkeitsverteilung im Träger zu erhalten. Für die Versuchsträger VT 1 bis 5 wurde als System ein Einfeldträger gewählt, für den Versuchsträger VT 6 ein Einfeldträger mit Kragarm.
- Verwendung einer Zweipunktbelastung zur ausreichend genauen Approximation einer gleichmäßig verteilten Belastung in Trägerlängsrichtung, die den wichtigsten Lastfall in der Praxis darstellt. Der Vorteil dabei liegt im querkräftfreien Bereich zwischen den Einzellasten.
- Anordnung der Lastpunkte in Stahlträgerebene der Versuchsträger VT 1, 2, 5 und 6, um eine Exzentrizität in Querrichtung und ein damit verbundenes Querbiegemoment des Betongurts zu vermeiden.
- Exzentrische Anordnung der Lastpunkte zur Stahlträgerachse der Versuchsträger VT 3 und 4, um eine Exzentrizität in Querrichtung und ein damit verbundenes Querbiegemoment des Betongurts zu erzeugen.
- Praxisgerechte Bewehrung der Betongurte.
- Verwendung von in der Praxis üblichen Werkstoffen und Werkstoffgüten.
- Die Abmessungen der Versuchsträger wurden auf Maße beschränkt, die einen Transport mit LKW, Kran, etc. ermöglichten und die maximalen Abmessungen des Versuchsstands einhielten.

Ausgehend von einem Basisversuch (Versuchskörper VT 1) wurde bei jedem weiteren Versuch nur ein einziger Parameter variiert, um dessen Auswirkung auf das Verformungsverhalten und die mittragende Breite zu bestimmen, siehe Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4. Damit war es möglich, mit diesem beschränkten Versuchsprogramm eine möglichst große Anzahl an Parametern zu untersuchen.

5.2 Versuchsprogramm

5.2.1 Geometrie der Träger und Variation der Parameter

Das Versuchsprogramm besteht aus sechs Versuchsträgern. Die hierbei gewählten Abmessungen und variierten Parameter sind in den nachfolgenden Tabellen angegeben. Tabelle 5.2 gliedert die verwendeten Betonstahl- und Baustahlgüten sowie die Querschnittsabmessungen des Hutprofils.

Tabelle 5.2: Versuchsprogramm - Werkstoffe und Profilgrößen

| Versuchs-Nr. | Stahlprofil | Untergurt | Stahlgüte | Betongüte | Bewehrungsgüte |
|--------------|----------------|--------------------|-----------|-----------|----------------|
| VT 1 | UPE 200 | 400 x 10 mm | S 235 | C 20/25 | S 500 |
| VT 2 | UPE 220 | 420 x 15 mm | S 235 | C 20/25 | S 500 |
| VT 3 | UPE 200 | 400 x 10 mm | S 235 | C 20/25 | S 500 |
| VT 4 | UPE 200 | 400 x 10 mm | S 235 | C 20/25 | S 500 |
| VT 5 | UPE 200 | 400 x 10 mm | S 235 | C 20/25 | S 500 |
| VT 6 | UPE 200 | 400 x 10 mm | S 235 | C 20/25 | S 500 |

In Tabelle 5.3 werden die Plattengeometrien aufgeführt. Die hervorgehobenen Werte zeigen jeweils den variierten Parameter der Versuchsträger.

Tabelle 5.3: Versuchsprogramm – Plattengeometrie/Verdübelungsgrad/Lastexzentrizität

| Versuchs-Nr. | Stahlquerschnitt | L [m] | B [m] | h _c [cm] | η ¹⁾ [-] | e ²⁾ [m] |
|--------------|------------------|-------------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| VT 1 | UPE 200 | 4,25 | 3,50 | 22 | 1,0 | 0,0 |
| VT 2 | UPE 220 | 4,25 | 3,50 | 30 | 1,0 | 0,0 |
| VT 3 | UPE 200 | 4,25 | 3,50 | 22 | 1,0 | 0,75 |
| VT 4 | UPE 200 | 4,25 | 3,50 | 22 | 1,0 | 1,25 |
| VT 5 | UPE 200 | 4,25 | 3,50 | 22 | 0,5 | 0,0 |
| VT 6 | UPE 200 | 5,00 | 3,50 | 22 | 1,0 | 0,0 |

1) Verdübelungsgrad
 2) Lastexzentrizität in Querrichtung (Abstand zur Stahlprofil-Längsachse)

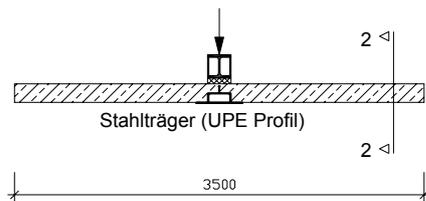
In Tabelle 5.4 gliedert nochmals im Überblick die variierten Parameter im Vergleich zum Basis-Versuchskörper VT 1.

Tabelle 5.4: Versuchsprogramm - Parametervariation

| Versuchs-Nr. | Variierter Parameter | Parameter | im Vgl. zum Basiskörper |
|--------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| VT 2 | Plattendicke h _c | h _c = 30 cm | h _c = 22 cm |
| VT 3 | Querbiegung | e = 0,75 m | e = 0,0 m |
| VT 4 | Querbiegung | e = 1,25 m | e = 0,0 m |
| VT 5 | Verdübelungsgrad η | η = 0,5 | η = 1,0 |
| VT 6 | negativer Momentenbereich | Auskragung | Einfeldträger |

In den nachfolgenden Abbildungen sind die jeweiligen Systemskizzen der Versuchsaufbauten der Versuchsträger VT 1 bis 6 aufgeführt. Hierbei zeigt Abbildung 5.32 die mittige Belastung des Verbundträgers bei den Versuchen VT 1, 2 und VT 5, während bei den Versuchsträgern VT 3 und VT 4 ein zusätzlicher Verteilungsträger für die exzentrische Lasteinleitung eingebaut wurde, siehe Abbildung 5.33. Der verlängerte Versuchsträger VT 6 wurde neben der Hauptpresse in Feldmitte zusätzlich noch durch eine Kragarmpresse belastet, um über dem linken Auflager (siehe Abbildung 5.34) ein negatives Moment zu erzeugen.

Schnitt 1 - 1



Schnitt 2 - 2

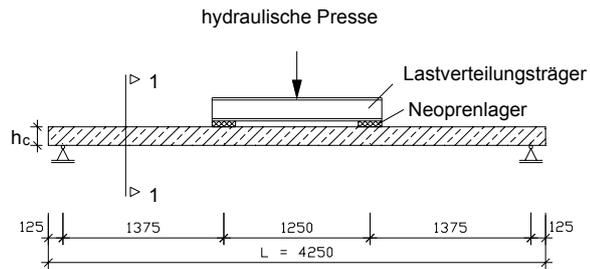
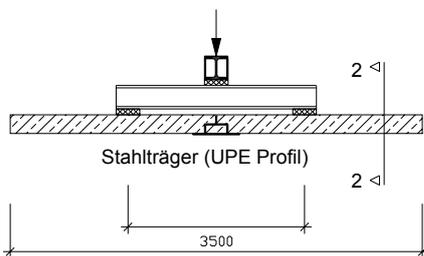


Abbildung 5.32: Versuchsträger VT 1, 2, 5

Schnitt 1 - 1



Schnitt 2 - 2

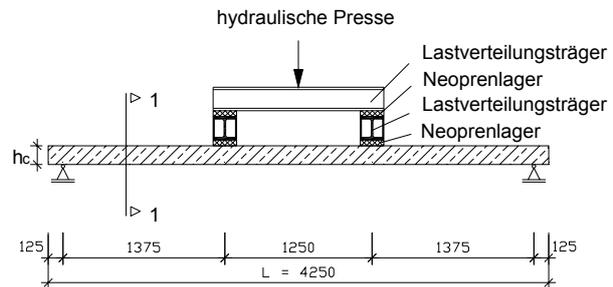
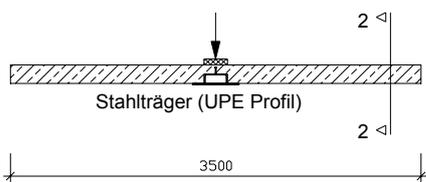


Abbildung 5.33: Versuchsträger VT 3, 4

Schnitt 1 - 1



Schnitt 2 - 2

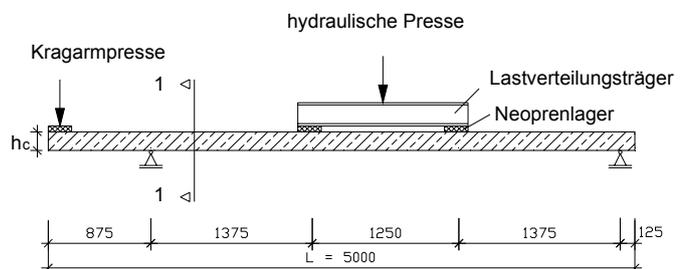


Abbildung 5.34: Versuchsträger VT 6

5.2.2 Versuchsträger VT 3 und VT 4 unter Querbiegung

Die Versuchsträger VT 3 und VT 4 wurden unter dem Einfluss einer Querbiegung untersucht. Hierbei wurden die Versuchsträger (durch Anordnung zusätzlicher Lastverteilungsträger, siehe hierzu Abbildung 5.33) einer Lastexzentrizität in Querrichtung unterzogen, um über dem Stahlträger ein Stützmoment zu erzeugen. Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 dargestellt, wurde die Querverteilung zu 0,75 m und 1,25 m gewählt. Ausgehend von einer Exzentrizität der Last von 0,75 m beim Versuchsträger VT 3 soll der Lastfall eine gleichmäßig verteilte Flächenlast über die Betonplatte abbilden.

Um den Einfluss der Querbiegung auf das Gesamttragverhalten zu untersuchen, wurde bei Versuchsträger VT 4 die Lastexzentrizität noch weiter auf 1,25 m gesteigert. Die Last stellte damit einen Extremfall einer am Trägerrandbereich konzentrierten Lasteinwirkung dar.

Durch die Erhöhung des Stützmoments aus Querbiegung reißt der Betonquerschnitt entlang des Stahlträgers an der Betonoberseite weiter auf. Hier sollte nun der Einfluss auf die mittragende Breite des Betons in Längsrichtung untersucht werden.

5.3 Herstellung der Versuchsträger

Die UPE-Profile wurden von der Fa. Salzgitter AG (Peine) gestiftet und von Fa. Haller Industriebau (Villingen-Schwenningen), die die Untergurtbleche für die Slim-Floor Profile gesponsert haben, zusammengebaut Abbildung 5.36. Die Kopfbolzendübel, gespendet von der Fa. Köster & Co., wurden mit einer handelsüblichen Bolzenschweißpistole mit Hubzündung aufgeschweißt, siehe Abbildung 5.37. Die Ausführung der Bolzenschweißung wurde mittels Sichtprüfung und stichprobenhaftem Schlagbiegeversuch kontrolliert.



Abbildung 5.35: Schneiden der Untergurtbleche

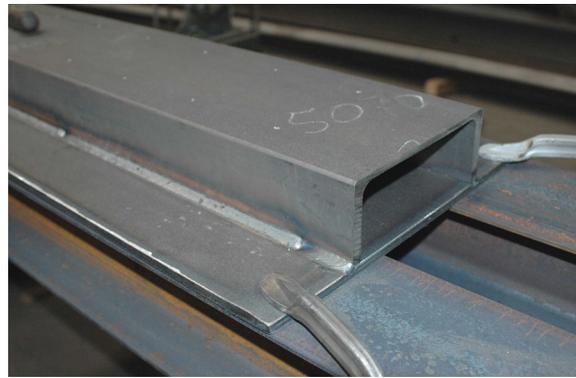


Abbildung 5.36: Zusammenschweißen der Hutprofile



Abbildung 5.37: Aufschweißen der Kopfbolzen



Abbildung 5.38: Hutprofile mit Kopfbolzen

Vor dem Betonieren wurde an den Stahlträgern Dehnmessstreifen zur Dehnungsmessung am Stahl angebracht. Zusätzlich wurden die Versuchsträger VT 1 und 2 mit Dehnmessrosetten auf dem UPE-Profil versehen, siehe Abbildung 5.39 und Abbildung 5.40.



Abbildung 5.39: Kleben der Dehnmessstreifen



Abbildung 5.40: Versuchsträger mit Dehnmessstreifen und Dehnmessrosetten

Die Betongurte wurden bei der Firma Knecht GmbH Betonwerk, Schorndorf hergestellt, siehe Abbildung 5.41, Abbildung 5.42 und Abbildung 5.43. Die Betongurte wurden liegend entsprechend dem späteren Versuch betoniert. Die Träger wurden mittels eines Kipptisches stehend aus der Schalung gehoben. Ebenso stehend erfolgte der Transport der Träger, siehe Abbildung 5.44.



Abbildung 5.41: Schalung und Bewehrung eines Versuchsträgers



Abbildung 5.42: Ausschalen des Versuchskörpers



Abbildung 5.43: Versuchskörper VT 2 nach dem Ausschalen



Abbildung 5.44: Transport der Versuchsträger

Zwischen dem jeweiligen Betoniertag und Versuchstag lagen 29 bis 61 Tage. Zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte der Versuchsträger wurden für jeden Träger drei bzw. vier

Probewürfel mit 150 mm Kantenlänge, drei Probezylinder mit 150 mm \varnothing und 300 mm Höhe und drei Probebalken mit den Abmessungen 530 x 100 x 100 mm hergestellt. Die Proben wurden durchgehend zusammen mit den Versuchskörpern gelagert.

Vor dem Versuch wurden die Ober- und Unterseite und die Stirnflächen des Betongurts mit weißer Kalkfarbe gestrichen, um Risse im Beton besser und einfacher erkennen zu können. Anschließend wurde an Ober- und Unterseite des Betongurts ein Raster aufgezeichnet und bezeichnet, um beim Versuch gemachte Bilder eindeutig zuordnen zu können.

5.4 Versuchsaufbau

Die Versuchsträger VT 1, 2 und VT 5 wurden als Einfeldträger mit einer Zweipunktbelastung in Stegebene des Stahlträgers geplant, siehe Abbildung 5.45 sowie Abbildung 5.32.



Abbildung 5.45: Aufbau des Versuchsstandes für die Versuchskörper VT 1, 2 und VT 5

Für die Versuchsträger VT 3 und 4 wurden infolge der exzentrischen Lasteinleitung zusätzliche Querverteilerträger eingebaut, siehe Abbildung 5.46 sowie Abbildung 5.33.



Abbildung 5.46: Aufbau des Versuchsstandes VT 3 und VT 4

Für den Versuchsträger VT 6 musste aufgrund der veränderten Plattengeometrie und der zusätzlichen Presse für die Belastung des Kragarmes der Versuchsstand entsprechend umgebaut werden, siehe Abbildung 5.47 sowie Abbildung 5.34.



Abbildung 5.47: Aufbau des Versuchsstandes VT 6

Die Belastung wurde mit einem servohydraulisch gesteuertem Prüfzylinder und einem Lastverteilungsträger auf die beiden Lastpunkte weggesteuert aufgebracht. Zwischen Lastverteilungsträger und Betongurt wurde an den beiden Belastungspunkten der Versuchsträger bewehrte Neoprenlager mit ca. 3 cm Dicke und zum Teil noch zusätzliche Stahlplatten zum Höhenausgleich eingelegt, siehe Abbildung 5.48. Bei allen Versuchsträgern wurden die Neoprenlager bzw. Stahlplatten auf ein Mörtelbett gesetzt, um Oberflächenunebenheiten auszugleichen.



Abbildung 5.48: Auflagerpunkt Lastverteilungsträger



Abbildung 5.49: Auflagerkonstruktion mit Rollenlager

Die Träger wurden im Versuchsstand an beiden Auflagern verschieblich gelagert. Dabei wurde bei allen Trägern nur der Stahlträger auf dem Auflager aufgelegt. Als Auflager dienten Rollenlager, die in Trägerlängsrichtung verschieblich gelagert wurden, siehe Abbildung 5.49.

5.5 Messeinrichtung

5.5.1 DMS und DMS-Rosetten

Zur Messung der Dehnungen im Baustahl wurden über die Versuchsträger verteilt auf der Ober- und Unterseite DMS angebracht. Zusätzlich wurden bei Versuchsträger VT1 und VT 2 Dehnmessrosetten auf die Stege der UPE-Profile angebracht.

5.5.2 Wegaufnehmer

Es wurden induktive Wegaufnehmer von zwei verschiedenen Herstellern eingesetzt. Zur Aufnahme der Durchbiegungen sowie des relativen Schlupfes zwischen Beton und Baustahl

wurden Wegaufnehmer der Baureihen TRS 25, TRS 50 und TRS 100 der Firma novotechnik verwendet. Die angegebene Zahl gibt hierbei den Messweg wieder, also 25 mm, 50 mm und 100 mm. Die Reihe TRS 25 hat einen definierten Bereich von 25 mm Messlänge und eine Messgenauigkeit von $\pm 0.2\%$, Typ TRS 50 hat 50 mm Messlänge und $\pm 0.15\%$ Messgenauigkeit. Der Typ TRS 100 besitzt eine Genauigkeit von $\pm 0.075\%$ bei einem Messbereich von 100 mm. Abbildung 5.50 zeigt die Wegaufnehmer auf der Betonober- und -unterseite.



Abbildung 5.50: Wegaufnehmer auf Betonober- und -unterseite

5.5.3 Setzdehnungsmesser

Zur Messung der Betondehnungen an der Betonoberseite wurden induktive Setzdehnungsmesser eingesetzt. Diese Setzdehnungsmesser sind ein Eigenbau des Otto-Graf-Instituts / MPA (Universität Stuttgart). Sie besitzen eine Messlänge von 200 mm und zeichnen die Dehnungsentwicklung in diesem Bereich auf. In Abbildung 5.51 ist ein solcher Setzdehnungsmesser dargestellt.

Die Setzdehnungsmesser haben gegenüber der Messung mit herkömmlichen Wegaufnehmern den Vorteil, dass die Messung direkt an der Bauteiloberfläche und nicht in der Achse des Wegaufnehmers vorgenommen wird.

Mit den Wegaufnehmern wird somit nicht die tatsächliche Dehnung an der Betonoberfläche sondern die Dehnung auf Höhe der Messachse der Wegaufnehmer, die wie in Abbildung 5.50 ersichtlich im Abstand von 2,5 cm entfernt von der Betonoberfläche liegt.

Die Setzdehnungsmesser messen die tatsächliche Dehnung an der Betonoberfläche. Da diese nur in begrenzter Anzahl zur Verfügung standen, wurden zusätzlich herkömmliche Wegaufnehmer zur Messung der Betondehnungen an den Betonträgeraußenseiten oben, sowie auf der Betonträgerunterseite verwendet.

Die Messung der Betondehnungen an der Ober- und Unterseite des Betongurtes erfolgt jeweils genau übereinander liegend. In Kombination mit den Dehnungen an der Trägerunterseite können somit Teilschnittgrößen (Biegemomente und Normalkräfte) des Betongurtes ermittelt werden.



Abbildung 5.51: Setzdehnungsmesser

5.5.4 Messpunkte

Folgende Messungen wurden vorgenommen, siehe Abbildung 5.52 und Abbildung 5.53:

1. Globale Messungen

Messung der Durchbiegung des Trägers in Feldmitte, gemessen an der Unterkante des Stahlträgers mittels eines 100 mm-Wegaufnehmers.

Messungen der seitlichen Bewegung der Platte an der seitlichen Stirnfläche des Trägers sowie an den Trägerstirnflächen.

Messung des Endschlupfs zwischen Beton und Stahl an beiden Trägerenden, sowie unter Lasteinleitungspunkt mittels eines 25 mm-Wegaufnehmers.

2. Messungen am Stahlträger mittels Dehnmessstreifen

Messung der Dehnung des Stahlträgers am Ober- und Untergurt verteilt über die Trägerlängsrichtung.

Messung des Dehnungszustands verteilt über den Versuchsträger VT 1 und VT 2 zur Bestimmung der Querkraft im Stahlträger mittels Dehnmessrosetten.

3. Messungen an der Oberseite des Betongurts

Messung der Längsdehnung des Betons in Feldmitte an der Betonoberseite verteilt über die Breite des Betongurts mittels Setzdehnmessmer und 25 mm-Wegaufnehmer. Messbasis 200 mm.

Messung der Längsdehnung des Betons auf Höhe der Lasteinleitung an der Betonoberseite, verteilt über die Breite des Betongurts mittels Setzdehnmessmer und 25 mm-Wegaufnehmer. Messbasis 200 mm.

Für die in den nachfolgenden Kapiteln diskutierten Betondehnungen gilt, dass es sich hierbei nicht um tatsächliche lokale Dehnungen des Betons handelt, sondern um über die Messlänge von 200 mm gemittelte Längenänderungen des entsprechenden Betonbereichs.

4. Messungen an der Unterseite des Betongurts

Messung der Längsdehnung des Betons in Feldmitte an der Betonunterseite, verteilt über die Breite des Betongurts mittels 25 mm-Wegaufnehmer. Messbasis 200 mm.

Messung der Längsdehnung des Betons auf Höhe einer Lasteinleitung in Feldmitte an der Betonunterseite, verteilt über die Breite des Betongurts mittels 25 mm-Wegaufnehmer. Messbasis 200 mm.

Aufzeichnung der Rissentwicklung an der Betonunterseite während des Versuchs

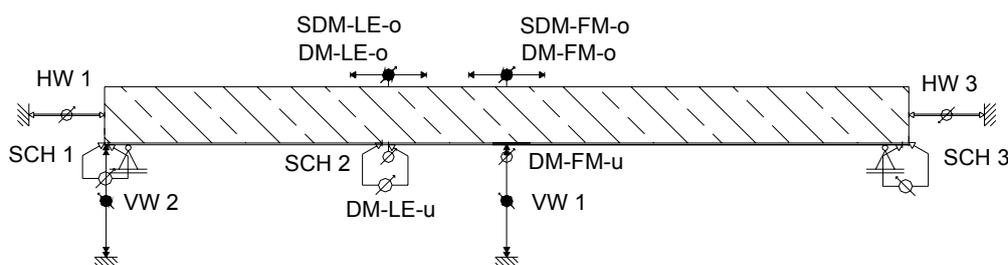


Abbildung 5.52: Messeinrichtung - Seitenansicht Betonplatte

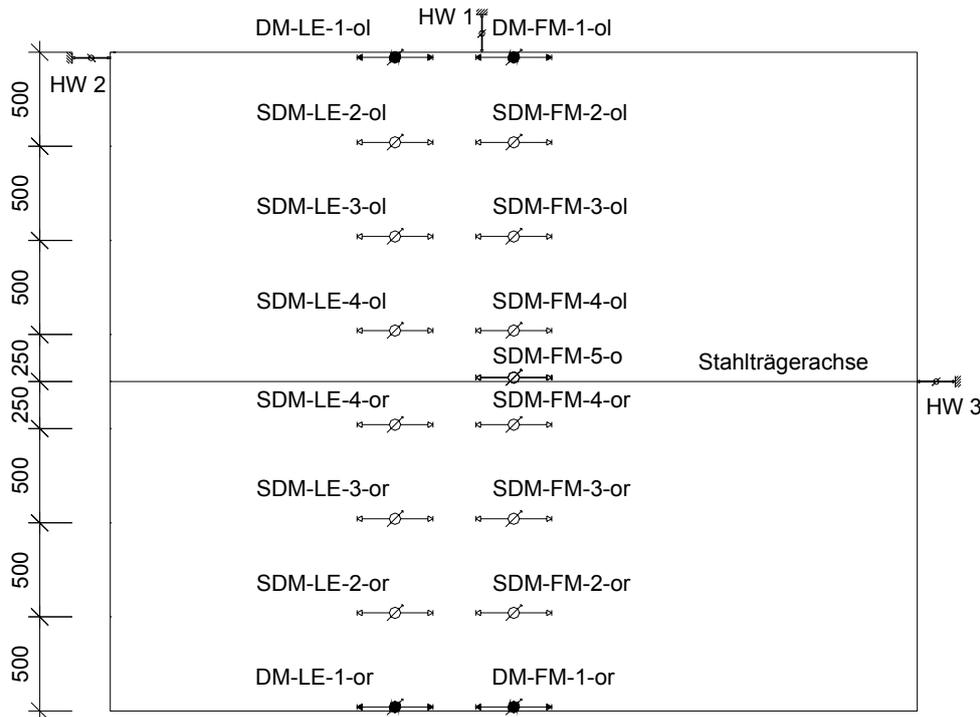


Abbildung 5.53: Messeinrichtung – Oberseite Betonplatte

5.6 Versuchsdurchführung

5.6.1 Versuchsträger VT 1 bis VT 5

Die Versuchsdurchführung der Träger VT 1 bis 5 wurde für alle fünf gleich ausgeführt. So wurden während des Versuchs Belastungsstopps (Anhalten der Verformung) mit einem Abstand von ca. 50 kN ($\approx 5-10\%$ der erwarteten Traglast) bis zum Erreichen der Streckgrenze eingelegt. Während der Belastungsstopps wurden die Rissbildung und das Rissbild an der Unterseite des Betongurts inspiziert, markiert und dokumentiert.

Nach einer schrittweisen Erstbelastung bis 150 kN wurde bei diesem Laststand die Rissbildung auf der Trägerunterseite aufgenommen. Die Rissentwicklung zeigte bereits bei dieser Belastung ein ausgeprägtes Rissbild im Mittelbereich des Trägers. An drei ausgewählten Rissen im Bereich der Feldmitte wurden Rissaufnehmer angebracht und anschließend der Träger wieder entlastet, um bei der Zweitbelastung die Rissentwicklung von Beginn an mit aufzeichnen zu können.

Die Pressengeschwindigkeit wurde weggesteuert mit 0,01 mm/s gefahren. Bei Erreichen der Höchstlast wurde ebenfalls ein Belastungsstopp eingelegt, die Rissentwicklung abschließend dokumentiert und aufgenommen. Anschließend wurde die Belastungsgeschwindigkeit auf 0,03 mm/s hochgefahren.

Die Erfassung der Messwerte erfolgte kontinuierlich alle 10 Sekunden. Alle Versuchsträger wurden bis zum Erreichen der Traglast belastet und darüber hinaus verformt. Die Versuchsdauer betrug jeweils ca. einen Tag, während die Vorbelastung auf 150 kN jeweils am Vortag durchgeführt wurde.

5.6.2 Versuchsträger VT 6

Im Gegensatz zu den anderen Trägern wurde beim Versuch VT 6 zusätzlich eine Kragpresse angebracht. Der Versuchsträger VT 6 war länger als die anderen Träger und kragte über ein Auflager mit ca. 90 cm aus. Für die Untersuchung des Einflusses der mittragenden Breite unter negativen Momenten wurde im ersten Belastungsschritt der Kragarm belastet, bis deutliche Querrisse über dem Auflager erkennbar waren. Hierbei wurde analog zum Vorgehen bei den Rissen auf der Betonunterseite ein Rissmesser angebracht und anschließend der Kragarm wieder entlastet. Die Kragarmpresse wurde kraftgesteuert angeschlossen, so dass bei der Hauptbelastung ein konstantes Stützmoment über dem Auflager garantiert werden konnte. Für die Hauptbelastung wurde analog verfahren wie bei Versuchsträger VT 1 bis VT 5. Im Gegensatz dazu wurde aber vor Belastungsbeginn bei der Hauptpresse die Kraft der Kragarmpresse wie bei der Vorbelastung eingestellt.

5.7 Werkstoffkennwerte

Die Ermittlung der Werkstoffkennwerte aller Versuchsträger wurde anhand vorhandener Proben durchgeführt. Für jeden Versuchsträger standen folgende Proben zur Verfügung:

- je drei Betonprobewürfel Kantenlänge 150 mm zur Bestimmung der Betonwürfel-druckfestigkeit
- je drei Betonprobenprismen mit Abmessungen 100 x 100 x 530 mm zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit
- je drei Betonprobenzylinder mit den Abmessungen 300 mm Höhe x 150 mm \varnothing
- je drei Proben der verwendeten Stahlbetonbewehrung zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Linie des Betonstahls
- je ein Trägerstück der Länge ca. 400 mm des Baustahls, entnommen aus den verwendeten Flachstahlbleche für die Untergurte sowie aus den Stegen der UPE-Profile

Die Betonproben wurden am Tag des Versuchs geprüft. Die Prüfung der Betonprobewürfel, -zylinder und -prismen erfolgte gemäß [DIN 1048].

5.8 Versuchsergebnisse

5.8.1 Trag- und Verformungsverhalten

5.8.1.1 Allgemeines

Bei allen Versuchen waren bereits unter sehr kleinen Laststufen Risse auf der Unterseite des Betons erkennbar, so dass bei Erreichen der Gebrauchslast ($\sim 0,5 \times$ Traglast) auf der Unterseite ein abgeschlossenes Rissbild vorlag.

Bei allen Trägern stellte sich das geplante Versagen ein. Alle Versuchsträger verhielten sich sehr duktil und das Versagen kündigte sich durch sehr große Verformungen an, siehe Abbildung 5.54. Das Versagen ergab sich bei allen Trägern in der Querachse einer der beiden Lastpunkte.

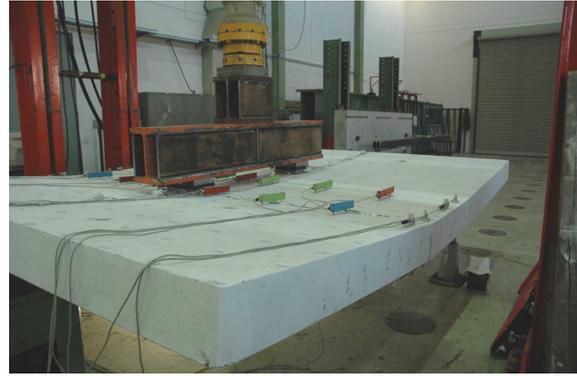


Abbildung 5.54: Durchbiegung des Trägers bei maximaler Traglast

Für die Träger wurde das Versagen durch ein Einschnüren der Betondruckzone eingeleitet. Das Versagen trat dann durch ein Druckversagen des Betons ein, erkennbar durch das Abscheren von Betonschollen am Biegedruckrand des Betongurts, siehe Abbildung 5.55.

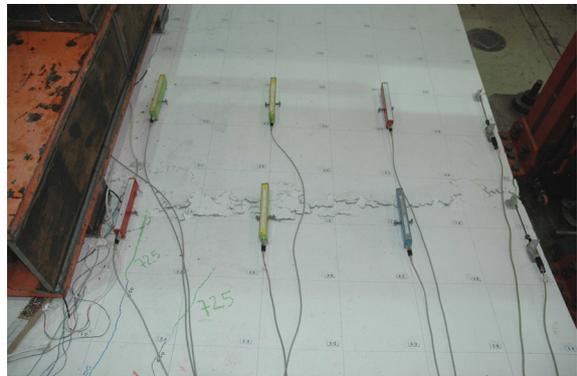


Abbildung 5.55: Abplatzungen des Betons in der Druckzone

Durch das Einschnüren der Druckzone und Fließen der Zugbewehrung auf der Betonunterseite rissen nachfolgend Längsbewehrungsstäbe ab, siehe Abbildung 5.56. Dies war mit einem Abfall der Pressenkraft verbunden. Der Versuchskörper wurde daraufhin nicht weiter belastet und der Versuch abgebrochen.

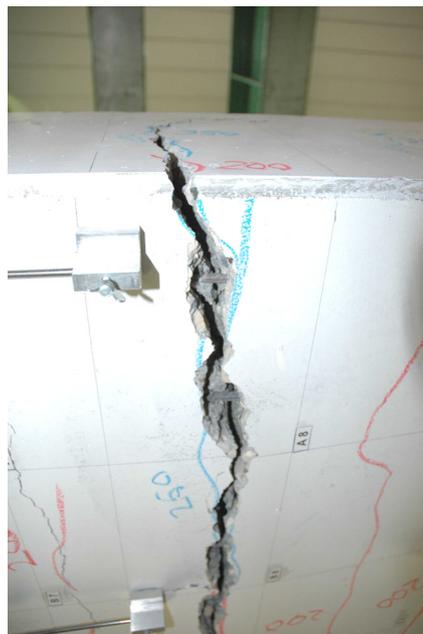
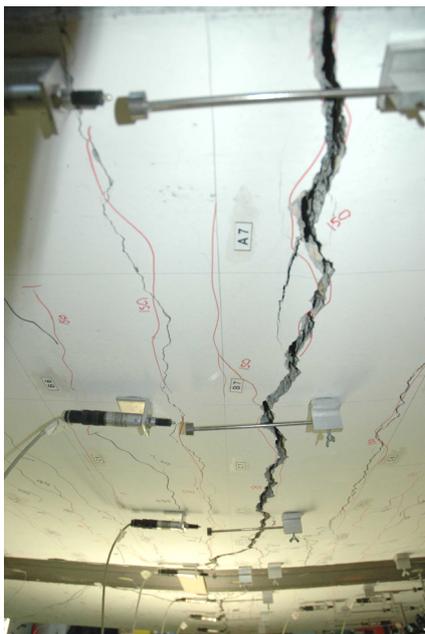


Abbildung 5.56: Reißen der Bewehrung in der Zugzone

In Abbildung 5.57 bis Abbildung 5.62 sind die Last-Verformungs-Kurven der Versuchsträger dargestellt.

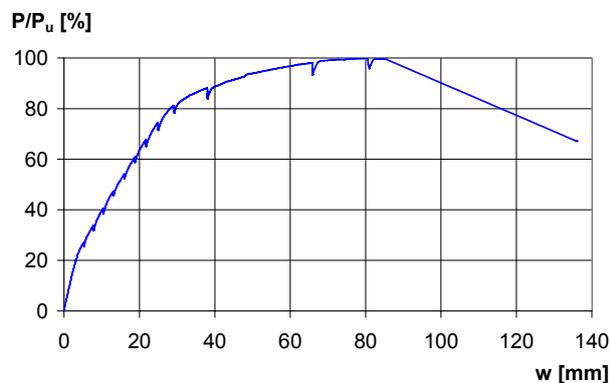


Abbildung 5.57: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 1

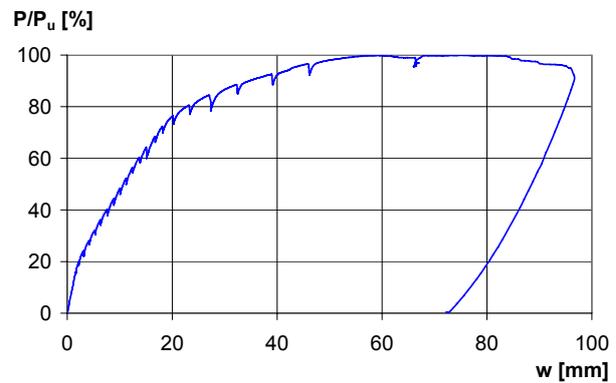


Abbildung 5.58: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 2

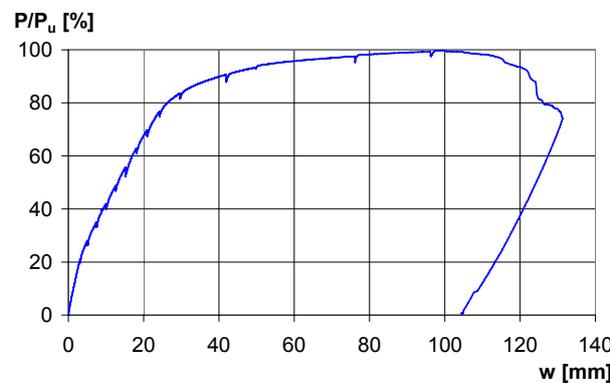


Abbildung 5.59: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 3

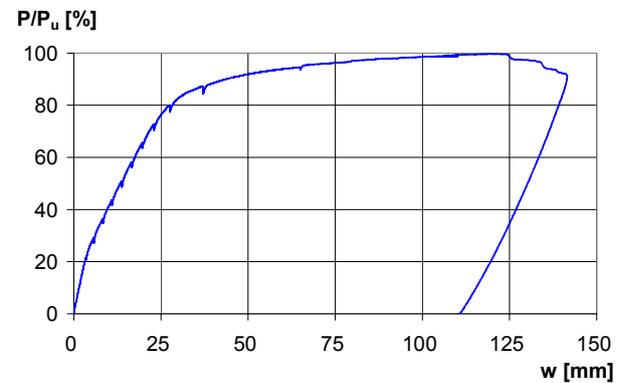


Abbildung 5.60: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 4

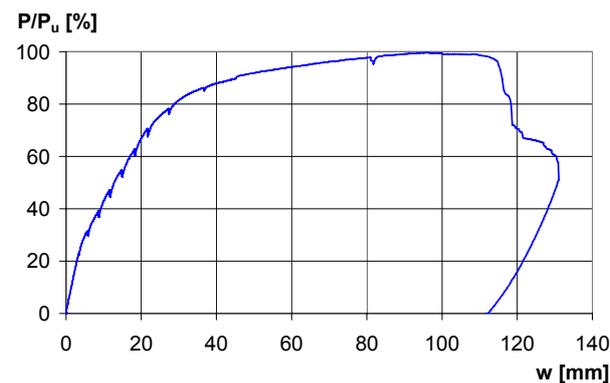


Abbildung 5.61: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 5

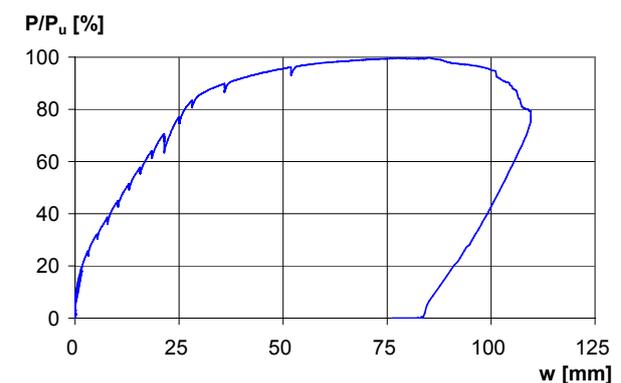


Abbildung 5.62: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 6

Beim Vergleich der verschiedenen Versuchskurven ist folgendes anzumerken:

- ein quantitativer Vergleich der Versuchswerte kann anhand dieser Abbildung nicht durchgeführt werden, da für die einzelnen Versuchskörper verschiedene Festigkeitswerte insbesondere für den Beton vorliegen.

- durch die größere Betonplattendicke (30 statt 22 cm) und der damit verbundenen höheren Gesamtsteifigkeitsverhalten des Trägers VT 2 weist dieser eine weit aus höhere Traglast auf als die restlichen Träger
- qualitativ ist anhand der Kurven von VT 1 und VT 3 bis VT 5 gut zu erkennen, dass diese Träger ein sehr ähnliches Trag-Verformungsverhalten aufweisen, ein ähnliches Traglastniveau erreichten und ähnliche Verformungswerte lieferten.

5.8.1.2 Traglast- und Verformungsverhalten VT 1

Der Versuchsträger VT 1, der als sog. „Basiskörper“ konzipiert wurde, zeigt erste Einzelrisse bereits bei sehr geringen Last von 20 % der Traglast. Das „abgeschlossene“ Rissbild zeigte sich bei einer Last von ca. 50% der Traglast.

5.8.1.3 Traglast- und Verformungsverhalten VT 2

Der Versuchsträger VT 2 (mit einer Plattendicke von 30 cm) weist, wie zu erwarten war, durch sein größeren Querschnitt eine höhere Traglast aus. Durch die höhere Gesamtträgersteifigkeit stieg die Last-Verformungskurve im Vergleich zu den anderen Trägern steiler an, die Gesamtverformung bis zum Bruch lag bei ca. 30% unterhalb der übrigen Versuchsträger.

5.8.1.4 Traglast- und Verformungsverhalten VT 3 und VT 4

Die beiden Versuchsträger VT 3 und VT 4 wurden im Gegensatz zu den übrigen Träger durch Querbiegung belastet. Trotz des variierten Hebelarmes der Querverteilung lagen die Traglasten beider Versuchskörper ähnlich nah beieinander. Auch das Last-Verformungsverhalten (siehe Abbildung 5.59 und Abbildung 5.60) gleichen einander sehr.

5.8.1.5 Traglast- und Verformungsverhalten VT 5

Durch die teilweise Verdübelung des Versuchsträgers VT 5 ist eine geringfügig kleinere Traglast und eine etwas größere Durchbiegung als zum Basisträger ermittelt worden. Ein Versagen der Schubfuge trat nicht wie erwartet ein. Der Träger versagte, wie auch alle anderen auf Biegung.

5.8.1.6 Traglast- und Verformungsverhalten VT 6

Durch die Besonderheit der Kragarmbelastung kann dieser Versuchsträger in seinem Last-Verformungsverhalten nicht direkt mit den anderen Trägern verglichen werden. Für eine genauere Auswertung des Versuches wird auf Abschnitt 5.8.6 verwiesen.

5.8.2 Schlupfverhalten

Im nachfolgenden Kapitel wird das Last-Schlupfverhalten der Träger nochmals genauer untersucht. Bei allen Versuchsträgern wurden Schlupfmessungen durchgeführt. Generell ist festzustellen, dass bei den Versuchsträgern der Schlupf im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) keine merkliche Rolle spielte bzw. vernachlässigt werden kann. Bei voller Verdübelung des Trägers VT 1 war ein Schlupf erst bei ca. 80 % der Traglast erkennbar, beim Versuchsträger VT 5 (mit einem rechnerischen Verdübelungsgrad von 50%) ab einer Ausnutzung von ca. 70 %, siehe Abbildung 5.63.

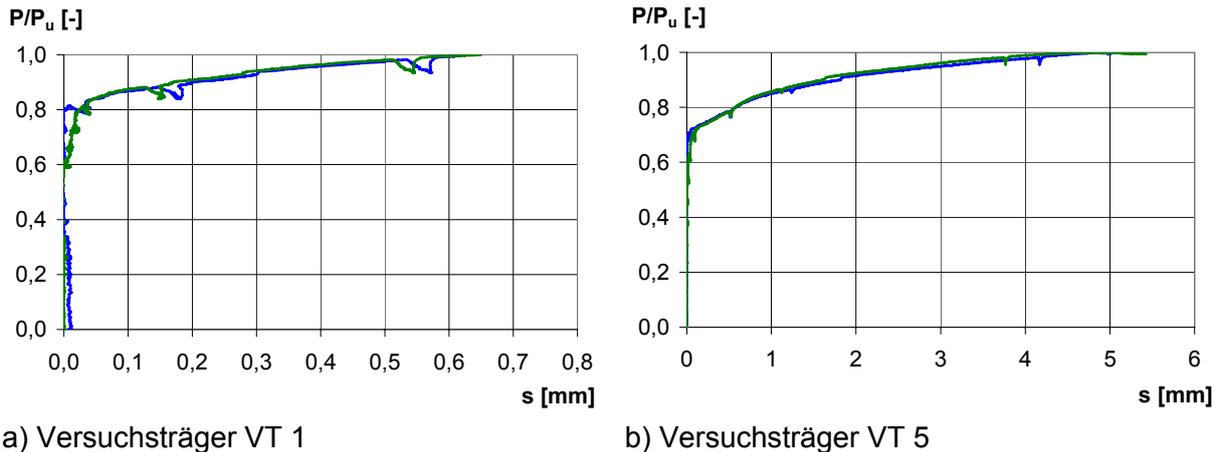


Abbildung 5.63: Last-Schlupfverhalten der Versuchsträger VT 1 und VT 5

Beim Erreichen der Tragfähigkeit besaß der teilverdübelt Versuchsträger VT 5 einen ca. 10-fach höheren Schlupf als der vergleichbare Versuchsträger VT 1 mit Vollverdübelung.

5.8.3 Rissverhalten

Verbundflachdecken weisen ein ähnliches Tragverhalten wie Stahlbetonflachdecken auf, d.h. dass bereits unter geringen Lasten die Betonzugseite aufreißt und sich mit steigender Last ein Risswachstum feststellen lässt. Beim Erreichen der Lasten im Grenzzustand der Gebrauchslasten zeigten die Versuchsträger bereits ein abgeschlossenes Rissbild. Um die Rissbreite zu quantifizieren, wurden nach Entstehen der ersten Risse Wegnehmer auf den Riss angebracht und gemessen. Nachfolgende Abbildung 5.64 zeigt am Beispiel des Versuchsträgers VT 1 und VT 3 den Rissverlauf in Abhängigkeit der einwirkenden Last.

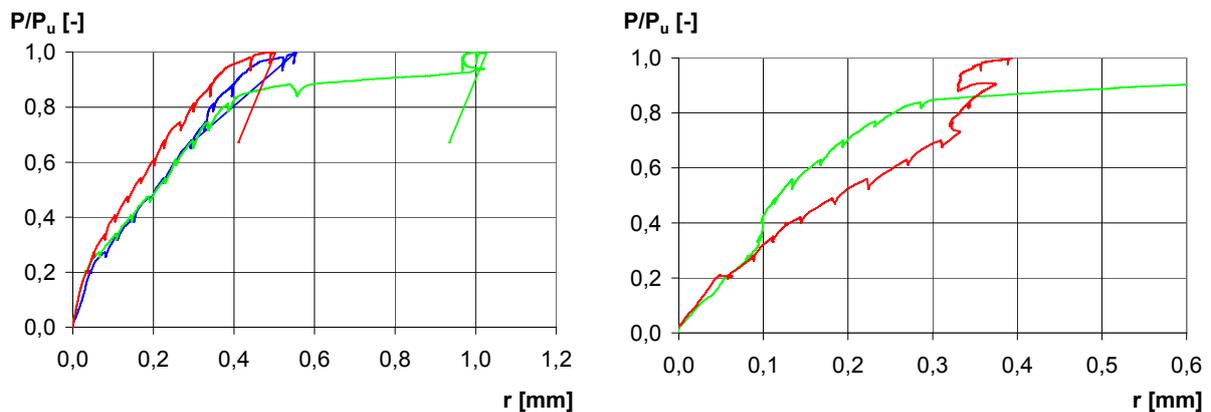


Abbildung 5.64: Rissentwicklung auf der Versuchsträgerunterseite VT 1 und VT 3

Die Auswertung im Gebrauchszustand ($\sim 50\%$ der Traglast) zeigt, dass die Rissbreiten, hier exemplarisch für Versuchsträger VT 1 und VT 3 dargestellt, etwa im Bereich von 0,2 – 0,4 mm lagen. Dies bedeutet, dass mit der eingelegten Mindestbewehrung für Platten der Nachweis der Rissbreitenbeschränkung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingehalten wurde.

Mit fortlaufend steigender Belastung öffneten sich die Risse weiter, so dass die Bewehrung plastizierte und letztendlich gerissen war (Fließplateau der Rissbreitenkurven).

5.8.4 Rissverhalten des Versuchsträgers unter Querbiegung

Für den Versuchsträger VT 3 und VT 4 wurde die Belastung nicht mittig auf den Verbundträger aufgebracht, sondern durch eine Exzentrizität quer dazu. Diese Belastungsanordnung erzeugte neben der Längsbiegebelastung des Verbundträgers auch Querbiegemomente in der Betonplatte. Der Verbundträger wirkte hierbei als eine zu beiden Seiten auskragende Platte. Hieraus resultierte durch die Belastung ein Stützmoment, das auf dem Träger (Betonoberseite) Längsrisse erzeugte. Abbildung 5.65 zeigt die gemessene Rissbreite auf der Trägeroberseite des Versuchsträger VT 3.

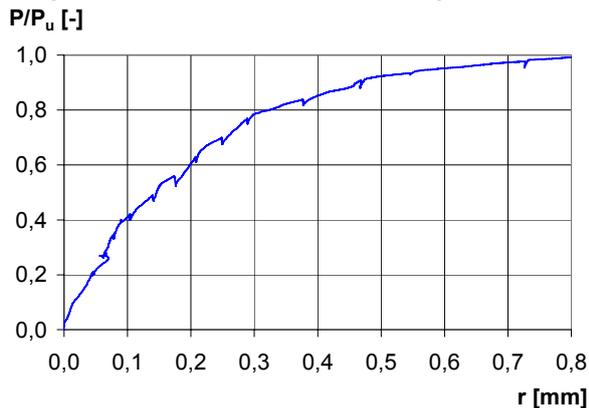


Abbildung 5.65: Rissentwicklung auf der Versuchsträgeroberseite infolge Querbiegung

Auch hier lagen die gemessenen Rissbreiten im Bereich des Gebrauchszustandes zwischen 0,1 – 0,4 mm. Der Vergleich mit anderen Trägern ohne Querbiegung zeigt hierbei einen kaum erkennbaren Unterschied.

5.8.5 Messung der Betondehnungen auf der Trägeroberseite

Für die Analyse und Ermittlung der mittragenden Breite wurden bei den Versuchsträgern in Feldmitte und auf Höhe einer Lasteinleitung quer zur Trägerrichtung die Betondehnungen gemessen. Bei den beiden nachfolgenden Abbildungen sind jeweils die Betondehnungen (vertikale Diagrammachse) über die Trägerbreite (horizontale Diagrammachse) abgetragen. Für $y = \pm 1,75$ m ist jeweils der Messwert an den Trägerrändern angegeben, für $y = 0,0$ m die Dehnung in Trägermitte, also über der Achse des Verbundträgers.

Die Abbildung 5.66 zeigt die Betonstauchungen des Versuchsträgers VT 1 in Feldmitte. Hierbei ist gut zu erkennen, dass sich in der Mitte (über dem Verbundträger) sich die größten Stauchungen einstellen und diese mit zunehmender Belastung verstärkt ausbilden.

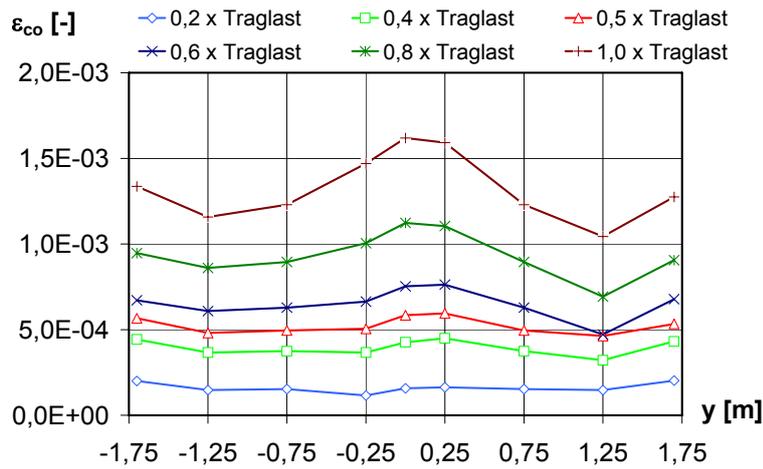


Abbildung 5.66: Stauchungen des Betons auf der Trägeroberseite (VT 1) in Trägermitte

Für die beiden Versuchsträger VT 3 und VT 4, die unter dem Querbiegeeinfluss standen, bildeten sich die Betondehnungen ähnlich aus, siehe hierzu Abbildung 5.67.

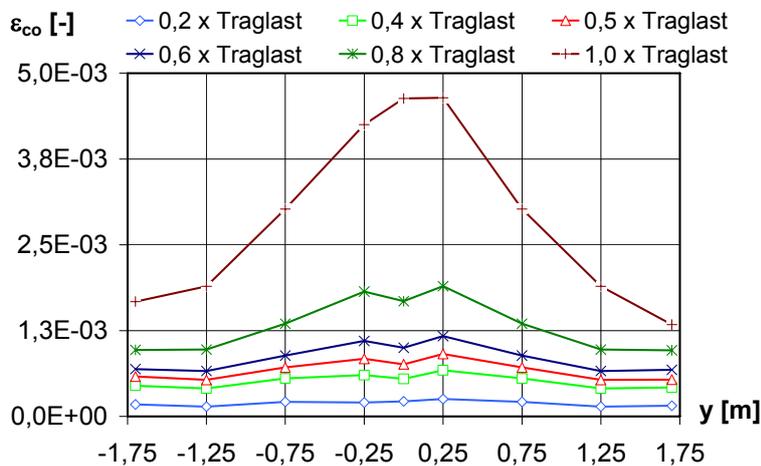


Abbildung 5.67: Stauchungen des Betons auf der Trägeroberseite (VT 4) in Trägermitte

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich an der Oberseite des Betongurts sich eine glockenförmige Verteilung der Betondehnungen mit ihrem Maximalwert in der Achse des Baustahlprofils ergab. Der Abfall der Dehnungen hin zur Außenseite des Betongurts war jedoch für geringe Lasten weniger stark ausgeprägt, als dies die elastischen Untersuchungen erwarten lassen.

Auf die Messwerte an der Betonunterseite wird im Weiteren nicht eingegangen. Die gemessene mittlere Längenänderung ist stark davon abhängig, ob im Bereich der Messlänge ein Riss oder evtl. mehrere Risse vorlagen oder nicht. Die Rissöffnung wird hierbei über die Messlänge verschmiert. Daher kann diese Messung weder die lokale Dehnung des Betons noch der unteren Längsbewehrung im Riss bestimmen. Eine Interpretation der Messergebnisse ist sehr schwierig, da bereits bei geringen Versuchslasten Risse auf der Betonunterseite vorhanden waren.

5.8.6 Trag- und Verformungsverhalten unter Einwirkung eines Stützmomentes

Versuchsträger VT 6 stellt in Bezug auf die Belastung und das System eine Besonderheit im Vergleich zu den anderen Trägern dar. Der Körper wurde als Einfeldträger mit Kragarm konzipiert und gleichzeitig in Feldmitte wie auch auf dem Kragarm belastet. Durch das hierdurch entstandene Stützmoment (das über die Kragarmpresse konstant gehalten wurde) sollte am Auflager eine Einspannung simuliert werden, um den Effekt der Rissbildung über der Stütze auf die Gesamtdurchbiegung des Trägers zu untersuchen.

Tabelle 5.5: Vergleich analytische Berechnung mit experimentellen Ergebnissen VT 6

| P / P_U [kN] | 0,23 | 0,34 | 0,46 | 0,51 | 0,57 | 0,69 | 0,74 | 0,86 |
|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{exp} [mm] | 1,46 | 3,68 | 7,00 | 8,84 | 10,98 | 14,73 | 16,81 | 21,70 |
| f_{analyt} [mm] | 2,84 | 5,73 | 9,34 | 11,18 | 13,04 | 16,69 | 18,56 | 25,01 |
| $f_{analyt} / f_{exp} - 1$ [-] | 95% | 56 % | 33 % | 26 % | 19 % | 13 % | 10 % | 15 % |

Hierbei zeigt der nachfolgende Vergleich (Tabelle 5.5 sowie Abbildung 5.68) der experimentellen Durchbiegung in Feldmitte mit der analytischen Berechnung (siehe hierzu Abschnitt 6.2.2) eines Einfeldträgers im Vergleich sehr deutlich, dass durch eine Einspannwirkung die Durchbiegung des Trägers verringert werden kann (konstanter Abstand zwischen beiden Kurven im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit). Anhand der Tabelle ist ebenso ersichtlich, dass mit zunehmender Last (Ausnutzung des Trägers) der Abstand der experimentellen Untersuchung von den analytischen Berechnungswerten des Einfeldträgers geringer wird. Dies beruht auf der zunehmenden Rissbildung des Trägers über Stütze, so dass der Grenzfall einer Gelenkausbildung und damit einem Einfeldträger (wie im analytischen Modell angenommen) entspricht.

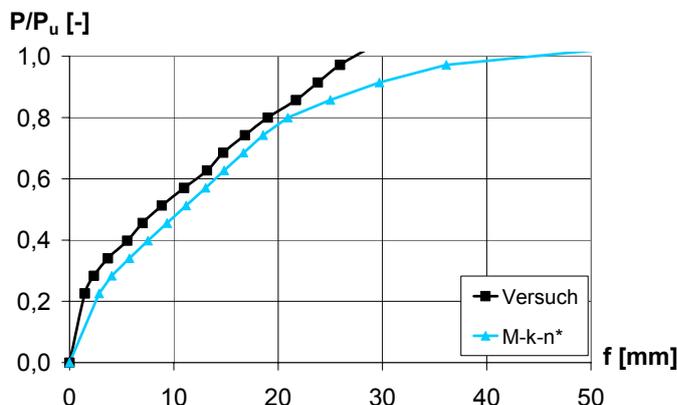


Abbildung 5.68: Vergleich analytische Berechnung mit experimentellen Ergebnissen VT 6

Da bisher die Durchlaufwirkung bei der Berechnung und Bemessung von Verbundträgern oftmals nicht berücksichtigt wird und diese als Einfeldträger berechnet werden, zeigt der Versuch jedoch sehr klar, dass durch die Ausbildung eines Stützmomentes die Durchbiegung wirksam reduziert werden kann, was sich vor allem im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bemerkbar macht.

Für eine systematische Auswertung der Einspannwirkung bzw. Durchlaufwirkung bei Slim-Floor Träger ist ein Versuch nicht ausreichend, so dass in diesem Bereich weitergehende Untersuchungen getätigt werden müssen. Für die mittragende Breite von normalen Verbundträgern im negativen Momentenbereich gibt es erste Untersuchungen [Holtkamp 1991]. Hierbei wurden erste Berechnungen für normal hohe Verbundträger dargestellt, jedoch auch

auf die Notwendigkeit weiterer breiter angelegter Untersuchungen hingewiesen, um das Tragverhalten systematisch zu untersuchen.

Für die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Berechnungsansätze wird die Belastung des Trägers mit Kragarm nicht weiter berücksichtigt. Die Modelle beziehen sich jeweils auf die Berechnung von Einfeldträgern. Weitere Untersuchungen bezüglich des Stützmomentes und der damit erzwungenen Einspannwirkung werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht geführt.

5.9 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsergebnisse

Die durchgeführten Versuchen an Slim-Floor Trägern stellten eine wichtige Ergänzung zu den Versuchen [Kuhlmann, Rieg 2004a] mit niedrigen Verbundträgern für das Tragverhalten dar. Durch die Variation verschiedener Parameter sollten verschiedene Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit der Slim-Floor Träger untersucht werden.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Slim-Floor Träger wiesen bereits unter geringen Lasten Risse auf der Betonunterseite auf.
- Durch die Lastexzentrizität (Querbiegung des Trägers) entstanden auf der Betonoberseite oberhalb des Baustahls Längsrisse.
- Schlupf in der Verbundfuge trat erst bei sehr hohen Last auf (nahe der Bruchlast); dies gilt auch für den Träger mit teilweiser Verdübelung.
- Die Querverteilung der Betonstauchung an der Betonoberseite ist über die Trägerbreite erkennbar ausgeprägt (und fällt nach außen hin ab).
- Der Einfluss der Querbiegung ist nur von untergeordneter Rolle.

5.10 Experimentelle Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern

Im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens [Kuhlmann, Rieg 2004a] wurden bereits experimentelle Untersuchungen an niedrigen Versuchsträgern durchgeführt. Hierbei wurden sechs Träger getestet und ausgewertet. Bei diesen Versuchen wurden folgende Parameter variiert (siehe Tabelle 5.9):

- Betongüte
- Verdübelungsgrad
- Plattenstärke des Betongurtes, sowie die
- Plattenbreite.

Tabelle 5.6: Abmessungen und Werkstoffe der Versuchsträger

| Versuchs-Nr. | Stahl- querschnitt | Stahl- güte | Beton- güte | Bewehrungs- güte | L [m] | B [m] | h _c [cm] | η ¹⁾ [-] |
|--------------|-----------------------|----------------|----------------|---------------------|-------|-------------|---------------------|---------------------|
| VT 1 | IPE 240 | S 235 | C 20/25 | S 500 | 4,25 | 4,00 | 16 | 1,0 |
| VT 2 | IPE 240 | S 235 | C 30/37 | S 500 | 4,25 | 4,00 | 16 | 1,0 |
| VT 3 | IPE 240 | S 235 | C 20/25 | S 500 | 4,25 | 4,00 | 16 | 0,4 |
| VT 4 | IPE 240 | S 235 | C 20/25 | S 500 | 4,25 | 5,40 | 16 | 1,0 |
| VT 5 | IPE 240 | S 235 | C 20/25 | S 500 | 4,25 | 4,00 | 26 | 1,0 |
| VT 6 | IPE 240 | S 235 | C 30/37 | S 500 | 4,25 | 4,00 | 26 | 1,0 |

Weitere Beschreibungen zum Versuchsaufbau sind dem Forschungsbericht [Kuhlmann, Rieg 2004a] zu entnehmen. Da die Auswertungen beider Vorhaben ähnlich durchgeführt wurden,



um die Vergleichbarkeit beider Trägertypen zu garantieren, wird jeweils in den nachfolgenden Kapiteln wiederholt auf den Forschungsbericht verwiesen. Die in den Abschnitten 6.2, 0 und 7 vorgestellten Berechnungsmodelle für Slim-Floor Träger werden an jeweiliger Stelle durch die bereits bekannten Ergebnisse für niedrige Verbundträger aus dem Bericht [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] ergänzt bzw. erweitert.

6 VERFORMUNGSBEZOGENE MITTRAGENDE BREITE

6.1 Einführung

6.1.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Darstellungen und Erläuterungen zur verformungsbezogenen mittragenden Breite entspricht [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] und ist hier nochmals zusammengefasst. Entsprechende Aussagen wurden für Slim-Floor Träger modifiziert und angepasst.

Wenn die Betongurte von Slim-Floor Trägern und Verbundträgern niedriger Bauhöhe breit sind, so zeigen diese aufgrund der Schubweichheit des Gurtes ein ausgeprägtes dreidimensionales Tragverhalten, siehe Kapitel 4.1, sowie [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006]. Dabei entziehen sich Bereiche des Betongurtes der Lastabtragung, die vom Stahlträger weiter entfernt sind. Das heißt, die Gurtspannungen nehmen mit zunehmendem Abstand vom Stahlträger ab und die Querverteilung der Gurtspannungen ist nicht konstant.

Um diese Träger mit breiten Gurten dennoch rechnerisch wie stabförmige Bauteile behandeln zu können und eine aufwändige dreidimensionale Berechnung des Betongurtes zu vermeiden, wurde die spannungsbezogene mittragende Breite b_m eingeführt, siehe Abschnitt 4.2.3.

Wie die in Abschnitt 4.4 dargestellten Untersuchungen in der Literatur und die in Kapitel 4.5 dargestellten elastischen Untersuchungen zeigen, verändert sich dabei die spannungsbezogene mittragende Breite im Allgemeinen in Trägerlängsrichtung und damit auch die Querschnittssteifigkeit. Da man in der Planungspraxis jedoch bestrebt ist, die Verformungsberechnung an einem Träger mit konstantem Querschnitt durchzuführen, wurde in Abschnitt 4.2.3 die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ eingeführt.

Der Zusatz „verformungsbezogen“ bedeutet dabei, dass dies eine Größe zur Berechnung von Verformungen und nicht von Spannungen ist.

Hierfür wurde ein analytisches Berechnungsmodell entwickelt [Rieg 2006], das sowohl das spezielle Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern und niedriger Verbundträger als auch alle wesentlichen Einflüsse auf die mittragende Breite abbilden kann, siehe Abschnitt 6.2. Vorteilhaft im Vergleich zum Beispiel zur Verwendung einer Finite Elemente Modellierung ist dabei vor allem, dass das analytische Berechnungsmodell auf einfachen, mechanisch nachvollziehbaren Grundlagen basiert und aufgrund der deutlich kürzeren Rechenzeit die Einflüsse von mehr Parametern untersucht werden können. Auf Basis dieses Berechnungsmodell wurden die Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite untersucht und im Rahmen einer umfangreichen Parameterstudie quantifiziert. Schließlich münden diese Erkenntnisse in die Entwicklung eines anwenderfreundlichen Berechnungsansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite, der eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung von Slim-Floor Trägern und niedrigen Verbundträgern bei vergleichsweise geringem Berechnungsaufwand ermöglicht.

6.1.2 Ausgangssituation

Die mittragende Breite für den linear-elastischen Fall weist hierbei folgende Punkte auf (siehe Abschnitt 4.5):

Die mittragende Breite b_m lässt sich in einen Wert des reinen Scheibenzustands $b_{m,s}$ und des reinen Biegezustands $b_{m,B}$ unterteilen, wobei der Wert des reinen Biegezustands $b_{m,B}$ größer ist als jener des reinen Scheibenzustands $b_{m,s}$. Die mittlere mittragende Breite b_m ist dadurch sehr stark vom Verhältnis der Steifigkeitsverteilung innerhalb des Verbundträgers abhängig. Mit zunehmender Biegesteifigkeit des Betongurtes im Verhältnis zur Gesamtsteifigkeit des

Verbundträgers wird die mittragende Breite größer. Aus diesem Grund wird die mittragende Breite b_m auch mit zunehmender Plattendicke h_c und abnehmender Gesamthöhe des Trägers größer. Die mittragende Breite b_m ist sehr stark vom Seitenverhältnis b/L des Betongurts abhängig. Der Verlauf der mittragenden Breite b_m in Trägerlängsrichtung ist im Allgemeinen nicht konstant und wird durch die Form der äußeren Belastung bestimmt.

Unter dem Einfluss der Rissbildung sind für mittragende Breite folgende Anmerkungen zu machen (siehe Abschnitt 4.4 und Kapitel 5):

Die verformungsbezogene mittragende Breite hängt sehr stark von der Rissbildung und der Belastungshöhe ab. Mit zunehmender Belastung und Rissbildung nimmt die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ ab. Sowohl die verformungsbezogene als auch die spannungsbezogene mittragende Breite der Versuchsträger sind deutlich größer als die in den entsprechenden Normen angegebenen Werte. Sowohl die verformungsbezogene als auch die spannungsbezogene mittragende Breite werden mit zunehmender Dicke des Betongurts h_c und zunehmender Breite des Betongurts größer. Die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ wird mit zunehmender Betonzugfestigkeit f_{ct} größer.

Für eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung von Slim-Floor Trägern und niedrigen Verbundträgern sind also gerade die Einflüsse des Biegezustandes der Platte und die Rissbildung maßgebend.

6.1.3 Vorgehen zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$

Bei der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ handelt es sich um einen ideellen Wert für die rechnerische Breite des Betongurts, der der vereinfachten Verformungsberechnung dient. Anstatt einer aufwändigen Berechnung des genauen dreidimensionalen Tragverhaltens des Verbundträgers mit breitem Betongurt wird eine vereinfachte Berechnung an einem Träger mit konstanter Breite und konstantem Querschnitt vorgenommen. Dieser Träger wird im Folgenden mit *Ersatzbalken* bezeichnet. Die Breite des Betongurts des Ersatzbalkens wird dabei so groß gewählt, dass der Wert der rechnerischen Verformung des Ersatzbalkens demjenigen des realen dreidimensionalen System entspricht. Diese Breite wird als verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ definiert [Rieg 2006], siehe Abschnitt 4.2.3.

Mit Kenntnis des tatsächlichen Last-Verformungs-Verhaltens eines Trägers, aus Versuchen oder einer genaueren dreidimensionalen Berechnung, kann die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ für diesen Träger rückgerechnet werden. Dazu wird die rechnerische Breite des Ersatzbalkens solange variiert, bis die rechnerische Verformung des Ersatzbalkens mit der tatsächlichen Verformung des Verbundträgers übereinstimmt. Die so gefundene Breite des Ersatzbalkens wird als verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ definiert. Eine direkte Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite ist dabei nicht möglich. Abbildung 6.69 stellt dieses Vorgehen schematisch dar [Rieg 2006].

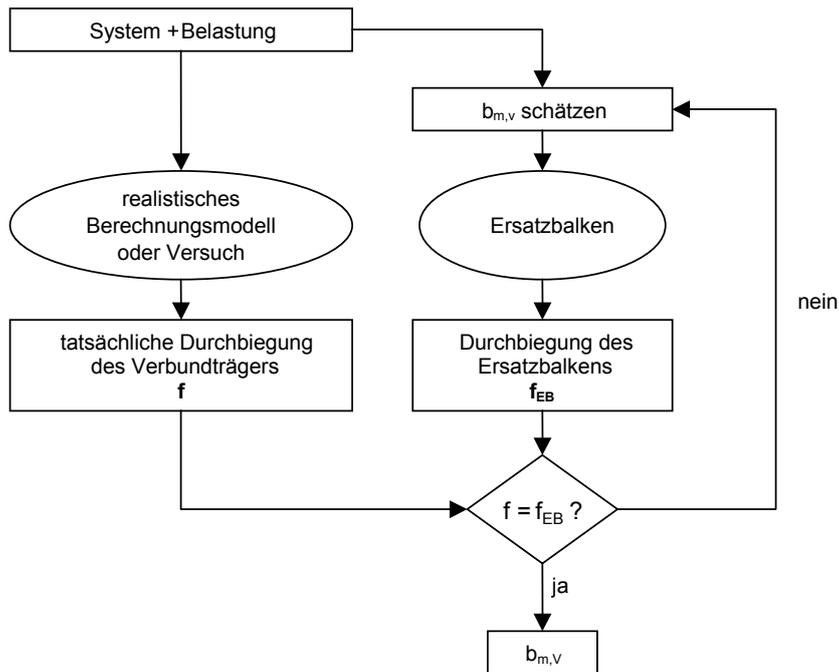


Abbildung 6.69: Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$
[Rieg 2006]

Da die verformungsbezogene mittragende Breite von der Rissbildung und damit auch von der Belastungshöhe des Trägers abhängt, ist die verformungsbezogene mittragende Breite kein Systemwert, der nur von den Abmessungen und Materialwerten abhängt, sondern auch von der Belastung.

Aus diesem Grund wird die verformungsbezogene mittragende Breite in Abhängigkeit der Belastungshöhe bestimmt und kann in einem $b_{m,v}$ - M/M_u -Diagramm dargestellt werden, siehe z. B. Abbildung 6.70. Die Belastungshöhe wird dabei als Verhältnis des maximalen Moments M in Feldmitte zum Bruchmoment des Trägers M_u dargestellt. Das Verhältnis M/M_u kann auch als Ausnutzungsgrad des Trägers betrachtet werden. Bis zur Rissbildung M_{Riss}/M_u verhält sich der Träger elastisch und die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ ist gleich dem elastischen Wert $b_{m,v,0}$. Mit zunehmender Belastung und fortschreitender Rissbildung nimmt die verformungsbezogene mittragende Breite ab. Dies liegt daran, dass durch die Rissbildung die Biegesteifigkeit und Biegetragwirkung des Betongurts abnimmt.

Da die mittragende Breite des Biegezustands $b_{m,B}$ deutlich größer ist als die des Scheibenzustands $b_{m,S}$, wird die verformungsbezogene mittragende Breite somit kleiner. Bei den durchgeführten Versuchen konnte beobachtet werden, dass die verformungsbezogene mittragende Breite für hohe Belastungen wieder zunimmt. Diese Umkehr tritt ungefähr auf dem Belastungsniveau ein, an dem der Stahlträger mit Plastizieren beginnt ($\rightarrow M_e/M_u$).

Dies liegt unter Anderem daran, dass mit zunehmender Belastung die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons flacher wird und dadurch die Querverteilung der Spannungen völliger wird als die der Dehnungen, was schließlich zu einer Vergrößerung der mittragenden Breite führt. Vereinfachend kann dieser Anstieg der verformungsbezogenen mittragenden Breite vernachlässigt werden. In diesem vereinfachten Fall nimmt die mittragende Breite stetig ab. Diese Vereinfachung ist im Allgemeinen ausreichend, da man sich in einer praktischen Berechnung nur für die Verformungen unter Gebrauchslasten interessiert und unter Gebrauchslasten in der Regel noch kein Plastizieren des Stahlträgers auftritt. Der untere Grenzwert für die verformungsbezogene mittragende Breite ist der Wert des reinen Scheibenzustands $b_{m,S}$, siehe Abbildung 6.70.

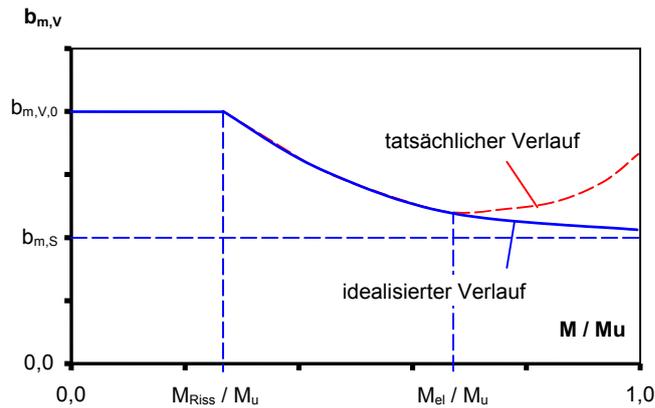


Abbildung 6.70: Prinzipieller Verlauf der verformungsbezogenen mittragende Breite $b_{m,V}$ niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u

Für eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Verformungen am Ersatzbalken muss das nichtlineare Trag- und Verformungsverhalten des Betons und insbesondere die Rissbildung bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die Berechnung erfolgt deshalb zweckmäßig mit einer M - κ -Linie, siehe Abschnitt 3.3.2.

6.2 Analytisches Berechnungsmodell zur Verformungsberechnung

6.2.1 Allgemeines

Das hier nachfolgend vorgestellte analytische Berechnungsmodell wurde bereits im Rahmen der Forschungsvorhabens für niedrige Verbundträger [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] entwickelt und dort aus Versuchsergebnissen mit niedrigen Verbundträgern kalibriert. Für Slim-Floor Träger wird dieses Modell übernommen und anhand der durchgeführten Versuche überprüft. Weitere Informationen und Modellbeschreibungen sind in der Arbeit von [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] zu finden.

Für die Rückrechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ müssen die tatsächlichen Verformungen der betrachteten Verbundträger bekannt sein, siehe Abschnitt 4.2.3. Da für eine systematische Untersuchung aller Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite keine ausreichende Anzahl an Versuchen vorhanden ist, wird diese systematische Untersuchung auf Basis einer Berechnung durchgeführt. Mit einem analytischen Berechnungsmodell, das sowohl die Biegetragwirkung des Betongurts als auch dessen Rissbildung berücksichtigt, wird eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung ermöglicht.

Die Verifikation des analytischen Modells wird dabei folgendermaßen vorgenommen:

- Nachvollziehbarkeit der mechanischen Grundlagen
- Vergleich mit den Ergebnissen der durchgeführten Versuchen für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger
- Plausibilitätsprüfung auf Basis der Erkenntnisse der elastischen Untersuchungen und der in der Literatur beschriebenen Untersuchungen, siehe Abschnitt 6.1.2

Anhand des analytischen Berechnungsmodells wurde eine umfangreiche Parameterstudie für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger durchgeführt, um die verschiedenen Ein-

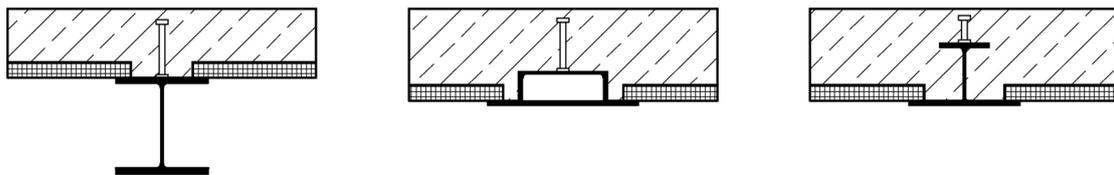
flüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite zu quantifizieren. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Parameterstudie wurde ein Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ entwickelt, siehe Abschnitt 0.

6.2.2 Beschreibung des analytischen Berechnungsmodells

6.2.2.1 Grundsätzliches

Das analytische Berechnungsmodell wurde zur Verformungsberechnung niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger insbesondere im Bereich der Gebrauchslasten entwickelt. Die genaue Ermittlung der Spannungsverteilung im Betongurt und insbesondere der Querverteilung der Längsspannungen ist nicht möglich. In der vorliegenden Form ermöglicht dieses Berechnungsmodell die Verformungsberechnung von Einfeldträgern mit in Trägerlängsrichtung gleichbleibenden, symmetrischen Verbundquerschnitten nach Abbildung 6.71 unter Gleichlast oder mittiger Einzellast. Dies stellt jedoch keine prinzipielle Einschränkung des Berechnungsmodells dar.

Das Berechnungsmodell orientiert sich dabei an Erkenntnissen der elastischen Untersuchungen, siehe Kapitel 3, und den nichtlinearen Berechnungsmethoden, siehe Abschnitt 3.3.3.



(a) Querschnitte herkömmlicher Bauart (b) Slim-Floor Querschnitte

Abbildung 6.71: Im analytischen Berechnungsmodell implementierte Verbundquerschnitte

Als Eingabewerte für das Berechnungsmodell sind die folgenden Querschnitts-, Material- und Systemwerte erforderlich:

Querschnittswerte:

- Abmessungen des Stahlprofil
- Dicke des Betongurts
- Querschnitt und Lage der Längsbewehrung
- evtl. Höhe eines Profilblechs

Materialwerte:

- Baustahl: Streckgrenze f_y , E-Modul E_a
- Beton: Druckfestigkeit f_c , Zugfestigkeit f_{ct} , E-Modul E_{cm}
- Bewehrung: Proportionalitätsgrenze f_{sy} , E-Modul E_s

Systemwerte:

- Stützweite L_T des Einfeldträgers
- Gesamtbreite des Betongurts b_c
- Belastungsform und -höhe

6.2.2.2 Bisherige Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern

Im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens [Kuhlmann, Rieg 2004a] wurden bereits Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern durchgeführt und das Trag- und Verformungsverhalten genauer analysiert. Da es sich hierbei, wie auch für Slim-Floor Träger, um ein nicht-lineares Verhalten handelt, werden für die Verformungsberechnung hier die gleichen Ansätze verwendet.

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] und Versuche mit niedrigen Verbundträgern wird die Auswertung für Slim-Floor Träger analog ausgeführt und umgesetzt.

6.2.2.3 System

Das Modell basiert auf einer Diskretisierung des Trägers durch einzelne Trägerelemente, die das nichtlineare Tragverhalten des Verbundquerschnitts abbilden. Aus den Systemwerten des Trägers (Stützweite, Breite, Belastungsform, etc.) wird für jedes Element die spannungsbezogene mittragende Breite im reinen Scheibenzustand $b_{m,S}$ und reinen Biegezustand $b_{m,B}$ berechnet.

Damit sind für jedes Element die rechnerischen Querschnittsabmessungen bestimmt und unter Berücksichtigung der Materialwerte kann für jedes Trägerelement die entsprechende M - κ -Linie berechnet werden. Dies gewährleistet eine wirklichkeitsnahe Steifigkeitsberechnung der Elemente.

Parallel hierzu werden aus der äußeren Belastung die Schnittgrößen der einzelnen Trägerelemente berechnet. Bei den untersuchten statisch bestimmten Einfeldträgern ist dies unabhängig von der Steifigkeitsverteilung des Systems möglich. Mit Kenntnis der Belastung und des Tragverhaltens der Trägerelemente kann die Änderung der Verdrehung in jedem Element berechnet werden und daraus schließlich die Verformung des Trägers. Durch die wiederholte Berechnung für verschiedene Belastungsstufen kann die Last-Verformungs-Linie des Trägers ermittelt werden. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 6.72 [Rieg 2006] dargestellt.

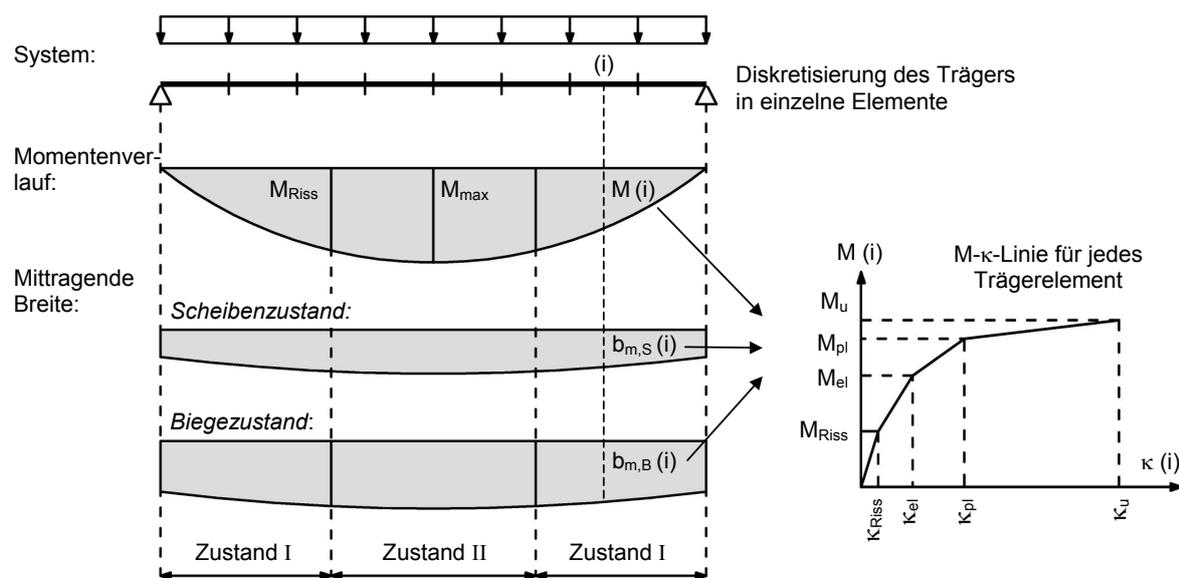


Abbildung 6.72: Schematische Darstellung des allgemeinen Berechnungsmodells [Rieg 2006]

Die Breite des Betonquerschnitts der jeweiligen Trägerelemente wird entsprechend dem Verlauf der spannungsbezogenen mittragenden Breite in Trägerlängsrichtung angesetzt, der sich bei rein elastischen Systemverhalten ergibt. Da somit im Allgemeinen jedes Trägerelement eine andere Breite des Betongurts und damit einen anderen rechnerischen Querschnitt hat, weist jedes Trägerelement ein geringfügig anderes Tragverhalten auf. Dadurch ist es notwendig, für jedes Element eine eigene M - κ -Linie zu berechnen.

6.2.2.4 Implementierte Materialmodelle

Für eine wirklichkeitsnahe Berechnung der Steifigkeit und des Verformungsverhaltens der Verbundträger sind die verwendeten Materialmodelle von entscheidender Bedeutung. Im Gebrauchszustand der Träger hat dabei insbesondere das Verhalten des Betons auf Zug großen Einfluss, da mit Erreichen des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit sich Stahlträger und Bewehrung im Allgemeinen noch elastisch verhalten. Bei höheren Belastungen ist hingegen die Beschreibung des Materialverhaltens des Stahls von großer Bedeutung.

Für das Materialmodell des Betons auf Druck wird das Parabel-Rechteck-Diagramm nach [EN 1994-1-1], 4.2.1.3.3 (9) verwendet. Das Betonverhalten auf Zug wurde entsprechend Abbildung 6.73 (b) angesetzt. Bis zur Betonzugfestigkeit wird ein lineares Verhalten angenommen. Mit Erreichen der Rissdehnung ϵ_{ct} fällt die Betonspannung auf 15 % der Betonzugfestigkeit ab. Mit weiterer Steigerung der Dehnung nimmt die Spannung ab, bis mit Erreichen der Dehnung ϵ_{ctu} die Spannung null wird. Dieser Verlauf ist an die von [Hilsdorf, Reinhardt 1998] beschriebene Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung angelehnt.

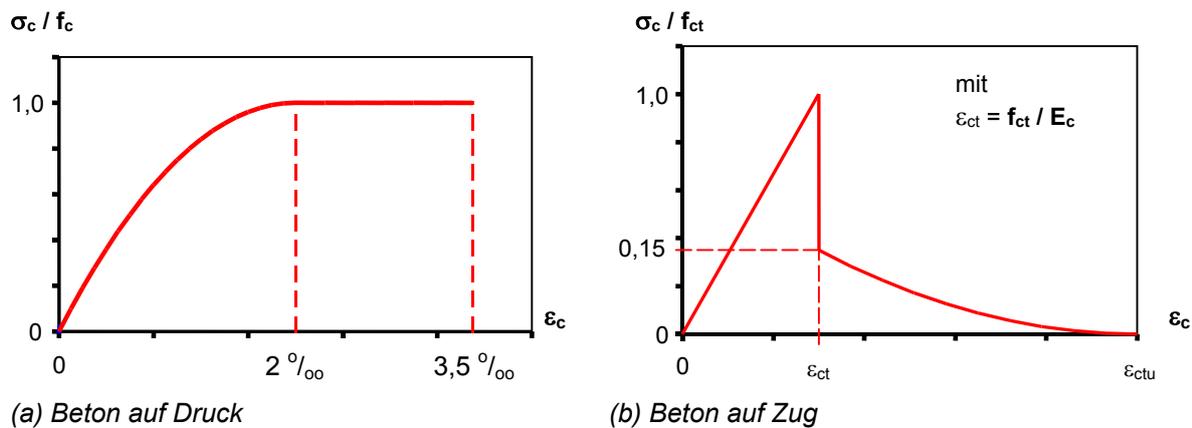


Abbildung 6.73: Verwendete Materialmodelle für den Beton

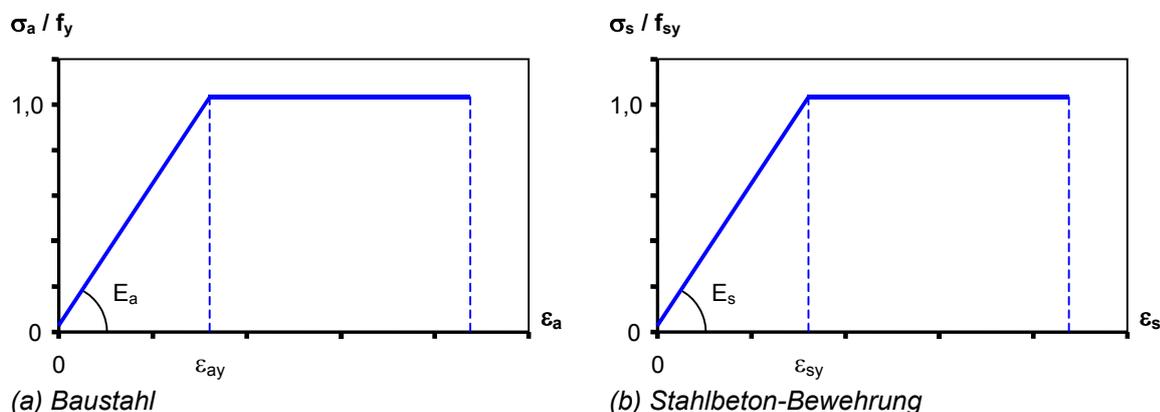


Abbildung 6.74: Verwendete Materialmodelle für Baustahl und Stahlbeton-Bewehrung

Für den Stahlträger als auch die Bewehrung wird ein linearelastisch-idealplastisches Materialmodell verwendet, siehe Abbildung 6.74. Für die Berechnung der Verformungen im Gebrauchszustand der Verbundträger ist eine genauere Definition der Materialgesetze für Baustahl und Bewehrung nicht erforderlich, da bis zum Erreichen des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit sowohl Baustahl als auch Bewehrung elastisch bleiben.

Für Slim-Floor Träger kann die Bewehrung nicht ohne weiteres unberücksichtigt bleiben. Während bei niedrigen Verbundträgern der Kraftanteil der Bewehrung durch die Lage der Bewehrung nahe der Spannungsnulllinie zu finden ist, ist bei Slim-Floor Trägern die Schwerpunktlage der Bewehrung oftmals unterhalb des Schwerpunkts des Baustahlprofils, so dass der Kraftanteil weitaus stärker ins Gewicht fällt als bei niedrigen Verbundträgern und damit einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil an der Momententragfähigkeit liefert, siehe Abbildung 6.75.

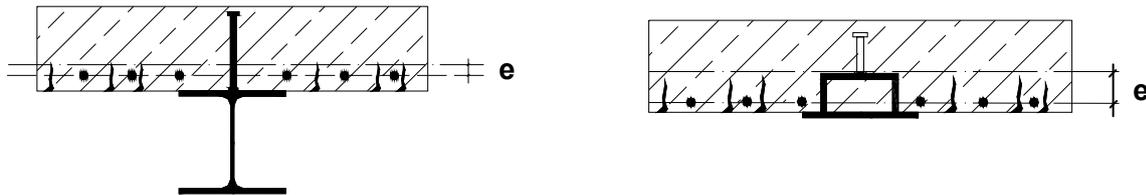


Abbildung 6.75: Abstand des Hebelarms e der Längsbewehrung zur Spannungsnulllinie

Da das Berechnungsmodell nur für Träger mit starrem Verbund entwickelt wurde, muss für die Verbundfuge kein Materialgesetz definiert werden.

6.2.2.5 M- κ -Linien und Breite des Betongurts

Für jedes Trägerelement wird eine individuelle M- κ -Linie berechnet. Bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden die M- κ -Linien zwischen den charakteristischen Punkten linearisiert, siehe Abschnitt 3.3.2 und Abbildung 6.76. Als charakteristische Punkte dienen dabei:

- Rissbildung ($M_{\text{Riss}} - \kappa_{\text{Riss}}$):
Im Beton wird erstmals die Rissdehnung ε_{ct} erreicht – im Allgemeinen an der Unterkante des Betongurts. Der Beton befindet sich fortan im Zustand II.
- Beginn des Plastizierens im Stahlträger ($M_{\text{el}} - \kappa_{\text{el}}$):
An der höchstbelasteten Stelle im Stahlträger wird die Fließdehnung ε_{ay} erreicht – im Allgemeinen an der Unterkante des Stahlträgers.
- Stahlträger ist vollplastisch ($M_{\text{pl}} - \kappa_{\text{pl}}$):
Mit Erreichen der Fließdehnung ε_{ay} an der Stelle mit der geringsten Dehnung im Stahlträger, ist der Stahlträger vollplastisch. Bei weiterer Laststeigerung können zwar die Krümmung und die Dehnungen des Stahlträgers gesteigert werden, die Spannungen des Stahlträgers erhöhen sich dabei jedoch nicht mehr. Durch die zunehmende Querschnittskrümmung schnürt sich jedoch die Druckzone im Beton ein, die dadurch völliger wird. Dadurch kann der innere Hebelarm noch einmal gesteigert werden, was zu einer weiteren geringen Steigerung des aufnehmbaren Moments führt.
- Bruchzustand ($M_{\text{u}} - \kappa_{\text{u}}$):
Wenn im Beton schließlich an der höchstbelasteten Stelle die Bruchdehnung ε_{cu} erreicht wird, kommt es rechnerisch zu einem Druckversagen des Betons. Eine weitere Laststeigerung ist nicht mehr möglich.

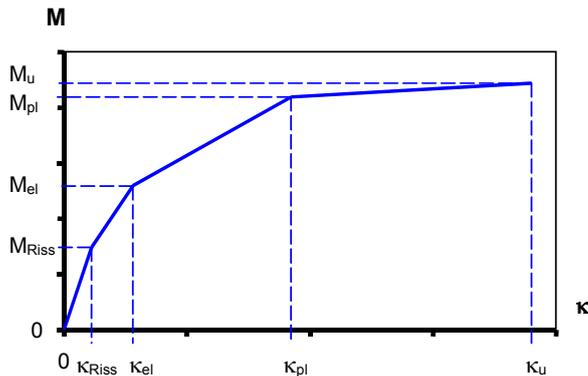


Abbildung 6.76: Linearisierte M-κ-Linie [Kuhlmann, Fries 2001a]

Bis zum Erreichen der Risskrümmung κ_{Riss} verhält sich der Querschnitt elastisch. Der Risszustand kann somit nach den Regeln der Elastizitätstheorie berechnet werden, siehe Abschnitt 4.5. Die Bedingung für den Grenzzustand der Rissbildung ist, dass an der Stelle im Beton mit der größten Zugdehnung die Rissdehnung ε_{ct} erreicht wird [Rieg 1998]. Im Allgemeinen tritt dies an der Unterkante des Betons auf. Das effektive Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts bis zum Erreichen des Rissmoments wird mit Gleichung (6.1) berechnet. Dabei wird für die Berechnung des Betonträgheitsmoments $I_{c,0}$ als Breite des Betonquerschnitts die spannungsbezogene mittragende Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands verwendet. Für die Berechnung der Betonfläche $A_{c,0}$ wird als Breite des Betonquerschnitts die spannungsbezogene mittragende Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands benutzt. Die Werte $b_{m,B}$ und $b_{m,S}$ werden dabei in Abhängigkeit der Belastungsfunktion, des Seitenverhältnisses b/L des Betongurts und der Lage des Trägerelements im Träger verwendet.

$$\begin{aligned}
 I_{i,0} &= I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{\text{St}} \\
 &= I_a + \frac{b_{m,B} \cdot h_c^3}{12 \cdot n_0} + \frac{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} \cdot A_a}{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} + A_a} \cdot a_{\text{St}}^2
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

| | | |
|-----|---------------------------|--|
| mit | $I_{i,0}$ | elastisches Trägheitsmoment des Gesamtverbundquerschnitts |
| | I_a | Trägheitsmoment des Stahlquerschnitts |
| | A_a | Querschnittsfläche des Stahlquerschnitts |
| | $n_0 = E_a/E_{\text{cm}}$ | Reduktionszahl ($E_a = E$ -Modul von Stahl, $E_{\text{cm}} = E$ -Modul von Beton) |
| | $b_{m,S}, b_{m,B}$ | mittragende Breite des Betongurts für den reinen Scheiben- bzw. Biegezustand |
| | h_c | Dicke des Betongurts |
| | a_{St} | Schwerpunktastand zwischen Beton- und Stahlquerschnitt |

Bei weiterer Laststeigerung ist der Beton im Zustand II und die Berechnung kann daher nicht mehr linear-elastisch erfolgen. Die weiteren Punkte der M-κ-Linie müssen durch Iteration bestimmt werden. Dabei wird die Dehnungsverteilung solange variiert, bis sich im Querschnitt ein Gleichgewichtszustand einstellt. Die Kräfte der Teilquerschnitte können mit Kenntnis der Materialmodelle aus der Dehnungsverteilung berechnet werden.

Die Variation der Dehnungsverteilung wird bei der Berechnung der linearisierten M - κ -Linie folgendermaßen vorgenommen: Da für die charakteristischen Punkte der M - κ -Linie an einer Stelle die Dehnung bereits bekannt ist, wird die Variation der Dehnungsverteilung durch Variation der Querschnittskrümmung vorgenommen. Beim Beginn des Plastizierens des Stahlträgers ($M_{el} - \kappa_{el}$) ist zum Beispiel die Dehnung an der Unterkante des Stahlträgers, die gerade die Fließdehnung des Baustahls erreicht, bekannt.

Beim Bruchzustand erreicht der Beton zum Beispiel schließlich an der höchstbelasteten Stelle die Bruchdehnung ε_{cu} .

Die Berechnung der Kräfte im Beton im Zustand II erfolgt unter der Verwendung folgender Breiten:

- **Betonzugkräfte**
Die Berechnung der Betonzugkräfte erfolgt unter Verwendung der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands.
- **Betondruckkräfte**
Die Betondruckkräfte werden in einen Teil $N_{c,1}$, der im Gleichgewicht mit der Zugkraft im Stahlträger steht, sowie einen Teil $N_{c,2}$, der im Gleichgewicht mit der Betonzugkraft und der Zugkraft der Bewehrung steht, unterteilt. Die Betondruckkraft $N_{c,1}$ wird mit der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands berechnet. Die Betondruckkraft $N_{c,2}$ wird mit der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands berechnet.

Dieses Vorgehen entspricht demjenigen bei elastischem Materialverhalten. Hier wird der Betongurt durch eine Druckkraft N_c und ein Betonmoment M_c beansprucht. Das Betonmoment M_c kann in ein Kräftepaar innerhalb des Betons aufgeteilt werden: eine Zugkraft $N_{ct,M}$ im unteren Teil des Betongurts und eine Druckkraft $N_{c,M}$ im oberen Teil. Die Betonzugkraft $N_{ct,M}$ und der Zugbereich im Beton resultieren folglich aus dem Biegezustand des Betongurts. Daher werden die Zugspannungen, die sich aus der Betonzugkraft $N_{ct,M}$ ergeben, mit der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands berechnet. Die Druckkraft im Beton setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Zum einen der Druckkraft $N_{c,N}$, die sich aus dem inneren Kräftepaar im Verbundquerschnitt ergibt und im Gleichgewicht mit der Zugkraft N_a im Stahlträger steht, und zum anderen der Druckkraft $N_{c,M}$, die sich aus dem Betonmoment M_c ergibt und im Gleichgewicht mit der Zugkraft $N_{ct,M}$ im unteren Bereich des Betons steht. Der Druckkraftanteil $N_{c,N}$ wird dabei mit der mittragenden Breite $b_{m,S}$ des Scheibenzustands berechnet und der Druckkraftanteil $N_{c,M}$ mit der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands.

Wenn man dieses Vorgehen auf den Betonquerschnitt im Zustand II überträgt, bedeutet dies, dass Spannungsanteile des Betons, die aus einer Biegung des Betonquerschnitts resultieren, mit der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands berechnet werden und Spannungsanteile des Betons, die im Gleichgewicht mit der Kraft im Stahlträger stehen, mit der mittragenden Breite $b_{m,S}$ des Scheibenzustands berechnet werden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Traganteile sowie die zugehörigen mittragenden Breiten nochmals zusammengefasst.

Tabelle 6.7: Zusammenfassung Traganteile - mittragende Breite (Scheibe/Platte)

| <u>Traganteil</u> | <u>Bezeichnung</u> | <u>Mittragende Breite</u> |
|-------------------|--|-----------------------------|
| N_{ct} | Betonzugkraft | $b_{m,B}$ - Biegezustand |
| $N_{c,1}$ | Betondruckkraft – Glgw mit Zugkraft Baustahlträger | $b_{m,S}$ - Scheibenzustand |
| $N_{c,2}$ | Betondruckkraft – Glgw mit Betonzugkraft | $b_{m,B}$ - Biegezustand |
| N_a | Zugkraft im Baustahl | $b_{m,S}$ - Scheibenzustand |
| N_s | Zugkraft in Bewehrung | $b_{m,B}$ - Biegezustand |

Weitere Hinweise zu M- κ -Linien sind in [Rieg 1998], [Schlaich, Schäfer 1997], [Hanswille 1986], [Manleitner 2000] und [Heft 525] gegeben.

6.2.2.6 Verformungsberechnung

Nachdem für alle Trägerelemente die M- κ -Linien bestimmt sind, wird aus der äußeren Belastung der Momentenverlauf berechnet. Im nächsten Schritt wird für jedes Element aus der entsprechenden M- κ -Linie die Krümmung bestimmt. Dadurch ist der Krümmungsverlauf in Trägerlängsrichtung bekannt. Mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte wird daraus die Durchbiegung des Trägers berechnet.

6.2.3 Voraussetzungen und Vereinfachungen

Im Folgenden sollen die dem entwickelten Berechnungsmodell zugrunde liegenden Annahmen, die die Voraussetzungen und getroffenen Vereinfachungen erklären, kurz beschrieben werden. Weitere Erläuterungen hierzu sind bei [Rieg 2006] und [Kuhlmann, Rieg 2004a] zu finden:

- Der Betongurt weist eine konstante Dicke auf.
- Der Verbundträger wird als Einfeldträger ausgeführt (das Berechnungsmodell in der vorliegenden Form ermöglicht nur die Berechnung von Einfeldträgern).
- Die Träger weisen einen starren Verbund auf.
- Zwischen Beton und Stahlträger entsteht kein nennenswerter Schlupf. Für Verbundträger mit voller Verdübelung stellt dies im Gebrauchszustand im Allgemeinen eine ausreichend genaue Vereinfachung dar (siehe hierzu auch Abschnitt 5.8.2). Ein Versagen der Verbundfuge wird ausgeschlossen. Die Bernoulli-Hypothese ist gültig. Für Verbundträger mit starrem Verbund ist diese Annahme ausreichend genau.
- Die in Abschnitt 6.2.2.4 beschriebenen Materialmodelle beschreiben in ausreichender Genauigkeit das tatsächliche Verhalten der Teilquerschnitte.
- Risse im Beton werden über die Länge der Trägerelemente verschmiert und in eine mittlere Betonzugdehnung umgerechnet. Die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen wird durch eine effektive Betonzugspannung berücksichtigt.
- M- κ -Linien ermöglichen eine wirklichkeitsnahe Berechnung des nichtlinearen Trag- und Verformungsverhaltens von Verbundträgern unter Berücksichtigung der Rissbildung des Betons und des Fließens von Stahl.
- Die Betonzugkraft N_{ct} wird unter der Annahme berechnet, dass die Breite des Betonzugbereichs gleich der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands ist, siehe Abschnitt 6.2.2.5.
- Die Betondruckkraft wird in zwei Teile unterteilt: den Druckkraftanteil $N_{c,N}$, der im Gleichgewicht mit der Zugkraft im Stahlträger steht, und den Druckkraftanteil $N_{c,M}$, der im Gleichgewicht mit der Betonzugkraft N_{ct} und der Zugkraft in der Bewehrung N_s steht, siehe Abschnitt 6.2.2.5.
- Der Betondruckkraftanteil $N_{c,N}$, der im Gleichgewicht mit der Zugkraft im Stahlträger steht, wird unter der Annahme berechnet, dass die Breite des Betondruckbereichs gleich der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands ist, siehe Abschnitt 6.2.2.5.

- Der Betondruckkraftanteil $N_{c,M}$, der im Gleichgewicht mit der Betonzugkraft und Zugkraft der Bewehrung steht, wird unter der Annahme berechnet, dass die Breite des Betondruckbereichs gleich der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands ist, siehe Abschnitt 6.2.2.5.
- Die Werte der spannungsbezogenen mittragenden Breite des Scheibenzustands $b_{m,S}$ und des Biegezustands $b_{m,B}$ werden entsprechend dem linear-elastischen Fall angesetzt, siehe Abschnitt 4.5. Es wird angenommen, dass diese Werte der mittragenden Breite auch im Zustand II gültig sind und die Rissbildung keinen Einfluss auf die Verteilung der spannungsbezogenen mittragenden Breiten hat bzw. dieser Einfluss vernachlässigbar ist.
- Die Zunahme der mittragenden Breite bei großen Betondehnungen wird vernachlässigt. Da mit zunehmenden Betondehnungen die Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons im Druckbereich flacher wird, wird die Querverteilung der Betonlängsspannungen ausgeglichener als die zugehörige Dehnungsverteilung und die spannungsbezogene mittragende Breite wird größer.
- Die Durchbiegung des Verbundträgers infolge Querkraft wird elastisch am Stahlträger bestimmt.

Die beschriebenen Annahmen wurden so getroffen, dass hiermit eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger möglich ist. Dadurch unterliegt das analytische Berechnungsmodell jedoch unter Anderem den Bedingungen, dass eine Berechnung von Spannungen im Beton nur in der Symmetrieachse möglich ist. Insbesondere kann die Querverteilung der Betonspannungen nicht berechnet werden. Verbundträger mit ausgeprägtem Schlupf zwischen Beton und Stahlträger, zum Beispiel infolge einer teilweisen Verdübelung, können vorerst nicht berechnet werden. Ebenso ermöglicht das Berechnungsmodell nur die Berechnung von Einfeldträgern. Eine Erweiterung ist möglich.

6.2.4 Verifikation des analytischen Berechnungsmodells für Slim-Floor Träger

6.2.4.1 Grundsätzliches

Der Nachweis, dass das entwickelte Berechnungsmodell für Slim-Floor Träger und niedrige Verbundträger wirklichkeitsnahe Verformungen berechnet, erfolgt durch Vergleich mit vorhandenen Versuchsergebnissen. Eine Überprüfung des Berechnungsmodells setzt dabei voraus, dass die zum Vergleich herangezogenen Versuchsträger einen breiten Betongurt haben und das spezielle Tragverhalten von Slim-Floor Träger und niedriger Verbundträger aufweisen. Nur so kann überprüft werden, ob der Einfluss der Schubweichheit des Betongurts auf das Verformungsverhalten auch bei gleichzeitiger Rissbildung und großer Biegetragwirkung des Betongurts vom Berechnungsmodell ausreichend genau abgebildet wird. Somit sind für eine Überprüfung des Berechnungsmodells nur Versuche mit breiten Gurten sinnvoll.

6.2.4.2 Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen

Die Beschreibung der durchgeführten Versuche ist ausführlich in Kapitel 5 gegeben. Da das Berechnungsmodell für Verbundträger mit starrem Verbund entwickelt wurde, kann der Versuchsträger VT 5 nur bedingt zur Überprüfung des Berechnungsmodells herangezogen werden (siehe hierzu auch Abschnitt 5.8.2).

Der Versuchsträger VT 6 wurde zusätzlich mittels einer Kragarmpresse belastet (siehe Abschnitt 5.2), so dass das analytische Modell, das hier von einer Durchbiegung eines Einfeld-

trägers ausgeht, nicht zum Vergleich herangezogen werden kann. Aus diesem Grund der Versuchskörper in der nachfolgenden Tabelle nicht mit aufgeführt.
 Die beiden Versuchsträger VT 3 und VT 4 wurden unter Querbiegung belastet, VT 1 und VT 2 mittig über dem Stahlträger.

In Tabelle 6.8 ist ein Vergleich der Verformungen der Versuchsträger bei einer Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell mit den experimentellen Werten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dargestellt.

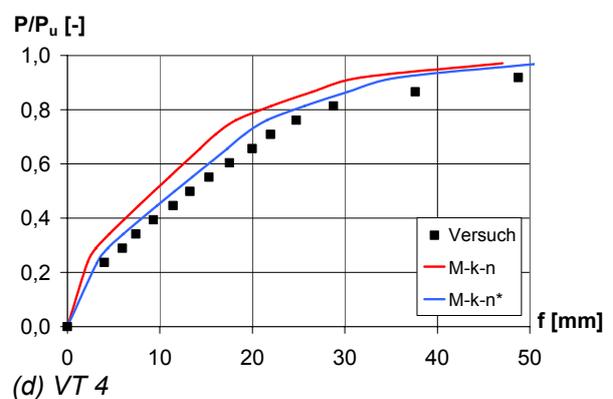
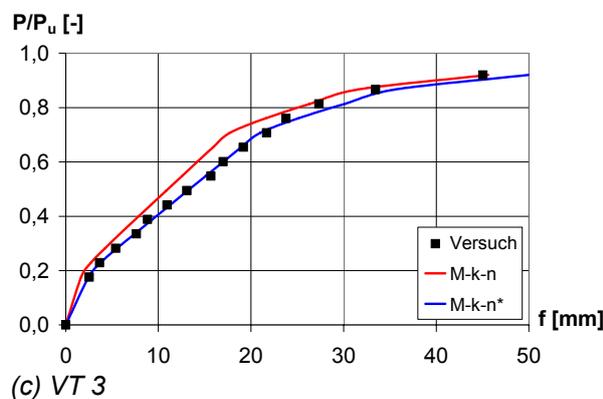
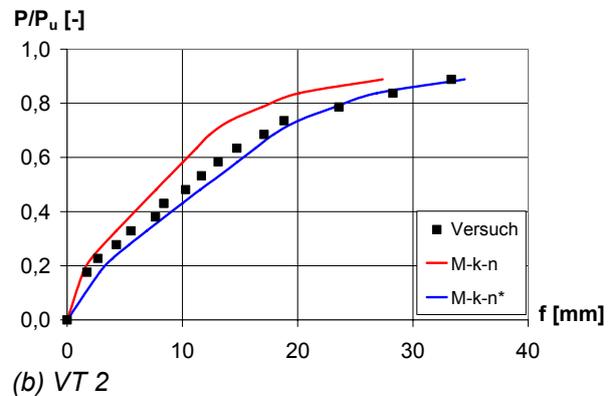
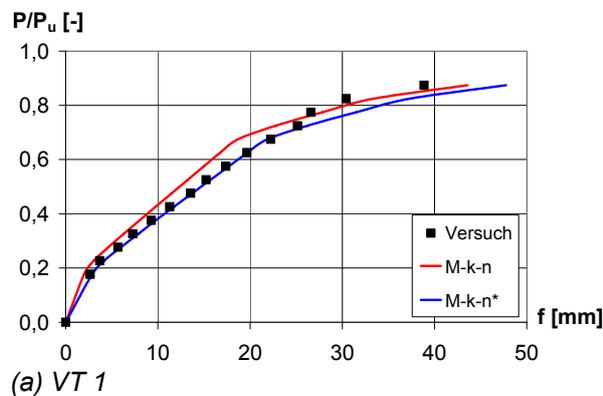
Tabelle 6.8: Vergleich der rechnerischen mit experimentellen Verformungen (SFT) für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

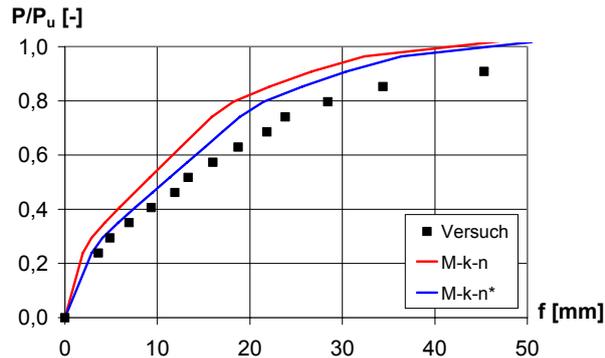
| | VT 1 | VT 2 | VT 3 | VT 4 | VT 5 |
|---|-------|--------|--------|---------|---------|
| $f_{\text{exp}}^{1)}$ [mm] | 15,22 | 11,65 | 15,67 | 15,31 | 13,32 |
| f_{rechn} [mm] | 15,72 | 13,20 | 15,10 | 13,49 | 11,35 |
| $f_{\text{rechn}} - f_{\text{exp}}^{2)}$ [mm] | 0,50 | 1,55 | -0,57 | 1,82 | -1,97 |
| $f_{\text{rechn}} / f_{\text{exp}} - 1$ [-] | 3,3 % | 13,3 % | -3,6 % | -11,9 % | -14,8 % |

¹⁾ f_{exp} Mittendurchbiegung der Versuchsträger

²⁾ f_{rechn} rechnerische Mittendurchbiegung der Versuchsträger (analytisches Berechnungsmodell) unter Berücksichtigung des Einflusses der Schubverformung

Abbildung 6.77 zeigt einen Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungs-Kurven, die gut übereinstimmen. Die rechnerischen Werte sind einmal mit und einmal ohne Schubverformung angegeben. Die Kraft-Verformungskurve ohne die Berücksichtigung der Schubverformung ist mit „M-k-n“ bezeichnet, die mit Berücksichtigung der Querkraftverformung des Stahlträgers ist mit „M-k-n*“ markiert.





(e) VT 5

Abbildung 6.77: Vergleich rechnerische und experimentelle Last-Verformungs-Werte

Das analytische Berechnungsmodell stimmt für die Versuchsträger VT 1 – VT 2 gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Da bei der Berechnung der Schubverformung die einwirkende Querkraft allein auf das Baustahlprofil bezogen wird, übersteigt die rechnerische Kurve des VT 2 die Versuchsergebnisse leicht, da im Vergleich zur einwirkenden Querkraft das Baustahlprofil des VT 2 im Vergleich zu den übrigen Trägern nur geringfügig größer gewählt wurde.

Bei den unter Querbiegung belasteten Versuchsträgern VT 3 und VT 4 ist zu erkennen, dass der Träger VT 3 mit der geringeren Lastexzentrizität (siehe hierzu auch Abschnitt 5.2) eine sehr gute Übereinstimmung mit dem analytischen Berechnungsmodell aufzeigt. Für den Versuchsträger VT 4 weicht das analytische Modell mit etwas zu geringen Durchbiegungswerten ab, so dass die gemessenen Werte größer waren. Der Versuchsträger VT 4 stellt dabei in Bezug auf die Laststellung einen Extremfall dar (vgl. hierzu auch Abschnitt 0).

Wie bereits im Abschnitt 5.8.2 beschrieben, machte sich bei allen Trägern erst bei höheren Lasten eine Schlupfänderung bemerkbar. Dies spiegelt sich auch in den Lastverformungskurven wieder. Beim Vergleich der analytischen Verformungsberechnung mit der experimentellen Messung des Versuchsträger VT 5 ist zu erkennen, dass bei niedrigen Lasten die beiden Kurven gut übereinstimmen, ab einer Last von ca. 65 % der Traglast aber die experimentelle Verformung stärker zunimmt. Wie bereits bei der Erläuterung des analytischen Modells beschrieben, wird der Schlupf in der Verbundfuge und damit die teilweise Verdübelung nicht berücksichtigt, so dass die beiden Kurven in diesem Bereich divergieren.

6.2.4.3 Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen [Kuhlmann, Fries 2001a]

Bei [Kuhlmann, Fries 2001a] wird von neun Versuchen an Slim-Floor Trägern mit UPE-Profilen berichtet. Versuchsträger VT 6 dieser Versuchsreihe wurde mit positiver Momentenbelastung und voller Verdübelung durchgeführt und kann somit mit dem entwickelten Berechnungsmodell berechnet werden. System und Abmessungen des Versuchsträgers VT 6 kann [Kuhlmann, Fries 2001a] entnommen werden.

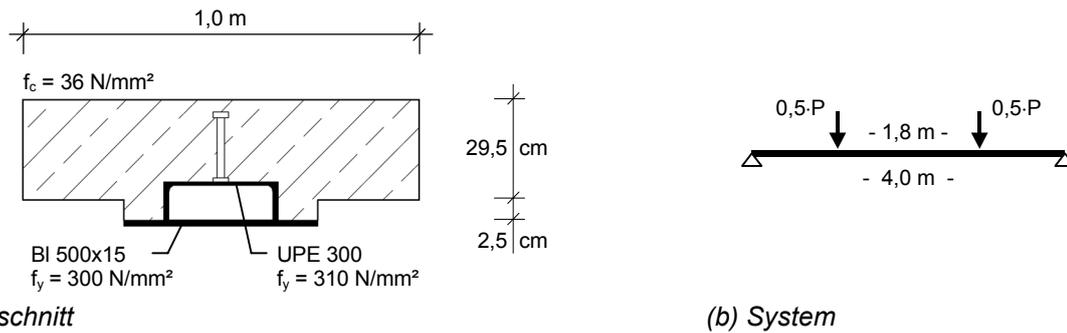


Abbildung 6.78: System und Querschnitt des Versuchsträgers VT 6

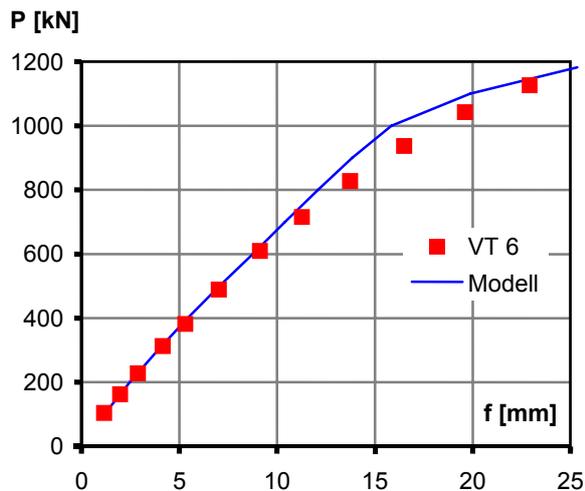


Abbildung 6.79: Vergleich rechnerische und experimentelle Last-Verformungs-Kurve des Versuchsträgers VT 6 [Kuhlmann, Fries 2001a]

Der Vergleich der rechnerischen Last-Verformungs-Kurve mit der experimentellen zeigt eine gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 6.79. Die mittlere Abweichung bis zum Erreichen des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit bei ca. 900 kN beträgt 3,2 %. Die rechnerischen Werte berücksichtigen dabei die Querkraftverformung des Stahlträgers für die bei den Versuchen gemessene Querkraft im Stahlträger.

6.2.4.4 Vergleich mit weiteren Slim-Floor Trägerversuchen

Weitere mit anderen Slim-Floor Querschnitten vergleichbare Versuche sind auch nach einer intensiven Literaturrecherche nicht bekannt, so dass eine zusätzliche Verifizierung des analytischen Modells für andere Baustahlquerschnitte, wie beispielsweise in der nachfolgenden Abbildung gezeigt, nicht ohne Weiteres durchführbar ist.

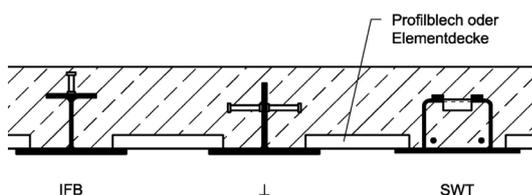


Abbildung 6.80: Auswahl möglicher Baustahlquerschnitte für Slim-Floor Träger

Ein Grund hierfür liegt in der geschichtlichen Entwicklung für Slim-Floor Träger begründet [Bode et al 1997]. Die Bauweise wurde Anfang 1980 in den skandinavischen Ländern entwi-

ckelt und erstmals überwiegend in der so genannten „Trockenbauweise“ eingesetzt. Bei dieser Bauweise werden vorgefertigte großformatige Deckenelemente (Spannbetonhohldielen, Stahlbetonhohlplatten, etc.) nach dem Verlegen auf der Baustelle lediglich durch einen Mörtelverguss zwischen den einzelnen Deckenelementen und dem Stahlträger ergänzt [Kuhlmann, Rieg 2003], siehe nachfolgende Abbildung.



Abbildung 6.81: Slim-Floor Decke in Trockenbauweise

Vorteile dieser Bauweise ist eine schnelle und weitgehend witterungsunabhängige Montage. Durch die Verwendung von Fertigteilen kann aber kein voller Verbund zwischen dem Stahlträger und den Fertigteilen erreicht werden, da der Stahlträger allenfalls mit dem örtlichen Mörtelverguss als Verbundträger wirkt.

In diesem Zusammenhang wurde daher in der Vergangenheit eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um nähere Aussagen über das Tragverhalten der Trockenbauweise und die unplanmäßige Verbundwirkung treffen zu können. Weiterführend wird auf die Literatur von [Lu, Mäkeläinen 1996] , [Lawson, Leskelä 1996] und [Bode et al 1997] verwiesen.

Auch wenn keine zum Vergleich geeigneten Verbundträgerversuche mit anderen Slim-Floor Querschnitten vorliegen, sind u. E. die hier entwickelten Regeln übertragbar.

Wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, beruht das analytische Modell auf elastisch-plastischen Werkstoffgesetzen, sowie dem mechanischen Modell für die Momenten-Krümmungs-Beziehung. Für die Bestimmung der $M-\kappa$ -Linie sind die Querschnittskennwerte des Bau-stahlprofils und der Betonplatte, sowie der Bewehrung notwendig, die für alle beliebigen Stahl- und Betonquerschnitte auf Grundlage mechanischer Gesetze berechnet werden können. Daher kann das für Hutprofile entwickelte Berechnungsmodell für die Ermittlung der Durchbiegung auf beliebige geometrische Slim-Floor Querschnitte, wie sie z.B. in der nachfolgenden Abbildung dargestellt sind, angewandt werden.

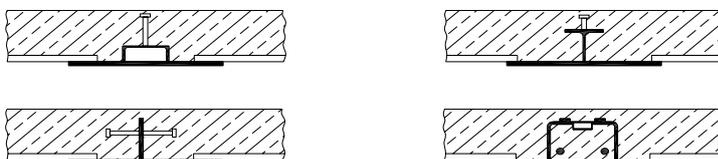


Abbildung 6.82: Mögliche Slim-Floor Querschnitte für planmäßigen Verbund

6.2.4.5 Fazit der Vergleiche mit Versuchsergebnissen

Der Vergleich der Last-Verformungs-Kurven und der verformungsbezogenen mittragenden Breite der vorliegenden experimentellen Untersuchungen mit den Ergebnissen des analytischen Berechnungsmodells zeigen eine gute Übereinstimmung. Die festgestellten Abweichungen liegen im üblichen Rahmen bei Nachrechnungen von Versuchsträgern. Darüber hinaus basiert das Berechnungsmodell auf nachvollziehbaren mechanischen Grundlagen, die die wesentlichen Effekte des Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern beschreiben können. Es kann daher davon ausgegangen, dass mit dem entwickelten Berechnungsmodell wirklichkeitsnahe Verformungen von Slim-Floor Trägern berechnet werden können.

Mit dem Berechnungsmodell kann somit das Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern simuliert werden. Dadurch können die Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite untersucht werden.

6.2.5 Ergebnisse aus der Untersuchung mit niedrigen Verbundträgern

Die ausführliche Beschreibung der durchgeführten Versuche ist in [Kuhlmann, Rieg 2004a] gegeben. Da das Berechnungsmodell für Verbundträger mit starrem Verbund entwickelt wurde, wird der Versuchsträger VT 3 mit teilweiser Verdübelung zur Überprüfung des Berechnungsmodells nicht herangezogen.

Tabelle 6.9: Vergleich der rechnerischen mit experimentellen Verformungen (nVT) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

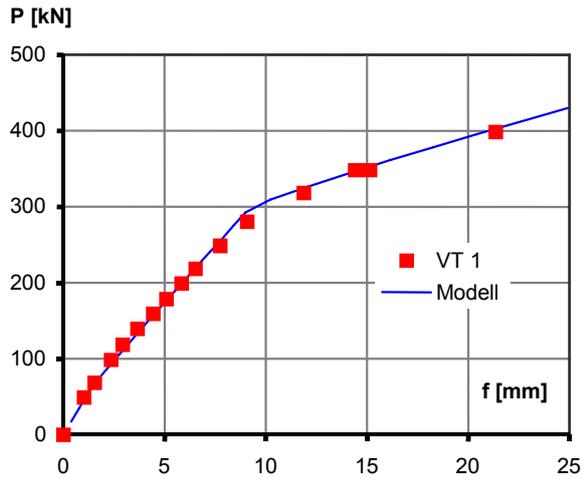
| | VT 1 | VT 2 | VT 4 | VT 5 | VT 6 | Mittelwert |
|---|------|------|------|------|------|------------|
| $f_{\text{exp}}^{1)}$ [mm] | 10,1 | 8,6 | 8,9 | 8,0 | 8,0 | -- |
| $f_{\text{rechn}} - f_{\text{exp}}^{2)}$ [mm] | 0,29 | 0,23 | 0,78 | 0,12 | 0,10 | 0,30 |
| $f_{\text{rechn}} / f_{\text{exp}} - 1$ [-] | 3,0% | 2,8% | 9,0% | 2,0% | 1,2% | 3,6% |

¹⁾ f_{exp} Mittendurchbiegung der Versuchsträger

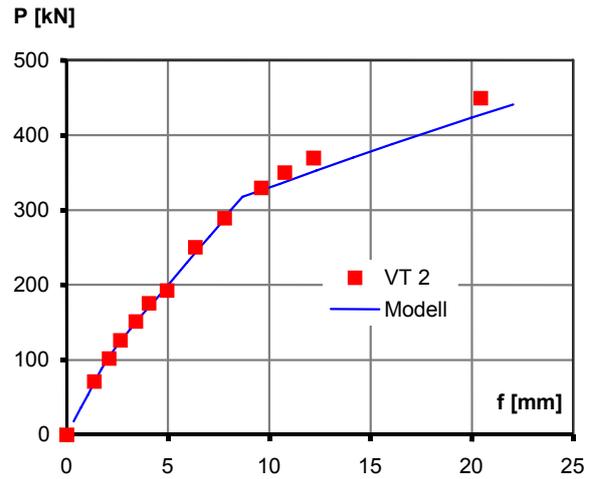
²⁾ f_{rechn} rechnerische Mittendurchbiegung der Versuchsträger (analytisches Berechnungsmodell)

In Tabelle 6.9 [Rieg 2006] ist ein Vergleich der Verformungen der Versuchsträger bei einer Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell mit den experimentellen Werten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dargestellt. Die Abweichungen der Ergebnisse des Berechnungsmodells zu den Versuchen betragen im Mittel 3,6 %.

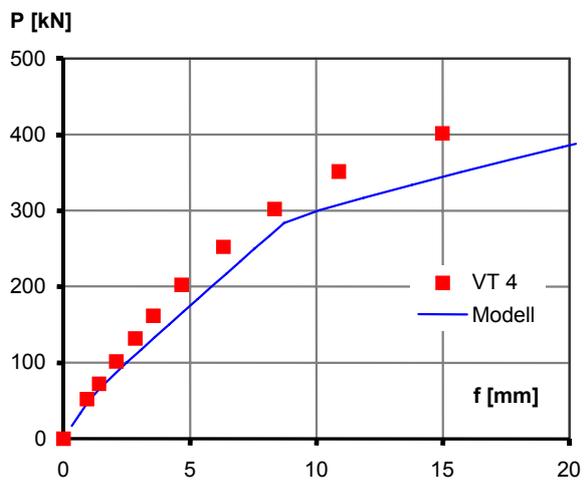
Die nachfolgende Abbildung 6.83 [Rieg 2006] zeigt den Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Verformungsberechnung mit Hilfe des analytischen Modells, die sehr gut übereinstimmen. Die rechnerischen Werte berücksichtigen dabei die Querkraftverformung des Stahlträgers für die bei den Versuchen am Stahlträger gemessene Querkraft.



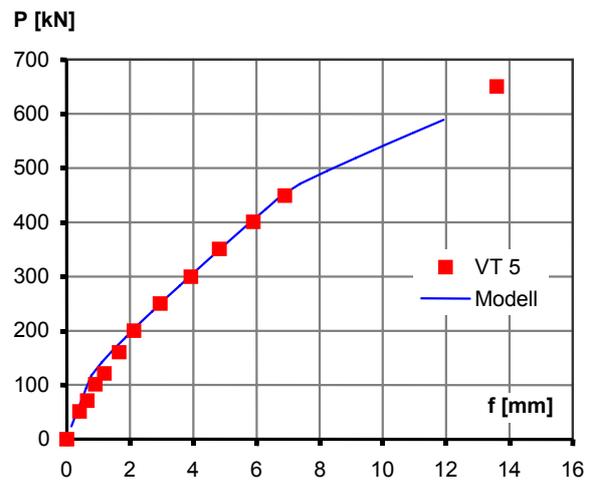
(a) VT 1



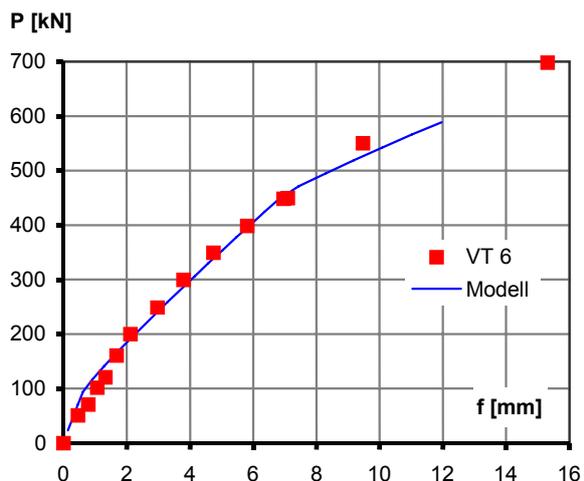
(b) VT 2



(c) VT 4



(d) VT 5



(e) VT 6

 Abbildung 6.83: Vergleich rechnerischer und experimenteller Last-Verformungs-Kurven
 [Rieg 2006]

Anhand der Abbildungen ist die gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit dem analytischen Berechnungsmodell zu erkennen.

6.3 Parameterstudie im Anwendungsbereich des Hochbaus

6.3.1 Allgemeines

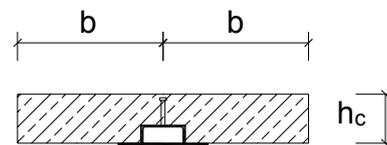
Um die Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite von Slim-Floor Trägern zu untersuchen, wurde analog zu den niedrigen Verbundträgern von [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Parameterstudie mit Slim-Floor Trägern durchgeführt. Die Verformungen der untersuchten Träger wurden dabei mit dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen Berechnungsmodell berechnet. Auf Basis der guten Übereinstimmung mit den Versuchsträgern wird dabei davon ausgegangen, dass die so ermittelten Verformungen wirklichkeitsnahe Werte darstellen, siehe Abschnitt 6.2.4. Aus den so berechneten Verformungen wurde die verformungsbezogene mittragende Breite entsprechend Abschnitt 6.1.3 rückgerechnet.

Im Folgenden wird zunächst der Umfang der Parameterstudie beschrieben.

System und Querschnitt:

Trägerstützweite: $L = 4 \div 10 \text{ m}$
 Trägerbreite: $b = 3 \div 6,5 \text{ m}$
 Plattendicke: $h_c = 16 \div 32 \text{ cm}$
 Höhe Stahlträger: UPE 160 \div 330 mm
 Profilreihen: UPE
 Ausnutzungsgrad: $M/M_u = 0 \div 1$

Querschnitt :



Material:

Beton

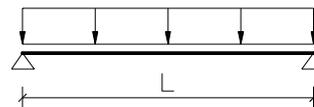
Druckfestigkeit: $f_c = 20 \div 45 \text{ N/mm}^2$
 Zugfestigkeit: $f_{ct} = 2,2 \div 4,0 \text{ N/mm}^2$
 E-Modul: $E_c = 28000 \div 35000 \text{ N/mm}^2$

Baustahl

Streckgrenze: $f_y = 23,5 \div 46 \text{ kN/cm}^2$

Verdübelung: $\eta = 1$ (volle Verdübelung)

System :



Umfang: ca. 270 Träger
 (ca. 4000 Belastungspunkte)

(a) Abmessungen

(b) Bezeichnungen

Abbildung 6.84: Umfang der Parameterstudie zur Entwicklung des Berechnungsansatzes

6.3.2 Untersucher Parameterbereich

6.3.2.1 Parametervariation

Die Parameterstudie wurde im Rahmen der Anwendung von Slim-Floor Trägern im normalen Hoch- und Geschossbau durchgeführt. Die variierten Parameter sind in Abbildung 6.84 zusammengefasst.

Die Untersuchungen beziehen sich dabei auf Verbundeinfeldträger, die mit einer Gleichlast belastet werden und eine volle Verdübelung aufweisen. Eine teilweise Verdübelung ist in der Praxis für Slim-Floor Profile wegen der geringen Bauhöhe und Durchbiegungsproblematik ohnehin eher selten. Es wird dabei angenommen, dass kein nennenswerter Schlupf zwi-

schen Beton und Stahlträger auftritt. Für Verbundträger im Hochbau mit einer vollen Verdübelung mittels Kopfbolzendübel stellt dies jedoch im Gebrauchszustand keine Einschränkung dar (siehe hierzu auch Abschnitt 5.8.2)

6.3.2.2 Träger nach Zulassung für Slim-Floor Träger

Für die analytische Modellrechnung wurden die Trägerquerschnitte herangezogen, die in der Zulassung [DIBt 2005] für Slim-Floor Träger angegeben sind. Der im Abschnitt 6.3.1 angegebene Parameterbereich geht hierbei über den in der Zulassung angegebenen Anwendungsbereich hinaus.

Berücksichtigt wurden die Querschnitte für die Kaltbemessung. Diese variieren in Abhängigkeit der einwirkenden Last, Trägerlänge und Deckenbreite.

6.3.3 Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$

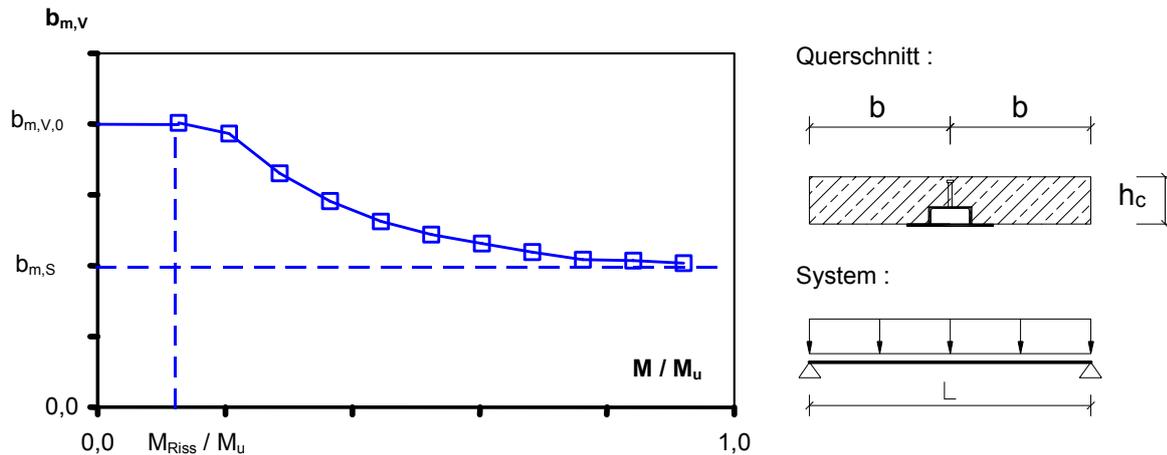
6.3.3.1 Allgemeines

Die Einflussfaktoren sind in weiten Teilen für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger gleich. Die nachfolgende Auflistung zeigt die Auswertung für Slim-Floor Träger. Die Erläuterungen und Erklärungen entsprechen den Ausführungen nach [Rieg 2006].

6.3.3.2 Ausnutzungsgrad des Verbundträgers M/M_u

Abbildung 6.85 zeigt den typischen Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades M/M_u eines Slim-Floor Trägers. Der Ausnutzungsgrad M/M_u ist dabei als Verhältnis des maximalen Feldmoments M in Trägermitte zum Bruchmoment M_u des Verbundquerschnitts definiert. Die verformungsbezogene mittragende Breite ist dabei aus den berechneten Verformungen des analytischen Berechnungsmodells rückgerechnet.

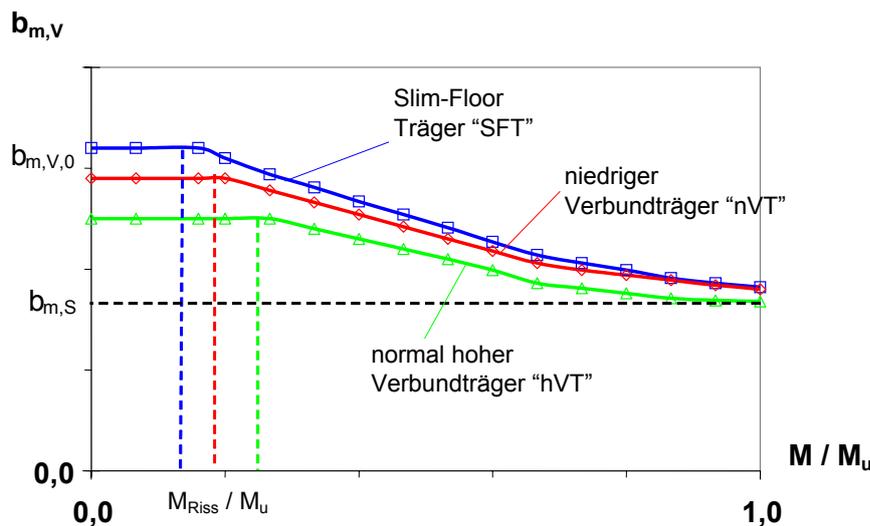
Die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ wird nach oben durch den elastischen Wert $b_{m,v,0}$ und nach unten durch die mittragende Breite $b_{m,s}$ des reinen Scheibenzustands begrenzt. Der elastische Wert $b_{m,v,0}$ der verformungsbezogenen mittragenden Breite kann aus den Werten des reinen Scheiben- und Biegezustands berechnet werden, siehe Abschnitt 4.5.3. Bis zum Erreichen des Rissmoments M_{Riss} des Verbundträgers ($M < M_{Riss}$) verhält sich der Slim-Floor Träger elastisch. Die verformungsbezogene mittragende Breite kann in diesem Bereich somit auf Basis der in Abschnitt 4.5.3 beschriebenen elastischen Untersuchungen bestimmt werden ($b_{m,v} = b_{m,v,0}$). Mit zunehmender Rissbildung ($M > M_{Riss}$) nimmt die Biegetragwirkung des Betongurts und damit die verformungsbezogene Breite und nähert sich daher dem Grenzwert $b_{m,s}$ des reinen Scheibenzustands an.


 Abbildung 6.85: Idealisierter Verlauf der verformungsbezogenen mittragende Breite $b_{m,v}$

Der untere Grenzwert $b_{m,s}$ der verformungsbezogenen mittragenden Breite ist vom Seitenverhältnis des Betongurtes b/L und dem Belastungstyp des Verbundträgers abhängig, siehe Abschnitt 4.5.2. Der Querschnitt und die Belastungshöhe haben hierauf keinen Einfluss. Der obere Grenzwert $b_{m,v,0}$ ist vom Seitenverhältnis des Betongurtes b/L , dem Belastungstyp und der Steifigkeitsverteilung im Verbundquerschnitt abhängig, siehe Abschnitt 4.5.3.

Die Differenz zwischen dem oberen und unteren Grenzwert der verformungsbezogenen mittragenden Breite hängt somit wesentlich vom Querschnitt des Verbundträgers ab. Bei hohen Verbundträgern mit dünnem Betongurt hat der Biegezustand des Betongurtes nur einen geringen Einfluss auf die verformungsbezogene mittragende Breite. Die Differenz $b_{m,v,0} - b_{m,s}$ ist daher klein. Bei niedrigen Verbundträgern ist der Einfluss des Biegezustands auf die mittragende Breite jedoch sehr groß und daher auch auf die Differenz $b_{m,v,0} - b_{m,s}$. Der Einfluss des Ausnutzungsgrades auf die verformungsbezogene mittragende Breite ist somit bei niedrigen Verbundträgern größer als bei hohen, siehe Abbildung 6.86.

Für Slim-Floor Träger liegt dieser Einfluss noch stärker als bei niedrigen Verbundträgern, da die Biegesteifigkeit des Betongurtes bei diesen Querschnitten einen Maximalwert erreicht.


 Abbildung 6.86: Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ für hVT, nVT und SFT in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades M/M_u

Weitere Einflussfaktoren auf die verformungsbezogene mittragende Breite werden in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführt und erläutert.

Der bei manchen Trägern zu beobachtende Anstieg der verformungsbezogenen mittragenden Breite nach Erreichen des Rissmoments lässt sich wie folgt erklären, siehe z. B. Abbildung 6.87: Die Rissbildung beginnt im Allgemeinen im höchstbelasteten Querschnitt, in der Regel in Feldmitte. Beim analytischen Modell ist die mittragende Breite an dieser Stelle am größten und somit auch das Rissmoment. Da die verformungsbezogene mittragende Breite des Ersatzbalkens im elastischen Bereich kleiner ist als die spannungsbezogene mittragende Breite in Feldmitte des analytischen Berechnungsmodells, ist hier auch das rechnerische Rissmoment kleiner. Deshalb beginnt die Rissbildung am Ersatzbalken rechnerisch bei einer geringeren Belastung als beim analytischen Modell. Um am Ersatzbalken, der bei dieser Last bereits im Zustand II ist, die gleiche rechnerische Steifigkeit wie am ungerissenen analytischen Modell zu erhalten, muss daher die verformungsbezogene mittragende Breite des Ersatzbalkens vergrößert werden.

6.3.3.3 Betonzugfestigkeit f_{ct}

Wie oben bereits erwähnt, vergrößert sich die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ mit zunehmender Betonzugfestigkeit f_{ct} , siehe Abbildung 6.87. Dieser Effekt wird auch bei numerischen Untersuchungen in [Rieg 2004 a], [Kuhlmann, et al 2003], [Nakajima 2003] beobachtet.

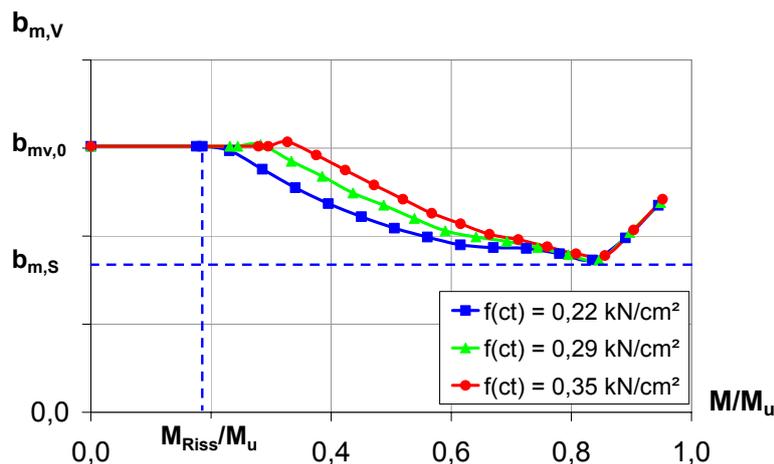


Abbildung 6.87: Einfluss der Betonzugfestigkeit f_{ct} auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

Die Gründe hierfür sind:

- Mit zunehmender Betonzugfestigkeit f_{ct} nimmt das Rissmoment M_{Riss} des Slim-Floor Trägers zu - bei gleichbleibendem Bruchmoment M_u . Dies führt dazu, dass der Verlauf der mittragenden Breite $b_{m,V}$ im Bereich der Rissbildung steiler wird und deshalb $b_{m,V}$ größere Werte annimmt, siehe Abbildung 6.87.
- Durch die höhere Betonzugfestigkeit ergibt sich eine größere Mitwirkung des Betons auf Zug im Rissquerschnitt und zwischen den Rissen. Dadurch ergibt sich eine größere Biegetragwirkung des Betongurts und somit eine größere mittragende Breite.
- Durch das größere Rissmoment bei höherer Betonzugfestigkeit ist bei gleicher Belastung die Ausdehnung des gerissenen Bereichs in Trägerlängsrichtung kleiner und größere Bereiche des Trägers verhalten sich noch elastisch. Dadurch ist die verformungsbezogene mittragende Breite größer.

6.3.3.4 Streckgrenze des Baustahls

Das Bruchmoment M_u von Verbundquerschnitten wird maßgeblich von der Streckgrenze des Stahlträgers bestimmt. Durch Erhöhung der Streckgrenze nimmt das Bruchmoment zu und das bezogene Rissmoment M_{Riss}/M_u des Trägers ab. Dadurch nimmt die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ bei gleichem Ausnutzungsgrad M/M_u des Trägers ab, siehe Abbildung 6.88. Dies ist in der schematischen Darstellung [Rieg 2006] in Abbildung 6.89 (a) gut zu erkennen.

$b_{m,V}$

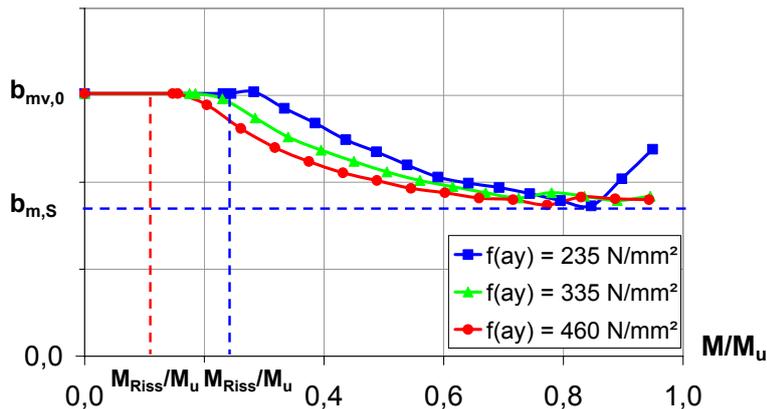
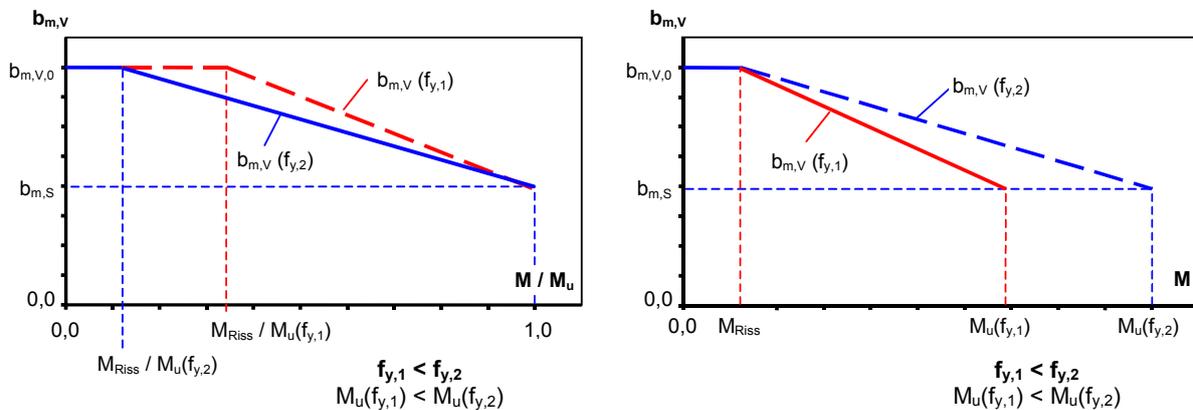


Abbildung 6.88: Einfluss der Streckgrenze f_y des Baustahls auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

Wird das äußere Moment M absolut konstant gehalten, ergibt die Erhöhung der Streckgrenze hingegen eine größere verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$, siehe Abbildung 6.89 (b), [Rieg 2006].



(a) Darstellung mit bezogenen Momenten

(b) Darstellung mit absoluten Momenten

Abbildung 6.89: Schematische Darstellung des Einflusses der Streckgrenze f_y des Baustahls auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

6.3.3.5 Einfluss der Betongurtdicke h_c

Die Biegetragwirkung des Betongurts nimmt mit zunehmender Dicke des Betongurts zu. Dies liegt daran, dass die Eigenbiegesteifigkeit I_c des Betongurts in dritter Potenz mit der Gurtdicke h_c ansteigt, während der Steifigkeitsanteil des inneren Kräftepaars im Verbundquerschnitt (Steiner-Anteil) langsamer wächst (Potenz < 2), siehe Gleichung (6.1). Eine größere

Biegetragwirkung führt zu einer größeren verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$, siehe Abbildung 6.90.

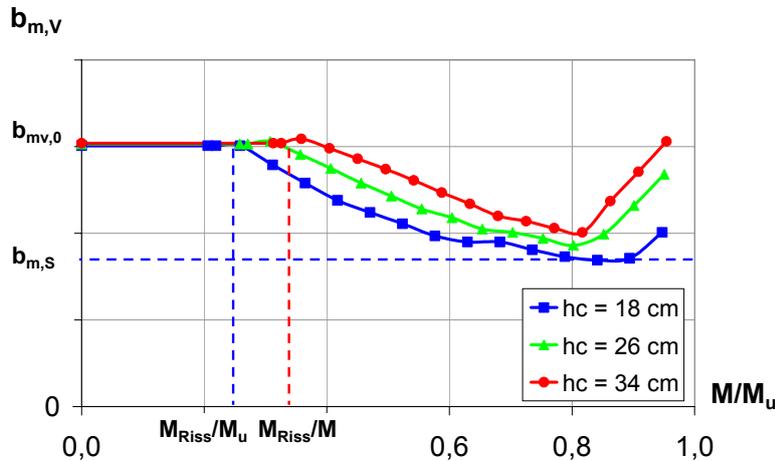
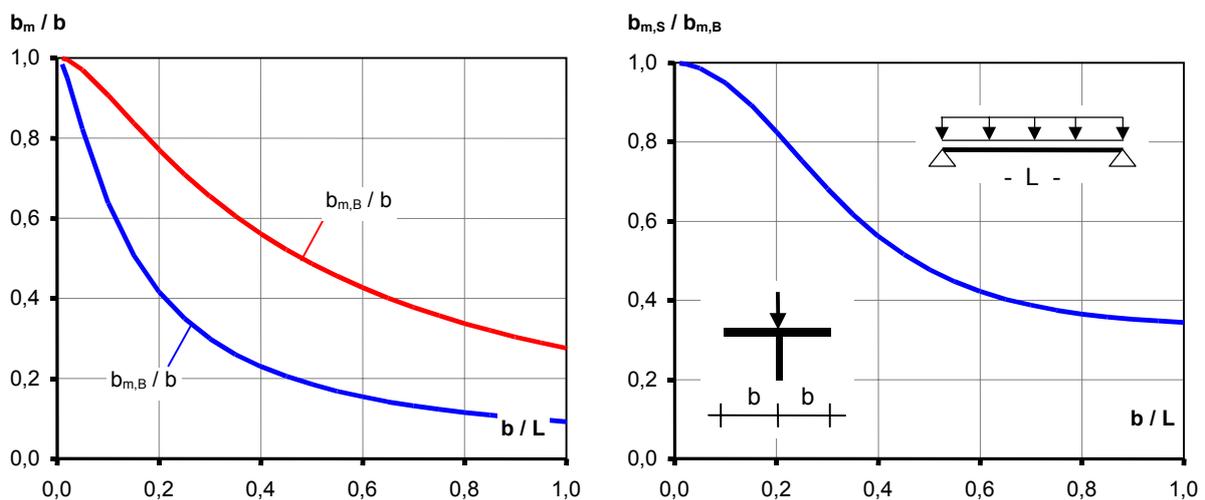


Abbildung 6.90: Einfluss der Gurtstärke h_c auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

6.3.3.6 Seitenverhältnis des Betongurts b/L

Der Unterschied zwischen der mittragenden Breite des reinen Scheibenzustands $b_{m,S}$ und des reinen Biegezustands $b_{m,B}$ ist abhängig vom Seitenverhältnis des Betongurts b/L , siehe Abbildung 6.91. Für kleine Verhältnisse b/L ist der Unterschied vergleichsweise gering. Für mittlere und große Verhältnisse b/L ist der Unterschied dagegen groß. Entsprechend ist der Einfluss der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ bei mittleren und großen Seitenverhältnissen b/L größer als bei kleinen, siehe Abbildung 6.92.



(a) Verlauf in Abhängigkeit von b/L

(b) Verhältnis $b_{m,S}/b_{m,B}$

Abbildung 6.91: Mittragende Breite des reinen Scheibenzustands $b_{m,S}$ und des reinen Biegezustands $b_{m,B}$ in Feldmitte eines einseitigen Verbundträgers unter Gleichlast

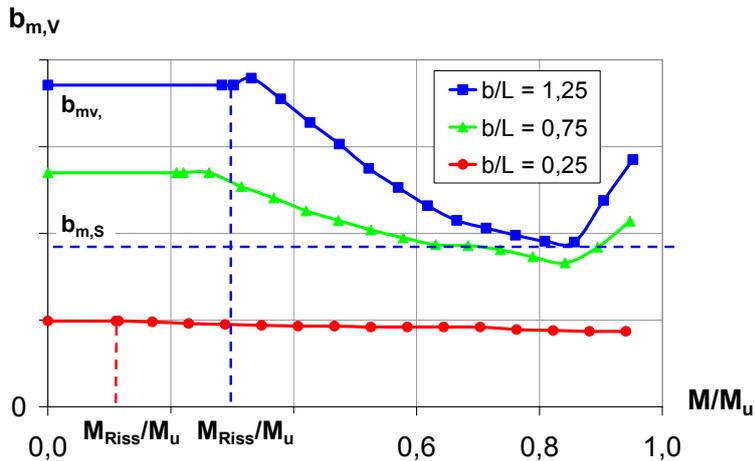


Abbildung 6.92: Verformungsbezogene mitttragende Breite $b_{m,v}$ in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses b/L

6.3.3.7 Einfluss des Baustahlquerschnitts

Die Querschnittsgröße des Baustahlprofils beeinflusst die Steifigkeitsverteilung im Verbundquerschnitt und somit die verformungsbezogene mitttragende Breite $b_{m,v}$. So wird z. B. bei Verwendung eines größeren Trägers zum Einen die Eigenbiegesteifigkeit I_a des Stahlträgers und zum Anderen der Steiner-Anteil der Teilflächen erhöht - bei gleichbleibender Biegesteifigkeit I_c des Betongurts. Dadurch wird der Einfluss des Biegezustands des Betongurts auf die mitttragende Breite geschwächt. Es ergibt sich eine kleinere verformungsbezogene mitttragende Breite $b_{m,v}$, siehe Abbildung 6.93.

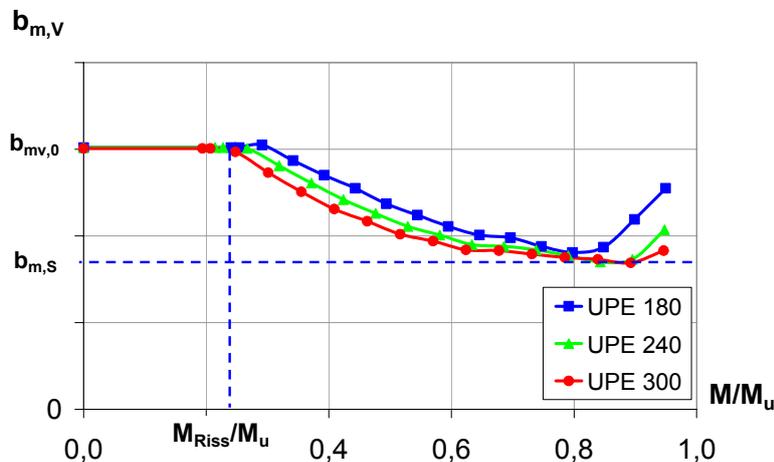


Abbildung 6.93: Einfluss der Querschnittsform des Stahlträgers auf die verformungsbezogene mitttragende Breite $b_{m,v}$

Ein weiterer Grund ist, dass mit kleinerem Stahlquerschnitt des Stahlprofils dessen Querschnittsfläche A_a und damit auch das Bruchmoment M_u kleiner wird. Wohingegen das Rissmoment M_{Riss} nur wenig beeinflusst wird. Insofern nimmt die verformungsbezogene mitttragende Breite ab, siehe Abschnitt 6.3.3.3.

Dieser Einfluss ist um so schwächer ausgeprägt, je dicker und größer der Betongurt im Vergleich zum Querschnitt des Stahlträgers ist. Bei niedrigen Verbundträgern, deren Steifigkeit und damit auch deren mitttragende Breite überwiegend vom Biegezustand des Betongurts bestimmt werden, ist dieser Effekt im Vergleich zu weiteren Einflüssen deshalb klein.

6.3.3.8 Einfluss des Längsbewehrungsgehalts A_s

Der Einfluss der Längsbewehrung A_s bei niedrigen Verbundträgern ist entsprechend klein und vernachlässigbar, da der Kräfteanteil der Bewehrung durch die Lage nahe der Spannungsnulllinie kaum einen Einfluss auf die Traganteile hat. Für Slim-Floor Träger aber liegt der Schwerpunkt der Längsbewehrung oftmals sogar unterhalb des Stahlprofil-Schwerpunkts, so dass bei Slim-Floor Trägern die Tragkraft einen nicht vernachlässigbaren Anteil besitzt.

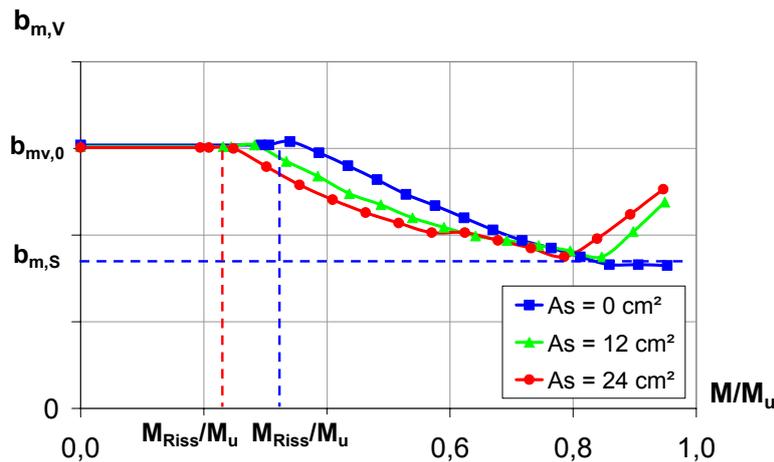


Abbildung 6.94: Einfluss der Bewehrungsgehaltes auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

Mit steigendem Längsbewehrungsgehalt steigt die Momentenragfähigkeit des Trägers an. Auf das Rissmoment des Trägers hat dies aber nur einen sehr geringen Einfluss. Das Rissmoment nimmt nur geringfügig zu. Durch die Erhöhung nimmt somit das bezogene Rissmoment M_{Riss}/M_u des Trägers ab. Dadurch nimmt die verformungsbezogene mittragende Breite bei gleichem Ausnutzungsgrad ab, siehe Abbildung 6.94. Das Verhalten ist vergleichbar mit der Veränderung der Streckgrenze des Baustahls nach Absatz 6.3.3.3.

6.3.3.9 Druckfestigkeit des Betongurts

Die Druckfestigkeit f_c des Betongurts hat nur einen geringen Einfluss auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ von Verbundträgern, siehe Abbildung 6.95. Grund hierfür ist, dass die Druckfestigkeit des Betons weder das Rissverhalten noch das Bruchmoment eines Verbundträgers wesentlich beeinflusst.

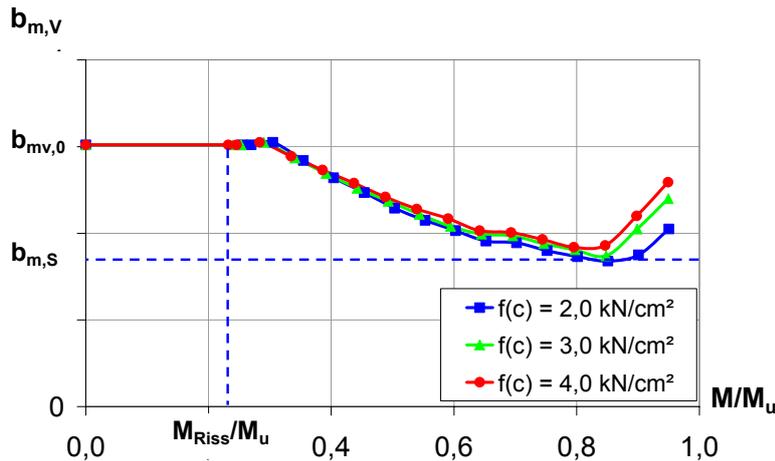


Abbildung 6.95: Einfluss der Betondruckfestigkeit f_c auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$

6.4 Vergleich mit bestehenden Normregelungen

6.4.1 Allgemeines

Ein Vergleich mit den bestehenden Regelungen zur mittragenden Breite der zur Zeit geltenden Normen [EN 1994-1-1] bzw. [DIN V 18800-5] soll zeigen, in wie weit diese Regelungen als Näherung für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ und zur Berechnung der Verformungen von Slim-Floor Trägern verwendet werden können. Beispielhaft soll dies an der Nachrechnung für die Versuchsträger der Slim-Floor Träger aufgezeigt werden.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass keine der angesprochenen Normen eine spezielle Regel für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ enthalten. Diese Regelungen gelten gleichermaßen für die spannungsbezogene als auch die verformungsbezogene mittragende Breite.

Die im Folgenden beschriebenen Vergleiche für den Versuchsträger VT 1 und VT 2 basieren auf der Annahme, dass mit dem analytischen Berechnungsmodell wirklichkeitsnahe Werte für die Verformungen und die verformungsbezogene mittragende Breite ermittelt werden, siehe Abschnitt 6.2.

6.4.2 Vergleich mit EN 1994-1-1 bzw. DIN 18800-5

6.4.2.1 Vergleichsrechnung für Versuchsträger

Die Regeln zur mittragenden Breite in [EN 1994-1-1] bzw. [DIN V 18800-5] sind identisch. In den nachfolgenden Abbildungen ist ein Vergleich der rechnerischen Verformungen des analytischen Modells und [DIN V 18800-5] sowie der Verformungsberechnung für b_{tot} (der gesamten geometrischen Breite) dargestellt. Die Berechnungen nach [DIN V 18800-5] berücksichtigen dabei das nichtlineare Materialverhalten der Verbundträger mittels M- κ -Linien und verwenden als Trägerbreite die mittragende Breite nach [DIN V 18800-5].

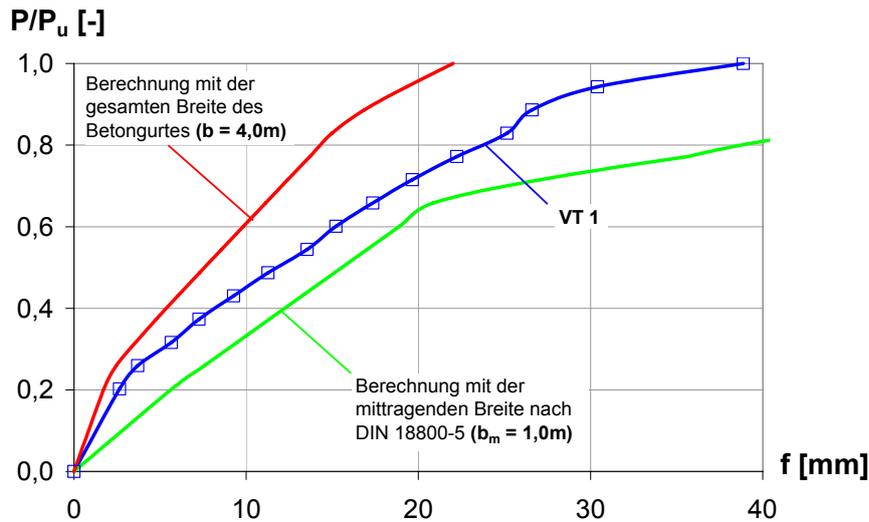


Abbildung 6.96: Mittragende Breite VT 1 - Vergleich mit [DIN V 18800-5]

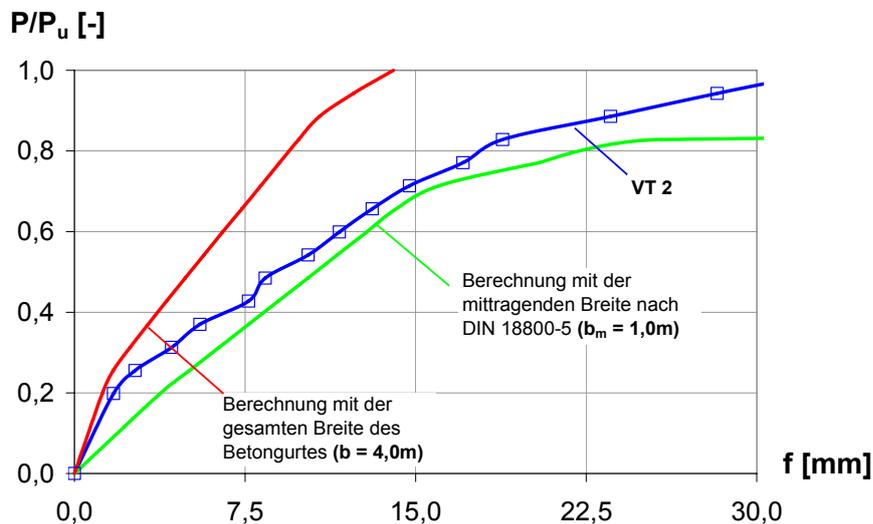


Abbildung 6.97: Mittragende Breite VT 2 - Vergleich mit [DIN V 18800-5]

Die Abbildungen Abbildung 6.96 und Abbildung 6.97 zeigen, dass die Berechnung nach [DIN V 18800-5] die Durchbiegungen überschätzen. Bei kleinen einwirkenden Kräften verläuft die Versuchskurve nahe der Berechnungskurve für die gesamte geometrische Breite. Nach Reißen des Betons und des damit einhergehenden Steifigkeitsverlustes nähert sich die Kurve der Berechnungskurve nach [DIN V 18800-5] leicht an.

Sowohl der Ansatz der gesamten geometrischen Breite, wie auch der mittragenden Breite nach [DIN V 18800-5] liefern keine ausreichend genaue Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen (bzw. dem analytischen Berechnungsmodells). Die Verformungsberechnung nach Norm überschätzen im Allgemeinen die Verformungen, was in vielen Fällen zu einer unwirtschaftlichen Dimensionierung führt.

6.4.2.2 Statistische Auswertung der Parameteranalyse

Die nachfolgende Abbildung 6.98 zeigt anschaulich, dass für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Verformungsberechnung mit der mittragenden Breite nach [DIN V 18800-5] die analytische Berechnung der Verformung stark überschätzt. Die statistische Auswertung wurde anhand der in Abschnitt 6.3 dargestellten Parameterstudie durchgeführt.

rel. Häufigkeit

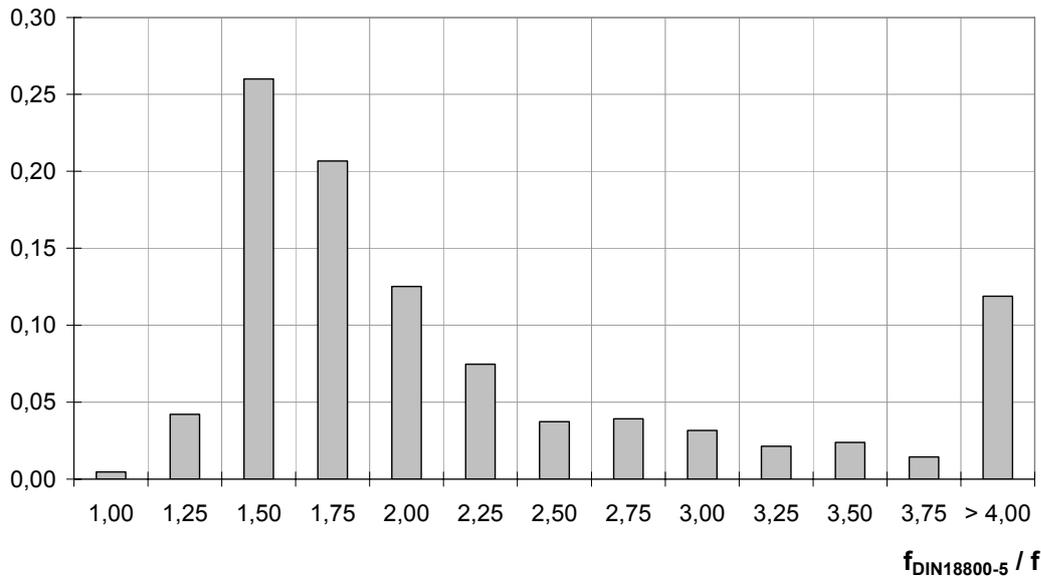


Abbildung 6.98: Abweichung der Verformungsberechnung nach [DIN V 18800-5] mit analytischem Berechnungsmodell

6.4.3 Schlussfolgerung aus dem Vergleich mit den bestehenden Normregelungen

Der vorangegangene Vergleich zeigt, dass die Regelungen zur mittragenden Breite in [DIN V 18800-5] bzw. [EN 1994-1-1] von der genauen Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite von Slim-Floor Trägern sehr stark abweichen und eine große Streuung aufweisen.

Für den Vergleich der bestehenden Normenregelungen mit niedrigen Verbundträgern wird auf das AiF-Forschungsvorhaben [Kuhlmann, Rieg 2004a] bzw. [Rieg 2006] verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auf Basis dieser Regeln berechnete Verformungen von Slim-Floor Trägern und niedriger Verbundträger die tatsächlichen Verformungen überschätzen und in der Regel die Werte stark streuen. Diese Regeln zur mittragenden Breite sind zur Verformungsberechnung für Slim-Floor Träger und niedrige Verbundträger somit nicht geeignet.

6.5 Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite

6.5.1 Grundsätzliches

Wie der Vergleich mit den bestehenden Normregelungen im vorangegangenen Abschnitt zeigt, werden die Verformungen von Slim-Floor Trägern auf Basis dieser Regelungen im Allgemeinen überschätzt, was zu einer unwirtschaftlichen Dimensionierung dieser Träger führt. Ziel ist es daher, durch die Entwicklung eines realistischeren Berechnungsansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung und damit eine wirtschaftlichere Dimensionierung von Slim-Floor Trägern zu ermöglichen.

Da Slim-Floor Träger bereits unter Gebrauchslasten eine ausgeprägte Rissbildung aufweisen, muss diese für eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung in der Rechnung berücksichtigt werden. Abbildung 6.99 stellt dieses Vorgehen schematisch dar. In Abhängigkeit der System- und Belastungswerte wird zunächst die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ berechnet. Mit deren Hilfe wird die M- κ -Linie des Verbundquerschnitts in Abhängigkeit der Querschnitts- und Materialwerte des Verbundträgers berechnet. Damit kann schließlich mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte die Verformung des Trägers bestimmt werden.

Der Berechnungsansatz wurde auf Basis der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Parameterstudie entwickelt. Er unterliegt daher folgenden Einschränkungen, kann jedoch auch bei vergleichbaren Querschnitten und Systemen näherungsweise angewendet werden, siehe hierzu auch Abschnitt 6.2.3:

- Der Querschnitt des Verbundträgers ist in Trägerlängsrichtung konstant.
- Der Betongurt weist eine konstante Dicke auf.
- Der Verbundträger wird als Einfeldträger ausgeführt.
- Der Verbundträger weist einen starren Verbund auf.
- Ein Versagen der Verbundfuge wird ausgeschlossen.
- Die Durchbiegung des Verbundträgers infolge Querkraft wird elastisch am Stahlträger bestimmt.
- Eigenspannungen im Stahlträger haben keinen nennenswerten Einfluss auf das Verformungsverhalten des Verbundträgers.
- Die Abmessungen des Verbundträgers liegen im Rahmen der durchgeführten Parameterstudie.
- Die Werkstoffkennwerte des Verbundträgers liegen im Rahmen der durchgeführten Parameterstudie.

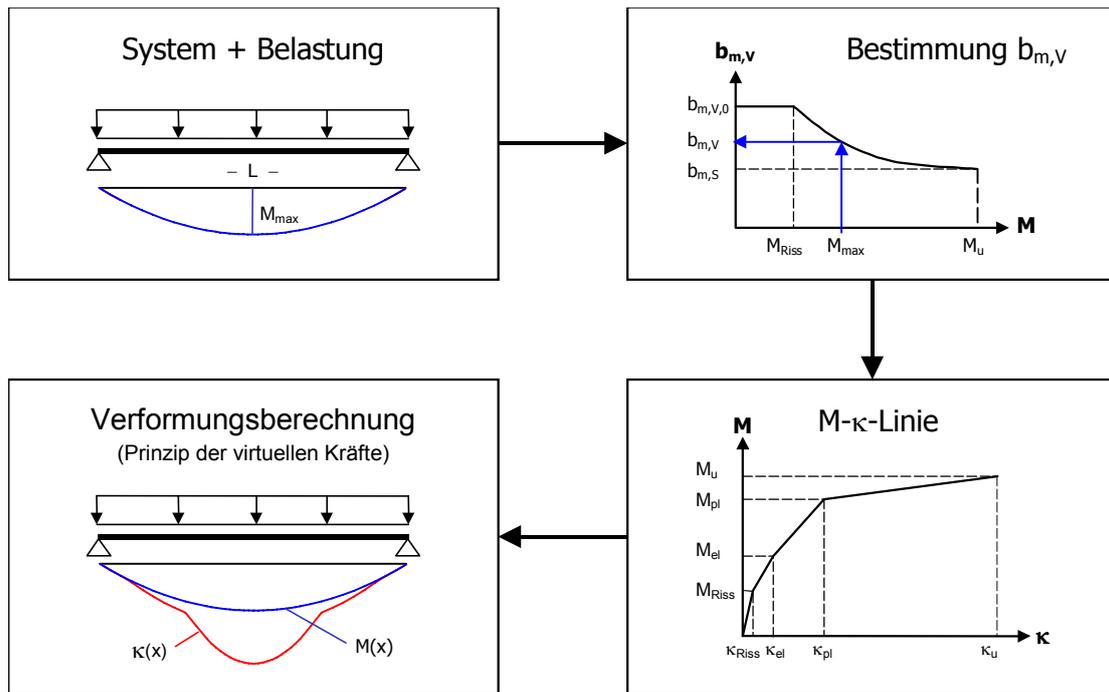


Abbildung 6.99: Verformungsberechnung nach [Rieg 2006] auf Basis der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$

Der Berechnungsansatz wurde durch systematische Auswertung der durchgeführten Parameterstudie entwickelt. Dabei wurde versucht, für die genauen Werte der verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ eine gute Näherungsfunktion über die Minimierung der Fehlerquadrate zu finden.

Der Berechnungsansatz wurde analog der Auswertung für niedrige Verbundträger [Kuhlmann, Rieg 2004a] bzw. [Rieg 2006] in zwei Genauigkeitsstufen ausgearbeitet.

Stufe 1 - Genauer Berechnungsansatz

Dieser Berechnungsansatz berücksichtigt die maßgebenden Einflüsse und liefert einen realistischen Wert für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ niedriger Verbundträger, siehe Abschnitt 6.5.3. Die damit berechneten Verformungen stellen im Allgemeinen sehr realistische Werte bei einem mittleren Berechnungsaufwand dar.

Stufe 2 - Vereinfachter Berechnungsansatz

Dieser Berechnungsansatz stellt eine Vereinfachung des genauen Berechnungsansatzes dar, siehe Abschnitt 6.5.4. Der Ansatz berücksichtigt im Unterschied zur Stufe 1 pauschal nur den maßgebenden Einfluss des Ausnutzungsgrads und damit implizit der Rissbildung. Die Genauigkeit der damit erzielten Ergebnisse ist in der Regel im Vergleich zur Zuverlässigkeit weiterer Einflüsse auf die Verformung ausreichend.

6.5.2 Unterschiedlicher Berechnungsansatz für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, unterscheiden sich die Tragwirkungen von niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern nur in einigen Punkten. Bei der Auswertung der maßgebenden Einflüsse stellten sich folgende Unterschiede heraus, die nicht für beide Querschnittstypen gleich angesetzt werden können:

- Da bei niedrigen Verbundträgern die in die Betonplatte eingelegte Längsbewehrung nahe der statischen Nulllinie liegt, ist der Einfluss der Betonstahlkraft vergleichsweise gering. Bei Slim-Floor Trägern liegt der Schwerpunkt der Längsbewehrung sogar unterhalb des Schwerpunkts des Hutprofils, so dass der Einfluss hier nicht unberücksichtigt bleiben darf. In die Berechnungsformel geht daher ein modifizierter Einflussfaktor für die Längsbewehrung ein.
- Der in [Rieg 2006] beschriebene Effekt, dass mit zunehmender Dicke die Biegesteifigkeit des Betongurtes zunimmt, erreicht für Slim-Floor Träger den Grenzwert der maximalen Biegetragwirkung eines Verbundträgers. Während in der Berechnungsformel nach [Rieg 2006] das Verhältnis der Betongurtdicke zur Gesamtträgerhöhe eingeht, wird im Ansatz für Slim-Floor Träger das Verhältnis von Betongurtdicke zur Höhe des eingebetteten Stahlprofils gebildet.

6.5.3 Genauer Berechnungsansatz (Stufe 1)

6.5.3.1 Bestimmung der maßgebenden Faktoren

Abbildung 6.100 zeigt den idealisierten Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u des Verbundträgers. Gleichung (6.2) und (6.3) geben den genauen Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ in Abhängigkeit der maßgebenden Parameter an. Mit der so bestimmten mittragenden Breite ist die wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung von Slim-Floor Trägern möglich. Die Berechnungsformel für niedrige Verbundträger nach [Rieg 2006] ist in Abschnitt 6.6 abgebildet.

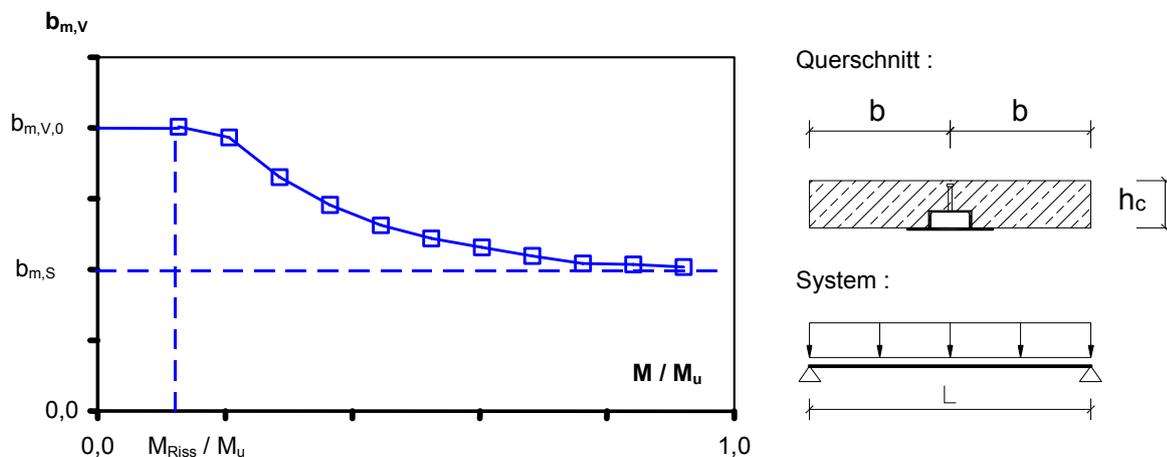


Abbildung 6.100: Idealisierter Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$

$$b_{m,V} = b_{m,S} + (b_{m,V,0} - b_{m,S}) \cdot \beta_{m,V} \quad (6.2)$$

| | | |
|-----|---------------|---|
| mit | $b_{m,V}$ | verformungsbezogene mittragende Breite |
| | $b_{m,S}$ | mittragende Breite des reinen Scheibenzustands nach Abbildung 6.101 |
| | $b_{m,V,0}$ | elastischer Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite (Beton im ungerissenen Zustand) |
| | $\beta_{m,V}$ | Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite nach Gleichung (6.3) |

$$\beta_{m,V} = 0,80 \cdot (1 - k_M)^{1,54} \cdot \left(\frac{f_{ct}}{f_{ct,0}} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{h_a}{h_c} \right)^{-0,15} \cdot \left(\frac{f_y}{f_{y,0}} \right)^{0,18} \cdot \left(\frac{A_{ges}}{h_a^2} \right)^{-0,57} \quad (6.3)$$

| | | |
|-----|---------------|---|
| mit | $\beta_{m,V}$ | Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite |
|-----|---------------|---|

$$k_M = \frac{M - M_{Riss}}{M_u - M_{Riss}}$$

| | |
|---------------------------------|--|
| M | einwirkendes Moment des Verbundträgers in Feldmitte |
| M_{Riss} | Rissmoment des Slim-Floor Trägers |
| M_u | Bruchmoment des Slim-Floor Trägers |
| f_{ct} | Betonzugfestigkeit, $2,2 \text{ N/mm}^2 \leq f_{ct} \leq 4,0 \text{ N/mm}^2$ |
| $f_{ct,0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert für die Betonzugfestigkeit |
| h_c | Dicke des Betongurtes, $16 \text{ cm} \leq h_c \leq 32 \text{ cm}$ |
| h_a | Höhe des Stahlprofils, das innerhalb des Betongurtes liegt |
| f_y | Streckgrenze des Baustahls, $235 \text{ N/mm}^2 \leq f_y \leq 460 \text{ N/mm}^2$ |
| $f_{y,0} = 355 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert für die Streckgrenze des Baustahls |
| A_{ges} | Gesamtstahlfläche Baustahl und Betonstahl, ansetzbare (mittragende) Betonstahlbewehrung wird hierbei (vereinfacht) anteilmäßig über Momentenausnutzung ermittelt |

Die Exponenten und Koeffizienten von Gleichung (6.3) wurden durch eine Regression über die Minimierung der Fehlerquadrate mit Hilfe des in Microsoft Excel implementierten Solver bestimmt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die einzelnen Parameter unter einander abhängig sein können.

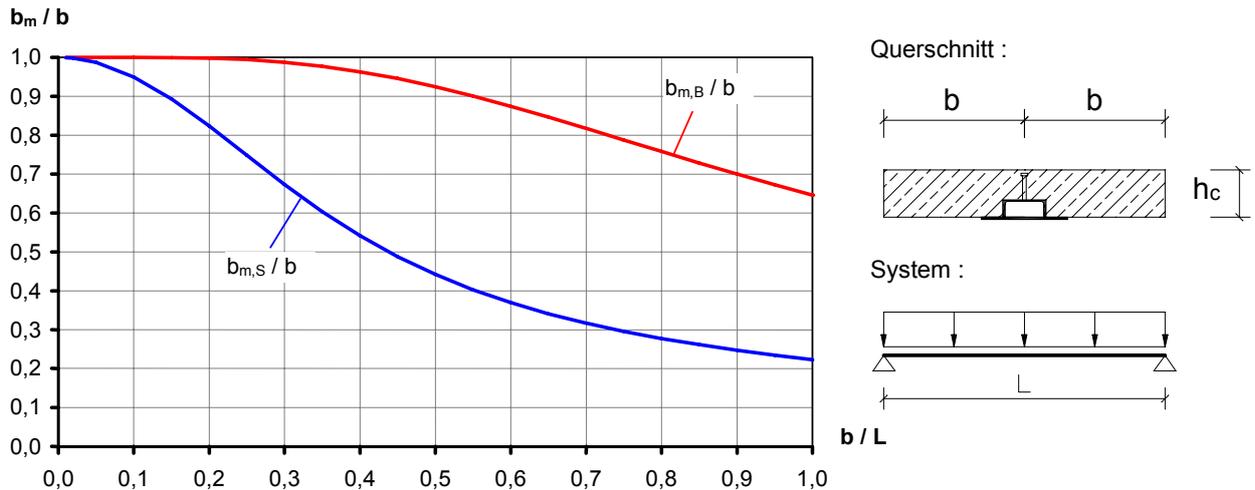


Abbildung 6.101: Mittragende Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands und $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands in Feldmitte für Träger mit einer Gleichlast

6.5.3.2 Statistische Auswertung des Berechnungsansatzes

Die Standardabweichungen der mit Gleichung (6.2) ermittelten Werte für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ im Vergleich zur genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell beträgt 7,44 %. Der 5%-Quantilwert liegt bei 0,89 und der 95%-Quantilwert bei 1,13.

rel. Häufigkeit

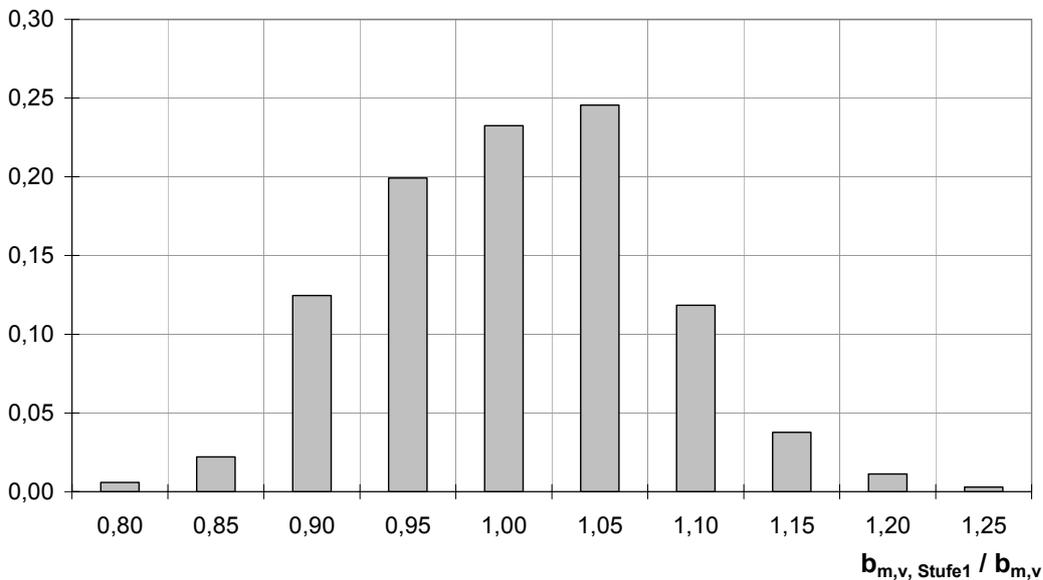


Abbildung 6.102: Abweichungen der verformungsbezogenen mittragenden Breite nach Gleichung (6.2) $b_{m,v,1}$ zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,v}$

Da der Einfluss der verformungsbezogenen mittragenden Breite auf die Durchbiegung der Verbundträger unterproportional ist, zeigen die Verformungen, die mit Gleichung (6.2) berechnet werden, eine noch bessere Übereinstimmung mit denen des analytischen Berechnungsmodells als die verformungsbezogene mittragende Breite, siehe Abbildung 6.103. Die

Abweichung vom Mittelwert beträgt 4,4 %, der 5%-Quantilwert liegt bei 0,97 und der 95%-Quantilwert bei 1,13.

rel. Häufigkeit

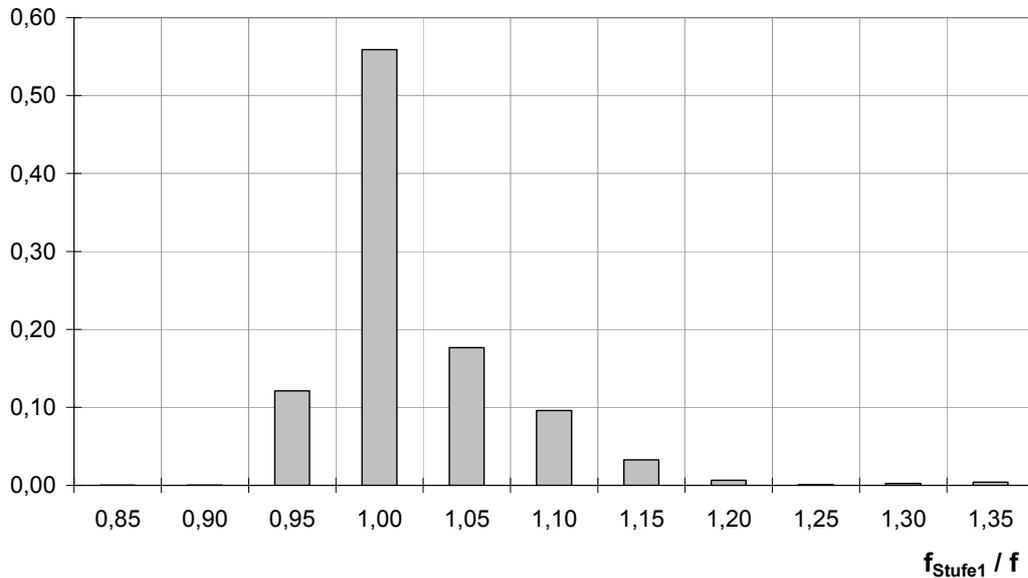


Abbildung 6.103: Abweichungen der Durchbiegung f_{Stufe1} zur analytischen Berechnung

Der Berechnungsansatz zeigt somit eine sehr gute Übereinstimmung mit den genauen Werten bei einer Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell und liefert realistische Werte für die verformungsbezogene mittragende Breite sowie die rechnerischen Verformungen von Slim-Floor Trägern.

6.5.4 Vereinfachter Berechnungsansatz (Stufe 2)

6.5.4.1 Bestimmung der maßgebenden Faktoren

Eine Vereinfachung des im vorangegangenen Abschnitts beschriebenen genauen Berechnungsansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ stellen Gleichung (6.4) und (6.5) dar. Im Vergleich zum genauen Ansatz wird hierbei nur der maßgebende Einfluss des Ausnutzungsgrads M/M_u des Verbundträgers berücksichtigt.

$$b_{m,V} = b_{m,S} + (b_{m,V,0} - b_{m,S}) \cdot \beta_{m,V} \quad (6.4)$$

$$\beta_{m,V} = (1 - k_M)^2 \leq 1 \quad (6.5)$$

mit $b_{m,V}$ verformungsbezogene mittragende Breite

$$k_M = \frac{M - M_{\text{Riss}}}{M_u - M_{\text{Riss}}}$$

M einwirkendes Moment des Verbundträgers in Feldmitte

M_{Riss} Rissmoment des Verbundträgers

M_u Bruchmoment des Verbundträgers

6.5.4.2 Statistische Auswertung des Berechnungsansatzes

Die Standardabweichungen dieses vereinfachten Berechnungsansatzes im Vergleich zur genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell betragen im Mittel 8,42 %. Der Mittelwert liegt bei 1,06. Somit wird die verformungsbezogene mittragende Breite tendenziell etwas unterschätzt und die damit berechnete Verformung folglich eher etwas überschätzt. Der 5%-Quantilwert beträgt 0,95 und der 95%-Quantilwert 1,21.

rel. Häufigkeit

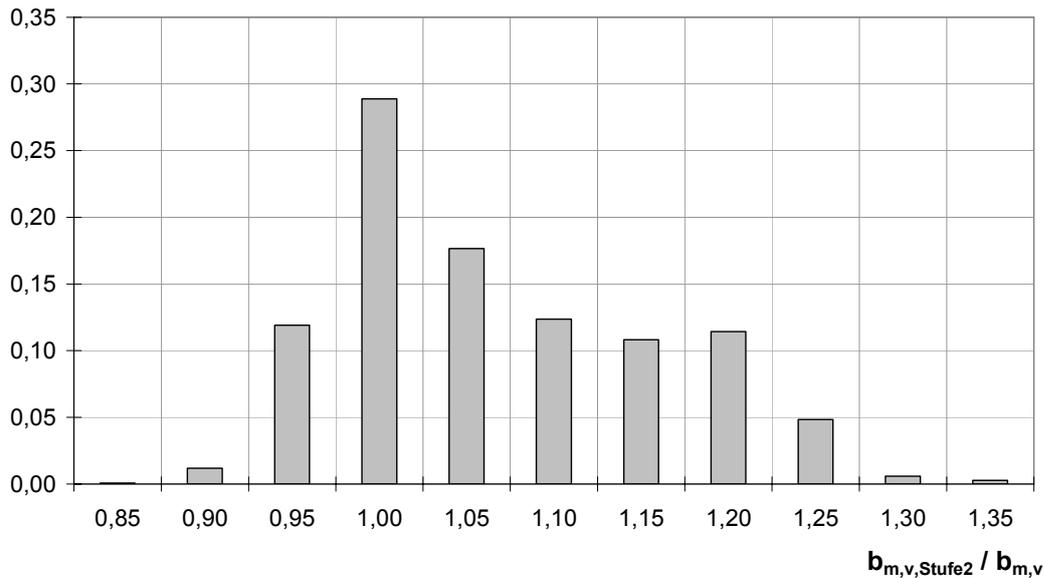


Abbildung 6.104: Abweichung des vereinfachten Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v,2}$ im Vergleich zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,v}$

Der Mittelwert der mit diesem vereinfachten Berechnungsansatz berechneten Verformung beträgt im Mittel nur 4,4 %. Der 5%-Quantilwert beträgt 0,97 und der 95%-Quantilwert 1,13. Die Verformungen der berechneten Träger können somit mit dem vereinfachten Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ nach Gleichung (6.4) und (6.5) sehr realistisch bestimmt werden, siehe Abbildung 6.105.

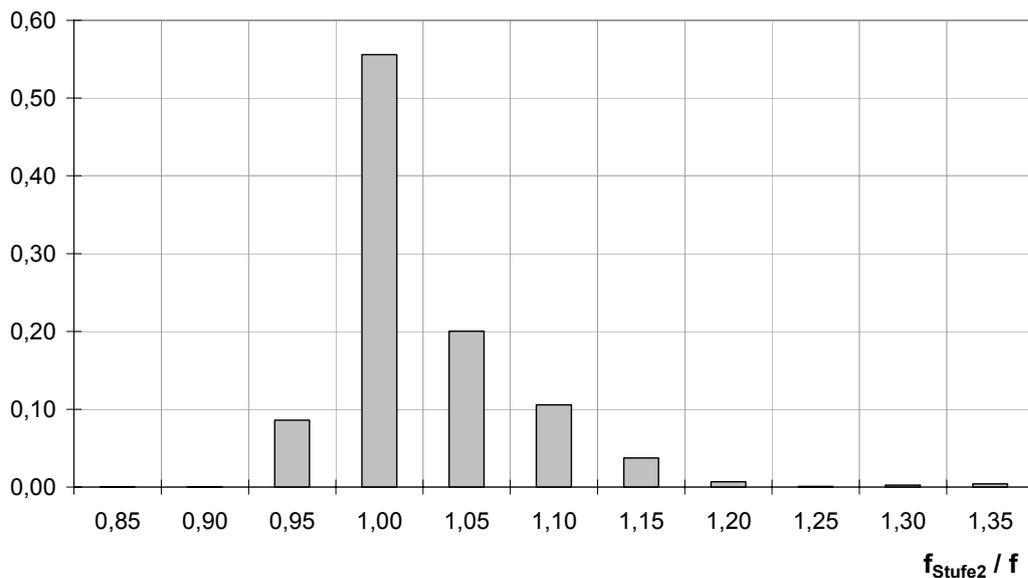
rel. Häufigkeit


Abbildung 6.105: Abweichungen der Durchbiegung f_{Stufe2} zur analytischen Berechnungsbe-
rechnung f

6.5.5 Schlussfolgerung aus dem entwickelten Berechnungsansatz

Durch die systematische Auswertung der durchgeführten Parameterstudie mit typischen Slim-Floor Trägerquerschnitten des Hoch- und Geschossbaus konnte für die verformungsbezogene mittragende Breite ein Berechnungsansatz entwickelt werden, der eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung und eine wirtschaftliche Dimensionierung dieser Träger ermöglicht. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu den bestehenden Normregelungen.

6.6 Berechnungsansätze für niedrige Verbundträger

6.6.1 Grundsätzliches

Der in Abschnitt 6.5 vorgestellte Berechnungsansatz beruht auf der Auswertung einer Vielzahl von Slim-Floor Trägern. Da sich das Tragverhalten von Slim-Floor Träger im Vergleich zu niedrigen Verbundträgern gerade im Hinblick auf die Steifigkeitsverteilung der Betonplatte zur Gesamtsteifigkeit unterscheidet, kann der in [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] entwickelte Ansatz nicht identisch übernommen werden. Der Berechnungsansatz unterscheidet sich daher bezüglich der einzelnen Berechnungsfaktoren. Ebenso wurde der Faktor des Baustahls A_a des Berechnungsansatzes für niedrige Verbundträger für Slim-Floor Träger durch den Faktor Gesamtstahl A_{ges} ersetzt.

Nachfolgend werden nochmals für niedrige Verbundträger die Ergebnisse für die beiden Berechnungsstufen nach [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] aufgezeigt.

6.6.2 Genauer Berechnungsansatz (Stufe 1)

Abbildung 6.106 zeigt den idealisierten Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u des Verbundträgers. Gleichung (6.2) und (6.3) geben den genauen Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ in Abhängigkeit der maßgebenden Parameter an. Mit der so bestimmten mittragenden Breite ist die wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung niedriger Verbundträger möglich.

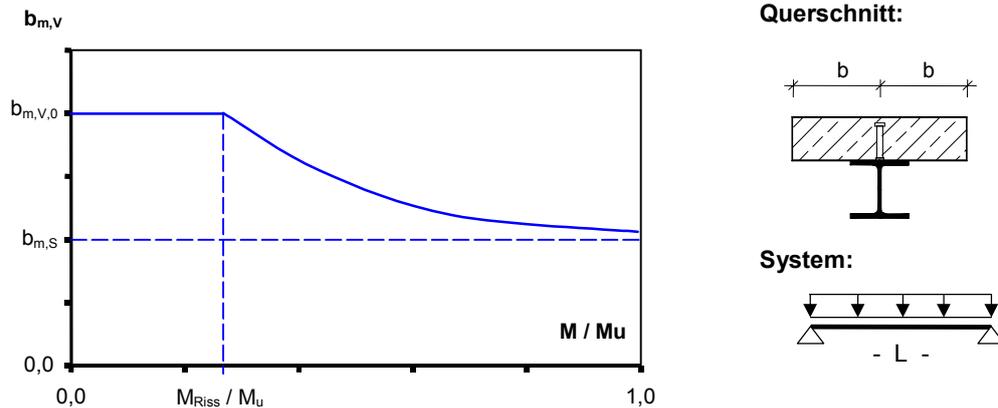


Abbildung 6.106: Idealisierter Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u

$$b_{m,V} = b_{m,S} + (b_{m,V,0} - b_{m,S}) \cdot \beta_{m,V} \quad (6.6)$$

mit

| | |
|---------------|--|
| $b_{m,V}$ | verformungsbezogene mittragende Breite |
| $b_{m,S}$ | mittragende Breite des reinen Scheibenzustands |
| $b_{m,V,0}$ | elastischer Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite |
| $\beta_{m,V}$ | Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite nach Gleichung (6.3) |

$$\beta_{m,V} = 0,83 \cdot (1 - k_M)^{1,49} \cdot \left(\frac{f_{ct}}{f_{ct,0}} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{h_c}{h} \right)^{0,77} \cdot \left(\frac{f_y}{f_{y,0}} \right)^{-0,39} \cdot \left(\frac{A_a}{h_a^2} \right)^{-0,28} \leq 1 \quad (6.7)$$

mit

| | |
|---------------|---|
| $\beta_{m,V}$ | Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite |
|---------------|---|

$$k_M = \frac{M - M_{Riss}}{M_u - M_{Riss}}$$

| | |
|---------------------------------|--|
| M | maximales Moment des Verbundträgers in Feldmitte |
| M_{Riss} | Rissmoment des Verbundträgers |
| M_u | Bruchmoment des Verbundträgers |
| f_{ct} | Betonzugfestigkeit, $1,5 \text{ N/mm}^2 \leq f_{ct} \leq 4,5 \text{ N/mm}^2$ |
| $f_{ct,0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert für die Betonzugfestigkeit |

| | |
|--------------------------------|---|
| h_c | Dicke des Betongurts, $16 \text{ cm} \leq h_c \leq 32 \text{ cm}$ |
| h | Gesamthöhe des Verbundträgers |
| f_y | Streckgrenze des Baustahls, $235 \text{ N/mm}^2 \leq f_y \leq 460 \text{ N/mm}^2$ |
| $f_{y,0} = 355 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert für die Streckgrenze des Baustahls |
| A_a | Querschnittsfläche des Stahlträgers |
| h_a | Höhe des Stahlträgers |

Die hier angegebenen Bereiche geben die Grenzen des untersuchten Parameterbereiches für niedrige Verbundträger wieder.

rel. Häufigkeit

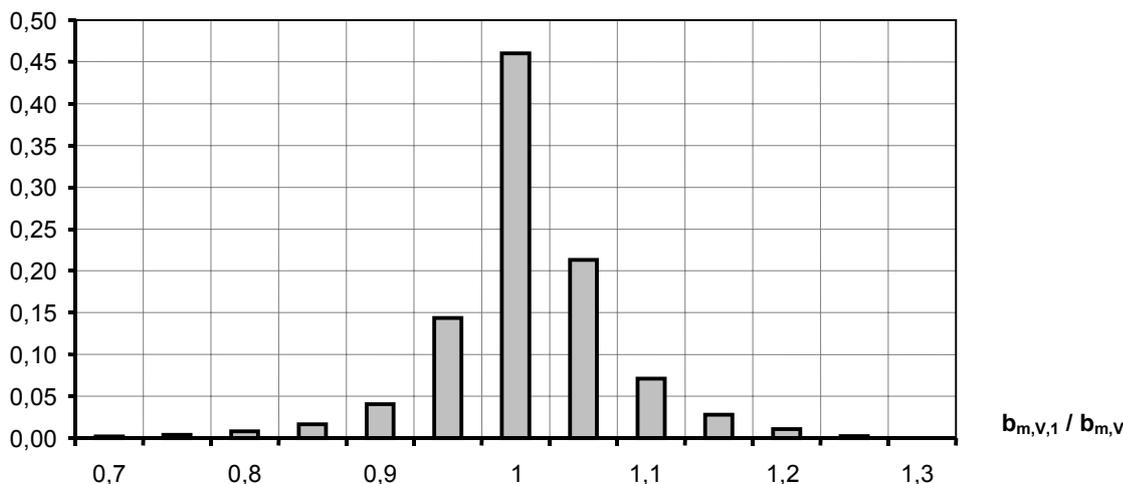


Abbildung 6.107: Abweichungen der verformungsbezogenen mittragenden Breite nach Gleichung (6.2) $b_{m,V,1}$ zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,V}$

Die Abweichungen der mit Gleichung (6.2) ermittelten Werte für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ im Vergleich zur genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell liegen im Mittel bei ca. 4,3 %, siehe Abbildung 6.95. Die Standardabweichung beträgt 6,1 %. Der 5%-Quantilwert liegt bei 0,89 und der 95%-Quantilwert bei 1,09.

Für weitere Informationen zur Bestimmung der Faktoren und statistischen Auswertung wird auf [Kuhlmann, Rieg 2004a] bzw. [Rieg 2006] verwiesen.

6.6.3 Vereinfachter Berechnungsansatz (Stufe 2)

Im Vergleich zum genauen Ansatz wird hierbei nur der maßgebende Einfluss des Ausnutzungsgrads M/M_u des Verbundträgers sowie implizit die Rissbildung des Betongurts berücksichtigt.

$$b_{m,V} = b_{m,S} + (b_{m,V,0} - b_{m,S}) \cdot \beta_{m,V} \quad (6.8)$$

$$\beta_{m,V} = (1 - k_M)^2 \leq 1 \quad (6.9)$$

| | | |
|-----|---|--|
| mit | $b_{m,V}$ | verformungsbezogene mittragende Breite |
| | $k_M = \frac{M - M_{Riss}}{M_u - M_{Riss}}$ | |
| | M | maximales Moment des Verbundträgers in Feldmitte |
| | M_{Riss} | Rissmoment des Verbundträgers |
| | M_u | Bruchmoment des Verbundträgers |

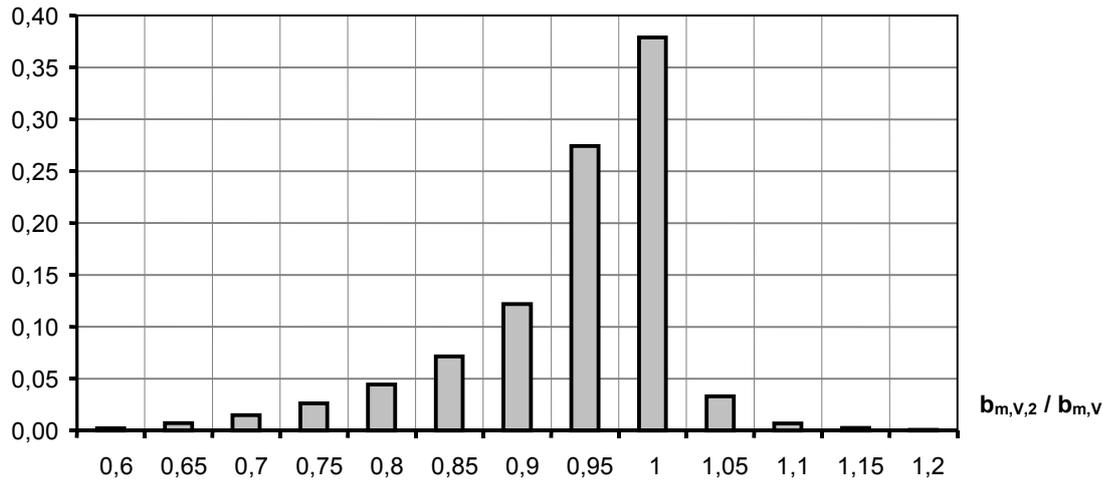
rel. Häufigkeit


Abbildung 6.108: Abweichung des vereinfachten Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V,2}$ im Vergleich zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,V}$

Die Abweichungen dieses vereinfachten Berechnungsansatzes im Vergleich zur genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell betragen im Mittel 8,7 %, siehe Abbildung 6.108. Die Standardabweichung beträgt 11,2 %. Der Mittelwert liegt bei 0,9. Somit wird die verformungsbezogene mittragende Breite tendenziell etwas unterschätzt und die damit berechneten Verformung folglich eher etwas überschätzt. Der 5%-Quantilwert beträgt 0,76 und der 95%-Quantilwert 0,99.

Die Abweichungen der mit diesem vereinfachten Berechnungsansatz berechneten Verformungen betragen im Mittel nur 2,2 %, siehe Abbildung 6.109. Der Mittelwert liegt hier bei 1,0. Die Standardabweichung beträgt 7,4 %. Der 5%-Quantilwert beträgt 0,95 und der 95%-Quantilwert 1,04. Die Verformungen der berechneten Träger können somit mit dem vereinfachten Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ nach Gleichung (6.4) und (6.5) sehr realistisch bestimmt werden.

rel. Häufigkeit

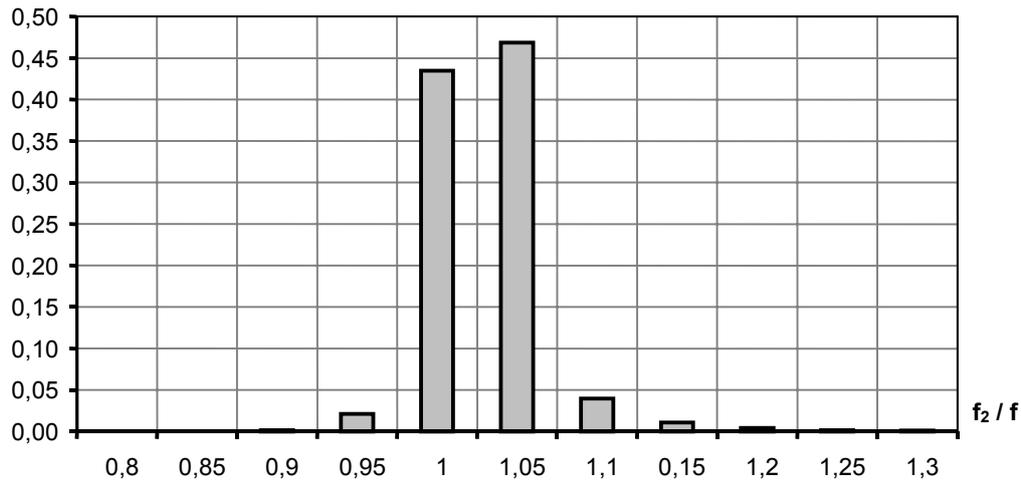


Abbildung 6.109: Abweichungen der mit dem vereinfachten Berechnungsansatz Gleichung (6.4) berechneten Verformungen f_2 im Vergleich zum analytischen Berechnungsansatz f

6.7 Zusammenfassung

Durch die systematische Auswertung der durchgeführten Parameterstudie mit typischen niedrigen Verbundträgern sowie Slim-Floor Trägern des Hoch- und Geschossbaus konnte für die verformungsbezogene mittragende Breite ein Berechnungsansatz entwickelt werden, der eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung und eine wirtschaftliche Dimensionierung dieser Träger ermöglicht. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu den bestehenden Normregelungen.

7 VORSCHLAG ZUR QUASI-ELASTISCHEN VERFORMUNGSBERECHNUNG

7.1 Grundsätzliches

Der elastische Berechnungsansatz wurde im Rahmen eines Aif-Vorhabens [Kuhlmann, Rieg 2004a] bzw. [Rieg 2006] für niedrige Verbundträger entwickelt und nun für die Slim-Floor Querschnitte modifiziert und angepasst.

Verbundträger niedriger Bauhöhe sowie Slim-Floor Träger weisen bereits unter Gebrauchslasten eine starke Rissbildung und ein ausgeprägtes nichtlineares Trag- und Verformungsverhalten auf. Eine rein elastische Verformungsberechnung unterschätzt daher im Allgemeinen die tatsächlichen Verformungen und stellt in vielen Fällen eine unzureichende Näherung dar. Eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung muss daher das nichtlineare Tragverhalten dieser Träger berücksichtigen. Die Berechnung von Verformungen unter expliziter Berücksichtigung des nichtlinearen Material- und Tragverhaltens, zum Beispiel mit Hilfe von M - κ -Linien, ist jedoch vergleichsweise aufwändig. Für eine Berechnung in der Planungspraxis ist daher ein vereinfachtes Verfahren auf Basis des bekannten elastischen Berechnungsverfahrens wünschenswert, um den Einfluss des nichtlinearen Tragverhaltens niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger bei der Verformungsberechnung zu berücksichtigen und für die Planungspraxis ein handhabbares Verfahren zu gewährleisten.

Kernstück der Modifikation ist die Bestimmung eines effektiven Trägheitsmoments $I_{i,eff}$ des Verbundträgers, mit dem die Verformungen quasi-elastisch berechnet werden können. Das effektive Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ berücksichtigt dabei das nichtlineare Material- und Tragverhalten niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger implizit, durch Reduktion der elastischen Steifigkeitsanteile des Betons mit einem Abminderungsfaktor α_c . Anhand einer umfangreichen Parameterstudie wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Einflussfaktoren auf den Abminderungsfaktor α_c untersucht und eine Näherungsfunktion hierfür entwickelt, die eine schnelle und wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung dieser Träger ermöglicht.

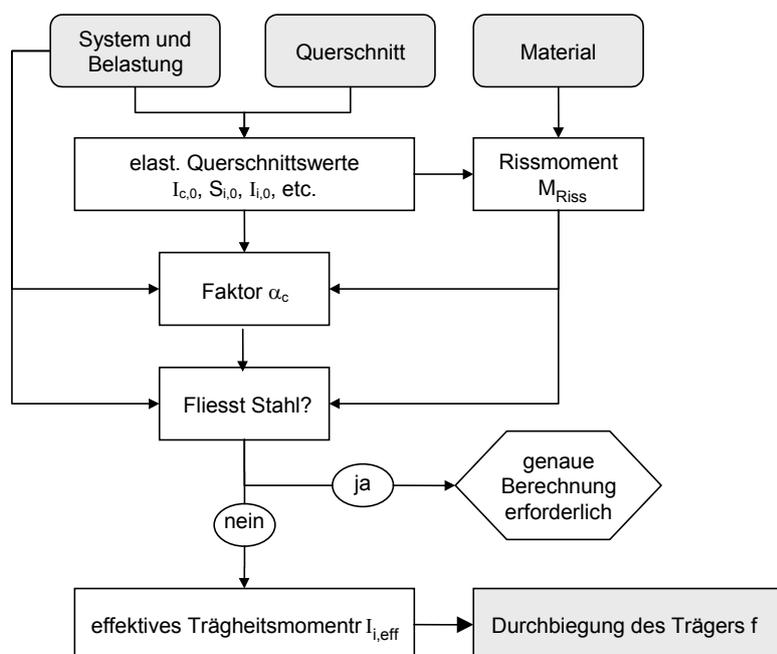


Abbildung 7.110: Vorgehen bei der quasi-elastischen Verformungsberechnung [Rieg 2006]

7.2 Bestehende Untersuchungen mit niedrigen Verbundträgern

Der in den nachfolgenden Abschnitten dargestellte elastische Berechnungsansatz zur Ermittlung der Durchbiegung wurde für niedrige Verbundträger entwickelt [Rieg 2006]. In Abhängigkeit der maßgebenden Einflussfaktoren wurde die Berechnungsformel aufgestellt und liefert hierbei einen einfachen Ansatz für die Verformungsberechnung. Um die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auch für Slim-Floor Träger zu gewährleisten, wurde der Ansatz übernommen und in Bezug auf die einzelnen Einflussfaktoren und Koeffizienten entsprechend angepasst.

7.3 Beschreibung des quasi-elastischen Berechnungsvorschlags

7.3.1 Allgemeines

Das Verfahren zur elastischen Verformung wird nachfolgend zusammenfassend dargestellt. Für weitere Informationen siehe [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006].

Das grundsätzliche Vorgehen bei der vorgeschlagenen quasi-elastischen Verformungsberechnung ist in Abbildung 7.110 dargestellt:

1. Berechnung der elastischen Steifigkeitswerte und Trägheitsmomente ($I_{i,0}$, $I_{c,0}$, $S_{i,0}$, etc.) und des Rissmoments M_{Riss} des Verbundquerschnitts
2. Überprüfung der Rissbildung des Betongurts und des Spannungszustands des Stahlträgers
3. Berechnung des Abminderungsfaktors α_c
4. Berechnung des effektiven Trägheitsmoments $I_{i,\text{eff}}$ des Verbundträgers
5. Quasi-elastische Berechnung der Verformung mit Hilfe des effektiven Trägheitsmoments $I_{i,\text{eff}}$

7.3.2 Effektives Trägheitsmoment $I_{i,\text{eff}}$

Der Grundgedanke des quasi-elastischen Berechnungsvorschlags ist, die Verformungen niedriger Verbundträger wie beim Gesamtquerschnittsverfahren [Haensel 1975], [Roik et al 1999] zu berechnen und dabei den Einfluss der Rissbildung und des nichtlinearen Tragverhaltens durch die Reduktion des Trägheitsmoments des Verbundträgers zu berücksichtigen. Hierzu werden die Steifigkeitsanteile des Betons mit den Abminderungsfaktor α_c reduziert, siehe Gleichung (7.1) bis (7.8). Das Trägheitsmoment I_c des Betons wird dabei mit der mittragenden Breite $b_{m,B}$ des Biegezustands in Trägermitte berechnet, die Betonfläche A_c mit der mittragenden Breite $b_{m,S}$ des Scheibenzustands in Trägermitte.

$$I_{i,\text{eff}} = I_a + \alpha_c \cdot (I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{\text{St}}) \quad (7.1)$$

$$I_{i,0} = I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{\text{St}} \quad (7.2)$$

$$S_{i,0} = A_{c,0} \cdot z_{i,0} \quad (7.3)$$

$$z_{i,0} = \frac{A_a \cdot a_{\text{St}}}{A_{i,0}} \quad (7.4)$$

$$A_{i,0} = A_a + A_{c,0} \quad (7.5)$$

$$I_{c,0} = \frac{b_{m,B} \cdot h_c^3}{12 \cdot n_0} \quad (7.6)$$

$$A_{c,0} = \frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} \quad (7.7)$$

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}} \quad (7.8)$$

| | | |
|-----|-------------------------|---|
| mit | $I_{i,eff}$ | effektives Trägheitsmoment des Verbundträgers |
| | $I_{i,0}, I_a, I_{c,0}$ | elastische Trägheitsmomente des Verbund-, Stahl- und Betonquerschnitts |
| | $A_{i,0}, A_a, A_{c,0}$ | Querschnittsflächen des Verbund-, Stahl- und Betonquerschnitts |
| | a_{St} | Schwerpunktsabstand zw. Stahl- und Betonquerschnitt |
| | n_0 | Reduktionszahl für den Betonquerschnitt |
| | E_a, E_{cm} | E-Modul des Stahl- und Betonquerschnitts |
| | $b_{m,S}, b_{m,B}$ | mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands nach Abschnitt 4.5.3 |
| | α_c | Abminderungsfaktor, siehe Abschnitt 7.4 |

7.3.3 Quasi-elastische Verformungsberechnung

Nachdem das effektive Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ des Verbundträgers bestimmt wurde, kann die Verformung quasi-elastisch am Ersatzbalken mit konstanter Steifigkeit $I_{i,eff}$ gemäß den Regeln der technischen Biegelehre berechnet werden.

Abschließend muss kontrolliert werden, ob der Stahlträger unter der gegebenen Belastung bereits plastiziert. Sollte dies der Fall sein, so ist eine genauere Verformungsberechnung unter expliziter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens erforderlich.

7.3.4 Voraussetzungen und Annahmen

Der Abminderungsfaktor α_c wurde für Verbundeinfeldträger mit einer Gleichlast unter hochbautypischen Randbedingungen bestimmt. Der Abminderungsfaktor α_c wurde dabei aus den Ergebnissen der in Abschnitt 6.3 dargestellten Parameterstudie mit dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen analytischen Berechnungsmodell rückgerechnet. Für den in Abschnitt 0 entwickelten Berechnungsansatz treffen somit ebenfalls die in Abschnitt 6.2.3 und 6.3.2 genannten Voraussetzungen und Annahmen zu [Rieg 2006]:

- Der Querschnitt des Verbundträgers ist in Trägerlängsrichtung konstant.
- Der Verbundträger wird als Einfeldträger ausgeführt.
- Die Träger weisen einen starren Verbund auf.
- Ein Versagen der Verbundfuge wird ausgeschlossen.
- Der Stahlträger bleibt elastisch.
- Der Einfluss der Querbiegung auf das Trag- und Verformungsverhalten sowie die Verteilung der spannungsbezogenen mittragenden Breite kann vernachlässigt werden.

- Die System- und Materialwerte liegen im Rahmen des in Abschnitt 6.3.2 dargestellten Umfangs.
- Die Durchbiegung des Verbundträgers infolge Querkraft wird elastisch am Stahlträger bestimmt.

Die beschriebenen Annahmen wurden so getroffen, dass hiermit eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung niedriger Verbundträger und Slim-Floor Träger möglich ist. Dadurch unterliegt der Vorschlag zur quasi-elastische Verformungsberechnung jedoch unter Anderem folgenden Einschränkungen:

- Eine Berechnung von Spannungen im Beton ist nicht möglich.
- Verbundträger mit ausgeprägtem Schlupf zwischen Beton und Stahlträger, zum Beispiel infolge einer teilweisen Verdübelung, können nicht berechnet werden.

7.4 Abminderungsfaktor α_c zur quasi-elastischen Verformungsberechnung

7.4.1 Allgemeines

Slim-Floor Träger und niedrige Verbundträger weisen bereits unter Gebrauchlasten eine ausgeprägte Rissbildung auf. Bei dem vorgeschlagenen quasi-elastischen Berechnungsvorschlag wird der Einfluss der Rissbildung auf die Verformung rechnerisch durch Reduktion der elastischen Steifigkeitsanteile des Betons mit dem Abminderungsfaktor α_c berücksichtigt, siehe Abschnitt 0. An Trägern, deren tatsächliche Verformungen f_0 bekannt sind, kann der Abminderungsfaktor α_c durch Vergleich mit der rein elastischen Verformung f_{el} rückgerechnet werden, siehe Gleichung (7.9) bis (7.11). Die elastische Verformung f_{el} wird dabei am Ersatzbalken mit konstanter Steifigkeit $I_{i,eff}$ berechnet, siehe Abschnitt 7.3.

$$\frac{f_0}{f_{el}} = \frac{I_{i,0}}{I_{i,eff}} \quad (7.9)$$

$$I_{i,eff} = \frac{f_{el}}{f_{II}} \cdot I_{i,0} \quad (7.10)$$

| | | |
|-----|-------------|---|
| mit | $I_{i,eff}$ | effektives Trägheitsmoment des Verbundträgers, siehe Gleichung (7.1) |
| | $I_{i,0}$ | elastisches Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts |
| | f_0 | tatsächliche Verformung unter Berücksichtigung des nichtlinearen Material- und Tragverhaltens |
| | f_{el} | elastische Verformung des Verbundträgers |

$$\alpha_c = \frac{I_{i,0} \cdot \frac{f_{el}}{f_0} - I_a}{I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}} \quad (7.11)$$

| | | |
|-----|------------|--|
| mit | α_c | Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des nichtlinearen Material- und Tragverhaltens |
|-----|------------|--|

Da die Rissbildung sehr stark von der Belastungshöhe abhängt, sind in gleicher Weise auch das effektive Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ und der Abminderungsfaktor α_c von der Belastungshöhe abhängig. Die typischen Verläufe des effektiven Trägheitsmoments und des Abminderungsfaktors in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u des Trägers sind in Abbildung 7.111 dargestellt. Der Ausnutzungsgrad stellt dabei das Verhältnis des maximalen Moments M in Trägermitte zum Bruchmoment M_u des Trägers dar. Die Verläufe lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

- **Bereich 1 - Elastischer Bereich**

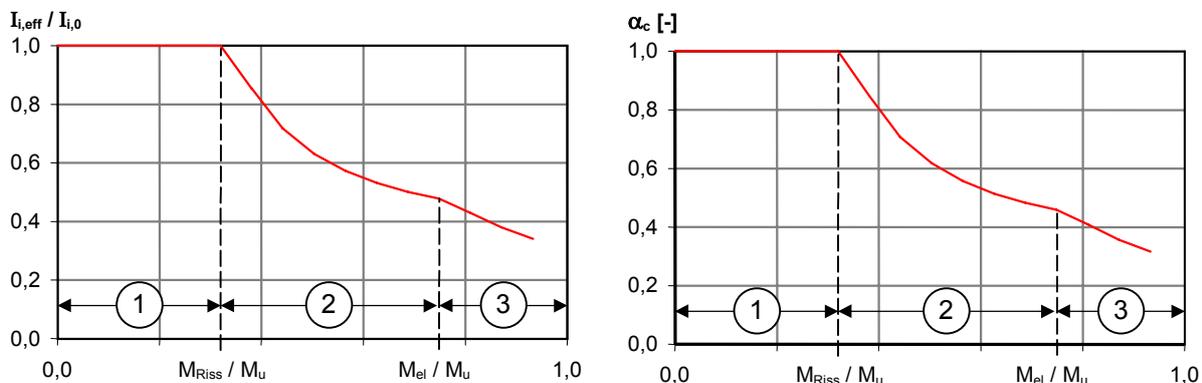
Der Träger verhält sich elastisch und ist im Zustand I. Die Belastung ist kleiner als die Risslast ($M/M_u < M_{Riss}/M_u$). Das effektive Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ ist gleich dem elastischen $I_{i,0}$, der Abminderungsfaktor α_c ist eins. Der Betonquerschnitt wirkt hierbei voll mit und bedarf daher keiner Abminderung.

- **Bereich 2 - Zustand II, Rissbildung**

Die Belastung ist größer als die Risslast ($M/M_u > M_{Riss}/M_u$), der Träger ist gerissen und teilweise oder vollständig im Zustand II. Die Steifigkeit und damit das effektive Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ nehmen ab, der Abminderungsfaktor α_c wird kleiner eins. Durch die Risse im Beton kann dieser nicht mehr vollständig mitwirken und daher angesetzt werden. Eine Abminderung durch den Faktor α_c berücksichtigt hierbei nun den Steifigkeitsverlust durch die Rissbildung.

- **Bereich 3 - Fließen des Stahlträgers**

Mit beginnender Plastizierung des Stahlträgers ($M/M_u > M_{el}/M_u$) nehmen die Steifigkeit des Trägers und der Abminderungsfaktor α_c rasch ab. Die Definition des Abminderungsfaktor α_c ist hier jedoch nicht weiter sinnvoll, da ein zunehmender Anteil der Verformung aus dem Fließen des Stahlträgers und nicht aus der Rissbildung des Betons resultiert. Da der Abminderungsfaktor α_c nur den Betonanteil der Steifigkeit abmindert, kann das Fließen des Stahls nicht berücksichtigt werden.



(a) effektives Trägheitsmoment $I_{i,eff}$

(b) Abminderungsfaktor α_c

Abbildung 7.111: Typische Verläufe des effektiven Trägheitsmoments $I_{i,eff}$ und des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u [Rieg 2006]

Im Zuge der in Abschnitt 6.3 dargestellten Parameterstudie an Slim-Floor Trägern und Verbundträgern niedriger Bauhöhe wurde der Abminderungsfaktor α_c systematisch untersucht. Innerhalb der Parameterstudie wurden die Verformungen der untersuchten Verbundträger mit dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen analytischen Berechnungsmodell berechnet und daraus der Abminderungsfaktor α_c rückgerechnet unter Berücksichtigung der systematischen Untersuchung der Einflüsse auf den Abminderungsfaktor α_c .

Im Folgenden werden die maßgebenden Einflüsse auf den Abminderungsfaktor α_c diskutiert und der entwickelte Berechnungsvorschlag vorgestellt. Ein Vergleich mit den genauen Ver-

formungswerten, die sich bei einer Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell ergeben, und mit einer Berechnung nach EN 1994-1-1 bzw. DIN 18800-5 zeigen, dass der entwickelte Berechnungsvorschlag eine gute Näherung für die Verformungsberechnung niedriger Verbundträger darstellt.

7.4.2 Einflüsse auf den Abminderungsfaktor α_c

7.4.2.1 Grundsätzliches

Da die Rissbildung vor allem zu einer Abnahme der Biegesteifigkeit des Betongurts führt, ist bei Trägern mit großer Biegetragwirkung des Betongurts der Einfluss der Rissbildung auf die effektive Steifigkeit des Verbundträgers und den Abminderungsfaktor α_c generell größer als bei Trägern mit geringer Biegetragwirkung des Betongurts. Dies bedeutet, dass der Einfluss bei Slim-Floor Träger noch stärker in Erscheinung tritt als bei niedrigen Verbundträgern.

7.4.2.2 Ausnutzungsgrad M/M_u

Wie oben bereits dargestellt, ist das Verformungsverhalten Slim-Floor Träger und niedriger Verbundträger sehr stark von der Rissbildung und damit von der Belastungshöhe abhängig, siehe Abbildung 7.111. Die Belastungshöhe lässt sich dabei als Ausnutzungsgrad darstellen, der als Verhältnis des maximalen Moments M in Trägermitte zum Bruchmoment M_u des Verbundträgers definiert ist. Eine genaue Beschreibung des Verhaltens ist in Abschnitt 7.4.1 gegeben.

Mit dem Fließen des Stahlträgers ist die Verwendung des Abminderungsfaktors α_c nicht mehr möglich, da dieser als Reduktionsfaktor für die Steifigkeitsanteile des Betongurts definiert ist. Durch das Fließen des Stahlträgers ergibt sich jedoch ein zunehmend größerer Teil der Verformungen aus dem Plastizieren des Stahls. Während beim Plastizieren es rechnerisch nicht zu einer Zunahme der Tragfähigkeit des Querschnitts kommt, finden jedoch durch Änderung der Dehnungsverläufe Umlagerungen statt und die Verformung nimmt überproportional zu.

7.4.2.3 Betonzugfestigkeit f_{ct}

Einen großen Einfluss auf das Rissmoment und damit auf das Rissverhalten des Verbundträgers hat die Betonzugfestigkeit f_{ct} und damit auch auf die effektive Steifigkeit und den Abminderungsfaktor α_c , siehe Abbildung 7.112.

Dieser Einfluss ist vor allem im Bereich 2 des Ausnutzungsgrads ausgeprägt, siehe Abschnitt 7.4.1. Bei größerer Betonzugfestigkeit ist das Rissmoment des Trägers größer und die Rissbildung setzt später ein. Bei gleicher Belastungshöhe ist somit die Risstiefe bei großer Betonzugfestigkeit kleiner und der gerissene Bereich des Betongurts in Trägerlängsrichtung weniger ausgedehnt.

Mit dem Fließen des Stahlträgers ($M/M_u > M_{ei}/M_u$) geht der Einfluss der Betonzugfestigkeit jedoch weitestgehend verloren. Dies liegt unter anderem daran, dass in diesem Bereich zunehmende Verformungsanteile aus dem Fließen des Stahlträgers entstehen und im Betongurt bereits ein weitestgehend abgeschlossenes Rissbild vorliegt. Dadurch ist der Beitrag des Biegezustands des Betongurts zur Steifigkeit des Verbundträgers vergleichsweise gering.

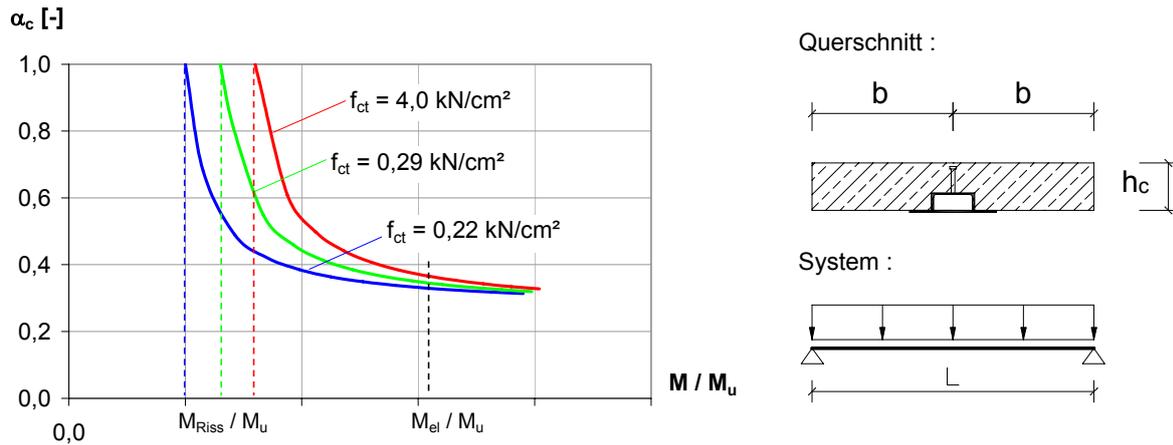
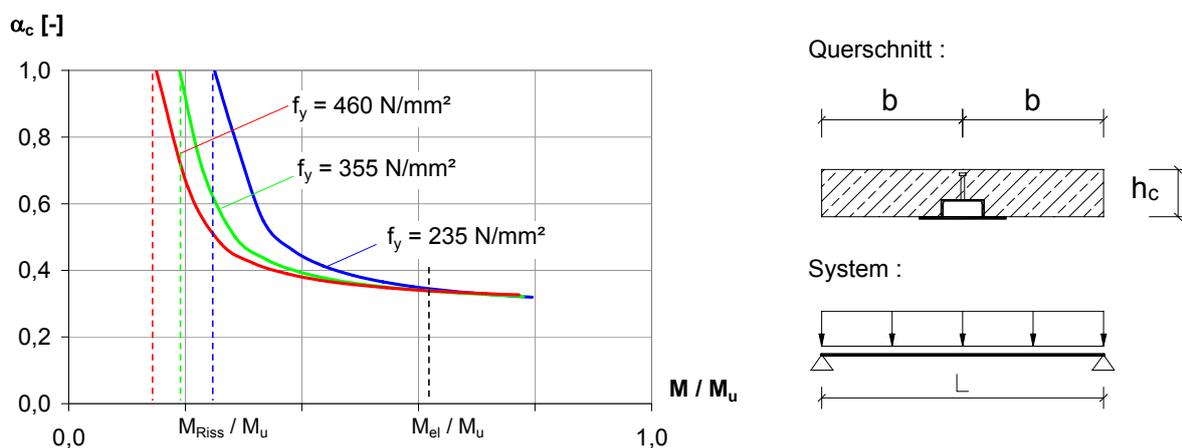


Abbildung 7.112: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit der Betonzugfestigkeit f_{ct} für Slim-Floor Querschnitte

7.4.2.4 Streckgrenze f_y des Stahlträgers

Mit zunehmender Streckgrenze f_y des Stahlträgers nimmt das Bruchmoment M_u des Stahlträgers zu und das Verhältnis zwischen Rissmoment M_{Riss} und Bruchmoment M_u verändert sich entsprechend, da das Rissmoment durch die Streckgrenze des Stahlträgers nicht beeinflusst wird.

Wird der Abminderungsfaktor α_c in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u betrachtet, so ergibt sich bei größerer Streckgrenze ein kleinerer Abminderungsfaktor α_c , da dadurch das bezogene Rissmoment M_{Riss}/M_u kleiner wird und der Träger früher vom Zustand I in den Zustand II wechselt, siehe Abbildung 7.113.

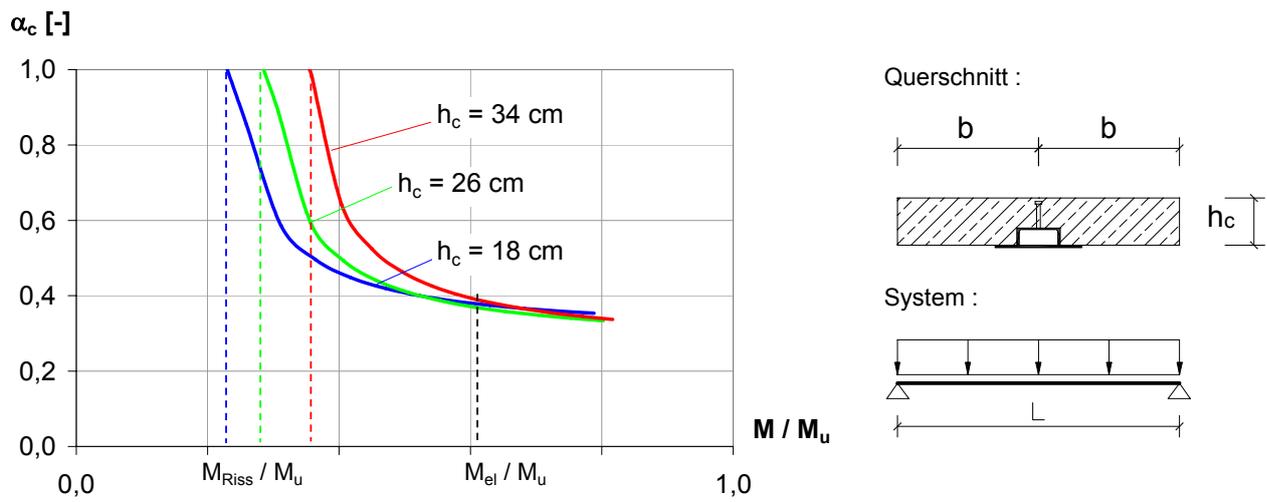


Darstellung mit bezogenen Momenten

Abbildung 7.113: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit der Streckgrenze des Stahlträgers f_y für Slim-Floor Querschnitte

7.4.2.5 Dicke des Betongurts h_c

Abbildung 7.114 zeigt den Einfluss der Gurtstärke h_c auf den Abminderungsfaktor α_c . Es ist zu erkennen, dass das bezogene Rissmoment M_{Riss}/M_u bei dickerem Gurt größer ist und die Rissbildung erst bei einer höheren Belastung beginnt. Da bei Verbundträgern mit dickem Betongurt der Biegeanteil des Betongurts und dessen Biegesteifigkeit vergleichsweise größer sind als bei Trägern mit dünnem Gurt, hat bei diesen Trägern auch die Rissbildung einen größeren Einfluss auf die effektive Steifigkeit des Trägers. Das heißt, durch die Rissbildung nimmt die effektive Steifigkeit und der Abminderungsfaktor α_c bei Trägern mit dickem Betongurt stärker ab als bei Trägern mit dünnem Gurt, siehe Abbildung 7.114.

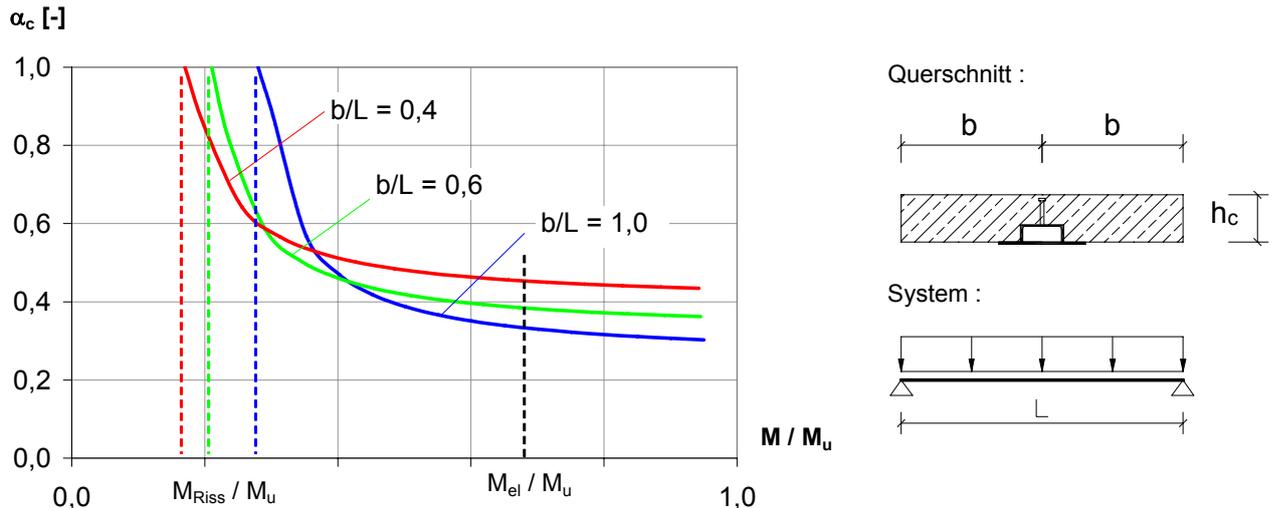


Einfluss der Gurtstärke h_c [cm]

Abbildung 7.114: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit der Gurtstärke und der Stahlträgerhöhe

7.4.2.6 Seitenverhältnis des Betongurts b/L

Mit zunehmendem Seitenverhältnis b/L wird der Einfluss der Biegetragwirkung des Betongurts auf die Steifigkeit des Verbundträgers größer. Dies liegt daran, dass mit zunehmendem Verhältnis b/L die mittragende Breite des Biegezustands $b_{m,B}$ im Vergleich zur mittragenden Breite des Scheibenzustands überproportional zunimmt und damit das Verhältnis $b_{m,S}/b_{m,B}$ kleiner wird. Dadurch ist bei großen Seitenverhältnissen b/L auch der Einfluss der Rissbildung auf die effektive Trägersteifigkeit und den Abminderungsfaktor α_c größer, siehe Abbildung 7.115.



Einfluss der Gurtbreite b [m]

Abbildung 7.115: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses b/L des Betongurts für Slim-Floor Querschnitte

7.5 Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor α

7.5.1 Herleitung des Berechnungsansatzes

Der nachfolgend vorgestellte Berechnungsansatz wurde analog zu [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] hergeleitet und verwendet. Der Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor α_c wurde auf Basis der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Parameterstudie für Slim-Floor Träger als Einfeldträger sowie für niedrige Verbundträger mit einer Gleichlast unter hochbautypischen Randbedingungen entwickelt. Die genauen Werte des Abminderungsfaktors α_c wurden dabei aus den Ergebnissen der Parameterstudie mit dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen analytischen Berechnungsmodell rückgerechnet. Der Berechnungsansatz unterliegt daher den in Abschnitt 6.2.3 und 6.3.2 beschriebenen Einschränkungen.

Der Berechnungsansatz wurde als Näherungsfunktion für die genauen Werte des Abminderungsfaktors α_c über die Minimierung der Fehlerquadrate entwickelt. Er basiert auf der Auswertung von ca. 240 Slim-Floor Trägern und ca. 4000 berechneten Belastungspunkten.

Gleichung (7.12) stellt den Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor α_c dar. Durch den zunehmenden Steifigkeitsverlust des Verbundträgers mit zunehmender Rissbildung bei höherer Belastung ist der Abminderungsfaktor wesentlich von der Belastungshöhe des Verbundträgers und der Betonzugfestigkeit f_{ct} abhängig. Der Abminderungsfaktor α_c wird dabei in drei Faktoren unterteilt: In α_{Mat} sind die Materialeinflüsse zusammengefasst, in α_{QS} die Einflüsse aus den Querschnittswerten und in α_M der Belastungseinfluss, siehe Gleichungen (7.13) bis (7.15).

$$\alpha_c = \alpha_{Mat} \cdot \alpha_{QS} \cdot \alpha_M \quad (7.12)$$

| | | |
|-----|----------------|---|
| mit | α_c | Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des nicht-linearen Material- und Tragverhaltens niedriger Verbundträger |
| | α_{Mat} | Faktor für den Einfluss der Materialkennwerte, siehe Gleichung (7.13) |
| | α_{QS} | Faktor für den Einfluss der Querschnittswerte, siehe Gleichung (7.14) |
| | α_M | Faktor für den Einfluss der Belastung siehe Gleichung (7.15) |

$$\alpha_{Mat} = \left(\frac{f_{ct}}{f_{ct,0}} \right)^{-0,133} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,0}} \right)^{0,148} \cdot \left(\frac{f_{ay}}{f_{ay,0}} \right)^{0,153} \quad (7.13)$$

$$\alpha_{QS} = \left(\frac{I_{c,0}}{I_{i,0}} \right)^{0,06} \cdot \left(\frac{S_{i,0} \cdot a_{St}}{I_{i,0}} \right)^{0,511} \cdot \left(\frac{z_{i,0}}{a_{St}} \right)^{0,118} \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^{-0,129} \quad (7.14)$$

$$\alpha_M = 1,371 \cdot \left(1 - \frac{M_{Riss}}{M} \right)^{-0,568} \quad (7.15)$$

| | | |
|-----|--|--|
| mit | M | Moment in Trägermitte |
| | M_{Riss} | Rissmoment des Verbundträgers |
| | $I_{i,0}, I_{c,0}, S_{i,0}, z_{i,0}, a_{St}$ | elastische Querschnittswerte des Verbund-, Stahl- und Betonquerschnitts nach Gleichung (7.2) bis (7.8) |
| | f_{ct} | Betonzugfestigkeit |
| | $f_{ct,0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert der Betonzugfestigkeit |
| | f_c | Betondruckfestigkeit |
| | $f_{c,0} = 30 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert der Betondruckfestigkeit |
| | f_{ay} | Streckgrenze des Stahlträgers |
| | $f_{ay,0} = 355 \text{ N/mm}^2$ | Bezugswert der Streckgrenze des Stahlträgers |

Die Exponenten und Koeffizienten der Gleichungen (7.12) bis (7.15) wurden durch eine Regression über die Minimierung der Fehlerquadrate mit Hilfe des in Microsoft Excel implementierten Solver bestimmt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die einzelnen Parameter untereinander abhängig sein können.

Mittels für den Hochbau gebräuchlichen Materialkennwerte für Beton und Baustahl berechnet sich der Faktor α_{Mat} für den Einfluss der Materialkennwerte wie folgt:

Tabelle 7.10: Berechnung des Faktors α_{Mat} mit für den Hochbau gebräuchlichen Materialkennwerten

| Betongüte/ Baustahlgüte | C 20/25 | C 25/30 | C 30/37 | C 35/45 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| S 235 | 0,796 | 0,805 | 0,815 | 0,823 |
| S 355 | 0,848 | 0,857 | 0,868 | 0,876 |
| S 460 | 0,882 | 0,892 | 0,903 | 0,912 |

Entsprechend kann der Faktor α_M für den Einfluss der Belastung bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt hierbei den Ergebniswert für den Faktor α_M in Abhängigkeit des Verhältnisses des Rissmoments zum einwirkenden Moment innerhalb eines Bereiches von 0,20-0,80 wieder:

 Tabelle 7.11: Berechnung des Faktors α_M

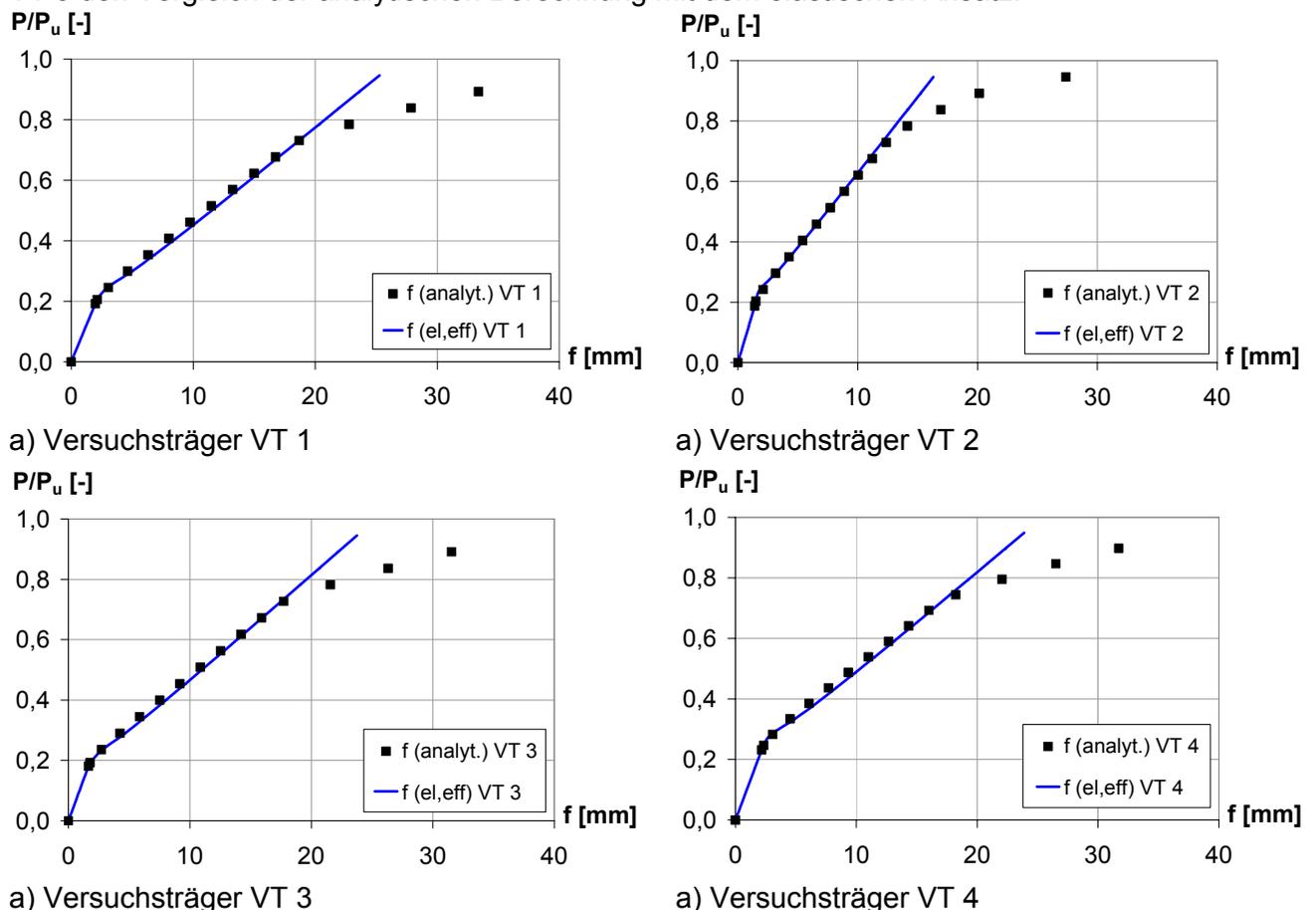
| M_{Riss} / M | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| α_M | 1,56 | 1,61 | 1,68 | 1,75 | 1,83 | 1,93 | 2,03 | 2,16 | 2,31 | 2,49 | 2,72 | 3,01 | 3,42 |

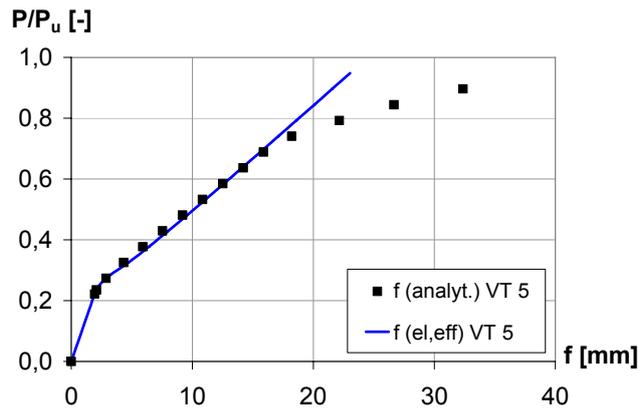
Infolge der Vielzahl möglicher Querschnitte für die Baustahlprofile, dem variierten Bewehrungsgehalt und der möglichen Geometrien für die Stahlbetonplatte wird auf eine tabellarische Darstellung des Faktors α_{QS} verzichtet.

7.5.2 Vergleich mit analytischen Berechnungsmodell

Die Anwendbarkeit des oben beschriebenen Berechnungsansatz für das effektive Trägheitsmoment $I_{i,\text{eff}}$ zur Verformungsberechnung von Slim-Floor Trägern kann durch einen Vergleich der rechnerischen Verformungen mit dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen analytischen Berechnungsmodell gezeigt werden.

Die nachfolgende Abbildung 7.116 zeigt hierbei exemplarisch für die Versuchsträger VT 1 bis VT 5 den Vergleich der analytischen Berechnung mit dem elastischen Ansatz.





e) Versuchsträger VT 5

Abbildung 7.116: Vergleich der elastischen mit experimentellen Verformungen

Die beiden nachfolgenden Tabellen stellen jeweils exemplarisch für verschiedene Ausnutzungsgrade die experimentelle Durchbiegung und die über den elastischen Ansatz berechnete Verformung der Versuchsträger VT 1 und VT 2 gegenüber.

Tabelle 7.12: Vergleich elastisches und analytisches Berechnungsmodell - VT 1

| P_{sd} / P_u | [kNm] | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|----------------|-------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|
| f (analyt.) | [mm] | 2,14 | 3,05 | 4,62 | 8,01 | 11,49 | 14,99 | 16,75 | 22,77 | 33,39 |
| f (el,eff) | [mm] | 2,13 | 2,98 | 5,00 | 8,59 | 12,00 | 15,35 | 17,01 | 20,32 | 23,62 |
| Abweichung | [%] | -0,5 | -2,3 | 8,2 | 7,2 | 4,4 | 2,4 | 1,6 | -10,8 | -29,3 |

Tabelle 7.13: Vergleich elastisches und analytisches Berechnungsmodell - VT 2

| P_{sd} / P_u | [kNm] | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|----------------|-------|------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| f (analyt.) | [mm] | 1,49 | 2,10 | 3,14 | 5,40 | 7,71 | 10,04 | 11,21 | 14,14 | 20,14 |
| f (el,eff) | [mm] | 1,51 | 1,83 | 3,15 | 5,47 | 7,68 | 9,86 | 10,94 | 13,09 | 15,24 |
| Abweichung | [%] | 1,0 | -12,9 | 0,3 | 1,3 | -0,4 | -1,8 | -2,4 | -7,4 | -24,3 |

Die Abweichungen der mit Gleichungen (7.1) und (7.12) berechneten Verformungen für die Werte der in Abschnitt 6.3 dargestellten Parameteruntersuchung zum analytischen Berechnungsmodell betragen für die Ausnutzungsgrade $M/M_u = 0 \div 0,8$ im Mittel 2,2 % und die Standardabweichung liegt bei 11,4 %. Der 5 %-Quantilwert liegt bei 0,89 der 95 %-Quantilwert bei 1,24.

Die Übereinstimmung der mit Gleichungen (7.1) und (7.12) berechneten Verformungen mit den genaueren Werten nach Abschnitt 6.3 ist somit sehr gut. Mit dem Konzept des effektiven Trägheitsmoments $I_{i,eff}$ können folglich die Verformungen von Slim-Floor Träger wirklichkeitsnah berechnet werden.

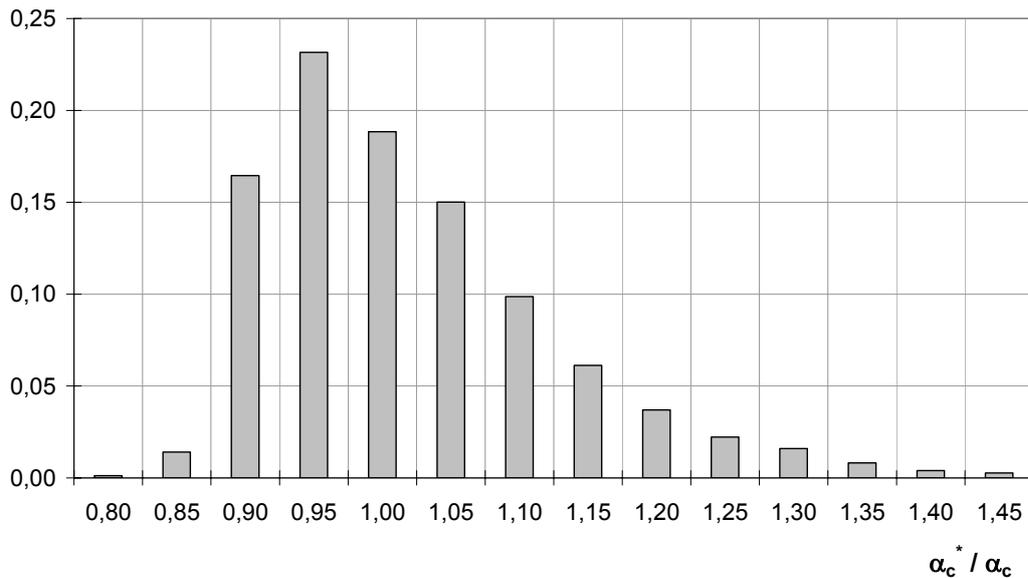
rel. Häufigkeit


Abbildung 7.117: Vergleich des Abminderungsfaktors α_c^* (Ansatz) zu analytischen Modellwerten α_c

Wie anhand der Grafiken (Abbildung 7.117 und Abbildung 7.118) zu erkennen ist, stimmt der elastische Berechnungsansatz $f_{el,eff}$ mit dem analytischen Ansatz $f_{(analyt.)}$ im Gebrauchslastniveau sehr gut überein. Für höhere Lasten (> 80 % der Traglast) jedoch weichen die Werte stark ab. Dies hängt von der steigenden Rissbildung und dem Plastizieren der Bewehrung und des Stahlträgers ab. Der nicht-lineare Durchbiegungszuwachs kann durch den linear-elastischen Ansatz nicht abgedeckt werden. Für die Berechnung der Durchbiegung innerhalb des Gebrauchslastzustands jedoch ist die Übereinstimmung sehr gut.

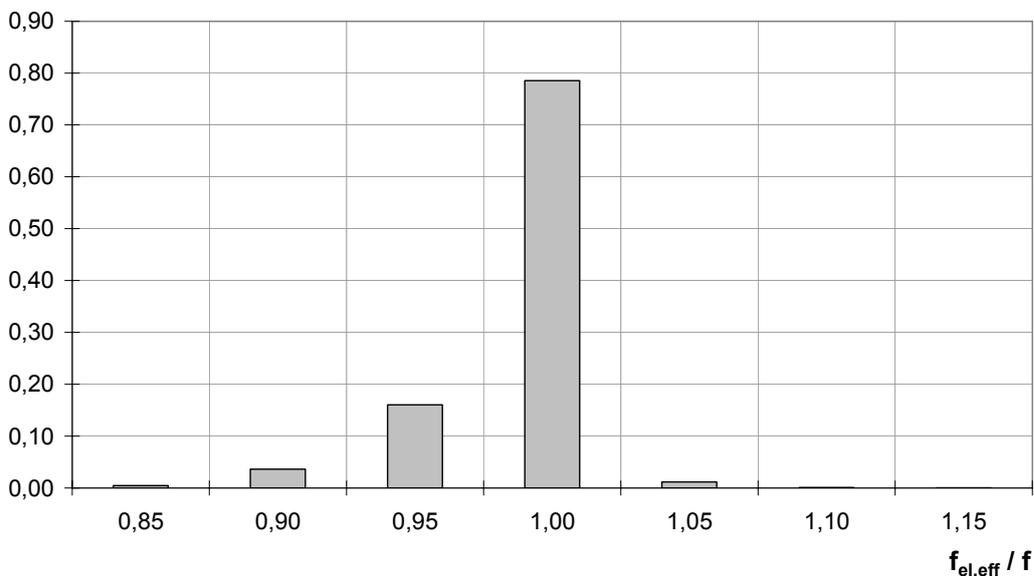
rel. Häufigkeit


Abbildung 7.118: Vergleich des Abminderungsfaktors α_c^* (Ansatz) zu analytischen Modellwerten α_c für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die Werte der Parameterstufie nach Abschnitt 6.3

7.5.3 Vergleich mit Versuchsträger VT 1

In Ergänzung zum Abschnitt 7.5.2 zeigt die Abbildung 7.119 beispielhaft den Vergleich der Verformungsberechnung nach elastischen Ansatz mit den experimentellen Versuchsergebnissen des Trägers VT 1.

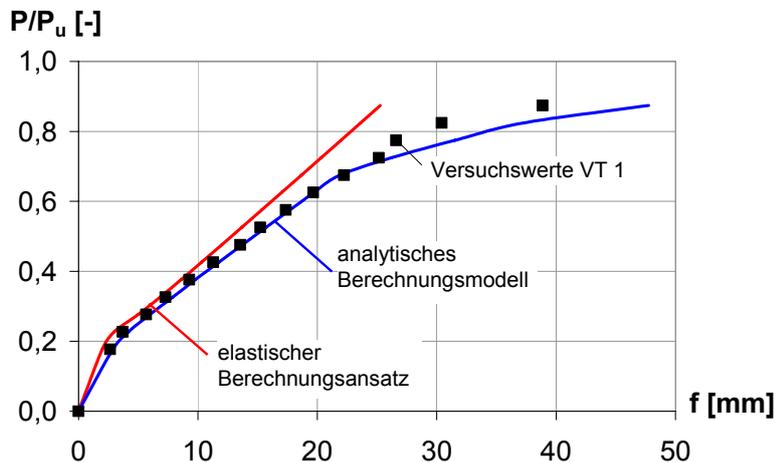


Abbildung 7.119: Vergleich Versuchsträger VT 1 mit elastischem Berechnungsansatz

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit liegen die Modellergebnisse relativ nah an den Versuchsergebnissen, mit zunehmender Belastung (also nach dem Beginn des Fließens des Baustahls) aber unterschätzt der elastische Berechnungsansatz die Durchbiegung des Versuchsträgers. Die Überschätzung der Verformung beginnt bei ca. 80 % Ausnutzungsgrad und somit oberhalb der Gebrauchstauglichkeitsgrenzen.

7.5.4 Schlussfolgerungen aus dem quasi-elastischen Berechnungsansatz

Durch die systematische Auswertung der durchgeführten Parameterstudie konnte für den Abminderungsfaktor α_c ein einfacher Berechnungsansatz entwickelt werden, der eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung von Slim-Floor Träger ermöglicht. Ein Vergleich der quasi-elastischen Verformungsberechnung mit dem entwickelten Berechnungsansatz und der genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell zeigt eine gute Übereinstimmung.

Der Vergleich der elastischen Verformungsberechnung auf Basis der Regelungen zur mittragenden Breite der bestehenden Normen mit der genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell zeigt, dass diese für eine elastische Verformungsberechnung von Slim-Floor Träger ungeeignet sind. Die rechnerischen Verformungswerte weichen in erheblichem Maß von der genaueren Berechnung ab. Mit dem vorgeschlagenen Berechnungsansatz zur quasi-elastischen Verformungsberechnung niedriger Verbundträger ist somit besonders im Vergleich zu den Normregelungen eine genauere Verformungsberechnung möglich

7.6 Berechnungsansatzes für niedrige Verbundträger

Der Berechnungsansatz nach Gleichung (7.16) bis (7.19) für niedrige Verbundträger berechnet sich folgt [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] lautet wie folgt:

$$\alpha_c = \alpha_{\text{Mat}} \cdot \alpha_{\text{QS}} \cdot \alpha_{\text{M}} \quad (7.16)$$

mit α_c Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des nicht-linearen Material- und Tragverhaltens niedriger Verbundträger

α_{Mat} Faktor für den Einfluss der Materialkennwerte

α_{QS} Faktor für den Einfluss der Querschnittswerte

α_{M} Faktor für den Einfluss der Belastung

$$\alpha_{\text{Mat}} = \left(\frac{f_{\text{ct}}}{f_{\text{ct},0}} \right)^{-0,154} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,0}} \right)^{0,146} \cdot \left(\frac{f_{\text{ay}}}{f_{\text{ay},0}} \right)^{0,152} \quad (7.17)$$

$$\alpha_{\text{QS}} = \left(\frac{I_{c,0}}{I_{i,0}} \right)^{0,06} \cdot \left(\frac{S_{i,0} \cdot a_{\text{St}}}{I_{i,0}} \right)^{0,565} \cdot \left(\frac{z_{i,0}}{a_{\text{St}}} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^{-0,125} \quad (7.18)$$

$$\alpha_{\text{M}} = 1,357 \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{Riss}}}{M} \right)^{-0,493} \quad (7.19)$$

mit M Moment in Trägermitte
 M_{Riss} Rissmoment des Verbundträgers
 $I_{i,0}, I_{c,0}, S_{i,0}, z_{i,0}, a_{\text{St}}$ elastische Querschnittswerte des Verbund-, Stahl- und Betonquerschnitts nach Gleichung (7.2) bis (7.8)
 f_{ct} Betonzugfestigkeit
 $f_{\text{ct},0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$ Bezugswert der Betonzugfestigkeit
 f_c Betondruckfestigkeit
 $f_{c,0} = 30 \text{ N/mm}^2$ Bezugswert der Betondruckfestigkeit
 f_{ay} Streckgrenze des Stahlträgers
 $f_{\text{ay},0} = 355 \text{ N/mm}^2$ Bezugswert der Streckgrenze des Stahlträgers

Für weitere Informationen zum elastischen Ansatz für niedrige Verbundträger, der statistischen Auswertung der Parameteruntersuchung wird auf die Quellen [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006] verwiesen.

Mittels für den Hochbau gebräuchlichen Materialkennwerte für Beton und Baustahl berechnet sich der Faktor α_{Mat} für den Einfluss der Materialkennwerte wie folgt:

Tabelle 7.14: Berechnung des Faktors α_{Mat} mit für den Hochbau gebräuchlichen Materialkennwerten

| Betongüte/ Baustahlgüte | C 20/25 | C 25/30 | C 30/37 | C 35/45 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| S 235 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,80 |
| S 355 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,86 |
| S 460 | 0,87 | 0,87 | 0,88 | 0,89 |

Entsprechend kann auch wiederum der Faktors α_M für den Einfluss der Belastung bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt hierbei den Ergebniswert für den Faktor α_M in Abhängigkeit des Verhältnisses des Rissmoments zum einwirkenden Moments innerhalb eines Bereiches von 0,20-0,80 wieder:

 Tabelle 7.15: Berechnung des Faktors α_M

| M_{Riss} / M | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| α_M | 1,51 | 1,56 | 1,62 | 1,68 | 1,75 | 1,82 | 1,91 | 2,01 | 2,13 | 2,28 | 2,46 | 2,69 | 3,0 |

Infolge der Vielzahl möglicher Querschnitte für die Baustahlprofile und der möglichen Geometrien für die Stahlbetonplatte wird auf eine tabellarische Darstellung des Faktors α_{QS} für den Einfluss der Querschnittsgeometrie verzichtet.

7.7 Zusammenfassung

Die Berechnung von Verformungen unter expliziter Berücksichtigung des nichtlinearen Material- und Tragverhaltens niedriger Verbundträger zum Beispiel mit M- κ -Linien ist vergleichsweise aufwändig. Für eine Berechnung in der Planungspraxis ist daher ein vereinfachtes Verfahren auf Basis der bekannten elastischen Berechnungsverfahren von Vorteil und wünschenswert. Um zum einen das nichtlineare Tragverhalten von Slim-Floor Trägern bei der Verformungsberechnung zu berücksichtigen und zum anderen für die Planungspraxis ein handhabbares Vorgehen zu gewährleisten, wurde ein Vorschlag zur quasi-elastischen Verformungsberechnung vorgestellt, der diese Aspekte berücksichtigt.

Kernstück dieses quasi-elastischen Berechnungsvorschlags ist die Bestimmung eines effektiven Trägheitsmoments $I_{i,\text{eff}}$ des Verbundquerschnitts, mit dem die Verformungen niedriger Verbundträger quasi-elastisch berechnet werden können. Das effektive Trägheitsmoment $I_{i,\text{eff}}$ basiert dabei auf den elastischen Querschnittswerten des Verbundquerschnitts und berücksichtigt das nichtlineare Material- und Tragverhalten von Slim-Floor Trägern implizit über den Abminderungsfaktor α_c . Durch eine umfangreiche Parameterstudie anhand des analytischen Berechnungsmodell konnten die Haupteinflussgrößen auf das effektive Trägheitsmoment identifiziert und in einen Berechnungsansatz umgesetzt werden, der im Rahmen der Randbedingungen des normalen Hoch- und Geschossbaus gültig ist.

Anhand des entwickelten quasi-elastischen Berechnungsansatzes ist somit die zuverlässige Ermittlung der Verformungen niedriger Verbundträger in einfacher Weise möglich. Aufgrund der großen Abweichungen der elastischen Verformungsberechnungen mit dem Gesamtquerschnittsverfahren auf Basis der Regeln zur mittragenden Breite in EN 1994-1-1, DIN 18800-5 und DIN 1045-1 im Vergleich zur genaueren Berechnung mit dem analytischen Berechnungsmodell als auch dem hier vorgeschlagenen Berechnungsansatz sind diese Normregelungen zur mittragenden Breite für die Verformungsberechnung niedriger Verbundträger wenig geeignet.

8 Numerische Untersuchungen

8.1 Grundsätzliches

Die beschriebenen experimentellen Untersuchungen mit Slim-Floor Trägern werden durch Berechnungen mit einem numerischen Modell auf der Grundlage der Finite-Element-Methode ergänzt.

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Umfang beschränkt sich hierbei auf eine elastische Untersuchung des Tragverhaltens.

Die Berechnungen werden hierbei mit dem Finite-Element-Programm MASA durchgeführt, das von Ožbolt am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart entwickelt wurde [Ožbolt 2001], [Ožbolt 1999].

Das Programm MASA wird vorwiegend zu Forschungszwecken im Beton-, Stahlbetonbau und der Befestigungstechnik angewendet. Es erlaubt eine zwei- oder dreidimensionale, lineare oder nichtlineare Berechnung von Konstruktionen aus quasispröden Materialien.

Für eine detaillierte Beschreibung des Programms MASA wird auf die Literatur von [Ožbolt 2001], [Ožbolt 1999] bzw. [Kuhlmann, Rieg 2004a] verwiesen.

8.2 Numerisches Modell

Da durch die Untersuchung der mittragenden Breite ein räumliches Tragverhalten erfasst werden soll, ist für die numerischen Untersuchungen ein dreidimensionales Modell erforderlich. Die nachfolgende Abbildung 8.120 zeigt das numerische Modell für den Versuchsträger VT 1. Aus Symmetriegründen (doppelt symmetrischer Versuchsträger) beschränkt sich das numerische Modell auf ein Viertel des Verbundträgers.

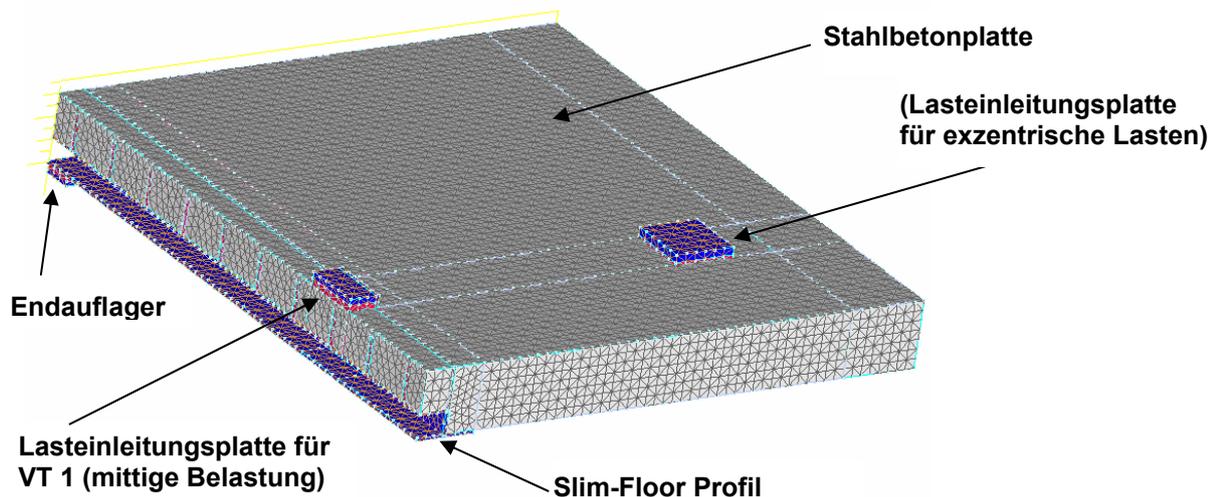


Abbildung 8.120: 3-dimensionales numerisches Modell Versuchsträgers VT1

Für die Modellierung des Betongurts als auch des Stahlträgers wurden achtknotige Volumenelemente verwendet. Für das Berechnungsmodell wurde ein linear-elastisches Material sowohl für den Baustahl, wie auch den Beton mit den jeweiligen charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften gewählt.

Im Bereich der Auflager und Lasteinleitung wurde zwischen der Auflagerplatte und dem Versuchsträger jeweils eine so genannte Zwischenschicht mit linear-elastischen Volumenelementen definiert, um durch eine möglichst steife Lasteinleitung zu garantieren.

Die Lagerung des Verbundträgers im Modell wird durch Punktlager in Vertikalrichtung an den FE-Knoten an der Unterseite des Stahlträgeruntergurts vorgenommen. Die Punktlager sind dabei in Querrichtung entlang nur einer Linie angeordnet, um eine ideale Rollenlagerung des Modells zu garantieren und ungewollte Einspanneffekte am Auflager zu vermeiden.

Die Lagerung des numerischen Modells in den Symmetrieebenen wird gleichermaßen mit Punktlagerung der entsprechenden Knoten vorgenommen. Generell werden Lagerungen nur durch Festhalten des entsprechenden Verschiebungsfreiheitsgrades erreicht.

Verbundmittel zur Verdübelung des Stahl- und Betonquerschnitts sind im numerischen Modell nicht explizit modelliert. Für das globale Last-Verformungs-Verhalten ist das lokale Verhalten der Verbundmittel nur von untergeordnetem Interesse.

Bei der Modellierung von Verbundträgern mit voller Verdübelung wird der Verbund zwischen Beton und Baustahl durch Verwendung derselben Knoten für die entsprechenden Beton- und Baustahlelemente erzeugt, siehe Abbildung 8.121.

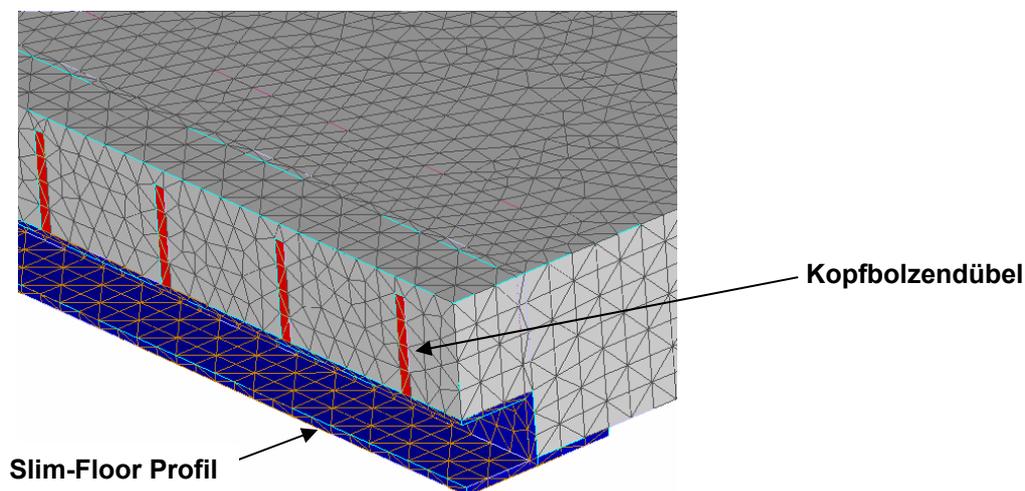


Abbildung 8.121: Modellierung der Verbundmittel

8.3 Untersuchung des Tragverhaltens

8.3.1 Allgemeines

Die nachfolgend dargestellten FE-Untersuchungen sollen einen qualitativen Eindruck über das Tragverhalten für einen mittig belasteten Versuch (Versuchsträger VT 1) geben.

Hierbei wurde unter der Vereinfachung eines elastischen Materialverhaltens für Baustahl wie auch Stahlbeton die Spannungsverteilung berechnet, die nachfolgend dargestellt werden.

In den Abbildungen werden als Längsbiegespannung die Zug- und Druckspannungen in Baustahlträgerlängsachse bezeichnet.

8.3.2 Versuchsträger VT 1 – mittige Belastung

Anhand der Abbildung 8.122 ist gut zu erkennen, dass der unter mittiger Biegung stehende Versuchsträger VT 1 in Feldmitte über die gesamte Breite unter der Druckeinwirkung steht. Ebenso ist ersichtlich, dass die Betondruckspannungen in Feldmitte nach außen hin und über die Trägerlängsachse zum Auflager hin abnehmen. Dies entspricht der analytischen Berechnung für die mittragende Breite, siehe Abschnitt 4.2.

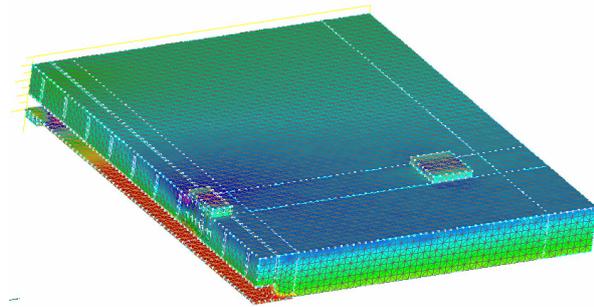


Abbildung 8.122: Längsbiegespannungen (Trägeroberseite) VT 1

Ein entsprechendes Bild zeigt sich auch für die unter Zug stehende Trägerunterseite. Auch hier nimmt über die Trägerlängsrichtung die mittragende Breite des Betons zu den Auflagern hin ab. Im Bereich der Lasteinleitung treten Spannungskonzentrationen auf, die sich auch bei den Versuchsträgern durch eine starke Rissbildung bemerkbar machten.

In der numerischen Berechnung wird hier die Rissbildung des Betons nicht berücksichtigt, jedoch lässt sich durch die linear-elastisch berechnete Spannungsverteilung auf das Rissverhalten des Betons schließen. Wie die Versuche auch zeigten, begannen die ersten Risse nahe dem Stahlträger und der Querschnitt riss mit zunehmender Belastung bis zu den Trägerseiten auf, siehe Abbildung 8.123.

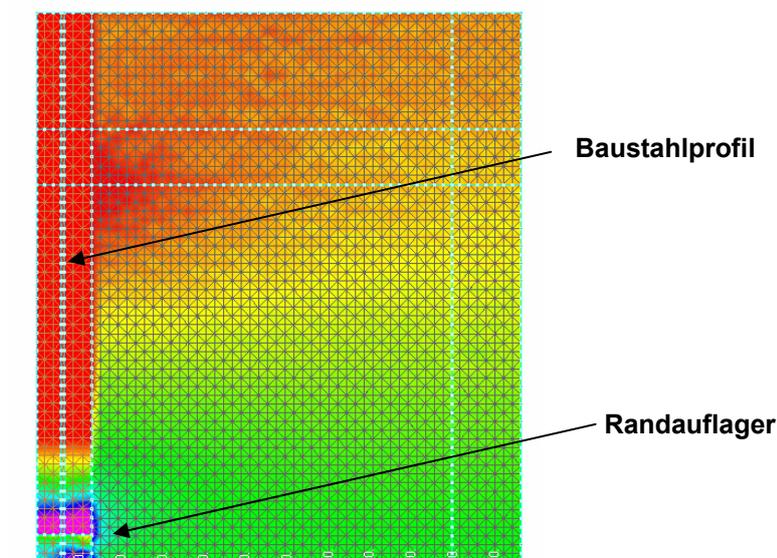


Abbildung 8.123: Längsbiegespannung (Trägerunterseite) VT 1

8.3.3 Versuchsträger VT 4 – exzentrische Belastung

Für den Versuchsträger VT 4 unter Querbiegung ergibt sich für die Biegelängsspannung auf der Trägeroberseite ein ähnliches Bild, siehe nachfolgende Abbildung. Durch die exzentrische eingeleitete Last bildet sich, wie auch unter mittiger Biegebeanspruchung, die Druckspannungsverteilung in Trägermitte über die gesamte Breite aus.

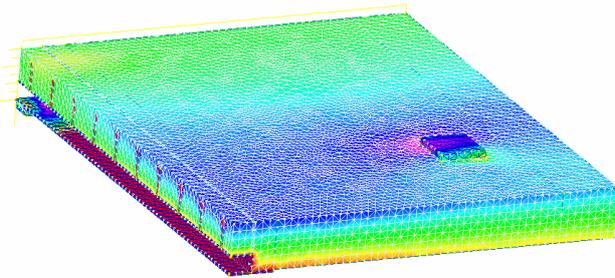


Abbildung 8.124: Längsbiegespannungen (Trägeroberseite) VT 4

Durch die exzentrische Laststellung erfährt der Versuchsträger eine Doppelbiegung. Während sich in Querrichtung über dem Baustahlprofil ein Stützmoment ausbildet, unterliegt der Träger in dessen Längsrichtung einem positiven Moment. In Abbildung 8.125 sind aus der linear-elastischen Berechnung heraus die Zugbeanspruchung in Trägerquerrichtung zu erkennen, die sich zum Auflager hin konzentrieren. Dies bestätigte sich ebenfalls in den Versuchen, dass die Längsrisse oberhalb des Baustahlprofils auf der Trägeroberseite sich mit zunehmenden Lasten bis zu den Auflagern durchzogen.

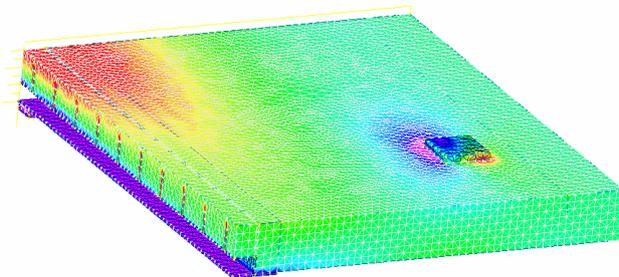


Abbildung 8.125: Querbiegespannungen (Trägeroberseite) VT 4

Für eine Nachrechnung der Versuche, besonders in Hinblick auch auf die Durchbiegung und dem Einfluss der Rissbildung, ist es für weitere Untersuchungen notwendig, die Berechnungen auf nicht-lineare Modelle zu erweitern, was als Fortführung geplant ist. Die durchgeführten Berechnungen auf Grundlage linear-elastischer Annahmen geben jedoch qualitativ das charakteristische Tragverhalten der Versuche sehr gut wieder.

9 Systemoptimierung und Anschlusskonstruktionen für Slim-Floor Konstruktionen

9.1 Allgemeines

Durch die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Berechnungsansätze ist es nun möglich Slim-Floor Träger wirtschaftlicher zu bemessen, da die Durchbiegungsberechnung nun genauere Ergebnisse liefert und diese nicht wie nach Norm [DIN V 18800-5] überschätzt. Um die Wirtschaftlichkeit von Slim-Floor Trägern im gesamten Kontext einer Konstruktion zu sehen, ist es aber auch notwendig, die Herstellung der Träger sowie der Anschlüsse in der Fertigung und Montage zu optimieren.

Ziel muss daher sein, die Slim-Floor Konstruktionen mit ihren Anschlusskonstruktionen und bestmöglich aufeinander abzustimmen und zu optimieren, so dass für die Anwendung dieses Konstruktionstyps eine Systemlösung für den Tragwerksplaner und Stahlbauer angeboten werden kann.

Die hier nachfolgend aufgezeigten Verbundanschlüsse mit Slim-Floor Trägern bestehen aus optimierten Stahlanschlüssen und einer durchlaufenden Stahlbetondecke. Die Kombination der verschiedenen Anschlussparameter (z. B. Stützentyp, Konstruktionsweise des Anschlusses, Gelenk- oder Durchlaufwirkung, etc.) ergibt eine Vielzahl an möglichen Anschlussvarianten. Eine vollständige Darstellung aller möglichen Kombinationen ist daher nicht möglich. In Abschnitt wird vielmehr eine sinnvolle Auswahl verschiedener Anschlusstypen in einer schematischen Übersicht zusammengestellt. Weitere Informationen zu den Anschlüssen sind in [Kuhlmann, Rieg 2005] zu finden.

Anhand der in den vorangegangenen Kapiteln sollen beispielhaft Anschlusskonstruktion für Slim-Floor Träger mit Hutprofilen vorgestellt werden. Die nachfolgend vorgestellten Anschlussvarianten sind jedoch als allgemeingültig zu verstehen und für beliebige Slim-Floor Querschnitte anzuwenden.

9.2 Konstruktionsgrundsätze

9.2.1.1 Allgemeines

In Abhängigkeit der zu übertragenden Schnittgrößen unter Berücksichtigung der zulässigen Verformungen kann zwischen Anschlüssen mit reiner Gelenkwirkung und Durchlaufwirkung unterschieden werden. Bei Slim-Floor Trägern wird der gelenkige Anschluss der Regelfall sein. Anschlüsse mit Rahmenwirkung, die zwischen Stütze bzw. Wand und Träger ein Biegemoment übertragen, bilden eher die Ausnahme. Gelenkige, wie auch biegesteife Anschlüsse werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

In den nachfolgenden Beschreibungen wird auf die Kaltbemessung eingegangen, für den Brandfall werden auf die Literaturquellen [Kuhlmann, Rieg 2005] und [DIBt 2005] verwiesen.

9.2.1.2 Anschlusswahl und Montage

Wichtigstes Kriterium für die Anschlusswahl ist die sichere Übertragung der Kräfte und die Umsetzung der Verformungsannahmen des statischen Systems (Gelenk- und Durchlaufwirkung).

Besonderen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten des Anschlusses hat die Belastungsgeschichte. Mit Eigengewichtsverbund, das heißt, das Stahlprofil des Verbundträ-

gers wird im Bauzustand durch Hilfsstützen unterstützt, ergeben sich geringere Durchbiegungen des Trägers aber eine stärkere Rissbildung des Betongurts am Auflager, da der Hauptteil der Auflagerverdrehung erst nach Ausbau der Hilfsstützen entsteht. Aufgrund der höheren Wirtschaftlichkeit sollte dennoch das Betonieren auf Hilfsstützen der Regelfall sein. Die Herstellung ohne Hilfsstützen und ohne Eigengewichtsverbund ist für Slim-Floor Träger eher ungeeignet, da die vergleichsweise geringe Tragfähigkeit und Steifigkeit des reinen Stahlträgers nur sehr kurze Montagestützweiten erlaubt.

9.3 Anschlüsse an Stützen

9.3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Anschlussstypen von Slim-Floor Trägern dargestellt und erläutert. Grundsätzlich kann zwischen gelenkigen und biegesteifen Anschlüssen unterschieden werden. Die Regelausführung der Slim-Floor Träger mit UPE-Profil ist der Einfeldträger mit gelenkigen Anschlüssen.

Die Fragestellung der mittragenden Wirkung und damit verbundenen Einspannwirkung über der Stütze, was direkt in die Verformungsberechnung der Verbundträger eingeht, ist derzeit noch nicht ausreichend geklärt.

Vorteil eines biegesteifen Anschlusses ist aber natürlich durch die Durchlaufwirkung des Trägers, dass die Durchbiegung des Trägers im Vergleich zum Einfeldträger reduziert wird.

Zur Minimierung der Verformungen kann es auch bei Trägern, die bei der statischen Berechnung als Einfeldträger bemessen werden, ratsam sein, eine konstruktive Durchlaufwirkung herzustellen.

9.3.2 Stirnplattenanschluss

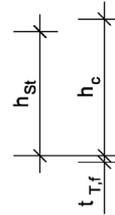
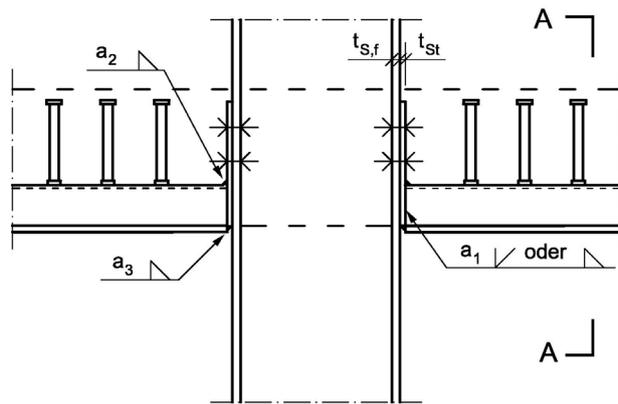
9.3.2.1 Gelenkige Anschlusskonstruktion

Bei diesem Anschluss wird die Stirnplatte direkt an den Stützenflansch geschraubt, siehe Abbildung 9.126.

Die Stirnplatte wird an beiden Stegen mit dem UPE-Profil verschweißt und durch ein symmetrisches Schraubenbild mit der Stütze verbunden. Die konstruktive Schweißnaht zwischen Ober- bzw. Untergurt des Hutprofils und der Stirnplatte wird planmäßig nicht zur Kraftübertragung herangezogen. Die Lage des theoretischen Gelenks liegt in der Verbindungsebene zwischen Stirnplatte und Stütze. So ergeben sich nur geringe Exzentrizitäten für die Schweißnaht im Stegbereich. Bei gelenkigen Anschlüssen sollten die Geometrie der Stirnplatte und die Schraubenbilder so aufeinander abgestimmt werden, dass diese ein ausreichendes Rotationsvermögen besitzen und keine ungewollten Einspanneffekte infolge der Durchbiegung entstehen. Aus diesem Grund wird die Dicke der Stirnplatte t_{st} bei gelenkigen Anschlüssen mit 10 bis 12 mm relativ dünn gewählt [Kuhlmann, Kürschner 2001].

Die Stirnplatten werden in der Werkstatt zugeschnitten, an die Träger geschweißt und die Schraubenlöcher mit Lochspiel gebohrt. Nach dem Einheben müssen die Träger zunächst nur mit wenigen Schrauben fixiert werden, so dass nur kurze Kranzeiten benötigt werden und dieser Anschlusstyp sehr montagefreundlich ist. Bei Ausführung der Einhakmontage kann die Kranzeit noch zusätzlich reduziert werden, siehe Abbildung 9.127, [Kuhlmann, Kürschner 2001].

Ansicht



Schnitt A - A

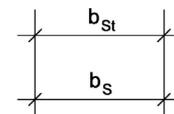
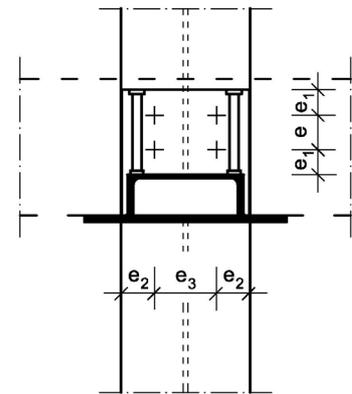
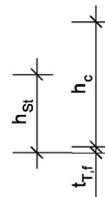
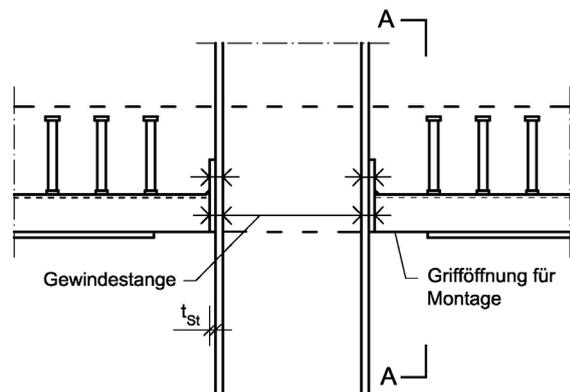


Abbildung 9.126: Gelenkiger Stirplattenanschluss an Innenstütze, Stahlprofil mit □-Querschnitt

Ansicht



Schnitt A - A

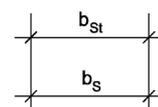
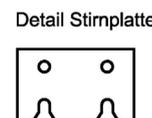
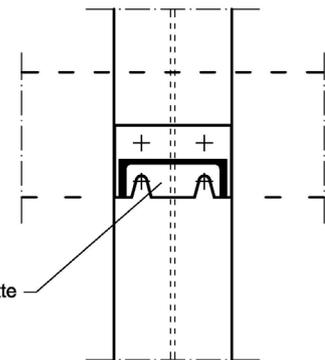


Abbildung 9.127: Gelenkiger Stirplattenanschluss mit Einhakmontage

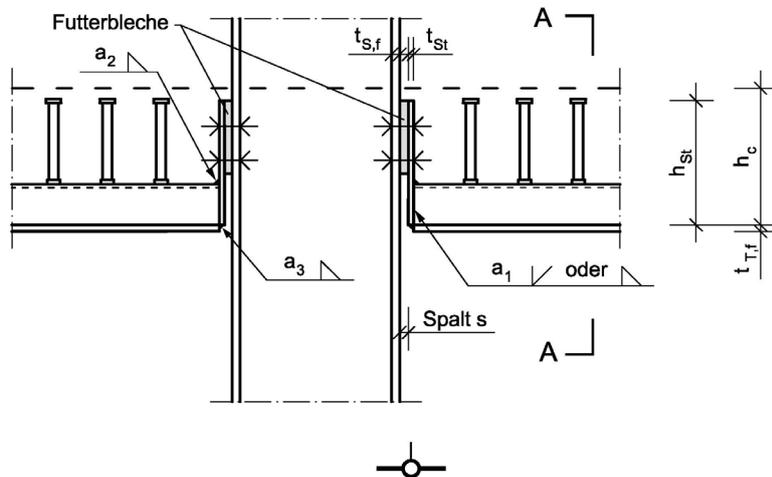
Bei Anordnung mehrerer Träger hintereinander sind die sich über die Länge aufsummierenden Fertigungstoleranzen durch konstruktive Maßnahmen zu berücksichtigen. Beispielsweise können für die Werkstatt Minuslängentoleranzen vorgegeben werden und Futterbleche für die Montage auf der Baustelle bereitgestellt werden. Vertikale und seitliche Toleranzen können im Bereich des Lochspiels von ± 2 mm ausgeglichen werden [Kuhlmann, Kürschner 2001].

Bereits im Bauzustand besitzt dieser Anschlussstyp auch um die schwache Achse und für Torsion eine gewisse Steifigkeit.

Bei großen Auflagerverdrehungen kann es infolge des vergleichsweise geringen Toleranzausgleichs beim Einheben des Trägers eventuell zu Schwierigkeiten kommen. Dann muss der Anschluss unter Umständen im Bereich der Schrauben mit Futterblechen und einem Spalt an der Unterseite der Stirplatte ausgeführt werden, siehe Abbildung 9.128.

Die Lagesicherung der Träger wird nach Montage der ersten Schrauben durch den Anschluss selbst gewährleistet. Es sind keine weiteren Maßnahmen zur Lagesicherung notwendig.

Ansicht



Schnitt A - A

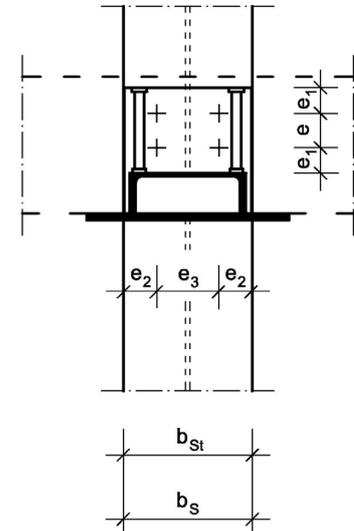


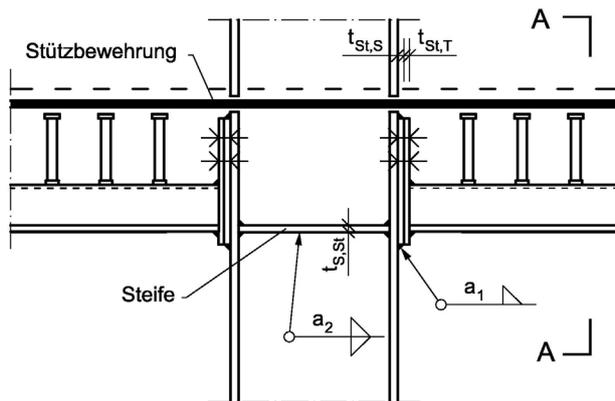
Abbildung 9.128: Gelenkiger Stirnplattenanschluss mit Futterblechen und Spalt bei großen Auflagerverdrehungen

9.3.2.2 Anschlusskonstruktion – Ausbildung einer Durchlaufwirkung

Eine Durchlaufwirkung kann durch Anordnung von Stützbewehrung erzielt werden. Bei Stahlstützen muss zur sicheren Abtragung der Druckkomponente in der Regel eine Drucksteife angeordnet werden, siehe Abbildung 9.129. Bei Verbundstützen kann diese im Allgemeinen entfallen. Die Druckkraft wird hier durch den Kammerbeton bzw. Betonkern kurzgeschlossen. Die Durchlaufwirkung ergibt sich erst nach Erhärten des Betons, im Bauzustand ist der Anschluss gelenkig.

Andere Möglichkeiten eine Durchlaufwirkung herzustellen, z. B. angeschweißte Stahllaschen, biegesteifer Stirnplattenanschluss, sind eher ungeeignet, da die Biegesteifigkeit des Hutprofils aufgrund der geringen Bauhöhe klein ist. Die Anordnung einer Stahllasche um oder durch die Stirnplatte hindurch ist zudem montage-technisch aufwändig. Der Vorteil einer solchen Lösung wäre allerdings, dass die Durchlaufwirkung bereits im Bauzustand aktiv ist.

Ansicht



Schnitt A - A

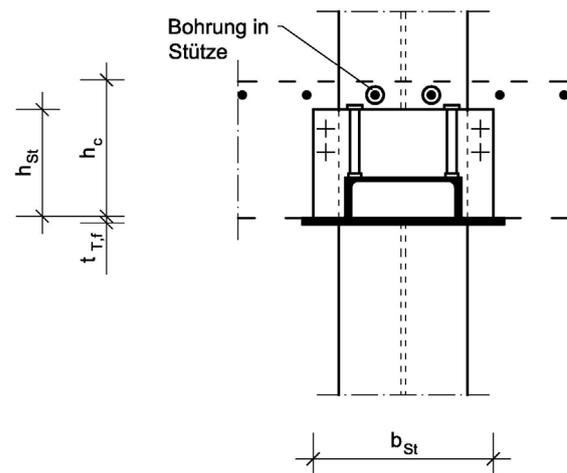


Abbildung 9.129: Biegetragfähiger Stirnplattenanschluss an eine Stahlstütze mit I-Querschnitt

Sollen Slim-Floor Träger mit einer Durchlaufwirkung ausgeführt werden, so ist zu beachten, dass der maximale Auslagerungsgrad der Stützbewehrung nicht überschritten wird [Kuhlmann, Rieg 2005]. Ein biegesteifer Anschluss des reinen Stahlprofils ist bei der Bemessung nicht berücksichtigt. Lediglich die der Zugkraft in der Stützbewehrung entsprechende Druckkraft muss angeschlossen bzw. übertragen werden. In aller Regel reicht der Untergurt des Stahlprofils zur Übertragung der Druckkraft aus. Der Anschluss der Querkraft und des Stützmoments kann somit entkoppelt werden. Durch die Begrenzung der Auslagerung der Stützbewehrung, muss ein Teil der Stützbewehrung innerhalb der Breite des Baustahlprofils durch die Stütze durchgeführt werden. Dadurch kann es notwendig werden, dass die Schrauben seitlich des Profils angeordnet werden müssen.

9.3.3 Knaggenanschluss

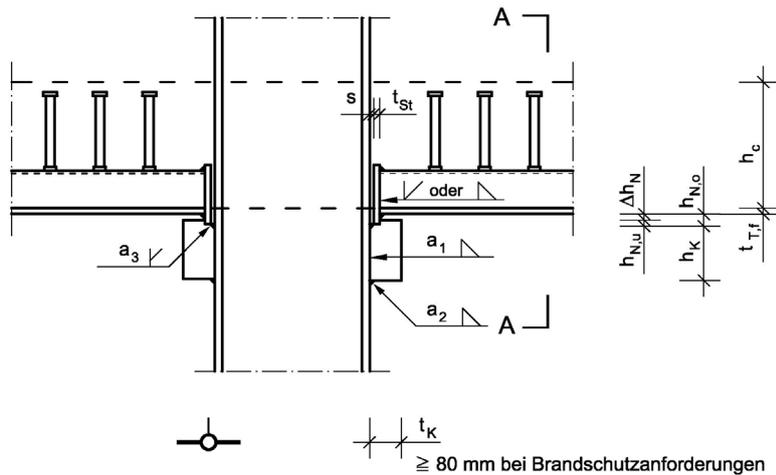
9.3.3.1 Gelenkige Anschlusskonstruktion

Anschlüsse mit Knaggen eignen sich bei Slim-Floor Trägern mit UPE-Profil besonders, da die Lasteinleitung im Allgemeinen unterhalb des Trägers liegt und somit eine räumliche Trennung des Anschlusses des Hutprofils und des Betongurts an die Stütze gelingt, siehe Abbildung 9.130. Im Bereich des Betongurts, wo die Querkraft des Betongurts in die Stütze eingeleitet wird, sind keine Verbindungsmittel zwischen Hutprofil und Stütze notwendig, wie z. B. bei Stirnplattenanschlüssen.

Der Knaggenanschluss zeichnet sich vor allem durch einen hohen Vorfertigungsgrad und eine schnelle Montage mit geringem Kostenaufwand aus. Der Anschluss lässt sich leicht an die erforderliche Tragfähigkeit und konstruktiven Randbedingungen anpassen.

Die unterhalb des Trägers angeordnete Knagge ermöglicht eine einfache und unkomplizierte Lasteinleitung für den Träger, siehe Abbildung 9.130.

Ansicht



Schnitt A - A

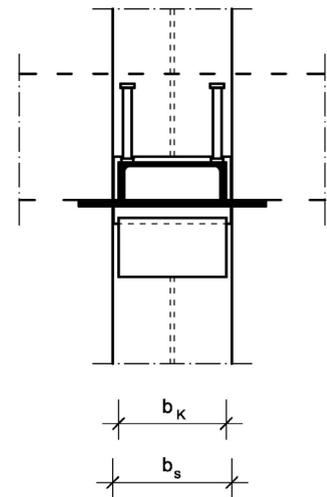
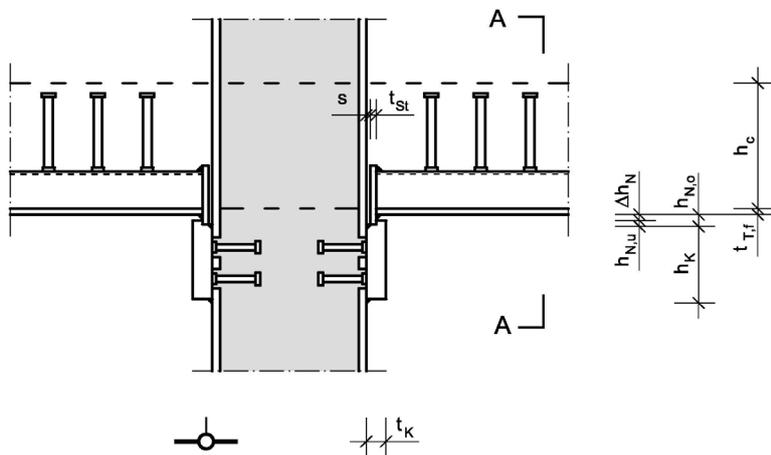


Abbildung 9.130: Gelenkiger Knaggenanschluss an Stahlstütze mit □-Querschnitt, Knagge unterhalb des Trägers

Die Querkraft des Trägers wird über Schweißnähte vom Steg auf die Stirnplatte des Trägers übertragen. In der Kontaktfläche zwischen Stirnplatte und Knagge befindet sich das theoretische Gelenk des Anschlusses. Die Kräfteinleitung aus der Knagge in die Stütze erfolgt über umlaufende Schweißnähte. Bei Ausführung mit Verbundstützen kann die Knagge auch zusätzlich mittels Kopfbolzendübel in den Kammerbeton rückverankert werden, siehe Abbildung 9.131. Die Steigerung der Tragfähigkeit durch die Kopfbolzendübel wird im Kaltfall im Allgemeinen vernachlässigt.

Ansicht



Schnitt A - A

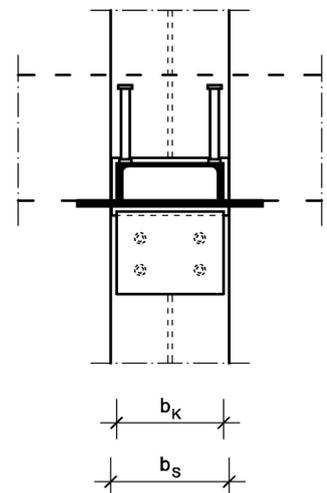
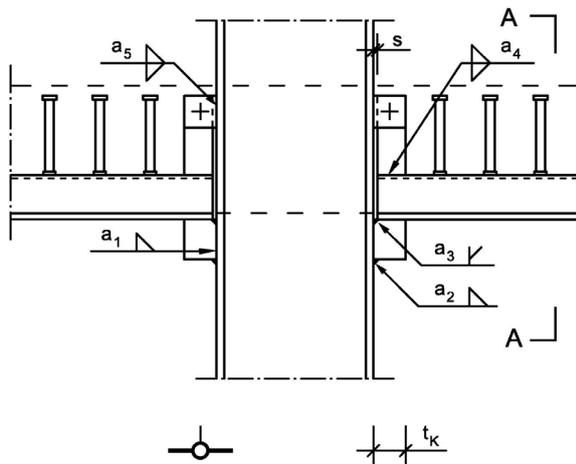


Abbildung 9.131: Gelenkiger Knaggenanschluss an Verbundstütze, Knagge in Kammerbeton durch Kopfbolzendübel rückverankert

Durch das Auflegen der Stirnplatte auf die Knagge ist der Auflagerpunkt des Trägers auch für größere Endverdrehungen, z. B. im Brandfall, klar definiert und es kommt nicht zu vergrößerten Lastausmitten durch ein Aufliegen des Trägerflanschs auf die Knaggenkante.

Ansicht



Schnitt A - A

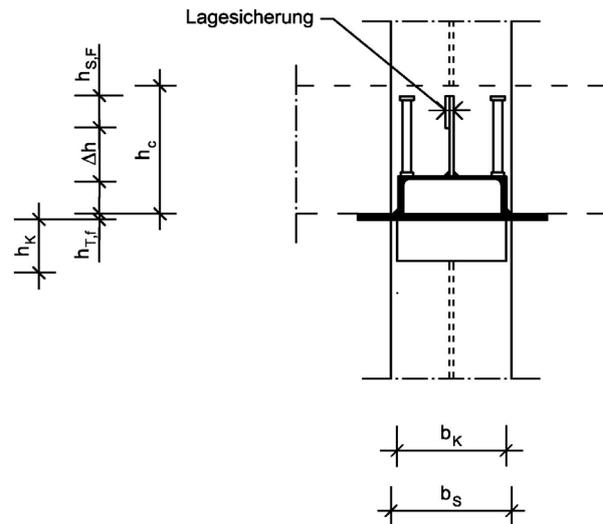


Abbildung 9.132: Gelenkiger Knaggenanschluss an Stahlstütze mit I-Querschnitt, Träger direkt auf Knagge aufgelegt

Alternativ kann der Träger auch direkt auf der Knagge aufgelegt werden, siehe Abbildung 9.132. Hierbei ergibt sich jedoch eine größere Exzentrizität für die Knagge. Bei der Bemessung sollte dann ungünstig davon ausgegangen werden, dass die Auflagerkraft an der Knaggenvorderkante übertragen wird.

Die Knagge an der Stütze und die Stirnplatte des Trägers werden in der Regel im Werk angeschweißt, so dass bei der Montage auf der Baustelle lediglich der Träger eingehoben werden muss. In der Regel sind keine Verbindungsmittel anzubringen, so dass die Montagezeit sehr kurz ist.

Die Stirnplatte dient gleichzeitig als Schalung für den Hohlraum des Hutprofils.

Für den horizontalen Toleranzausgleich in Trägerlängsrichtung kann die halbe Spaltbreite genutzt werden. Die Größe kann durch die Wahl des planmäßigen Spalts frei bestimmt werden. Dieser sollte zur Minimierung der Exzentrizität der Knagge nicht mehr als $10 \div 15$ mm betragen. Der Spalt wird in der Regel beim Betonieren der Decke vergossen. Im Bauzustand ist das Trägerende bei geringer Auflagerpressung und Reibung seitlich in gewissen Maßen verschieblich. Der Knaggenanschluss ist hierbei ideal gelenkig.

Zweckmäßig wird in der Kontaktfläche zwischen Träger und Knagge eine Verzahnung mittels „Nasen“ hergestellt. Dies dient der Lagesicherung des Trägers im Bauzustand und trägt vorteilhaft zur Abrutschsicherung im Brandfall bei. Die Nase an der Oberseite der Knagge wird werkseitig entweder eingehobelt oder angeschweißt. Wird der Träger ohne Stirnplatte ausgeführt so kann am Untergurt des Hutprofils ebenfalls eine Nase angeschweißt werden. Da Maßabweichungen nicht auszuschließen sind, sollte der Anschluss so konstruiert werden, dass die vertikale Kraftübertragung über die Aufstandsfläche nur an einer Nase geschieht. Durch Ausbildung unterschiedlicher Nasenhöhen kann die planmäßige Kontaktfläche genau festgelegt und die daraus resultierenden Exzentrizitäten ermittelt werden.

Wenn der Träger auf die Knagge ohne Verzahnung mit Nasen aufgelegt wird, so ist die Lagesicherung des Trägers im Bauzustand z. B. über zusätzliche Fahnenbleche am Träger und der Stütze notwendig, siehe Abbildung 9.133. Die einschnittige Schraubenverbindung sollte mit dünnen Blechen und einem ausreichend großen Schraubendurchmesser, z. B. $\geq M 20$ [23], vorgesehen werden, um sicherzustellen, dass Lochleibung maßgebend wird bzw. planmäßig duktiler Versagen hervorgerufen wird. Für ein schnelles Einschwenken des Trägers ist auf einen ausreichenden Abstand zwischen Oberkante des Trägers und der Stützenfahne zu achten, z. B. $\Delta h \geq 30$ mm. Durch Wahl eines horizontalen Langlochs wird

für einen ausreichenden Toleranzausgleich in Trägerlängsrichtung gesorgt. Die Geometrie der Fahnenbleche und Schraubenlöcher ist so festzulegen, dass der Träger daran gehindert wird, von der Knagge zu rutschen [Kuhlmann, Kürschner 2001].

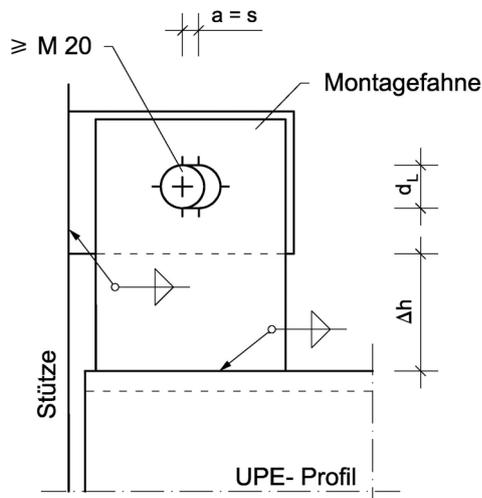


Abbildung 9.133: Lagesicherung mit Fahnenblechen bei Knaggenanschlüssen

9.3.3.2 Anschlusskonstruktion – Ausbildung einer Durchlaufwirkung

Durch Anordnung von Stützbewehrung und eines Druckstücks am Untergurt des Trägers wird an diesem eigentlich gelenkigen Anschluss eine Durchlaufwirkung erzeugt, siehe Abbildung 9.134. Zur sicheren Übertragung der Druckkraft muss bei reinen Stahlstützen in der Regel eine Drucksteife angeordnet werden. Bei Verbundstützen kann die Druckkraft im Allgemeinen durch den Kammerbeton bzw. Betonkern übertragen und auf eine Steife verzichtet werden. Die Durchlaufwirkung ergibt sich erst nach Erhärten des Betons - im Bauzustand ist der Anschluss ideal gelenkig.

Andere Möglichkeiten eine Durchlaufwirkung herzustellen, z. B. angeschweißte Stahllaschen, sind eher ungeeignet, da die Biegesteifigkeit des Baustahlprofils aufgrund der geringen Bauhöhe klein ist. Die Anordnung einer Stahllasche um oder durch die Stirnplatte hindurch ist zudem montage-technisch aufwändig. Der Vorteil einer solchen Lösung wäre allerdings, dass die Durchlaufwirkung bereits im Bauzustand aktiv ist.

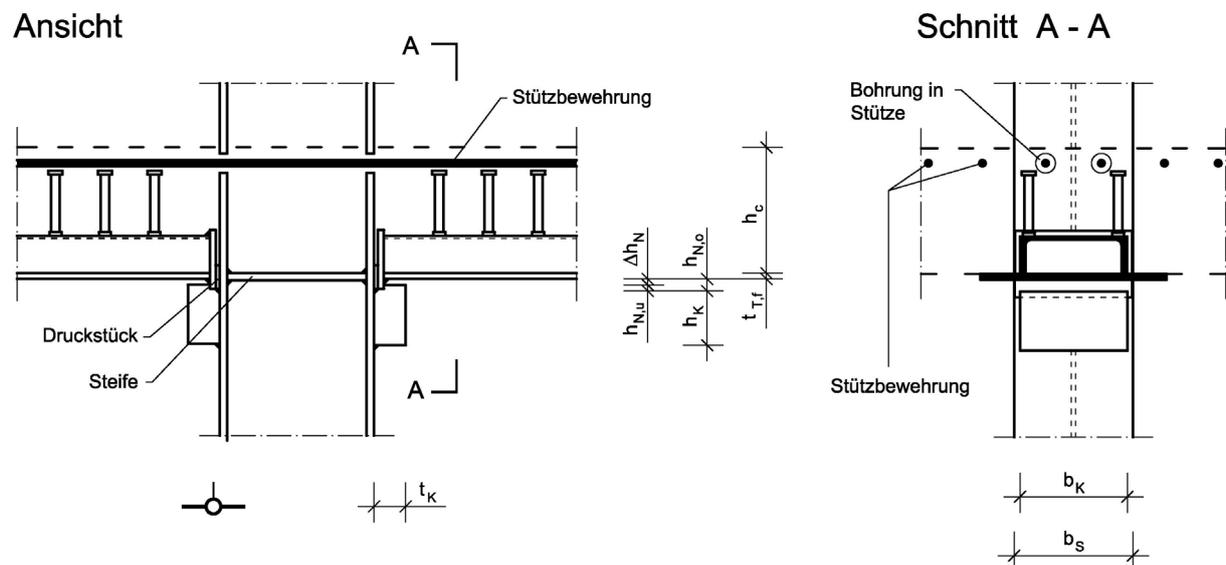


Abbildung 9.134: Biegetragfähiger Knaggenanschluss an Stahlstütze mit □-Querschnitt

Abbildung 9.135 zeigt die Lastausbreitung im Druckstück unter einem Winkel von 1:2,5 und die erforderliche Höhe des Druckstücks.

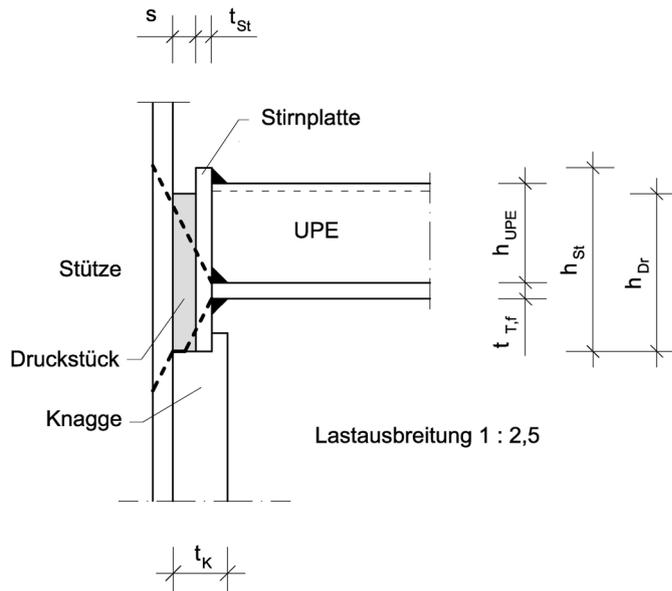


Abbildung 9.135: Anordnung eines Druckstücks

9.4 Anschlüsse an Wände

9.4.1 Gelenkige Anschlusskonstruktion

Im Folgenden werden Anschlüsse an Wände aus Stahlbeton und Mauerwerk beschrieben. Zweckmäßig werden Kontaktverbindungen ausgeführt. Schraubverbindungen sind im Allgemeinen nicht geeignet. Die Kraftein- bzw. -ausleitung der Slim-Floor Träger geschieht über Stirnplatten oder direkte Lagerung des Hutprofils.

Auf der Wand können die Träger entweder in einer Aussparung oder einer nachträglich angeschweißten bzw. anbetonierten Konsole aufgelagert werden, siehe Abbildung 9.136.

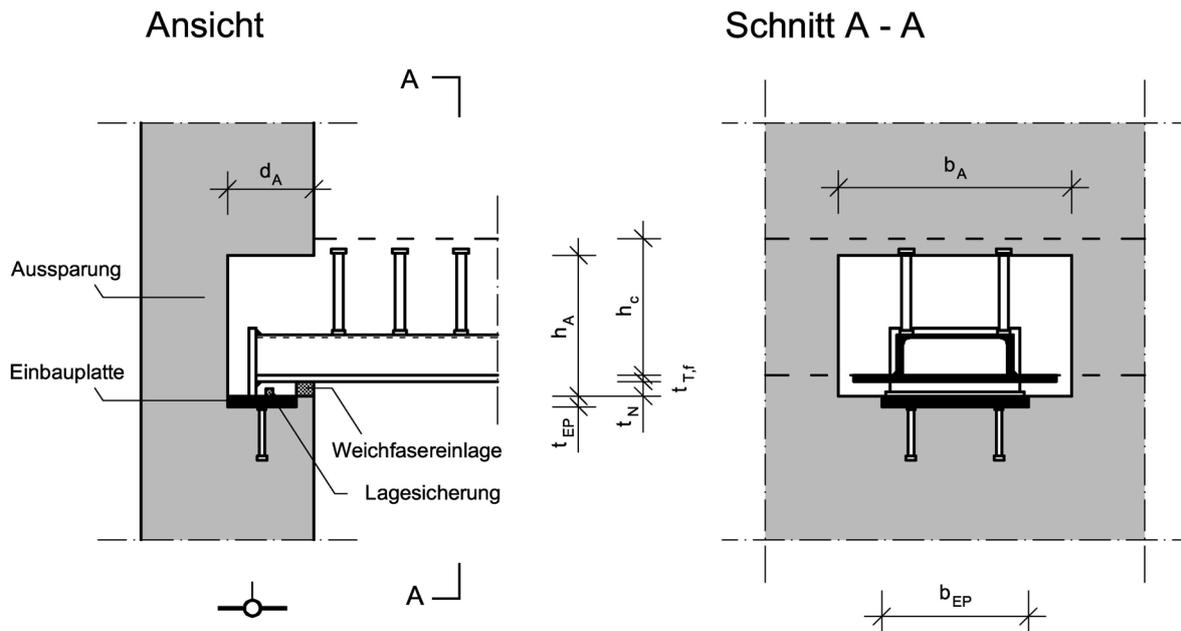


Abbildung 9.136: Lagerung auf Stahlbetonwand in Aussparung

In der Regel wird die Wandauflagerung als Endauflager der Slim-Floor Träger gelenkig ausgeführt. Im Prinzip ist auch eine Einspannung in die Wand möglich, die wegen der Komplexität der Umlenkwirkung jedoch nicht empfehlenswert ist. Die Kräfteinleitung sollte im mittleren Drittel der Wand erfolgen, um für die Wand größere Exzentrizitäten und Zugspannungen in der Lagerfuge bzw. eine klaffende Fuge zu vermeiden.

Da im Stahlbeton- und Mauerwerksbau mit größeren Maßabweichungen zu rechnen ist, sollte schon in der Planungsphase ein entsprechend großer Toleranzausgleich eingeplant werden.

Der Querkraftanschluss des Betongurts bei Ausführung der Slim-Floor Träger mit integriertem Brandschutz ist durch die kontinuierliche Ausführung von Betongurt und Stahlbetonwand bzw. direkte Lagerung auf Mauerwerkswänden möglich. Zusätzliche Maßnahmen sind hier im Allgemeinen nicht notwendig.

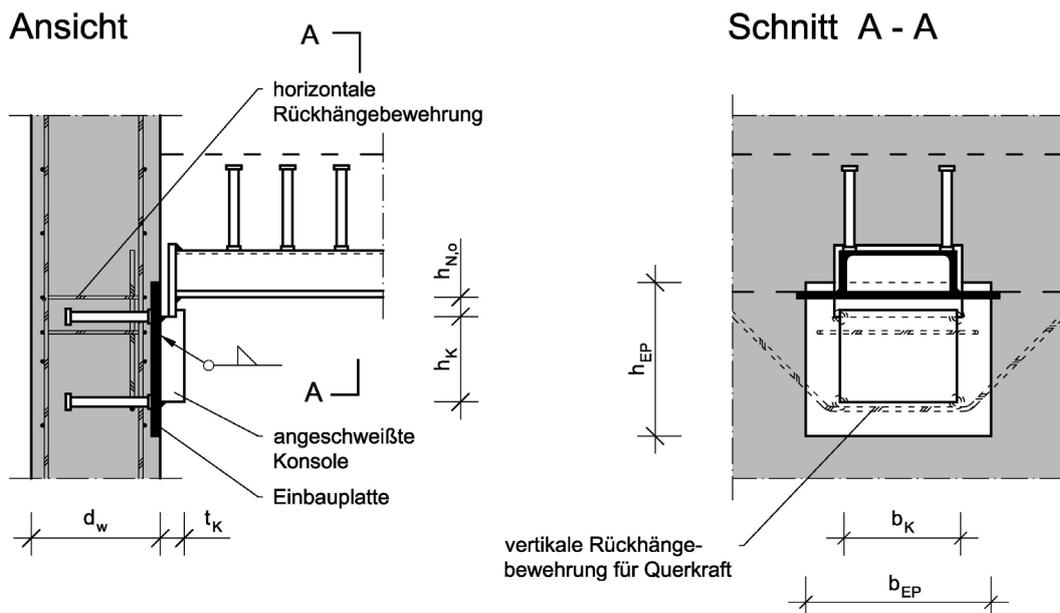


Abbildung 9.137: Lagerung an einer Stahlbetonwand mit Einbauteil und angeschweißter Knagge

Die Kraftausleitung aus dem Slim-Floor Träger geschieht über eine Stirnplatte oder direkte Lagerung des Hutprofils, siehe Abbildung 9.137.

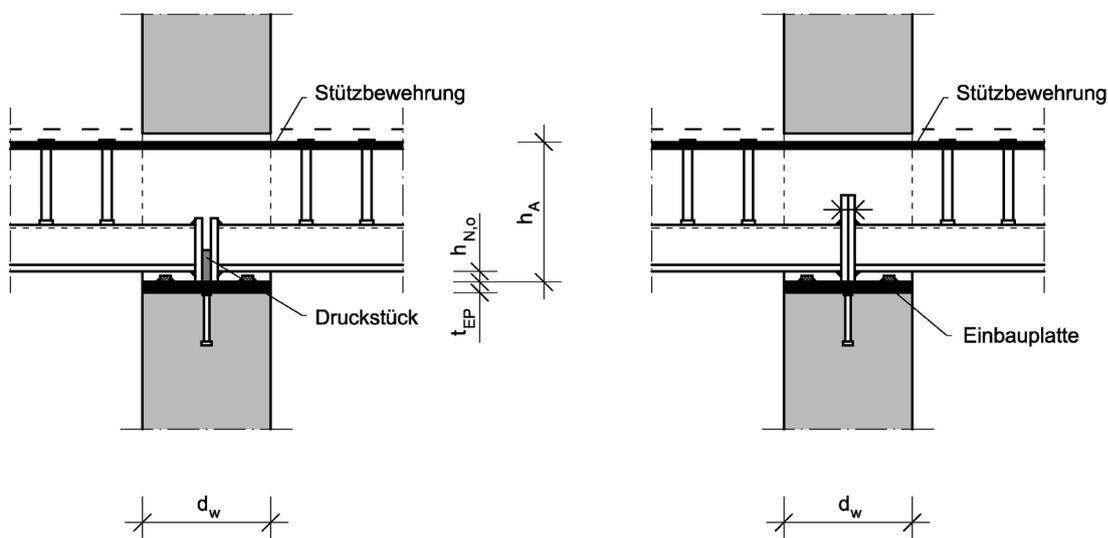
Die Kraftübertragung zwischen Wand und Träger sollte im mittleren Drittel der Wand erfolgen, um eine große Exzentrizität für die Wand zu vermeiden. Wegen der geringen Druckfestigkeit der Wände muss bei Verwendung von Stirnplatten zur Lastverteilung in der Regel die Wand mit einer Einbauplatte ausgeführt werden.

Alternativ zur Lagerung in einer Aussparung kann bei Stahlbetonwänden auch eine Konsole zum Einsatz kommen. Diese kann entweder anbetoniert oder an einer Einbauplatte angeschweißt werden. Bei kleineren Auflagerkräften können Betonkonsolen auch nachträglich mittels Rückbiege- oder Schraubbewehrung anbetoniert werden. Bei angeschweißten Konsolen wird die Auflagerkraft über die umlaufenden Schweißnähte der Konsole in die Einbauplatte und von dieser über Kopfbolzendübel, Blockdübel, angeschweißten Blechen, etc. in die Wand übertragen. Aus der exzentrischen Lasteinleitung entsteht oben an der Einbauplatte Zug, der durch eine entsprechende Bewehrung in der Wand aufgenommen werden muss.

9.4.2 Anschlusskonstruktion – Ausbildung einer Durchlaufwirkung

Wenn die Träger auf der Wand z. B. in einer Aussparung gelagert werden, kann eine Durchlaufwirkung sehr einfach durch Anordnung von Stützbewehrung und evtl. eines Druckstücks zwischen den Stirnplatten erreicht werden, siehe Abbildung 9.138. Alternativ zum Druckstück kann die Druckkomponente auch durch verbreiterte Stirnplatten und mit zwischenliegendem Verguss übertragen werden.

Durch Verwenden von großen Stirnplatten, die miteinander verschraubt werden, kann bereits im Bauzustand eine Durchlaufwirkung erreicht werden.



a) mit Druckstück

b) verschraubte Stirnplatten

Abbildung 9.138: Anschluss mit Durchlaufwirkung an Stahlbetonwand

Die gezeigten Anschlussbeispiele sollen beispielhaft die Vielfältigkeit möglicher Anschlüsse aufzeigen. Die Lösungen sind als allgemein gültige Beispiele anzusehen, die auf beliebige Slim-Floor Querschnitte angewendet werden können.

10 Beispiel einer Durchbiegungsberechnung

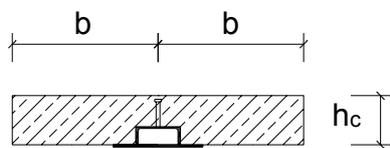
10.1 Allgemeines

Nachfolgend soll für einen Beispielträger die Durchbiegungsberechnung für die Berechnungsmodelle exemplarisch aufgezeigt werden. Als Querschnitt wird ein Slim-Floor Träger gewählt, für den unter vorgegebenen Belastungen die Durchbiegung ermittelt werden soll.

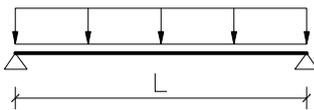
10.2 System und Querschnitt des Beispielträgers

In Abbildung 10.139 sind das System und der Querschnitt des Beispielträgers dargestellt.

Querschnitt :



System :



| | | | |
|----------------------------|-------|------|---|
| Dicke Betonplatte | h_c | 0,30 | m |
| Breite des Betongurtes | b | 2,50 | m |
| Länge des Verbundträgers | L | 7,00 | m |
| UPE Profil "UPE 270" | | | |
| Untergurtblech 470 x 12 mm | | | |

Abbildung 10.139: System und Querschnitt des SFT Trägers (Beispielrechnung)

Die Materialwerte werden für die Berechnung wie folgt angenommen:

Beton

| | | | |
|-----------------|-----------|--------|-------------------|
| Druckfestigkeit | f_{ck} | 29,5 | N/mm ² |
| Zugfestigkeit | f_{ctm} | 2,8 | N/mm ² |
| E-Modul | E_{cm} | 23.300 | N/mm ² |

Baustahl

| | | | |
|---------------|----------|---------|-------------------|
| Streckgrenze | f_{yk} | 355 | N/mm ² |
| Zugfestigkeit | f_{uk} | 510 | N/mm ² |
| E-Modul | E_a | 210.000 | N/mm ² |

Die Belastung wird für die Berechnung wie folgt angenommen:

| | | | |
|--------------|-------|-----|-------------------|
| Ausbaulast | g_k | 1,0 | kN/m ² |
| Verkehrslast | q_k | 7,5 | kN/m ² |

Für die Berechnung wird ein Eigengewichtsverbund angenommen. Somit wirken auf den Verbundquerschnitt des Slim-Floor Trägers folgende Lasten:

Eigengewicht

| | | | |
|--------------|-------|-------|-------------------|
| Beton | g_k | 36,86 | kN/m |
| Hutprofil | g_k | 0,79 | kN/m |
| Ausbaulasten | g_k | 1,00 | kN/m ² |

Verkehrslasten

| | | | |
|----------|-------|------|-------------------|
| Nutzlast | q_k | 7,50 | kN/m ² |
|----------|-------|------|-------------------|

Da für die Durchbiegung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit keine Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt werden, berechnet sich das charakteristische einwirkende Moment des Einfeldträgers zu **490,9 kNm**.

10.3 Durchbiegungsberechnung mit analytischen Berechnungsmodell

Die Berechnung der Durchbiegung mittels des analytischen Modells, siehe Abschnitt 6.2, liefert mit dem angegebenen Moment von 490,9 kNm eine Durchbiegungswert von 20,35 mm („M- κ -n“), unter der Berücksichtigung der Schubverformung aus Querkraft, die allein dem Stahlträgerprofil zugewiesen wird, eine Gesamtverformung in Trägermitte von 21,87 mm („M- κ -n*“).

Die diskreten Berechnungspunkte zur Erstellung der Momenten-Durchbiegungskurve sind wie folgt:

| | | |
|---------------------------|--------------|------------|
| Rissbildung: Rissmoment | $M_{Riss} =$ | 218,6 kNm |
| Beginn des Plastizierens: | $M_{el} =$ | 802,3 kNm |
| Träger ist vollplastisch: | $M_{pl} =$ | 984,5 kNm |
| Bruchzustand: | $M_{pl} =$ | 1046,1 kNm |

Der Verlauf der Verformung in Abhängigkeit des einwirkenden Momentes ist in der nachfolgenden Abbildung zu finden.

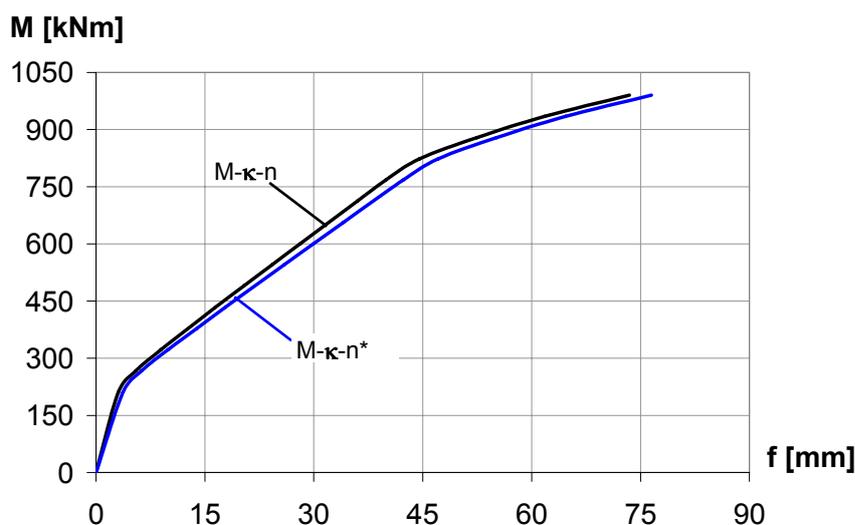


Abbildung 10.140: Durchbiegungsberechnung: analytisches Modell „M- κ -n“

10.4 Durchbiegungsberechnung nach dem elastischen Ansatz

Zur Berechnung der Durchbiegung nach dem elastischen Ansatz wird das Trägheitsmoment des Betons durch den Abminderungsfaktor α_c reduziert. Mit diesem reduzierten Wert kann über den elastischen Ansatz der Biegelehre die Verformung bestimmt werden.

Bestimmung der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand

$$b/L = 2,5 / 7 = 0,357$$

$$\rightarrow b_{m,S} / b = 0,5632 \quad \rightarrow b_{m,S} = 0,5632 \cdot 2,5 = 1,41 \text{ m}$$

$$\rightarrow b_{m,B} / b = 0,9315 \quad \rightarrow b_{m,B} = 0,9315 \cdot 2,5 = 2,33 \text{ m}$$

Für die Berechnung notwendige Querschnittswerte sind wie folgt:

Betonquerschnittswerte:

$$A_c = 8.460 \text{ cm}^2$$

$$I_c = 1.048.050 \text{ cm}^4$$

$$n_0 = 6,89 \text{ [-]}$$

$$A_{c,0} = 1.228 \text{ cm}^2$$

$$I_{c,0} = 152.112 \text{ cm}^4$$

Querschnittswerte Hutprofil:

$$A_a = 101,2 \text{ cm}^2$$

$$I_a = 1.705 \text{ cm}^4$$

$$h_a = 10,7 \text{ cm}$$

Elastische Querschnittswerte des Verbundquerschnitts:

$$a_{st} = 12,4 \text{ cm}$$

$$A_{i,0} = 1.329 \text{ cm}^2$$

$$z_{i,0} = 1,07 \text{ cm}$$

$$S_{i,0} = 1.308 \text{ cm}^3$$

$$I_{i,0} = 170.155 \text{ cm}^4$$

Zur Theorie und Berechnung der Querschnittswerte von Slim-Floor Trägern wird auf die Literaturquelle [Kuhlmann, Fries 2000] verwiesen.

Über den elastischen Verbundquerschnittswert sowie der Betonzugspannungen kann das Rissmoment M_{Riss} des Slim-Floor Trägers zu 214,4 kNm bestimmt werden. Dieser Wert unterscheidet sich vom Rissmoment des analytischen Berechnungsmodells dahingehend, dass beim analytischen Modell für jedes diskrete Trägerelement eine mittragende Breite für den Scheiben- und Biegezustand berechnet wird, beim elastischen Modell jedoch eine über die gesamte Trägerlängsrichtung konstante mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands bestimmt wird.

$$\alpha_{Mat} = \left(\frac{f_{ct}}{f_{ct,0}} \right)^{-0,133} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,0}} \right)^{0,148} \cdot \left(\frac{f_{ay}}{f_{ay,0}} \right)^{0,153}$$



mit

$$f_{ct} = 2,6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ct,0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_c = 25 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0} = 30,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ay} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ay,0} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_{QS} = \left(\frac{I_{c,0}}{I_{i,0}} \right)^{0,06} \cdot \left(\frac{S_{i,0} \cdot a_{St}}{I_{i,0}} \right)^{0,511} \cdot \left(\frac{z_{i,0}}{a_{St}} \right)^{0,118} \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^{-0,129}$$

mit

$$I_{c,0} = 152.112 \text{ cm}^4$$

$$I_{i,0} = 170.155 \text{ cm}^4$$

$$S_{i,0} = 1.308 \text{ cm}^3$$

$$a_{St} = 12,4 \text{ cm}$$

$$z_{i,0} = 1,07 \text{ cm}$$

$$b = 2,5 \text{ m}$$

$$L = 7,0 \text{ m}$$

$$\alpha_M = 1,371 \cdot \left(1 - \frac{M_{Riss}}{M} \right)^{-0,568}$$

mit

$$M_{Riss} = 214,4 \text{ kNm}$$

$$M = 490,9 \text{ kNm}$$

$$\text{Reduktionsfaktor } \alpha_c = \alpha_{Mat} \cdot \alpha_{QS} \cdot \alpha_M = 0,857 \cdot 0,218 \cdot 1,902 = 0,356$$

Mit der Bestimmung des Reduktionsfaktors α_c kann nun das effektive Trägheitsmoment des Verbundträgers berechnet werden:

$$\begin{aligned} I_{i,eff} &= I_a + \alpha_c \cdot (I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}) \\ &= 60.940 \text{ cm}^4 = 0,36 \cdot I_{i,0} \end{aligned}$$

Die Mittendurchbiegung des Trägers kann nun mit Hilfe des effektiven Trägheitsmomentes $I_{i,eff}$ berechnet werden:

$$\begin{aligned} f &= (5 \cdot q \cdot L^4) / (384 \cdot E_a \cdot I_{i,eff}) \\ \text{mit } q &= 80 \text{ kN/m} \\ L &= 7,0 \text{ m} \\ E_a &= 210.000 \text{ N/mm}^2 \\ I_{i,eff} &= 60.940 \text{ cm}^4 \\ &= 1,953 \text{ cm} = 19,53 \text{ mm} = L / 358 \end{aligned}$$

10.5 Nicht-lineare Berechnung (Berechnungsstufe 1 und 2)

Die Berechnungsstufe 2 weist im Vergleich zur Stufe 1 eine Vereinfachung bei der Berechnung der mittragenden Breite auf. Der Berechnungsterm verkürzt sich wie in Abschnitt 6.5.4 dargestellt nur auf den Anteil der Momentenausnutzung, die Material- und Geometrieterme fallen hierbei weg.

Aus der iterativen Berechnung heraus lässt sich der Abminderungsfaktor $b_{m,v}$ zu 0,44 und damit die mittragende Breite, bei einem einwirkenden Moment von 490,9 kNm, zu 3,65 m für die Berechnungsstufe 2 bestimmen.

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass bei der Bestimmung von $b_{m,v}$ auch der elastische Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v,0}$ benötigt wird, der (als eine Möglichkeit) über einen Vergleich der Trägheitsmomente (bzw. der mittragenden Breiten) aus Scheiben- und Biegetragwirkung auf der einen Seite und einer konstanten mittragenden Breite auf der anderen Seite zurückgerechnet werden kann.

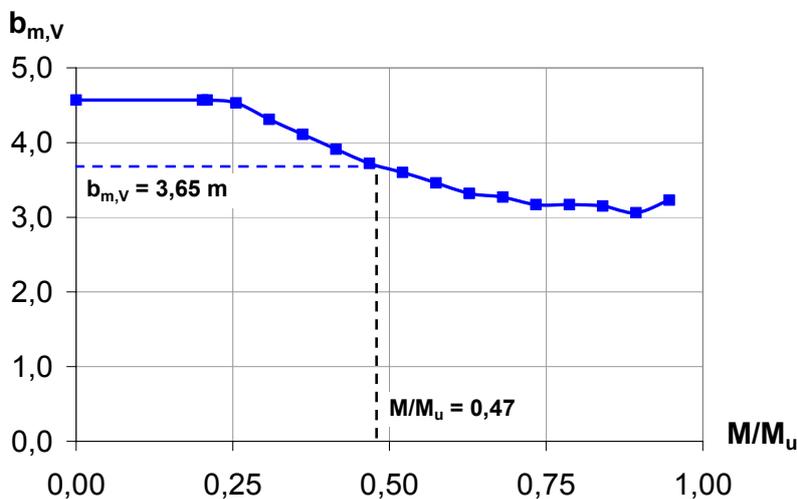


Abbildung 10.141: Verlauf der mittragende Breite in Abh. des einwirkenden Momentes

Mit der hier ermittelten verformungsbezogenen mittragenden Breite kann nun über die Integration der Krümmung die Verformung bestimmt werden. Der Slim-Floor Träger verformt sich hierbei um 20,7 mm.

Auf die einzelnen Berechnungsschritte des iterativen Verfahrens wird in diesem Beispiel nicht näher eingegangen.

10.6 Berechnung nach [EN 1994-1-1] bzw. [DIN V 18800-5]

Die gesamte mittragende Breite nach [EN 1994-1-1] bzw. [DIN V 18800-5] berechnet sich zu 1,75 m ($L/4$), die konstant über die gesamter Trägerlänge angesetzt wird. Die nicht-lineare Berechnung des Slim-Floor Trägers liefert für das einwirkende Moment eine Durchbiegung von 31,65 mm.

Die diskreten Berechnungspunkte zur Erstellung der Momenten-Verformungskurve sind wie folgt:

| | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Rissbildung: Rissmoment | $M_{\text{Riss}} = 96,0 \text{ kNm}$ |
| Beginn des Plastizierens: | $M_{\text{el}} = 708,1 \text{ kNm}$ |
| Träger ist vollplastisch: | $M_{\text{pl}} = 872,9 \text{ kNm}$ |
| Bruchzustand: | $M_{\text{pl}} = 887,1 \text{ kNm}$ |

10.7 Vergleich der Ergebnisse

Die einzeln berechneten Durchbiegungen des Beispielträgers unter der angegebenen Belastung sind in der nachfolgenden Tabelle nochmals zusammengefasst. Die Abweichungen der entwickelten Berechnungsmodelle im Vergleich zum analytischen Berechnungsmodell liegen zwischen -4 und +1,7%.

Die Berechnung nach Norm [EN 1994-1-1] bzw. [DIN V 18800-5] überschätzt die Verformung um 55%. Das bedeutet, dass nach Norm die zulässige Durchbiegung von $l/300$ nicht eingehalten ist, da diese bei einer Trägerspannweite von 7,0 m bei 2,3 cm liegt.

Tabelle 10.16: Zusammenstellung der Verformungswerte (Beispielrechnung)

| | | Berechnung der Durchbiegung „M-k-n“ | Berechnung der Durchbiegung „M-k-n**“ | Berechnung der Durchbiegung „M-k-b _{m1} (Stufe 1)“ | Berechnung der Durchbiegung „M-k-b _{m1} (Stufe 2)“ | Berechnung der Durchbiegung „M-k-el“ | Berechnung der Durchbiegung „M-k-EC4/DIN18800-5“ |
|---|------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|---|--------------------------------------|--|
| Verformung | [mm] | 20,35 | 21,87 | 19,79 | 20,70 | 19,53 | 31,65 |
| Abweichung zum analyt. Modell „M-k-n“ | [%] | [-] | + 7% | - 2,8% | + 1,7% | - 4,0% | + 55% |
| *) Berücksichtigung der Schubverformung aus Querkraft | | | | | | | |

Die nachfolgende Abbildung 10.142 zeigt die Verformungsberechnungen für den Träger in Abhängigkeit des einwirkenden Momentes. Es ist schön zu erkennen, dass die Berechnung nach Norm durchweg die Durchbiegungen überschätzen. Ebenso ist zu erkennen, dass für den linear-elastischen Ansatz die Berechnung im Bereich bis ~ 70 % der Trägermomentenragfähigkeit die Kurve nahe dem analytischen Modell liegt. Durch das Plastizieren des Stahlträgers – erkennbar am zweiten Knick in den Verformungskurven – kann die Verformung mittels des elastischen Ansatzes nicht mehr korrekt bestimmt werden.

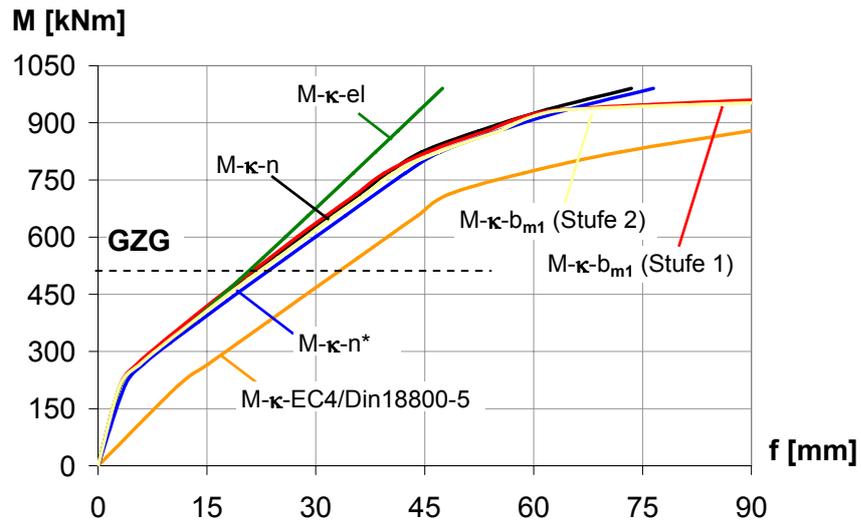


Abbildung 10.142: Vergleich der Durchbiegungen (Beispielrechnung)

11 ZUSAMMENFASSUNG

11.1 Allgemeines

Slim-Floor Träger und Verbundträger bieten durch die schnelle Bauweise, die schnelle Montage, die Bauzeitverkürzung und die mögliche Verwendung von Halbfertigteilen viele Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbetonkonstruktionen.

Durch die Verwendung eines Stahlprofils lässt sich für diese schlanken und niedrigen Bauglieder eine sehr hohe Tragfähigkeit erreichen.

Durch die aktuell geltenden Normen [EN 1994-1-1] und [DIN V 18800-5] kann jedoch ihre Wirtschaftlichkeit nicht voll ausgenutzt werden, so dass sie im Vergleich zu Stahlbetonkonstruktionen überdimensioniert werden müssen. Dies beruht auf für Slim-Floor Träger und niedrige Verbundträger nachteilige Annahmen der mittragenden Breite, die sich vor allem bei der Durchbiegungsberechnung dieser schlanker Konstruktionen bemerkbar macht. Während bei normal hohen Verbundträgern die Annahmen für die mittragende Breite einen kaum bemerkbaren Einfluss haben, spielt die Betontragfähigkeit der schlanken Slim-Floor Träger eine entscheidende Rolle.

Die bestehenden Regelungen der Anwendungsnormen des Verbundbaus sind dabei im Hinblick auf die Verformungsberechnung konservativ.

Dies schränkt die Wettbewerbsfähigkeit erheblich ein und wirkt sich für die Verbreitung dieser Bauweisen nachteilig aus.

Aufgabe des hier durchgeführte Forschungsvorhaben war es, die Tragwirkung genauer zu. Es hatte zum Ziel, ein Bemessungs- und Berechnungskonzept für Slim-Floor Träger zu entwickeln, bei dem das veränderte Tragverhalten berücksichtigt wird.

11.2 Analytische Modellbildung

Slim-Floor Träger und niedrige Verbundträger weisen im Vergleich zu normal hohen Verbundträgern ein verändertes Tragverhalten auf, da bei diesen der Betontraganteil des Gurtes eine nicht vernachlässigbare Rolle spielt. Die Traganteile lassen sich für den Betongurt in einen Scheiben- und Biegezustand unterteilen. Da in den derzeitigen Normen für den Verbundbau nur der Scheibenzustand berücksichtigt wird, analytische Untersuchungen aber zeigen, dass der Biegetraganteil größer als der Scheibentraganteil ist, wird die mittragende Breite der Betongurte unterschätzt. Die Berücksichtigung des Biegezustands führt damit im Vergleich zum derzeit üblichen Vorgehen auf eine größere mittragende Breite.

Für normal hohe Verbundträger hat diese Vereinfachung für die Verformungsberechnung keinen entscheidenden Einfluss, so dass die Normung hier eine ausreichend genaue Annahme trifft. Für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger jedoch ist der Traganteil des Betongurtes im Verhältnis zum Gesamttraganteil weit aus größer, so dass die Berechnung der Verformung nach Norm ungünstige Werte liefert. Das Tragverhalten dieser schlanken Träger wird maßgeblich von der Rissbildung des Betongurtes und dem damit einhergehenden Steifigkeitsverlust beeinflusst.

Aus diesem Grund wurde ein analytisches Modell entwickelt. Mit Hilfe der nicht-linearen Berechnung mittels M- κ -Verfahren und den aus der linear-elastischen Berechnung bekannten mittragenden Breiten für den Scheiben- und Biegezustand ist es nun möglich, die Rissbildung zu berücksichtigen und gleichzeitig das Tragverhalten von niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor in einem Modell abzubilden.

Das Modell liefert im Vergleich zu den Versuchsergebnissen eine gute Übereinstimmung, ist jedoch durch die iterative Berechnung der M- κ -Linie verhältnismäßig aufwändig.

Zur Vereinfachung der Berechnung wurde daher zusätzlich ein modifizierter linear-elastischer Ansatz für die Verformungsberechnung entwickelt, der mit so genannten effekti-

ven Steifigkeiten die Rissbildung des Betons berücksichtigt und somit für die Praxis eine einfach handhabbare Berechnungsformel bereitstellt.

Anhand einer umfangreichen Parameterstudie konnte der Berechnungsansatz abgeleitet werden, der eine wirklichkeitsnahe Durchbiegungsberechnung von niedrigen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern ermöglicht. Die durch den Ansatz ermittelten Verformungswerte sind im Allgemeinen kleiner als die auf Basis der bestehenden Normenregelung berechneten Verformungen.

11.3 Experimentelle Ergebnisse

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Verbundträgerversuche mit Slim-Floor Trägerquerschnitten unter Berücksichtigung praxisüblicher Randbedingungen durchgeführt.

Ziel sollte hierbei sein, die analytischen Untersuchungen zu verifizieren und das Tragverhalten an Versuchsträgern zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde an den Trägern eine Vielzahl von Messungen durchgeführt. Für jeden Versuchsträger wurde ein Parameter variiert, so dass die Bandbreite möglicher Einflussfaktoren näher untersucht werden konnte. Die Ergebnisse der Versuche wurden im Anschluss mit den analytischen Modellen verglichen bzw. die Modelle dadurch verifiziert.

Hierbei zeigte sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen Ergebnisse aus den Versuchen mit den berechneten Ergebnissen der Berechnungsmodelle nachgewiesen werden.

11.4 Ausblick

Das Verformungsverhalten von Slim-Floor Träger und niedriger Verbundträger wird von einer Vielzahl Faktoren beeinflusst, die teils noch nicht erforscht sind. Im Rahmen dieser Arbeit haben die Untersuchungen zur mittragenden Breite hierfür einen Teil geleistet.

Die Untersuchungen beschränkten sich hierbei auf Slim-Floor Träger als Einfeldträger. Die Auswertung des Versuchsträgers VT 6 (siehe Abschnitt 5.8.6) zeigt aber auch, dass im Zusammenhang mit dieser Bearbeitung noch einige Fragen bleiben, wie z. B. die Einspannwirkung und Einspanngrad von Verbundträgern an der Stütze, sowie das generelle Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Träger als Durchlaufträger.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen hierbei ganz klar, dass wegen der Überschätzung der Verformung nach bestehendem Normenstand eine wirtschaftliche Bemessung nicht möglich ist und dadurch ein Wettbewerbsnachteil für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger im Vergleich zu Stahlbetonkonstruktionen entsteht.

Die daraus ermittelten Berechnungsmodelle sollen eine wirtschaftliche Bemessung und Berechnung von Slim-Floor Träger ermöglichen und die Verbreitung dieser Bauweise fördern.

Dies, so hoffen die Verfasser, führt zu einer Erhöhung der Marktchancen von kleinen und mittleren Unternehmen im Stahlbau.



11.5 Danksagung

Die Autoren möchten sich nochmals bei der *Stiftung Industrieforschung* (Köln) für die Förderung dieses Projektes bedanken.

Ebenso gilt ein besonderer Dank für die Spenden folgender Firmen und Ingenieurbüros:

Fa. Haller Industriebau GmbH (Villingen-Schwenningen),
Fa. Köster & Co. GmbH (Ennepetal)
Harrer Ingenieure GmbH, Beratende Ingenieure VBI (Karlsruhe),
Leonhardt, Andrä und Partner GmbH, Beratende Ingenieure VBI (Stuttgart),
Ingenieurbüro Kuhlmann - Gerold - Kraus – Eisele (Nellingen),
Ingenieurgruppe Bauen (Karlsruhe),
Spannverbund GmbH (Waldems),
stahl+verbundbau gmbh (Dreieich),

Für die Versuchsdurchführung wurden wir zusätzlich mit Material- und Sachspenden durch folgende Firmen unterstützt. Hierfür gilt ebenso ein besonderer Dank.

| | |
|--|--|
| Fa. Haller Industriebau GmbH (Villingen-Schwenningen) | Spende der Flachstähle und Zusammen- schweißen der Hutprofile |
| Fa. Köster & Co. GmbH (Ennepetal) | Spende der Kopfbolzendübel und Anschwei- ßen dieser |
| Fa. Peiner Träger GmbH (Peine) | Spende der Hutprofile |

Ebenso gilt ein Dank den Mitarbeitern des Otto-Graf-Instituts der Universität Stuttgart für die Durchführung der Versuche.

12 Literaturverzeichnis

Verwendete und weiterführende Literatur:

- [Albrecht 1976] Albrecht, G.: Beitrag zur mittragenden Breite von Plattenbalken im elasto-plastischen Bereich, Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 76-7, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität Bochum, 1976.
- [Amadio et al 2004] Amadio, C., Fedrigo, C., Fragiaco, M., Macorini, L.: Experimental evaluation of effective width in steel-concrete composite beams. Journal of Constructional Steel Research 60 (2004), pp 199-220.
- [Amadio, Fragiaco 2002] Amadio, C., Fragiaco, M.: Effective Width Evaluation for Steel-Concrete Composite Beams, Journal of Constructional Steel Research 58 (2002), Page 373-388.
- [Arbed 1997] Arbed: Vorbemessungstabellen IFB- bzw. SFB-Träger, Esch-sur-Alzette, Luxemburg, Firmenschrift, 1997.
- [Baehre, Pepin 1995] Baehre, R., Pepin, R.: Flachdecken mit Stahlträgern in Skelettbauten, Bauingenieur 70 (1995), Heft 2, Seite 65-71.
- [Bauberatung Stahl 1996] Bauberatung Stahl: Dokumentation 605, Geschoßbau in Stahl, Flachdeckensysteme, 1996.
- [Baumgärtner et al 1997] Baumgärtner, H., Krampe, A., Muess, H., Sauerborn, N.: Die Stahlverbundbauweise - Erfolgreiche Anwendung bei der Goethe Galerie in Jena, Bauingenieur 72 (1997), Seite 67-74.
- [Bode 1998] Bode, H.: Euro-Verbundbau, Konstruktion und Berechnung. 2. Auflage, Werner Verlag, 1998.
- [Bode et al 1997] Bode, H., Stengel, J., Sedlacek, G., Feldmann, M., Müller, C.: Untersuchung des Tragverhaltens bei Flachdecken-Systemen (Slim-Floor Konstruktionen) mit verschiedener Ausbildung der Platten und verschiedener Lage der Stahlträger, Forschungsbericht P 261, Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, 1997.
- [Brendel 1960] Brendel, G.: Die mitwirkende Plattenbreite nach Theorie und Versuch, Beton- und Stahlbetonbau 55 (1960), Seite 177-185.
- [BS 5400-5] BS 5400-5: Steel, concrete and composite bridges; Part 5: Code of practice for design of composite bridges. British Standards Institution, 1979.
- [Chawalla 1936] Chawalla, E.: Die Formeln zur Berechnung der „voll mittragenden Breite“ dünner Gurt- und Rippenplatten, Stahlbau 9 (1936), Heft 10, Seite 73-78.
- [DIBt 2005] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassungsbescheid Z-26.2-48; Slim-Floor Träger mit UPE-Profilen, Peiner Träger GmbH, 27. Juli 2005.
- [DIN 1045-1] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Juli 2001.
- [DIN 1048] DIN 1048, Teil 1: Prüfverfahren für Beton; Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper, Dezember 1978.



- [DIN 1075] DIN 1075: Betonbrücken; Bemessung und Ausführung, April 1981.
- [DIN EN 10002] DIN EN 10002-1: Prüfung metallischer Werkstoffe, Zugversuch. Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur), Juli 1998.
- [DIN EN 1993-1-1] DIN EN 1993-1-1: Eurocode 3, Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Juli 2005.
- [DIN V 18800-5] DIN V 18800, Teil 5: Stahlbauten; Verbundtragwerke aus Stahl und Beton, Bemessung und Konstruktion, August 2004.
- [DIN V ENV 1992-1-1] DIN V ENV 1992-1-1: Eurocode 2, Teil 1-1: Planung von Stahlbeton- und Spannbeton-tragwerken; Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Juni 1992.
- [DIN V ENV 1992-2] DIN V ENV 1992-2: Eurocode 2, Teil 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbeton-tragwerken; Betonbrücken, Oktober 1997.
- [ECCS 1976] ECCS European Convention for Constructural Steelwork COMMITTEE 8: Manual on Stability of Steel Structures. June 1976.
- [ECCS 1977] ECCS European Convention of Constructural Steelwork: Stability of Steel Structures. Final Report, Second International Colloquium, Liège 13th – 15th April 1977.
- [EN 1994-1-1] EN 1994-1-1: Eurocode 4, Teil 1-1: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau, 3. September 2004.
- [EN 1994-2] prEN 1994-2: Eurocode 4, Teil 2: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken, 10. November 2004.
- [Feldmann et al 1998] Feldmann, M., Müller, C., Stengel, J.: Zum Tragverhalten von Stahl-flachdecken. Bauingenieur 73 (1998), Seite 427-434.
- [Fries 2001] Fries, J.: Tragverhalten von Flachdecken mit Hutprofilen, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2002-1, Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2001.
- [Grages, Lange 2004] Grages, H., Lange, J.: Deflection of Steel Composite Beams in real Structures as basis for the Calculation of the Serviceability of Buildings. Composite Construction V, July 18-23, 2004, Kruger National Park, South Africa.
- [Grasser 1991] Grasser, E., Thielen, G.: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 240, 3. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [Grasser 1997] Grasser, E.: Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045 (Ausgabe Dez. 1978), Teil 1: Biegung mit Längskraft, Schub, Torsion, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 220, 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, 1979.
- [Grasser, Moosecker 1982] Grasser, E., Moosecker, W.: Hilfsmittel zur näherungsweise Bestimmung der mitwirkenden Breite von Plattenbalken im Stahlbetonbau, Beton- und Stahlbetonbau, Band 77 (1982), Heft 6, Seite 164-167.



- [Grünberg 1978] Grünberg, J.: Spannungszustände und mitwirkende Plattenbreite eines Stahl-Beton-Plattentragwerks im gerissenen Zustand. Beton- und Stahlbetonbau 53 (1978), Seite 177-181.
- [Haas 1999] Haas, U.: Wirtschaftlichkeitsvergleich von Slim-Floor Decken mit konventionellen Flachdecken, Diplomarbeit, Nr. 1999-12X, Institut für Konstruktion und Entwurf I, Universität Stuttgart, 1999.
- [Haensel 1975] Haensel, J.: Praktische Berechnungsverfahren für Stahlträgerverbundkonstruktionen unter der Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse zum Betonzeitverhalten, Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 75-2, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1975.
- [Hanswille 1986] Hanswille, G.: Zur Rissbreitenbeschränkung von Verbundträgern. Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 86-1, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1986.
- [Hanswille, Schäfer 2005] Hanswille, G., Schäfer, M.: Verbundtragwerke aus Stahl und Beton, Bemessung Konstruktion - Kommentar zu DIN V 18800-5, Ausgabe November 2004. Stahlbaukalender 2005, Verlag Ernst & Sohn, 2005.
- [Hasslacher 2001] Haßlacher, S.: Die mittragende Breite von Betongurten für Biegebeanspruchung, Diplomarbeit, Nr. 2001-38X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2001.
- [Heft 525] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Erläuterungen zu DIN 1045-1. Heft 525, 1. Auflage 2003, Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [Hilsdorf, Reinhardt 1998] Hilsdorf, H. K., Reinhardt, H.-W.: Beton. Betonkalender 1998, Verlag Ernst & Sohn, 1998.
- [Hofmann, Ramm 1993] Hofmann, T. J., Ramm, E.: Erfassung der mittragenden Breite durch eine verfeinerte Balkentheorie, Festschrift Udo Vogel, Institut für Baustatik, Universität Karlsruhe, Seite 107-125, 1993.
- [Holtkamp 1991] Holtkamp, H. J.: Zur mittragenden Breite von Verbundträgern im Bereich negativer Momente, Dissertation, Mitteilung Nr. 91-3, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1991.
- [Huber, Obholzer 1999] Huber, G., Obholzer, A.: Verbundflachdecken beim Millenium Tower, Stahlbau 68 (1999), Heft 8, Seite 623-630.
- [Karmann von 1924] Karman von, Th.: Die mittragende Breite, August-Föppel-Festschrift, Springer Verlag, Berlin, 1924, S. 114-127.
- [Kindmann, Xia 2000] Kindmann, R., Xia, G.: Erweiterung der Berechnungsverfahren für Verbundträger, Stahlbau 69 (2000), Seite 170-183.
- [Koepcke, Denecke 1967] Koepcke, W., Denecke, G.: Die mitwirkende Breite der Gurte von Plattenbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 192, Ernst Verlag, Berlin, 1967.
- [Kuhlmann 1998] Kuhlmann, U.: Neues aus der Verbundbaunormung. VPI-Arbeitstagung-Freudenstadt, Freudenstadt, Juni 1998.
- [Kuhlmann et al 2000] Kuhlmann, U., Fries, J., Leukart, M.: Bemessung von Flachdecken mit Hutprofilen, Stahlbau-Kalender 2000, Verlag Ernst & Sohn, 2000.
- [Kuhlmann, et al 2003] Kuhlmann, U., Rieg, A., Nakajima, S.: Numerical Studies on the Effective Widths of Composite Girders Considering Cracking Behaviour, In: Matsui, S., Nakai, H. (Eds.), Proceedings of the 5th Japa-



- nese-German Joint Symposium on Steel and Composite Bridges, 9-12 September 2003, Osaka University, Japan.
- [Kuhlmann, et al 2006] Kuhlmann, u., Konrad, M., Hauf, G.: Schubtragfähigkeit von Slim-Floor Trägern, Forschungsvorhaben DIBt Nummer: ZP 52-5-17.12-1109/04, Zwischenbericht, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2006
- [Kuhlmann, Fries 1998a] Kuhlmann, U., Fries, J.: Slim-Floor Deckenträger mit Hutprofil, Fachseminar und Workshop, Verbundbau 2, FH München und Bauen mit Stahl e.V. München, 1998.
- [Kuhlmann, Fries 1998b] Kuhlmann, U., Fries, J.: Slim-Floor Deckenträger mit Hutprofil, Fachseminar und Workshop, Verbundbau 2, FH München und Bauen mit Stahl e.V. München, 1998.
- [Kuhlmann, Fries 1999] Kuhlmann, U., Fries, J.: Zur Anwendung von Hutprofilen mit Stanzdübeln. Festschrift 60. Geburtstag Prof. Tschemmerneegg, Institut für Stahlbau, Holzbau und Mischbautechnologie, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Seite 491-507, 1999.
- [Kuhlmann, Fries 2000] Kuhlmann, U., Fries, J., Leukart, M.: Bemessung von Flachdecken mit Hutprofilen, Stahlbau-Kalender 2000, Verlag Ernst & Sohn, 2000.
- [Kuhlmann, Fries 2001a] Kuhlmann, U., Fries, J.: Optimierung der Bemessung von deckengleichen Verbundträgern in Hutform, Schlußbericht, AiF-Forschungsvorhaben 12017 N, Institut für Konstruktion und Entwurf I, Universität Stuttgart, 2001.
- [Kuhlmann, Fries 2001b] Kuhlmann, U., Fries, J., Rieg, A.: Composite Girders with Reduced Height, Connections between Steel and Concrete, RILEM Proceedings PRO 21, RILEM Publications S.A.R.L., Page 1371-1381, 2001.
- [Kuhlmann, Fries 2002] Kuhlmann, U., Fries, J.: Entwicklung von Bemessungstabellen für Slim-Floor Träger mit UPE-Profilen, Forschungsarbeit, Institut für Konstruktion und Entwurf I, Universität Stuttgart, Förderung durch Salzgitter AG, 2002.
- [Kuhlmann, Rieg 2003] Kuhlmann, U.; Rieg, A.: Flachdecken mit Slim-Floor Profilen. In: VDI-Gesellschaft Bautechnik (Hrsg.), Stahlbetondecken mit Vorspannhilfe nach DIN 1045-1, Fachseminar 21. Oktober 2003, Stuttgart.
- [Kuhlmann, Rieg 2004a] Kuhlmann, U., Rieg, A.: Mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13460 N/1, Schlussbericht, Nr. 2004-46X Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2004.
- [Kuhlmann, Rieg 2004b] Kuhlmann, U., Rieg, A.: Flachdecken mit Slim-Floor Profilen, Jahrbuch 2004, Bautechnik, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Bautechnik (VDI-Bau), VDI-Verlag GmbH, 2004.
- [Lange 2005] Lange, J.: Flachdecken in Stahlbauweise - Bemessung von Randträgern. Stahlbau 74 (2005), Seite 580-586.
- [Langendock van 1958] van Langendock, T.: Die Berechnung der Plattenbalken und Verbundträger, Die Bautechnik 35 (1958), Heft 12, S. 467-474.
- [Lawson, Leskelä 1996] Lawson, R., Leskelä, M.: Slim Floor Construction. Structural Engineering International 1996, Heft 2, Seite 122-126.
- [Lawson, Leskelä 1996] Lawson, M., Leskelä, M.: Slim Floor Construction, Structural Engi-



- neering International, 2/96, page 122-127
- [Lenzen et al 1999] Lenzen, K., Kuhlmann, U., Fries, J.: Slim-Floor Deckenträger mit UPE-Profilen. FRILLO-Magazin 1/99, Friedrich & Lochner GmbH, Seite 53-56.
- [Leskelä 1997] Leskelä, M.: Slim Floors - The Scandinavian Approach. In: Bode, H., Ramm, W., Wittek, U., Schmackpfeffer, H.: Beiträge zur Fachtagung „Verbundkonstruktionen. Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung“. 24.-25.07.1997, Universität Kaiserslautern.
- [Leskelä 2000] Leskelä, M.: Shallow Floor Integrated Beams and their Components: Comparison of Behavior. In: Hajjar, J., Hosain, M., Easterling, W., Shahrooz, B. (Eds.): Proceedings of the conference „Composite Construction in Steel and Concrete IV“, May 28 - June 2, 2000, Banff, Canada.
- [Loo-Ywe-Chaye 1986] Loo-Yew-Chaye: Effective Flange Width Formulas for T-Beams, Concrete International, Design and Construction, Band 8 (1986), Heft 2, Seite 40-45.
- [Lu, Mäkeläinen 1996] Lu, M., Mäkeläinen, P.: Slim Floor Developments in Sweden and Finland, Structural Engineering International, 1996, Heft 2, Seite 127-129.
- [Lu, Mäkeläinen 1996] Lu, X., Mäkeläinen, P.: Slim Floor Developments in Sweden and Finland, Structural Engineering International, 2/96, page 127-129
- [Manleitner 2000] Manleitner, S.: Bestimmungen; DIN 1045-1 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Betonkalender 2000, Verlag Ernst & Sohn, 2000.
- [Marguerre 1952] Marguerre, K.: Über die Beanspruchung von Plattenträgern, Stahlbau 61 (1952), Seite 129-132.
- [Metzer 1929] Metzer, W.: Die mittragende Breite, Luftfahrtforschung, Heft 4, 1929, Seite 1-20.
- [Muess 1996] Muess, H.: Interessante Tragwerkslösung im Verbund, Stahlbau 65 (1996), Heft 10, Seite 349-355.
- [Müller, Feldmann 1997] Müller, C., Feldmann, M.: Flachdecken in Stahl- und Stahlverbundbauweise, 10. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau, RWTH Aachen, 4/1997, Seite 9-14.
- [Nakajima 2003] Nakajima, S.: Definition of Effective Widths for Composite Girders based on Numerical Studies considering the Cracking Behaviour, Master Thesis, Nr. 2003-32X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2003.
- [Ožbolt 1999] Ožbolt, J.: MASA – MACROSCOPIC SPACE ANALYSIS, Bericht zur Beschreibung des FE-Programms MASA, Institute for Construction Materials, University of Stuttgart, 1999.
- [Ožbolt 2001] Ožbolt, J., Li, Y., Kožar, I.: Microplane Model for Concrete with Relaxed Kinematic Constraint. International Journal of Solids and Structures 38, Elsevier Science Ltd., 2001, pp 2683-2711.
- [Ožbolt et al 1999] Ožbolt, J., Mayer, U., Vocke, H., Eligehausen, R.: Verschmierte Rissmethode, Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Heft 10, Seite 403-412.
- [Petersen 2003] Petersen, C.: Stahlbau; Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 3. Auflage, Verlag Friedr. Vieweg &



- Sohn, 2003.
- [Rieg 1998] Rieg, A.: Kriechen und Schwinden bei Verbundträgern mit niedriger Bauhöhe, Diplomarbeit, Institut für Konstruktion und Entwurf I, Universität Stuttgart, 1998.
- [Rieg 2004 a] Rieg, A.: Effective Width of Composite Girders with Reduced Height, In: Walraven, J., Blaauwendraad, J., Scarpas, T., Snijder, B. (Eds.), Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, 16-19 Juni 2004, Delft, Niederlande.
- [Rieg 2004 b] Kuhlmann, U., Rieg, A.: Mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger, Schlußbericht, AiF-Forschungsvorhaben, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2004.
- [Rieg 2006] Rieg, A.: Verformungsbezogene mittragende Breite von niedrigen Verbundträgern. Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Juni 2006.
- [Rieg, Hauf 2006] Rieg, A., Hauf, G.: Verformungsbezogene mittragende Betongurtbreite von Flachdecken mit Slim-Floor Profilen, In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.), 46. DAfStb-Forschungskolloquium, Forschungsbericht 2006, S. 197-208.
- [RiLi Stahlverbundträger] Richtlinien für Stahlverbundträger: Richtlinie für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern, März 1981.
- [Roik et al 1999] Roik, K., Bergmann, R., Haensel, J., Hanswille, G.: Verbundkonstruktionen - Bemessung auf der Grundlage des Eurocode 4 Teil 1. Betonkalender 1999, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
- [Rose 1965] Rose, E. A.: Ein weiterer Beitrag zur Berechnung der mitwirkenden Breite bei Plattenbalken, Bautechnik 42 (1965), Seite 65-71.
- [Rybinski 2000] Rybinski, M.: Erfassung der materiellen Nichtlinearität von Stahlbetongurten bei Verbundträgern. Diplomarbeit, Nr. 2000-25X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2000.
- [Sattler 1959] Sattler, K.: Theorie der Verbundkonstruktionen, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1959, Band I und II.
- [Schäfer 2005] Schäfer, M.: Zum Rotationsnachweis teiltragfähiger Verbundknoten in verschieblichen Verbundrahmen. Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2005-1, Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2005.
- [Schlaich, Schäfer 1997] Schlaich, J., Schäfer, K.: Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau. Vorlesungsmanuskript, Institut für Konstruktion und Entwurf II, Universität Stuttgart, 1997, unveröffentlicht.
- [Schmidt, Born 1978] Schmidt, H., Born, W.: Die Mitwirkung Breiter Gurte In Balkenbrücken mit veränderlichem Querschnitt, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1978.
- [Schmidt, Peil 1976] Schmidt, H., Peil, U.: Berechnung von Balken mit breiten Gurten, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1976.
- [Schröder, Stritzke 1978] Schröder, S., Stritzke, J.: Neue Untersuchungen zur mittragenden Breite von Plattenbalken, Bauplanung - Bautechnik, Band 32 (1978), Heft 4, Seite 176-180.
- [Sedlacek, Bild 1990] Sedlacek, G., Bild, S.: Vorgehensweise bei der Ermittlung der mit-



- tragenden Breite, Bauingenieur 65 (1990), Seite 551-562.
- [Severn 1964] Severn, R. T.: The effective width of T-beams, Magazine of Concrete Research (Great Britain), Band 16 (1964), Heft 47, Seite 99-102.
- [Stegbauer 1978] Stegbauer, A.: Untersuchungen des Grenztragverhaltens von symmetrischen Stahlbetonplattenbalken mit Hilfe der Methode der finiten Elemente, Bauingenieur 53 (1978), Seite 51-54.
- [Trost 1968] Trost, H.: Zur Berechnung von Stahlverbundträgern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastischen Verhaltens des Betons, Stahlbau 37 (1968), Heft 11.
- [Tschemmernegg, Huber 1996] Tschemmernegg, F., Huber, G.: Flachdecken mit Stanzdübeln, Bauingenieur 71 (1996), Heft 10, Seite 425-436.
- [Weyer, Uhlendahl 1995] Weyer, U., Uhlendahl, J.: Rissesicherung schlaff bewehrter Verbundbrücken, Bauingenieur 70 (1995), Seite 331-341.

13 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1.1: Verbundträger niedriger Bauhöhe und Slim-Floor Träger | 3 |
| Abbildung 1.2: Tragverhalten von Verbundträgern [Rieg 2004 a] | 4 |
| Abbildung 2.3: Abgrenzung zwischen niedrigen und hohen Verbundträgern | 9 |
| Abbildung 2.4: Mögliche Stützweiten von niedrigen Verbundträgern | 11 |
| Abbildung 2.5: Mögliche Stützweiten von Slim-Floor Trägern..... | 11 |
| Abbildung 3.6: Einfluss der mittragenden Breite auf Momententragfähigkeit..... | 13 |
| Abbildung 3.7: Einfluss der mittragenden Breite auf Gesamtträgersteifigkeit | 13 |
| Abbildung 3.8: Charakteristischer Verlauf der M- κ -Linie eines niedrigen Verbundträgers..... | 16 |
| Abbildung 3.9: Vorgehen bei der Verformungsberechnung von Verbundträgern | 16 |
| Abbildung 4.10: Mögliche Plattenbalkenquerschnitte..... | 18 |
| Abbildung 4.11: Scheiben- und Biegezustand des Gurtes von Verbundträgern | 19 |
| Abbildung 4.12: Querverteilung der Längsspannungen eines Plattenbalkengurtes..... | 19 |
| Abbildung 4.13: Verlauf der mittragenden Breite in Trägerlängsrichtung (elast. Material)..... | 20 |
| Abbildung 4.14: Bezeichnungen zur mittragenden Breite | 21 |
| Abbildung 4.15: Vergleich der mittragenden Betongurtbreite: nationale Regelungen..... | 21 |
| Abbildung 4.16: Vergleich der mittragenden Betongurtbreite: europäische Normen | 22 |
| Abbildung 4.17: Mittragende Breite $b_{m,B}$ und $b_{m,S}$ eines Plattenbalkens unter Gleichlast..... | 23 |
| Abbildung 4.18: Mittragende Breite $b_{m,S}$ der Gurtscheibe | 29 |
| Abbildung 4.19: Verlauf der mittragenden Breite $b_{m,S}$ der Gurtscheibe..... | 29 |
| Abbildung 4.20: Mittragende Breite $b_{m,B}$ der Gurtplatte eines Plattenbalkens in Trägermitte. | 30 |
| Abbildung 4.21: Verlauf der mittragenden Breite $b_{m,B}$ (Plattenbalken) in Längsrichtung..... | 30 |
| Abbildung 4.22: Mittragende Breite $b_{m,B}$ in Abhängigkeit des Querschnittstyps..... | 31 |
| Abbildung 4.23: Mittragende Breite $b_{m,B}$ der Gurtplatte und $b_{m,S}$ eines Plattenbalkens..... | 31 |
| Abbildung 4.24: Einfluss der mittragenden Breite $b_{m,B}$ auf die Biegesteifigkeit | 33 |
| Abbildung 4.25: Einfluss der Dicke des Betongurts auf die „mittlere“ mittragende Breite b_m . | 34 |
| Abbildung 4.26: Mittlere mittragende Breite b_m in Abhängigkeit der Breite b | 35 |
| Abbildung 4.27: Mittlere mittragende Breite b_m in Abhängigkeit der Stützweite L | 36 |
| Abbildung 4.28: Einfluss des E-Moduls des Betons auf die mittragende Breite b_m | 37 |
| Abbildung 4.29: Vergleich der mittragenden Breite $b_{m,V}$ und b_m ($x/L = 0,5$)..... | 38 |
| Abbildung 4.30: Vergleich mittragenden Breite b_m zur geometrischen Breite | 38 |
| Abbildung 4.31: Verformungsbezogene mittragende Breiten $b_{m,V}$ für Verbundquerschnitte .. | 39 |
| Abbildung 5.32: Versuchsträger VT 1, 2, 5 | 43 |
| Abbildung 5.33: Versuchsträger VT 3, 4 | 43 |
| Abbildung 5.34: Versuchsträger VT 6 | 43 |
| Abbildung 5.35: Schneiden der Untergurtbleche..... | 44 |
| Abbildung 5.36: Zusammenschweißen der Hutprofile..... | 44 |
| Abbildung 5.37: Aufschweißen der Kopfbolzen..... | 44 |
| Abbildung 5.38: Hutprofile mit Kopfbolzen | 44 |
| Abbildung 5.39: Kleben der Dehnmessstreifen | 45 |
| Abbildung 5.40: Versuchsträger mit Dehnmessstreifen und Dehnmessrosetten | 45 |
| Abbildung 5.41: Schalung und Bewehrung eines Versuchsträgers | 45 |
| Abbildung 5.42: Ausschalen des Versuchskörpers | 45 |
| Abbildung 5.43: Versuchskörper VT 2 nach dem Ausschalen | 45 |
| Abbildung 5.44: Transport der Versuchsträger | 45 |
| Abbildung 5.45: Aufbau des Versuchsstandes für die Versuchskörper VT 1, 2 und VT 5 | 46 |
| Abbildung 5.46: Aufbau des Versuchsstandes VT 3 und VT 4 | 46 |
| Abbildung 5.47: Aufbau des Versuchsstandes VT 6 | 47 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 5.48: Auflagerpunkt Lastverteilungsträger..... | 47 |
| Abbildung 5.49: Auflagerkonstruktion mit Rollenlager..... | 47 |
| Abbildung 5.50: Wegaufnehmer auf Betonober- und -unterseite | 48 |
| Abbildung 5.51: Setzdehnungsmesser..... | 48 |
| Abbildung 5.52: Messeinrichtung - Seitenansicht Betonplatte | 49 |
| Abbildung 5.53: Messeinrichtung – Oberseite Betonplatte | 50 |
| Abbildung 5.54: Durchbiegung des Trägers bei maximaler Traglast | 52 |
| Abbildung 5.55: Abplatzungen des Betons in der Druckzone | 52 |
| Abbildung 5.56: Reißen der Bewehrung in der Zugzone | 52 |
| Abbildung 5.57: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 1 | 53 |
| Abbildung 5.58: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 2 | 53 |
| Abbildung 5.59: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 3 | 53 |
| Abbildung 5.60: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 4 | 53 |
| Abbildung 5.61: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 5 | 53 |
| Abbildung 5.62: Last-Verformungskurve Versuchsträger VT 6 | 53 |
| Abbildung 5.63: Last-Schlupfverhalten der Versuchsträger VT 1 und VT 5 | 55 |
| Abbildung 5.64: Rissentwicklung auf der Versuchsträgerunterseite VT 1 und VT 3 | 55 |
| Abbildung 5.65: Rissentwicklung auf der Versuchsträgeroberseite infolge Querbiegung | 56 |
| Abbildung 5.66: Stauchungen des Betons auf der Trägeroberseite (VT 1) in Trägermitte | 57 |
| Abbildung 5.67: Stauchungen des Betons auf der Trägeroberseite (VT 4) in Trägermitte | 57 |
| Abbildung 5.68: Vergleich analytische Berechnung mit experimentellen Ergebnissen VT 6 | 58 |
| Abbildung 6.69: Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ | 63 |
| Abbildung 6.70: Prinzipieller Verlauf der verformungsbezogenen mittragende Breite $b_{m,v}$ | 64 |
| Abbildung 6.71: Im analytischen Berechnungsmodell implementierte Verbundquerschnitte | 65 |
| Abbildung 6.72: Schematische Darstellung des allgemeinen Berechnungsmodells..... | 66 |
| Abbildung 6.73: Verwendete Materialmodelle für den Beton | 67 |
| Abbildung 6.74: Verwendete Materialmodelle für Baustahl und Stahlbeton-Bewehrung | 67 |
| Abbildung 6.75: Abstand des Hebelarms e der Längsbewehrung zur Spannungsnulllinie | 68 |
| Abbildung 6.76: Linearisierte M - κ -Linie [Kuhlmann, Fries 2001a]..... | 69 |
| Abbildung 6.77: Vergleich rechnerische und experimentelle Last-Verformungs-Werte | 74 |
| Abbildung 6.78: System und Querschnitt des Versuchsträgers VT 6 | 75 |
| Abbildung 6.79: Vergleich rechnerische und experimentelle Last-Verformungs-Kurve | 75 |
| Abbildung 6.80: Auswahl möglicher Baustahlquerschnitte für Slim-Floor Träger | 75 |
| Abbildung 6.81: Slim-Floor Decke in Trockenbauweise..... | 76 |
| Abbildung 6.82: Mögliche Slim-Floor Querschnitte für planmäßigen Verbund..... | 76 |
| Abbildung 6.83: Vergleich rechnerischer und experimenteller Last-Verformungs-Kurven | 78 |
| Abbildung 6.84: Umfang der Parameterstudie zur Entwicklung des Berechnungsansatzes.. | 79 |
| Abbildung 6.85: Idealisierter Verlauf der verformungsbezogenen mittragende Breite $b_{m,v}$ | 81 |
| Abbildung 6.86: Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ für hVT, nVT und SFT | 81 |
| Abbildung 6.87: Einfluss der Betonzugfestigkeit f_{ct} auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ | 82 |
| Abbildung 6.88: Einfluss der Streckgrenze f_y des Baustahls auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ | 83 |
| Abbildung 6.89: Schematische Darstellung des Einflusses der Streckgrenze f_y des Baustahls auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ | 83 |
| Abbildung 6.90: Einfluss der Gurtstärke h_c auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ | 84 |
| Abbildung 6.91: Mittragende Breite des reinen Scheibenzustands $b_{m,s}$ und des reinen Biegezustands $b_{m,B}$ in Feldmitte eines einsteigigen Verbundträgers unter Gleichlast | 84 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6.92: Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses b/L | 85 |
| Abbildung 6.93: Einfluss der Querschnittsform des Stahlträgers auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ | 85 |
| Abbildung 6.94: Einfluss der Bewehrungsgehaltes auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ | 86 |
| Abbildung 6.95: Einfluss der Betondruckfestigkeit f_c auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ | 87 |
| Abbildung 6.96: Mittragende Breite VT 1 - Vergleich mit [DIN V 18800-5] | 88 |
| Abbildung 6.97: Mittragende Breite VT 2 - Vergleich mit [DIN V 18800-5] | 88 |
| Abbildung 6.98: Abweichung der Verformungsberechnung nach [DIN V 18800-5] mit analytischem Berechnungsmodell | 89 |
| Abbildung 6.99: Verformungsberechnung nach [Rieg 2006] auf Basis der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ | 91 |
| Abbildung 6.100: Idealisierter Verlauf der verformungsbezogenen mittragende Breite $b_{m,V}$.. | 92 |
| Abbildung 6.101: Mittragende Breite $b_{m,S}$ des reinen Scheibenzustands und $b_{m,B}$ des reinen Biegezustands in Feldmitte für Träger mit einer Gleichlast | 94 |
| Abbildung 6.102: Abweichungen der verformungsbezogenen mittragenden Breite nach Gleichung (6.2) $b_{m,V,1}$ zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,V}$ | 94 |
| Abbildung 6.103: Abweichungen der Durchbiegung f_{Stufe1} zur analytischen Berechnung f | 95 |
| Abbildung 6.104: Abweichung des vereinfachten Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V,2}$ im Vergleich zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,V}$ | 96 |
| Abbildung 6.105: Abweichungen der Durchbiegung f_{Stufe2} zur analytischen Berechnung f | 97 |
| Abbildung 6.106: Idealisierter Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u | 98 |
| Abbildung 6.107: Abweichungen der verformungsbezogenen mittragenden Breite nach Gleichung (6.2) $b_{m,V,1}$ zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,V}$ | 99 |
| Abbildung 6.108: Abweichung des vereinfachten Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V,2}$ im Vergleich zum analytischen Berechnungsmodell $b_{m,V}$ | 100 |
| Abbildung 6.109: Abweichungen der mit dem vereinfachten Berechnungsansatz Gleichung (6.4) berechneten Verformungen f_2 im Vergleich zum analytischen Berechnungsansatz f | 101 |
| Abbildung 7.110: Vorgehen bei der quasi-elastischen Verformungsberechnung [Rieg 2006] | 102 |
| Abbildung 7.111: Typische Verläufe des effektiven Trägheitsmoments $I_{i,\text{eff}}$ und des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads M/M_u [Rieg 2006] | 106 |
| Abbildung 7.112: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit der Betonzugfestigkeit f_{ct} für Slim-Floor Querschnitte | 108 |
| Abbildung 7.113: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit der Streckgrenze des Stahlträgers f_y für Slim-Floor Querschnitte | 108 |
| Abbildung 7.114: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit der Gurtstärke und der Stahlträgerhöhe | 109 |
| Abbildung 7.115: Typische Verläufe des Abminderungsfaktors α_c in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses b/L des Betongurts für Slim-Floor Querschnitte | 110 |
| Abbildung 7.116: Vergleich der elastischen mit experimentellen Verformungen | 113 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 7.117: Vergleich des Abminderungsfaktors α_c^* (Ansatz) zu analytischen Modellwerten α_c | 114 |
| Abbildung 7.118: Vergleich des Abminderungsfaktors α_c^* (Ansatz) zu analytischen Modellwerten α_c für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für die Werte der Parameterstudie nach Abschnitt 6.3 | 114 |
| Abbildung 7.119: Vergleich Versuchsträger VT 1 mit elastischem Berechnungsansatz | 115 |
| Abbildung 8.120: 3-dimensionales numerisches Modell Versuchsträgers VT1 | 118 |
| Abbildung 8.121: Modellierung der Verbundmittel | 119 |
| Abbildung 8.122: Längsbiegespannungen (Trägeroberseite) VT 1 | 120 |
| Abbildung 8.123: Längsbiegespannung (Trägerunterseite) VT 1 | 120 |
| Abbildung 8.124: Längsbiegespannungen (Trägeroberseite) VT 4 | 121 |
| Abbildung 8.125: Querbiegespannungen (Trägeroberseite) VT 4 | 121 |
| Abbildung 9.126: Gelenkiger Stirnplattenanschluss an Innenstütze, Stahlprofil mit I-Querschnitt | 124 |
| Abbildung 9.127: Gelenkiger Stirnplattenanschluss mit Einhakmontage | 124 |
| Abbildung 9.128: Gelenkiger Stirnplattenanschluss mit Futterblechen und Spalt bei großen Auflagerverdrehungen | 125 |
| Abbildung 9.129: Biegetragfähiger Stirnplattenanschluss an eine Stahlstütze mit I-Querschnitt | 126 |
| Abbildung 9.130: Gelenkiger Knaggenanschluss an Stahlstütze mit I-Querschnitt, Knagge unterhalb des Trägers | 127 |
| Abbildung 9.131: Gelenkiger Knaggenanschluss an Verbundstütze, Knagge in Kammerbeton durch Kopfbolzendübel rückverankert | 127 |
| Abbildung 9.132: Gelenkiger Knaggenanschluss an Stahlstütze mit I-Querschnitt, Träger direkt auf Knagge aufgelegt | 128 |
| Abbildung 9.133: Lagesicherung mit Fahnenblechen bei Knaggenanschlüssen | 129 |
| Abbildung 9.134: Biegetragfähiger Knaggenanschluss an Stahlstütze mit I-Querschnitt | 129 |
| Abbildung 9.135: Anordnung eines Druckstücks | 130 |
| Abbildung 9.136: Lagerung auf Stahlbetonwand in Aussparung | 131 |
| Abbildung 9.137: Lagerung an einer Stahlbetonwand mit Einbauteil und angeschweißter Knagge | 131 |
| Abbildung 9.138: Anschluss mit Durchlaufwirkung an Stahlbetonwand | 132 |
| Abbildung 10.139: System und Querschnitt des SFT Trägers (Beispielrechnung) | 133 |
| Abbildung 10.140: Durchbiegungsberechnung: analytisches Modell „M-κ-n“ | 134 |
| Abbildung 10.141: Verlauf der mittragende Breite in Abh. des einwirkenden Momentes | 137 |
| Abbildung 10.142: Vergleich der Durchbiegungen (Beispielrechnung) | 139 |



14 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 2.1: Vergleich der Teilschnittgrößen von Verbundträgern und Slim-Floor Trägern | 8 |
| Tabelle 5.2: Versuchsprogramm - Werkstoffe und Profilgrößen | 42 |
| Tabelle 5.3: Versuchsprogramm – Plattengeometrie/Verdübelungsgrad/Lastexzentrizität.... | 42 |
| Tabelle 5.4: Versuchsprogramm - Parametervariation..... | 42 |
| Tabelle 5.5: Vergleich analytische Berechnung mit experimentellen Ergebnissen VT 6 | 58 |
| Tabelle 5.6: Abmessungen und Werkstoffe der Versuchsträger | 59 |
| Tabelle 6.7: Zusammenfassung Traganteile - mittragende Breite (Scheibe/Platte)..... | 70 |
| Tabelle 6.8: Vergleich der rechnerischen mit experimentellen Verformungen (SFT)..... | 73 |
| Tabelle 6.9: Vergleich der rechnerischen mit experimentellen Verformungen (nVT)..... | 77 |
| Tabelle 7.10: Berechnung des Faktors α_{Mat} mit für den Hochbau gebräuchlichen Materialkennwerten | 111 |
| Tabelle 7.11: Berechnung des Faktors α_M | 112 |
| Tabelle 7.12: Vergleich elastisches und analytisches Berechnungsmodell - VT 1 | 113 |
| Tabelle 7.13: Vergleich elastisches und analytisches Berechnungsmodell - VT 2 | 113 |
| Tabelle 7.14: Berechnung des Faktors α_{Mat} mit für den Hochbau gebräuchlichen Materialkennwerten | 117 |
| Tabelle 7.15: Berechnung des Faktors α_M | 117 |
| Tabelle 10.16: Zusammenstellung der Verformungswerte (Beispielrechnung)..... | 138 |



Stuttgart, den 27. Oktober 2006

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Gunter Hauf

