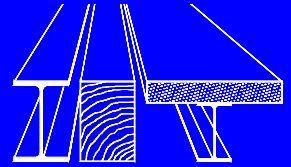


Institut für Konstruktion und Entwurf  
Stahl- Holz- und Verbundbau  
Universität Stuttgart



# **Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern unter Biegebeanspruchung**

**Gunter Hauf**

**Mitteilungen**







**Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern  
unter Biegebeanspruchung**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Gunter Hauf**

aus Gundelfingen a. d. Donau

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Mitberichter: Prof. Dr. sc.techn. Mario Fontana

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juni 2010

Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart

2010

**Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf; Nr. 2010-1**

Gunter Hauf                      Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern  
unter Biegebeanspruchung

Herausgeber                    Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann  
Pfaffenwaldring 7  
70569 Stuttgart  
Telefon: (0711) 685 66245  
Telefax: (0711) 685 66236

Redaktion                        Bernadette Froschmeier

**D 93**

© Institut für Konstruktion und Entwurf; Stuttgart 2010  
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1439-3751

## Kurzdarstellung

Slim-Floor Trägerquerschnitte werden aufgrund der vergleichsweise großen Schlankheit in sehr vielen Fällen durch den Verformungsnachweis bestimmt. Das Verformungsverhalten dieser Verbundflachdeckenträger wird hierbei maßgeblich durch die große Biegesteifigkeit des Betongurtes und dessen Rissbildung im Feldbereich, für durchlaufende Trägersysteme auch im Stützbereich, beeinflusst. Einen maßgebenden Einfluss auf die Trägersteifigkeit und damit das Verformungsverhalten spielt hierbei die mittragende Breite, wobei nach derzeitiger normativer Regelung das Biegetragverhalten des Betongurtes weitestgehend vernachlässigt wird.

Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen wurde dabei festgestellt, dass die mittragende Breite weitaus größer angenommen werden kann, als bisherige normative Regelungen angeben, und die Biegetragwirkung des Betongurtes einen entscheidenden Einfluss auf das Verformungsverhalten besitzt.

In der vorliegenden Arbeit wird daher das Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern unter Berücksichtigung der Biegetragwirkung und der Rissbildung des Betongurtes untersucht. Durch die Entwicklung eines analytischen Modells unter Berücksichtigung der Rissbildung (nicht-lineare Berechnung) und unter Berücksichtigung der mittragenden Breite des Biege- und Scheibenzustands kann das Verformungsverhalten im Bereich der Gebrauchstauglichkeit sehr gut dargestellt werden. Es zeigt sich hierbei, dass der Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich auf das Verformungsverhalten nur von untergeordneter Bedeutung ist, insgesamt jedoch durch die Durchlaufträgerwirkung die Verformungen des Slim-Floor Trägers reduziert werden können.

Auf Basis der Ergebnisse einer umfangreichen Parameterstudie mit dem entwickelten analytischen Berechnungsmodell wird ein Ansatz für eine verformungsbezogene mittragende Breite sowie ein Vorschlag zur quasi-elastischen Verformungsberechnung entwickelt.

Mit diesen beiden Berechnungsansätzen ist eine realistische Durchbiegungsberechnung von Slim-Floor Trägern als ein- und zweifeldrige Systeme möglich.

## Abstract

Due to the high slenderness of this construction type composite slim-floor sections are often determined by the deflection design. The girder deflection is mainly influenced by the bending stiffness of the concrete chord as well as the cracking behavior in the span and for continuous girder also at the support area. For the girder stiffness and the deflection behavior the effective width of the concrete chord plays an important role behavior; however according to current rules the bending behavior normally is neglected in calculation.

Within the scope of the experimental tests on slim-floor girders the effective width of the concrete chords was much larger than expected and given by codes and the influence of the concrete chord, especially the bending stiffness, has an important influence on the deflection behaviour.

Therefore the presented thesis deals with investigations on the deflection behaviour of slim floor girders taking into account the bending state and the cracking of the concrete. Based on an analytical calculation model the non-linear behaviour considering the effective width of the bending state and the cracking the real deflection under serviceability can be determined. The analysis shows that the influence of the effective width at midsupport is of marginal importance. However the effect of the continuous girder reduces the deflection of the slim-floor girders.

The analysis of results of a wide-ranging parametric study based on the analytical and non-linear calculation model leads to the development of an approach for a deflection-based effective width and a proposal for a quasi-elastic calculation method of the deflections of single span and two span slim-floor girders.

On basis of these proposed calculation methods the girder deflection of composite slim-floor structures may now be determined realistically.



<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Grundsätzliches	1
1.2	Motivation und Zielsetzung	2
1.3	Überblick	2
<b>2</b>	<b>TRAG- UND VERFORMUNGSVERHALTEN VON VERBUNDTRÄGERN</b>	<b>4</b>
2.1	Grundsätzliches	4
2.2	Abgrenzung zwischen Verbundträger und Slim-Floor Träger	4
2.2.1	Verbundträger allgemein	5
2.2.1.1	Tragverhalten	5
2.2.1.2	Verformungsverhalten	6
2.2.1.3	Berechnungsansätze für die Durchbiegung	6
2.2.2	Niedrige Verbundträger	6
2.2.2.1	Tragverhalten	6
2.2.2.2	Verformungsverhalten	7
2.2.3	Slim-Floor Träger	7
2.2.3.1	Tragverhalten	7
2.2.3.2	Verformungsverhalten	8
2.2.3.3	Berechnungsansätze für die Durchbiegung	8
2.2.4	Trag- und Verformungsverhalten von Zwei-/Mehrfeldträgern	8
2.2.4.1	Grundsätzliches	8
2.2.4.2	Tragverhalten	9
2.2.4.3	Verformungsverhalten	10
2.3	Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden	11
2.4	Zusammenfassung	11
<b>3</b>	<b>BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN ZU SLIM-FLOOR TRÄGERN</b>	<b>12</b>
3.1	Grundsätzliches	12
3.2	Untersuchungen zum Tragverhalten von Slim-Floor Profilen	12
3.2.1	Slim-Floor Profile mit ausbetonierten, hohlkastenförmigen Stahlprofilen nach [Schäfer 2007]	12
3.2.2	Slim-Floor Träger mit Hutprofilen nach [Fries 2001]	12
3.3	Untersuchungen zum Tragverhalten und zur mittragenden Breite	13
3.3.1	Untersuchungen nach [Amadio, Fragiaco 2002]	13
3.3.2	Mittragende Breite von Verbundträger unter negativer Momentenbeanspruchung nach [Holtkamp 1991]	14
3.3.3	Untersuchungen zur mittragenden Breite an Verbundknoten nach [Schäfer 2005]	15
3.3.3.1	Grundsätzliches	15
3.3.3.2	Anordnung der Kopfbolzen – Zugbandeffekt	15
3.3.3.3	Experimentelle mittragende Breite im Bereich des Verbundknotens	15
3.3.4	Verformungsbezogene mittragende Breite nach [Rieg 2006]	16
3.3.4.1	Grundsätzliches	16
3.3.4.2	Untersuchungen zur Scheiben- und Biegetragwirkung des Betongurts	16

3.3.4.3	Tragverhalten von Verbundquerschnitten im Stützbereich nach [Elz 1998].....	18
3.4	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>18</b>
4	<b>MITTRAGENDE BREITE VON BETONGURTEN BEI SLIM-FLOOR TRÄGERN .....</b>	<b>19</b>
4.1	<b>Grundsätzliches .....</b>	<b>19</b>
4.2	<b>Tragverhalten von Plattenbalken und Träger mit breiten Gurten.....</b>	<b>19</b>
4.2.1	Grundsätzliches.....	19
4.2.2	Scheiben- und Biegezustand der mittragenden Breite .....	20
4.2.3	Einfluss der mittragenden Breite auf die Tragfähigkeit.....	21
4.2.4	Einfluss der mittragenden Breite $b_{eff}$ auf die Steifigkeit .....	21
4.3	<b>Definition der mittragenden Breite .....</b>	<b>22</b>
4.3.1	Spannungsbezogene mittragende Breite $b_{eff}$ .....	22
4.3.2	Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ .....	23
4.4	<b>Normative Regelungen für die mittragende Breite .....</b>	<b>24</b>
4.5	<b>Traganteile des Betongurts (Scheiben- und Biegezustand) .....</b>	<b>26</b>
4.5.1	Grundsätzliches.....	26
4.5.2	Mittragende Breite des Scheibenzustands für Einfeldträger .....	26
4.5.3	Mittragende Breite des Biegezustands für Einfeldträger .....	27
4.5.4	Vergleich des mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands mit der normativen Regelung nach [DIN 18800-5] .....	28
4.5.5	Kombinierte Wirkung des Scheiben- und Biegezustands.....	29
4.5.6	Mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustand für den Zweifeldträger .....	31
4.5.7	Zusammenfassung zur linear-elastischen Untersuchung der mittragenden Breite .....	32
5	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUR MITTRAGENDEN BREITE .....</b>	<b>34</b>
5.1	<b>Allgemeines .....</b>	<b>34</b>
5.2	<b>Versuche an Einfeldträgern .....</b>	<b>34</b>
5.2.1	Grundsätzliches.....	34
5.2.2	Experimentelle Untersuchungen .....	34
5.2.2.1	Grundsätzliches.....	34
5.2.2.2	Geometrie der Träger und Variation der Parameter .....	35
5.2.2.3	Herstellung, Versuchsaufbau und Messeinrichtung .....	37
5.2.2.4	Versuchsdurchführung .....	39
5.2.2.5	Werkstoffkennwerte - Festigkeiten .....	39
5.2.2.6	Trag- und Verformungsverhalten VT1-VT5 .....	40
5.2.2.7	Last-Schlupf-Verhalten .....	42
5.2.2.8	Last-Riss-Verhalten .....	43
5.2.2.9	Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite - Einfeldträger .....	44
5.2.2.10	Voruntersuchung Stützmomenteinwirkung – Versuchsträger VT6 .....	47
5.2.2.11	Verifizierung der Dehnungsmessungen .....	48
5.3	<b>Versuche an Zweifeldträgern .....</b>	<b>50</b>
5.3.1	Grundsätzliches.....	50
5.3.2	Experimentelle Untersuchungen .....	50
5.3.2.1	Grundsätzliches.....	50

5.3.2.2	Versuchsprogramm - Trägerabmessungen und Variation der Parameter .....	51
5.3.2.3	Herstellung, Versuchsaufbau und Messeinrichtung .....	53
5.3.2.4	Versuchsdurchführung .....	54
5.3.2.5	Werkstoffkennwerte - Festigkeiten .....	55
5.3.2.6	Last- und Verformungsverhalten Zweifeldträgerversuche V1 bis V6 .....	56
5.3.2.7	Schlupfmessung Zweifeldträgerversuche .....	57
5.3.2.8	Rissmessung Zweifeldträgerversuche .....	59
5.3.2.9	Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite - Zweifeldträger ....	61
5.3.2.10	Experimentelle Dehnungsverteilung der Bewehrung im Stützbereich .....	63
5.3.2.11	Rückrechnung auf die Momententragfähigkeit anhand der Dehnungsmessungen .....	64
5.4	Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen .....	65
6	<b>ANALYTISCHES BERECHNUNGSMODELL ZUR BERECHNUNG DER TRÄGERVERFORMUNG .....</b>	<b>67</b>
6.1	<b>Grundsätzliches .....</b>	<b>67</b>
6.2	<b>Beschreibung des analytischen Berechnungsmodells .....</b>	<b>67</b>
6.2.1	Allgemeines .....	67
6.2.2	Voraussetzungen und Vereinfachungen .....	67
6.2.3	Berechnungsablauf des analytischen Modells .....	68
6.2.3.1	Grundsätzliches .....	68
6.2.3.2	Rissmoment $M_{\text{Riss}}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{\text{Riss}}$ (1) .....	69
6.2.3.3	Fließmoment $M_{\text{el}}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{\text{el}}$ (2) .....	71
6.2.3.4	Zwischenpunkt – Moment $M_{\text{Zw}}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{\text{Zw}}$ (3) .....	72
6.2.3.5	Bruchmoment $M_{\text{u}}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{\text{u}}$ (4) .....	72
6.2.4	Implementierte Materialmodelle .....	73
6.2.5	Kraftanteile – Ansätze der mittragenden Breite .....	74
6.2.6	Einfluss der Bewehrung in der Druckzone .....	75
6.2.7	Berechnungsverfahren des analytischen Modells .....	76
6.2.7.1	Berechnungsverfahren für Einfeldträger .....	76
6.2.7.2	Berechnungsverfahren für Zweifeldträger .....	77
6.2.8	Mittragende Breite für den Zweifeldträger – Momenten-Nulldurchgang .....	81
6.2.8.1	Allgemeines .....	81
6.2.8.2	Mittragende Breite im Stützbereich .....	81
6.2.8.3	Analytische Untersuchung zum Nulldurchgang bei Zweifeldträgersystemen .....	82
6.2.8.4	Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich .....	84
6.3	<b>Verifikation des analytischen Berechnungsmodells .....</b>	<b>85</b>
6.3.1	Allgemeines .....	85
6.3.2	Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen (Einfeldträger) .....	85
6.3.3	Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen (Zweifeldträger) .....	87
6.3.4	Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen nach [Kuhlmann, Fries 2001] .....	89
6.3.5	Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen von [Kuhlmann et al 2010] ...	90
6.4	<b>Vergleich analytisches Modell mit [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] .....</b>	<b>91</b>

6.4.1	Grundsätzliches .....	91
6.4.2	Vergleich normative Regelung zu Einfeldträgerversuche .....	91
6.4.3	Vergleich normative Regelung zu Zweifeldträgerversuchen .....	92
<b>6.5</b>	<b>Analytische Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Verformung .....</b>	<b>93</b>
6.5.1	Allgemeines .....	93
6.5.2	Untersuchung für Einfeldträgersysteme .....	93
6.5.2.1	Grundsätzliches .....	93
6.5.2.2	Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ .....	94
6.5.2.3	Betondruckfestigkeit $f_c$ .....	94
6.5.2.4	E-Modul des Betons $E_c$ .....	95
6.5.2.5	Plattendicke $h_c$ .....	95
6.5.2.6	Fließgrenze des Baustahls $f_y$ .....	96
6.5.2.7	E-Modul des Baustahls $E_a$ .....	97
6.5.2.8	Querschnittsfläche des Baustahlprofils $A_a$ .....	97
6.5.2.9	Bewehrungsgehalt $a_{s,u}$ – untere Lage .....	98
6.5.2.10	Bewehrungsgehalt $a_{s,o}$ – obere Lage .....	98
6.5.2.11	Geometrisches Verhältnis $b/L$ .....	99
6.5.3	Untersuchung für Zweifeldträgersysteme .....	99
6.5.3.1	Grundsätzliches .....	99
6.5.3.2	Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ .....	100
6.5.3.3	Betondruckfestigkeit $f_c$ .....	101
6.5.3.4	Querschnittsfläche des Baustahlprofils $A_a$ .....	101
6.5.3.5	Betonplattendicke $h_c$ .....	102
6.5.3.6	Fließgrenze des Baustahls $f_y$ .....	102
6.5.3.7	Bewehrungsgehalt $a_{s,o}$ – obere Lage .....	103
<b>6.6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b>BESTIMMUNG DER VERFORMUNGSBEZOGENEN MITTRAGENDEN BREITE ..</b>	<b>105</b>
<b>7.1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>105</b>
<b>7.2</b>	<b>Ablauf zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite <math>b_{m,v}</math> .....</b>	<b>105</b>
7.2.1	Grundsätzliches .....	105
7.2.2	Verfahren zur Bestimmung am Einfeldträger .....	106
7.2.3	Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ für Einfeldträger .....	107
<b>7.3</b>	<b>Parameterstudie zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite <math>b_{m,v}</math> bei Einfeldträgern .....</b>	<b>109</b>
7.3.1	Grundsätzliches .....	109
7.3.2	Bisherige Untersuchung zur verformungsbezogenen mittragenden Breite für Hutprofile .....	109
7.3.3	Parameterstudie zur verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ .....	110
7.3.4	Einflüsse auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ .....	111
7.3.4.1	Grundsätzliches .....	111
7.3.4.2	Ausnutzungsgrad des Verbundträgers $M/M_u$ .....	111
7.3.4.3	Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ .....	113
7.3.4.4	Druckfestigkeit des Betongurts $f_c$ .....	113
7.3.4.5	Plattendicke $h_c$ .....	114
7.3.4.6	Streckgrenze des Baustahls $f_y$ .....	114

7.3.4.7	Querschnitt des Baustahlträgers $A_a$ .....	115
7.3.4.8	Untere Bewehrungslage $a_{s,u}$ .....	116
7.3.4.9	Obere Bewehrungslage $a_{s,o}$ .....	117
7.3.4.10	Seitenverhältnis des Betongurts $b/L$ .....	117
7.3.5	Zusammenstellung der Einflussfaktoren auf $b_{m,V}$ für Einfeldträger.....	118
7.3.6	Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ von Einfeldträgern .....	120
7.3.6.1	Grundsätzliches .....	120
7.3.6.2	Genaue Berechnungsansatz (Stufe 1) .....	122
7.3.6.3	Vereinfachter Berechnungsansatz (Stufe 2).....	127
7.3.7	Vergleich mit bestehenden Normregelungen .....	129
7.3.7.1	Grundsätzliches .....	129
7.3.7.2	Vergleich mit [DIN 18800-5] .....	129
7.3.8	Schlussfolgerung .....	131
<b>7.4</b>	<b>Verformungsbezogene mittragende Breite <math>b_{m,V}</math> für Zweifeldträger.....</b>	<b>131</b>
7.4.1	Grundsätzliches .....	131
7.4.2	Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ für den Zweifeldträger.....	131
7.4.3	Anpassungsfaktor $\alpha_{bm,V}$ für die verformungsbezogene mittragende Breite des Zweifeldträgers .....	134
<b>7.5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>137</b>
<b>8</b>	<b>LINEAR-ELASTISCHER ANSATZ FÜR DIE VERFORMUNGSBERECHNUNG .....</b>	<b>138</b>
<b>8.1</b>	<b>Grundsätzliches .....</b>	<b>138</b>
<b>8.2</b>	<b>Linear-elastischer Ansatz für Einfeldträger.....</b>	<b>138</b>
8.2.1	Grundsätzliches .....	138
8.2.2	Definition des effektiven Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ .....	138
8.2.3	Bestimmung des Abminderungsfaktors $\alpha_c$ und Parameteruntersuchung.....	140
8.2.3.1	Grundsätzliches .....	140
8.2.3.2	Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor $\alpha_c$ .....	141
8.2.4	Verifizierung des elastischen Modells an Versuchsträgern .....	144
8.2.5	Einflussfaktoren des Abminderungsfaktors $\alpha_c$ .....	146
8.2.5.1	Grundsätzliches .....	146
8.2.5.2	Einfluss der Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ .....	147
8.2.5.3	Einfluss der Betonplattendicke $h_c$ .....	148
8.2.5.4	Einfluss der Baustahlprofils $A_a$ .....	149
8.2.6	Statistische Auswertung des linear-elastischen Ansatzes.....	149
<b>8.3</b>	<b>Linear-elastischer Ansatz für Zweifeldträger .....</b>	<b>150</b>
8.3.1	Grundsätzliches .....	150
8.3.2	Berechnungsansatz mit reduzierter Trägersteifigkeit $I_{i,2,eff}$ .....	150
8.3.2.1	Grundsätzliches .....	150
8.3.2.2	Herleitung eines linearen Ansatzes zur Verformungsberechnung von Zweifeldträgern.....	151
8.3.3	Statistische Auswertung des linear-elastischen Ansatzes für Zweifeldträger.....	155
8.3.4	Berechnungsansatz mit Federsteifigkeit als Ersatzsystem .....	155

<b>9</b>	<b>WEITERE NOCH OFFENE FRAGESTELLUNGEN ZU SLIM-FLOOR TRÄGERN..</b>	<b>158</b>
9.1	Grundsätzliches .....	158
9.2	Einfluss aus Schwinden und Kriechen .....	158
9.3	Querkrafttragfähigkeit .....	159
9.3.1	Grundsätzliches .....	159
9.3.2	Tragverhalten von normal hohen Verbundträgern.....	159
9.3.3	Tragverhalten von Slim-Floor Träger.....	159
9.3.3.1	Experimentelle Untersuchungen an Einfeldträgern .....	160
9.3.3.2	Experimentelle Untersuchungen an Zweifeldträgern.....	160
9.3.4	Zusammenfassung.....	161
9.4	Untersuchung am durchlaufenden Mehrfeldträgersystem .....	162
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>164</b>
10.1	Zusammenfassung .....	164
10.2	Ausblick .....	166
<b>11</b>	<b>BERECHNUNGSBEISPIEL .....</b>	<b>168</b>
11.1	Grundsätzliches .....	168
11.2	Nichtlineares analytisches Modell für Ein- und Zweifeldträger.....	169
11.3	Verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$ .....	170
11.4	Linear-elastischer Ansatz .....	172
<b>12</b>	<b>BEZEICHNUNGEN .....</b>	<b>175</b>
<b>13</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>178</b>
<b>14</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>185</b>
<b>15</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>190</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Grundsätzliches

Flachdeckensysteme in Verbundbauweise sind heute unter Berücksichtigung von ganzheitlich wirtschaftlichen Aspekten eine echte Alternative zu konventionellen Stahlbetonflachdecken [Haas 1999], [Huber, Obholzer 1999], [Muess 1996], [Kuhlmann et al 2007b].

Durch die Integration des Stahlprofils in die Flachdecke erhält man eine sehr geringe Deckenstärke. Gleichzeitig bietet diese Bauweise viele weitere Vorteile. In Hinblick auf die Bauzeit entsteht durch die Stahlkonstruktion ein Zeitgewinn. Bei entsprechender monetären Bewertung der Bauzeit (frühere Nutzung des Gebäudes) kann die Verbundbauweise als eine wirtschaftliche Lösung angesehen werden [Leskelä 2000], [Kuhlmann et al 2007b].

Der einbetonierte Stahlträger erlaubt es sehr schlanke Deckenkonstruktionen auszuführen bei gleichzeitigem Verzicht auf Unterzüge, was sich bei der Installation der Haustechnik als sehr positiv herausstellt. Ebenso wirkt sich dies positiv auf das Gewicht der Deckenkonstruktion wie auch auf die Ästhetik aus.

Durch die einbetonierten Stahlträger sind im auflagnahen Bereich Deckendurchbrüche möglich, da die Lasteinleitung in die Stütze hierbei über den Stahlträgeranschluss erfolgt. Dies ist besonders für einen späteren Ausbau der Gebäudetechnik interessant und gegenüber der Stahlbetonflachdecke sehr vorteilhaft. Ebenso bieten die werksseitig vorgefertigten Stahlbauteile eine hohe Qualität an Genauigkeit und durch den Einsatz der Stahldeckenträger und Stahlstützen einen sehr schnellen montageseitigen Baufortschritt [Sauerborn 2000], [Kuhlmann, Rieg 2005]. Brandschutztechnische Erfordernisse können bei Verbundflachdecken sehr einfach und kostengünstig mit zusätzlich eingelegter Bewehrung oder durch Anbringung von Brandschutzplatten erfüllt werden [Fontana 2000], [Schaumann 2001]. Da das Einsatzgebiet der Flachdeckenkonstruktion der Bürogeschossbau ist, werden für die Installation überwiegend abgehängte Decken eingesetzt, so dass konventionelle Brandschutzmaßnahmen sehr einfach eingesetzt werden können.

Durch die schlanke Konstruktion verformen sich die Slim-Floor Trägersysteme sehr stark, was sich als ein Hauptproblem beim Nachweis des Deckensystems herausstellt, da der Nachweis der Verformung oftmals bemessungsbestimmend wird. In Hinblick auf das Verformungsverhalten unterscheiden sich die Slim-Floor Träger sehr stark von normal hohen Verbundträgern, so dass die bestehenden Regelwerke für Verbundkonstruktionen nach [DIN 18800-5] sehr konservative Berechnungsansätze für die Verformungsberechnung angeben. Die Trägerverformung wird überschätzt, so dass der Slim-Floor Querschnitt überdimensioniert wird, was sich wiederum sehr nachteilig auf einen wirtschaftlichen Einsatz der Verbundflachdecken auswirkt.

Während es für die Stahlbetonflachdecke bestehende Regelwerke [Grasser 1991] gibt, die es erlauben, die Berechnung sehr einfach durchzuführen, gibt es im Verbundbau für jedes Flachdeckensystem eine eigene Zulassungen [DIBt 2005]. Dies stellt für den Planer oftmals eine Hemmnis dar, da er sich durch die Verwendung bereits sehr früh auf ein spezielles System festlegen muss [Baumgärtner et al 1997]. So ist die Verbundflachdecke auch nicht einmal im Anwendungsbereich der [DIN 18800-5] enthalten. Einzelne Zulassungen sollten daher allgemeinen Bemessungsregeln weichen, so dass ein allgemein gültiger Charakter für die Verbundflachdecken entsteht. Dies würde eine gute Basis für eine gesteigerte Akzeptanz bieten und den Einsatz weiter stärken.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen allgemein Ansatz für Slim-Floor Träger, in diesem Fall für die Verformungsberechnung, zu entwickeln, der die Möglichkeit schaffen soll, die Anwendung und Akzeptanz der Verbundflachdeckenbauweise weiter zu stärken.

## 1.2 Motivation und Zielsetzung

Die Verbundflachdeckenträgersysteme besitzen ein verändertes Verformungsverhalten, wie im nachfolgenden Abschnitt 2.2.3 ausführlich beschrieben wird, so dass die Verformung nach aktuell gültiger Norm [DIN 18800-5] nicht ohne Weiteres berechenbar ist bzw. keine allgemein gültigen Regeln vorhanden sind. Dies erschwert die Berechnung und Nachweisführung für dieses Deckensystem. Hinzu kommt der sehr konservative Ansatz für die mittragende Breite des Betongurtes. Da Slim-Floor Träger einen großen Anteil der Biegetragfähigkeit über den Betongurt entwickeln, ist der Einfluss der mittragenden Breite größer anzusehen als bei normal hohen Verbundträgern. Dies führt insgesamt zu einer Überschätzung der Verformung, so dass die Querschnitte oftmals überdimensioniert werden.

Um die Anwendbarkeit zu verbessern und zu erleichtern, soll im Rahmen dieser Arbeit grundlegende Fragen zum Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern geklärt werden um darauf aufbauend Bemessungshilfen für eine realitätsnahe Verformungsberechnung zu entwickeln. Im Mittelpunkt der Untersuchung stehen hierbei Slim-Floor Konstruktionen in der sogenannten „Nassbauweise“, siehe hierzu auch Abschnitt 2.

Das Ziel soll sein, für die Praxis taugliche und einfach anwendbare Berechnungsansätze zu entwickeln, die dem veränderten Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern Rechnung tragen. In diesem Zusammenhang wird eine eigens auf das Verformungsverhalten abgestimmte mittragende Breite abgeleitet, die für verschiedene in der Praxis verwendete Verbundflachdeckenquerschnitte angewendet werden kann.

Eine umfangreiche Literaturrecherche für Slim-Floor Träger brachte keine Ergebnisse, dass bereits zutreffende Modelle für die Verformungsberechnung an Slim-Floor Träger existieren.

Durch zwei durchgeführte Testreihen an Slim-Floor Deckenträgern wird die mittragende Breite im Feld- und Stützbereich experimentell ermittelt und diese dann im Anschluss an einem neu entwickelten analytischen Modell auf Basis mechanischer Ansätze (Momenten-Krümmungs-Beziehung) verifiziert. Ziel ist es, ein allgemein gültiges und anwendbares Modell für die Bestimmung der Verformung an ein- und zweifeldrigen Slim-Floor Trägersystemen zu abzuleiten.

Ebenso dient das Modell als Berechnungsgrundlage für eine umfangreiche Parameterstudie, um wesentliche Einflussgrößen zu identifizieren und um den Berechnungsansatz weiter zu entwickeln. Im ersten Schritt wird dies für eine konstante mittragende Breite auf Basis einer nichtlinearen Verformungsbestimmung durchgeführt und im zweiten Schritt in einen linearen Berechnungsansatz überführt.

Für die praktische Anwendung steht hierbei im Vordergrund, einen vereinfachten aber dennoch für die Bemessung wirtschaftlichen Ansatz vorzugeben, der allgemein gültig für Slim-Floor Querschnitte genutzt werden kann.

## 1.3 Überblick

Die Untersuchungen zum Trag- und insbesondere dem Verformungsverhalten von Verbundflachdeckenträgersystemen unterteilen sich in dieser Arbeit in experimentelle und analytische Untersuchungen. Dabei wird die Arbeit wie folgt strukturiert:

In Abschnitt 2 wird grundlegend das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundflachdeckensystemen dargestellt und gegenüber normal hohen Verbundträgern und Verbundträgern mit niedriger Bauweise abgegrenzt. Der Abschnitt 3 stellt den Stand der Technik und aktuelle Untersuchungen zu Slim-Floor Trägern zusammen.



Der Abschnitt 4 behandelt die mittragende Breite. Neben der Definition der mittragenden Breite allgemein und der normativen Regelung dafür, wird kurz die mittragende Breite für den sog. Scheiben- und Biegezustand dargestellt.

In Abschnitt 5 werden die experimentellen Untersuchungen an Ein- und Zweifeldträgern beschrieben und ausgewertet, die im Rahmen zweier Forschungsvorhaben durchgeführt wurden.

Anschließend wird in Abschnitt 6 ein analytisches Berechnungsmodell für die Berechnung der Durchbiegung von Slim-Floor Trägern vorgestellt, auf Basis dessen ein- und zweifeldrige Systeme berechnet werden können.

Im Rahmen einer umfangreichen Parameterstudie werden die maßgebenden Einflussfaktoren dargestellt, die im Abschnitt 7 zur Entwicklung der sog. verformungsbezogenen Breite herangezogen werden. Bei dieser auf die Verformungsberechnung abgestimmten mittragenden Breite wird ein konstanter Wert auf Basis einer nichtlinearen Berechnung für Einfeldträger- und Zweifeldträgersysteme abgeleitet.

Zur Vereinfachung und praxistauglichen Anwendung wird in Abschnitt 8 ein auf Basis der linearen Berechnung entwickelter Berechnungsansatz für die Bestimmung der Trägerverformung beschrieben.

Im Abschnitt 9 werden weitere und noch offene Fragestellungen angesprochen, die weitere Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten beinhalten. Abschließend werden in Abschnitt 10 alle wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse zum Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern zusammengefasst und in Abschnitt 11 beispielhaft an einem Slim-Floor Querschnitt als Ein- und Zweifeldträger die Verformungsberechnung der verschiedenen in dieser Arbeit entwickelten Ansätze durchgerechnet.

## 2 Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern

### 2.1 Grundsätzliches

Tragwerke unterliegen im Allgemeinen immer zwei Anforderungen, der Standsicherheit (Grenzzustand der Tragfähigkeit) und der Funktionstüchtigkeit im Gebrauch (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit). Dies bedeutet, dass z.B. Verbundträger auf die maximale Beanspruchung hin untersucht werden, gleichzeitig aber auch Aspekte wie die Durchbiegung, das Schwingungsverhalten und Dauerhaftigkeit der Konstruktion (Rissbildung) berücksichtigt werden müssen.

Während für den Grenzzustand der Tragfähigkeit die Einwirkungen und Materialwiderstände mit Sicherheitsfaktoren beaufschlagt werden, ist für die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit die wirklichkeitsnahe Ermittlung der Schnittgrößen, Verformungen und Steifigkeiten notwendig [Bode 1998].

Im Folgenden soll daher für verschiedene Verbundträgersysteme das Trag- und Verformungsverhalten näher erläutert werden und hierbei besonders auf die Berechnung der Verformungen eingegangen werden. Dies ist für das Verständnis gerade in Hinblick auf die in dieser Arbeit hin untersuchten Verformungen für Slim-Floor Träger notwendig.

### 2.2 Abgrenzung zwischen Verbundträger und Slim-Floor Träger

Die möglichen Ausführungsvarianten für Verbundträger sind sehr vielfältig [Feldmann 2000]. So kann die Querschnittsgestaltung des Baustahlprofils sehr verschieden und frei gewählt werden, ebenso aber auch die Lage und Dicke der Betonplatte zum Baustahlprofil. Hierbei wird in drei Kategorien unterschieden, dem normal hohen Verbundträger, dem niedrigen Verbundträger und dem Verbundflachdeckenträger (im Folgenden als „Slim-Floor Träger“ bezeichnet).

Eine eindeutige und grundlegende Unterscheidung zwischen den ersten beiden genannten Varianten ist nur schwer möglich. So besteht die Möglichkeit, die Größe des Baustahlprofils als eine mögliche Abgrenzung heranzuziehen. Eine zweite und bevorzugte Möglichkeit ist durch das verschiedene Tragverhalten gegeben. Verbundträger werden als „niedrige Verbundträger“ bezeichnet, wenn der Betongurt unter Gebrauchslasten (bei positiven Momenten) Risse aufweist.

Die Abbildung 2.1 zeigt typische Querschnitte eines normal hohen Verbundträgers, eines niedrigen Verbundträgers und eines Slim-Floor Trägers.

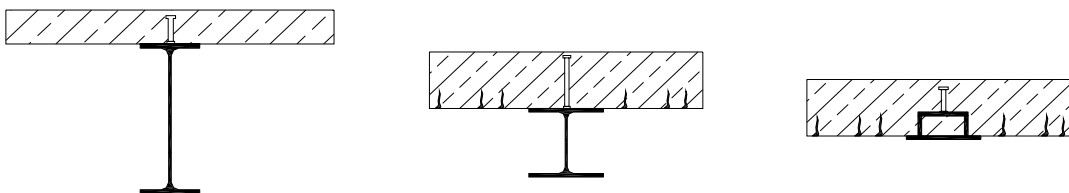


Abbildung 2.1: Normal hoher Verbundträger, niedriger Verbundträger, Slim-Floor Träger

Slim-Floor Träger werden übersetzt auch als „deckengleiche“ Verbundträger bezeichnet. Bei dieser Art von Verbundträger liegt das Baustahlprofil in den Beton eingebettet. Es gibt sehr viele mögliche Querschnitte, die hierbei zur Anwendung kommen können. Bei der Herstellung wird zwischen zwei Bauweisen unterschieden [Feldmann 2000]. Bei der sog. Trockenbauweise werden vorgefertigte Elemente verwendet, die auf den Stahlträgeruntergurt aufgelegt und entsprechend ausgegossen werden [Bode et al 1997], [Feldmann 1998]. Es kann hierbei aber nicht automatisch

von einer Verbundwirkung ausgegangen werden. Verbundmittel werden oftmals nicht planmäßig vorgesehen, eine gewisse Verbundwirkung durch Reibung oder Klemmwirkung ist aber meist vorhanden [Däuwel 2001].

Im Gegensatz dazu wird bei der sog. Nassbauweise der Beton vor Ort eingebracht. Bei zusätzlich angebrachten Verbundmittel werden die Träger so zu vollwertigen Verbundquerschnitten. Die nachfolgenden Untersuchungen konzentrieren sich hierbei auf Slim-Floor Querschnitte in Nassbauweise unter Ansatz einer Verbundwirkung.

Gegenüber normal hohen Verbundträgern bzw. auch Deckensystemen mit Unterzügen ergeben sich für Slim-Floor Konstruktionen viele Vorteile. Durch die unterzugsfreie Konstruktion ist das Verlegen von Leitungen und Kanälen ungestört möglich. Durch stahlbaumäßige Anschlüsse können Deckendurchbrüche und Öffnungen auch sehr nah am Stützenbereich ausgebildet werden. Insgesamt wird die Deckenplattenhöhe niedrig gehalten, auch evtl. Brandschutzmaßnahmen sind leichter durch die ebene Untersicht vorzusehen als bei normal hohen Verbundträgern.

Insgesamt sind natürlich die Spannweiten bei Slim-Floor Trägern durch die schlanke Deckenhöhe beschränkt, so dass das Hauptanwendungsgebiet dieser Deckenkonstruktion bei Bauten mit mittleren Spannweiten bzw. Achsabständen von 5 - 8 m liegt. Dieser Bereich kommt vorwiegend im Büro- und Geschossbau in Frage.

## 2.2.1 Verbundträger allgemein

### 2.2.1.1 Tragverhalten

Anhand der nachfolgenden Abbildung 2.2 lässt sich das Tragverhalten eines normal hohen Verbundträgers erklären. Infolge der äußeren Belastung auf Gebrauchslastniveau – in diesem Fall ein positives Biegemoment – stellt sich über die Trägerhöhe eine Dehnungsverteilung ein, bei der der Betongurt unter Druck steht. Die Nulllinie liegt bei diesen hohen Trägerquerschnitten im Stahlträgersteg. Durch die nur sehr kleine Krümmung des Verbundträgers sind der Krümmungsanteil und damit das Biegemoment des Betongurtes vernachlässigbar klein und werden daher bei der Berechnung nicht weiter berücksichtigt [Roik et al 1999]. Die Haupttraganteile werden durch das Eigenbiegemoment des Stahlträgers  $M_a$  und das Kräftepaar aus Betondruck  $N_c$  und Stahlzugkraft  $N_a$  gestellt.

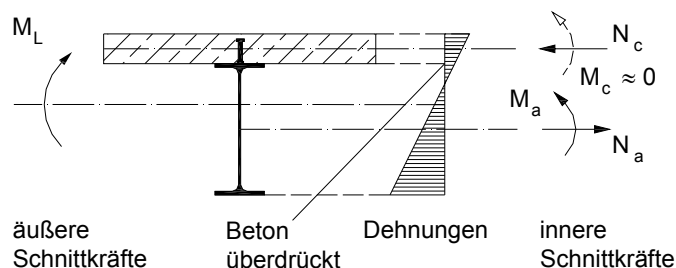


Abbildung 2.2: Dehnungsverteilung eines Verbundträgers

In Abhängigkeit der gewählten Querschnitte erreicht der Biegeanteil des Betongurtes ca. 5% des gesamten Verbundbiegemoments, der Anteil des Baustahlprofils liegt bei ca. 20-30%, die restli-

chen 65-70% werden durch das Kräftepaar aus Stahlzugkraft und Betondruckkraft aufgenommen [Kuhlmann, Fries 1998].

Anhand der Dehnungsverteilung ist zu erkennen, dass der Verbundträger werkstoffoptimiert eingesetzt wird, d.h. das Baustahlprofil übernimmt die Zugkomponente und der Betongurt wirkt als Druckgurt.

#### 2.2.1.2 Verformungsverhalten

Da der Betonquerschnitt unter Gebrauchslasten gewöhnlich ungerissen (Zustand I) und der Baustahl ebenfalls noch im elastischen Bereich vorliegt, kann die Durchbiegung des Trägers mittels materiell linearer Berechnungsverfahren bestimmt werden. Das Verformungsverhalten dieser Träger (dies gilt ebenso auch für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger) kann im Übrigen erheblich durch das angewandte Bauverfahren beeinflusst werden. Es wird hierbei zwischen dem Eigengewichtsverbund und dem Verkehrslastverbund unterschieden.

Beim Eigengewichtsverbund ist der Stahlträger beim Betonieren der Aufbetonplatte unterstützt, so dass nach dem Erhärten und Wegnahme der Unterstützung das gesamte Eigengewicht vom Verbundquerschnitt aufgenommen wird.

Beim Verkehrslastverbund trägt der Stahlträger ohne Unterstützung das Gewicht der Betonplatte, die Verbundwirkung kommt erst nach Erhärten des Betons und bei weiteren Lasten (Ausbau- und Verkehrslasten) zu tragen. Dies bedeutet, dass bei Berücksichtigung aller Lasten die Trägerverformung beim Verkehrslastverbund größer ist als beim Eigengewichtsverbund. Weitere Einflüsse auf das Verformungsverhalten wie z. B. durch das Aufschweißen der Kopfbolzendübel oder durch Richten der Stahlträger sind u.a. in der Arbeit von [Grages, Lange 2004], [Grages 2007] erläutert.

#### 2.2.1.3 Berechnungsansätze für die Durchbiegung

Die aktuelle Verbundbaunorm [DIN 18800-5] verweist bei den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit, insbesondere des Verformungsnachweises, auf die Anforderungen nach [DIN 1045-1], Abschnitt 11.3.1. Weitere Hinweise werden nicht gegeben.

Da im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit Verbundträger für gewöhnlich ungerissen vorliegen, vereinfacht sich die Verformungsberechnung, da die klassischen Formeln der linear-elastischen Stabstatik auf einen in diesem Zustand noch materiell linearen Träger angewandt werden können. Hierzu wird ein sog. ideeller Verbundquerschnittswert  $I_{i,0}$  berechnet, der sich aus dem Baustahlquerschnitt und aus Umrechnung des Betonquerschnitts in einen fiktiven Stahlquerschnitt zusammensetzt. Dieser Ansatz wird auch als Gesamtquerschnittsverfahren bezeichnet [Sattler 1959]. Auf eine nichtlineare Berechnung kann verzichtet werden.

### 2.2.2 Niedrige Verbundträger

#### 2.2.2.1 Tragverhalten

Niedrige Verbundträger sind vom Tragverhalten zwischen normal hohen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern einzustufen. Durch den kleineren Baustahlquerschnitt, der aber unterhalb der Betonplatte liegt, ergibt sich, wie in Abbildung 2.3 veranschaulicht, eine ausgeprägte Dehnungsverteilung. Dies hat zur Folge, dass durch den niedrigeren Querschnitt der Betongurt auf der Trägerunterseite unter Gebrauchslasten Risse aufweist. Die Nulllinie des Verbundquerschnitts liegt daher

im Betongurt. Unter Gebrauchslasten ist der Baustahlträger gewöhnlich nicht mehr im linear-elastischen Zustand [Kuhlmann et al 2001], [Kuhlmann, Hauf 2006].

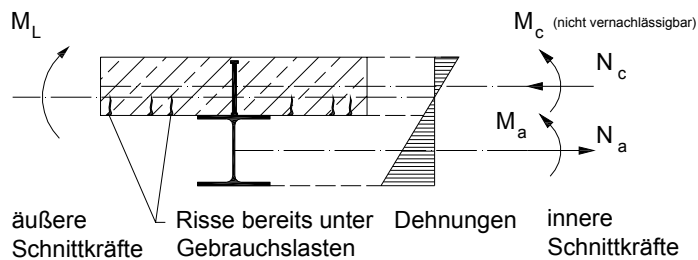


Abbildung 2.3: Dehnungsverteilung eines niedrigen Verbundträgers

### 2.2.2.2 Verformungsverhalten

Im Verhältnis zum Biegeanteil des Gesamtverbundquerschnitts besitzt der Betongurt einen nicht mehr ohne Weiteres zu vernachlässigenden Traganteil. Die Verformungen würden ohne diesen Anteil weit überschätzt werden und eine effiziente Dimensionierung wäre nicht möglich [Kuhlmann et al 2003], [Kuhlmann, Rieg 2004b]. Im Unterschied zum normal hohen Verbundträger aber kann der materiell lineare Ansatz nicht mehr angewandt werden [Kuhlmann, Rieg 2003]. Dies beruht auf der Rissbildung und dem damit verbundenen Steifigkeitsverlust.

Für die Berechnung unter Berücksichtigung des materiell nichtlinearen Verhaltens wird auf den Abschnitt 6 verwiesen, bei dem der Momenten-Krümmungs-Ansatz ausführlich erklärt wird. In der Diplomarbeit von [Bott 2007] wurde das Verformungsverhalten von niedrigen Slim-Floor Trägern auf Zweifeldträger unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens und des Momenten-Krümmungs-Ansatzes untersucht und im Rahmen einer Parameterstudie maßgebende Einflussfaktoren der Trägerverformung bestimmt.

## 2.2.3 Slim-Floor Träger

### 2.2.3.1 Tragverhalten

Die Abbildung 2.4 beschreibt anschaulich, dass bei Slim-Floor Trägern die Krümmung infolge der äußeren Einwirkung und der niedrigen Bauhöhe des Trägers sehr groß ist. Dies verursacht bereits unter sehr geringen Lasten (z.B. eine positive Momenteneinwirkung) Risse auf der Betonuntergurtseite. Durch die Rissbildung entzieht sich der Beton der Zugbeanspruchung und das Baustahlprofil wie auch zugelegte Längsbewehrung tragen diese Kräfte ab. Der Beton erzeugt im Druckbereich die entsprechende Gegenkraft, mit der das Moment durch das Kräftepaar aufgenommen werden kann. In Abhängigkeit des gewählten Baustahlprofils liegt die Nulllinie noch im oder oberhalb des Profils.

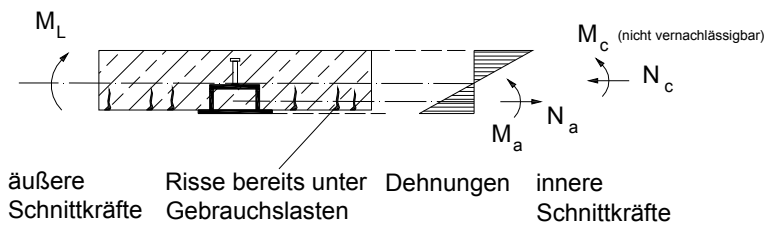


Abbildung 2.4: Dehnungsverteilung eines Slim-Floor Trägers

Anhand der Dehnungsverteilung ist zu erkennen, dass ein nicht zu vernachlässigender Teil der Biegetragwirkung durch den Betongurt abgetragen wird. So liegt der Traganteil des Betongurts beim Slim-Floor Träger im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei ca. 30% [Kuhlmann et al 2006b].

### 2.2.3.2 Verformungsverhalten

Da der Betongurt deckengleich mit dem Baustahlprofil auf der Unterseite abschließt, reißt der Querschnitt schon bei sehr geringen Lasten auf. Dies bedeutet, dass die Rissbildung auf das Verformungsverhalten einen sehr frühen und, wie in Abbildung 2.4 anhand der Dehnungsverteilung zu sehen ist, sehr starken Einfluss besitzt. Durch den im Vergleich zum niedrigen Verbundträger kleineren Gesamtquerschnitt wirkt sich die Rissbildung natürlich stärker auf das Verformungsverhalten aus [Kuhlmann, Hauf 2007].

### 2.2.3.3 Berechnungsansätze für die Durchbiegung

Für Slim-Floor Träger gelten durch den gerissenen Betongurt dieselben Bedingungen wie für niedrige Verbundträger, daher muss für die Verformungsberechnung das nichtlineare Materialverhalten berücksichtigt werden [Rybinski 2000]. Da der Betongurt aber einen größeren Anteil für die Biegetragfähigkeit beisteuert, wirkt sich der Ansatz der mittragenden Breite für den Betongurt noch stärker aus (siehe hierzu auch Abschnitt 4.2.4). Daher muss das Ziel sein, die mittragende Breite so realitätsnah wie möglich zu bestimmen, um eine wirtschaftliche Verformungsberechnung zu ermöglichen.

## 2.2.4 Trag- und Verformungsverhalten von Zwei-/Mehrfeldträgern

### 2.2.4.1 Grundsätzliches

Werden Verbundkonstruktion als Durchlaufsysteme ausgebildet, so sind einige Besonderheiten bei der Berechnung der Schnittgrößen, Tragfähigkeit und der Durchbiegung zu beachten. Durch das negative Stützmoment liegt der Betongurt unter Zug und reißt auf, da die Betonzugspannungen bereits unter sehr kleinen Lasten überschritten werden. Durch die Rissbildung verliert der Verbundquerschnitt jedoch an Biegesteifigkeit, was sich direkt auf den Schnittgrößenverlauf und die Durchbiegung auswirkt. Dies gilt sowohl für normal hohe Verbundträger wie auch Slim-Floor Konstruktionen.

### 2.2.4.2 Tragverhalten

Das Tragverhalten von normal hohen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern unterscheidet sich hierbei voneinander. Während bei normal hohen Verbundträgern nur der Betongurt im Stützbe-  
reich aufreißt und daher nur dieser Bereich einem Steifigkeitsverlust unterliegt, treten beim Slim-  
Floor Träger ebenfalls im Feldbereich auf der Betongurtunterseite Risse auf, siehe Abbildung 2.5.  
Unter Gebrauchslasten steht der Betongurt eines normal hohen Verbundträgers im Feld gewöhn-  
lich unter Druck, so dass für diesen Bereich die Trägersteifigkeit nicht reduziert werden muss.

[DIN 18800-5] schreibt vor, dass die Rissbildung und deren Einflüsse bei der elastischen Ermitt-  
lung der Schnittgrößen zu berücksichtigen sind. Sind keine besonderen Anforderungen an die  
Verformung gegeben, dürfen die Schnittgrößen auch ohne Berücksichtigung der Rissbildung ermit-  
telt werden, ggfs. ist eine Umlagerung der Schnittgrößen durchzuführen.

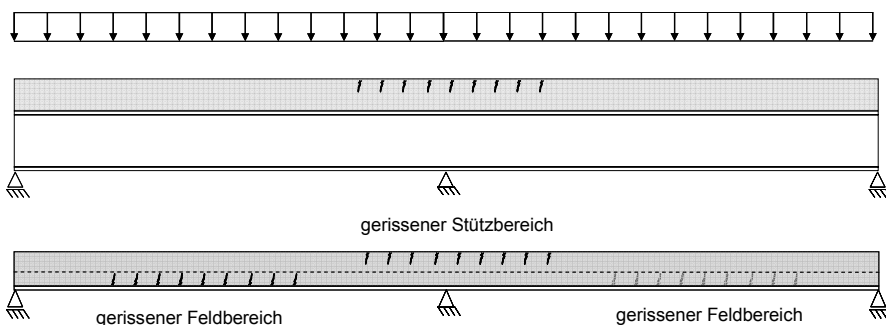


Abbildung 2.5: Aufreißen des Querschnitts im Stütz- und Feldbereich eines normal hohen Ver-  
bundträgers und eines Slim-Floor Trägers

Für die Berücksichtigung der Rissbildung gibt die Norm zwei Möglichkeiten vor, das „allgemeine  
Verfahren“ mit einem iterativen Vorgehen und einem „vereinfachten Verfahren“, das nachfolgend  
genauer erläutert wird:

Für die Ermittlung der Schnittgrößen ist entsprechend ein Berechnungsansatz in der Norm gege-  
ben, der die Rissbildung und damit einhergehende Momentenumlagerung berücksichtigt. Dieser  
Ansatz sieht hierfür vor, dass im Bereich der Stütze (jeweils  $0,15 \cdot L$  vom Stützaufleger entfernt)  
eine verminderte Querschnittssteifigkeit angesetzt wird, bei der nur das Baustahlprofil und die  
zugelegte Längsbewehrung berücksichtigt werden, siehe Abbildung 2.6. Das Verfahren ist nur  
dann anwendbar, wenn das Verhältnis der an eine Innenstütze angrenzenden Stützweiten nicht  
kleiner als 0,6 ist [DIN 18800-5].

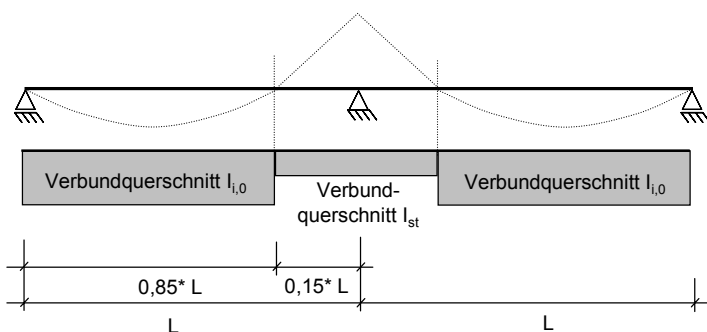


Abbildung 2.6: Vereinfachtes Berechnungsverfahren für den gerissenen Stützbe-  
reich

Da Slim-Floor Träger zusätzlich in den Feldbereichen einen Steifigkeitsabfall erfahren, ist dieser Ansatz nach [DIN 18800-5] nicht mehr ohne Weiteres anwendbar. Da es sich um ein statisch unbestimmtes System (Zwei- oder Mehrfeldträger mit veränderlicher Trägersteifigkeit) handelt, wirkt sich die Rissbildung im Feld auch auf die Schnittgrößenverteilung über dem Träger und damit auf die Durchbiegung aus.

Bei einem Einfeldträgersystem hat eine Rissbildung keinen Einfluss auf die Schnittgrößen, trotz unterschiedlicher Trägersteifigkeiten. Da der Träger aber statisch bestimmt ist, können direkt aus der Belastung und unabhängig von den Querschnittswerten die Schnittgrößen und damit die Verformung bestimmt werden. Ein möglicher Berechnungsansatz, um die Verformung von ein- und zweifeldrigen Slim-Floor Trägern bestimmen zu können, wird in Abschnitt 6.2.7 ausführlich vorgestellt.

### 2.2.4.3 Verformungsverhalten

Sobald der Betongurt reißt und damit an Steifigkeit verliert, erhöht sich die Durchbiegung des Trägers. Im ungerissenen Zustand können linear-elastische Durchbiegungsansätze und Berechnungsformeln angewandt werden, wie sie aus der Stabstatik bekannt sind. Mit steigender Belastung und damit tiefergehenden Rissen, sinkt die Trägersteifigkeit (Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts) weiter ab und die Durchbiegungen nehmen zu. Gewöhnlich kommen unter Gebrauchslasten die Träger nicht ins Fließen. Dies hätte zur Folge, dass die Durchbiegung noch weiter überproportional steigen würde [Kuhlmann, Hauf 2008].

Die Verformung des Zweifeldträgers wird sehr stark von der Trägersteifigkeit über der Mittelstütze beeinflusst. Da in diesem Bereich jedoch der Beton im Zugbereich liegt, verliert der Querschnitt an dieser Stelle sehr stark an Steifigkeit und die Durchbiegungen nehmen stark zu. Das Mittelauger kann daher wie eine nichtlineare Drehmomentenfeder angesehen werden, die mit zunehmender Belastung an Steifigkeit verliert, siehe Abbildung 2.7. Weitergehende Untersuchungen hierzu sind in Abschnitt 8.3 zu finden.

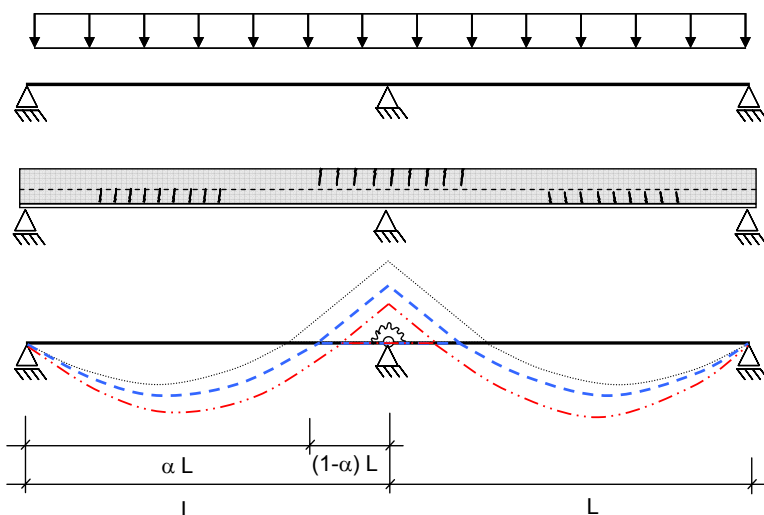


Abbildung 2.7: Momenten-Nulldurchgang bei einem Zweifeldträger in Abhängigkeit der Steifigkeitsverteilung



## 2.3 Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden

Der Baustahl verhält sich unterhalb der Streckgrenze (und damit meist im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) linear-elastisch, während der Beton ein zeitabhängiges Materialverhalten aufweist. Hierbei treten zwei Effekte in Erscheinung [Bode 1998], das Kriechen (Verformungszunahme unter ständigen Lasten) und das Schwinden (Verkürzung des Querschnitts durch Austrocknen).

Nach [DIN 18800-5] müssen die Einflüsse aus Kriechen und Schwinden berücksichtigt werden, können aber bei „typischen“ Trägerquerschnitten mit dem Näherungsverfahren nach Element (822) ermittelt werden. Bei diesem Verfahren werden die Einflüsse aus Kriechen und Schwinden durch ideelle auf das E-Modul des Baustahls bezogene Werte für die Querschnittsfläche und das Flächenträgheitsmoment des Betongurtes berücksichtigt.

Für ausführliche rechnerische Untersuchungen zum Kriechen und Schwinden an Verbundträgern wird auf die Arbeit von [Haensel 1975], [Iliopoulos, 2005] und [Rieg 1998] verwiesen.

## 2.4 Zusammenfassung

Durch den erhöhten Biegetraganteil des Betongurtes bei Slim-Floor Trägern unterscheidet sich das Trag- und Verformungsverhalten dieser schlanken Träger von normal hohen Verbundträgern. Der Biegetraganteil wirkt sich hierbei sehr positiv auf das Verformungsverhalten aus, so dass mit bestehenden Ansätzen die Verformung rechnerisch überschätzt wird und dies zu einer unwirtschaftlichen Bemessung führt. Durch die lastabhängige Rissbildung im Querschnitt auch unter positiven Momenten ist von keinem linearen Tragverhalten mehr auszugehen. Dies ist bei der Ermittlung der Verformung zu berücksichtigen.

### 3 Bisherige Untersuchungen zu Slim-Floor Trägern

#### 3.1 Grundsätzliches

Der nachfolgende Abschnitt soll einen Querschnitt der vorhandenen Literatur zu Slim-Floor Trägern bzw. niedrigen Verbundträgern wiedergeben. Hierbei werden aktuelle Arbeiten und Untersuchungen dargestellt, die sich mit dem Trag- und Verformungsverhalten der Slim-Floor Bauweise beschäftigen. Im Mittelpunkt hierbei stehen Untersuchungen zu Slim-Floor Trägern der Nassbauweise, da hier von einem Verbund zwischen Baustahlprofil und dem Betongurt ausgegangen werden kann, so dass Flachdeckenkonstruktionen mit aufgelegten Fertigteilplatten ohne Verbund hier nicht weiter aufgeführt werden.

Ebenso werden vorliegende Untersuchungen zum Tragverhalten und zur mittragenden Breite bei Verbundträgern unter positiver und negativer Momentenbeanspruchung kurz zusammengefasst.

#### 3.2 Untersuchungen zum Tragverhalten von Slim-Floor Profilen

##### 3.2.1 Slim-Floor Profile mit ausbetonierten, hohlkastenförmigen Stahlprofilen nach [Schäfer 2007]

In der Arbeit von [Schäfer 2007] wird das Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor-Profilen mit ausbetonierten, hohlkastenförmigen Stahlprofilen untersucht, da für dieses System ebenfalls keine normativen Regelungen vorhanden sind. Ein in der Praxis eingeführtes System ist der sog. DELTA<sup>®</sup>-Beam der Fa. Peikko, siehe nachfolgende Abbildung.

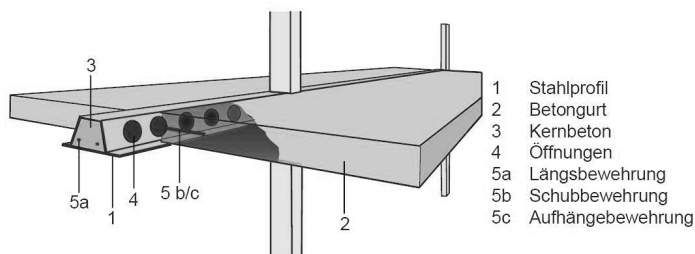


Abbildung 3.1: Slim-Floor Profil mit ausbetonierten, hohlkastenförmigen Stahlprofil [Schäfer 2007]

Bereits für den Bauzustand müssen Besonderheiten bei der Bemessung berücksichtigt werden, da das Stahlprofil nur sehr geringe Blechstärken besitzt. Im Endzustand werden die Hohlräume des Stahlprofils ausbetoniert, so dass damit gleichzeitig auch die Verbundwirkung wirksam wird. Für die gegebenen Querschnitte zeigt sich ferner beim Tragfähigkeitsnachweis, dass eine dehnungsbeschränkte Bemessung durchgeführt werden muss. Ebenso entwickelt Schäfer in seiner Arbeit einen Ansatz für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit dieser Systeme.

##### 3.2.2 Slim-Floor Träger mit Hutprofilen nach [Fries 2001]

[Fries 2001] behandelt das Tragverhalten und die Optimierung der Bemessung von deckengleichen Verbundträgern in Hutform. Der Schwerpunkt liegt auf der wirklichkeitsnahen Erfassung der Verformungen von Flachdecken mit Hutprofilen als Einfeldträger unter Berücksichtigung einer teilweisen Verdübelung. Zur Verifizierung des analytischen Rechenmodells im positiven Momentenbereich wurden sechs Versuche unter Variation des Verdübelungsgrads durchgeführt.

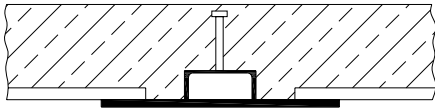


Abbildung 3.2: Flachdecke mit Hutprofil

Zur Ermittlung realistischer Verformungen von Flachdecken mit Hutprofilen an Einfeldträgern entwickelt Fries ausgehend von Lösungen elastischer Differentialgleichungen ein Rechenmodell. Ebenso führt Fries Versuche mit Trägern im negativen Momentenbereich durch. Es zeigt sich hierbei, dass das Tragverhalten der Flachdecke mit Hutprofil unter negativer Momentenbeanspruchung nahezu unabhängig vom Verdübelungsgrad ist. Nach [Fries 2001] kann der deckengleiche Verbundträger als reine Stahlbetondecke mit durch das Hutprofil verstärktem Druckbereich aufgefasst werden. Zur Berechnung realistischer Verformungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  sollte im Stützbe- reich das elastische Trägheitsmoment des deckengleichen Verbundträgers mit dem Faktor 0,6 reduziert werden. Die Arbeit beinhaltet zudem eine aus den Versuchsergebnissen abgeleitete Näherung zur Berechnung der Verformungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  bei Teilverbund.

Fries entwickelt somit zum ersten Mal Ansätze zur Berechnung der Tragfähigkeit und der Verfor- mung von Slim-Floor Trägern allerdings für den speziellen Querschnittstyp der Hutprofile.

### 3.3 Untersuchungen zum Tragverhalten und zur mittragenden Breite

#### 3.3.1 Untersuchungen nach [Amadio, Fragiaco 2002]

Im Rahmen einer numerischen Untersuchung an normal hohen Verbundträgern [Amadio, Fragiaco 2002] stellen die Autoren fest, dass die mittragende Breite zwischen dem Grenzzu- stand der Gebrauchstauglichkeit und dem Grenzzustand der Tragfähigkeit erheblich voneinander abweicht. Mit steigender Belastung nimmt die mittragende Breite stark zu. Um diese Berechnun- gen zu untermauern wurden verschiedene Trägertests an normal hohen Verbundträgern durchge- führt und die Versuchskörper hinsichtlich der mittragenden Breite untersucht [Amadio et al 2004].

Getestet wurden im Rahmen der Untersuchung Verbundträger mit einer Länge von  $L = 3,80$  m und einer Plattenbreite von  $b = 1,60$  m unter negativer Momentenbelastung. Ein Träger wurde mit einem durchgängigen Profil ausgeführt, der zweite als Träger-Stützenanschluss in Feldmitte.

Anhand der Versuche kann folgendes festgestellt werden:

- Für den ungerissenen und gerissenen Betonquerschnitt kann ein glockenförmiger Verlauf der Dehnungen in der Bewehrung festgestellt werden.
- Dieser flacht jedoch immer mehr ab, sobald die Bewehrung die Fließgrenze erreicht und auch die Bewehrungsstäbe in den äußeren Bereichen beginnen zu fließen.
- Bei Erreichen der Traglast kann eine konstante Dehnungsverteilung über die gesamte Trä- gerbreite ermittelt werden.
- Der Versuchsträger, ausgeführt als Träger-Stützen-Anschluss, weist ein sehr ähnliches Trag- und Verformungsverhalten zum über der Stütze durchlaufenden Profil auf.

[Amadio et al 2004] schlägt auf Basis der durchgeführten Versuche und der numerischen Untersu- chungen vor, die mittragenden Breiten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit wie folgt anzupas- sen:

- Im Bereich positiver Momente soll die mittragende Breite nach [DIN EN 1994-1-1] beibehalten werden:  $b_{e,i} = l_0 / 8$ , mit  $l_0$  als Abstand zwischen den Momentennullpunkten und  $b_{e,i}$  die mittragende Breite einer Trägerhälfte
- Im Bereich der negativen Momente schlägt Amadio die mittragende Breite zu  $b_{e,i} = l_0 / 4$  vor, was einer größeren mittragenden Breite als im Feldbereich entspricht.

Da im Rahmen der eigenen Versuchsreihe auch Träger unter negativer Momentenbelastung und als Träger-Stützenanschluss durchgeführt wurden, eignen sich die Verbundträgerversuche nach [Amadio et al 2004] sehr gut zum Vergleich.

### 3.3.2 Mittragende Breite von Verbundträger unter negativer Momentenbeanspruchung nach [Holtkamp 1991]

[Holtkamp 1991] beschäftigt sich in seiner Arbeit mit der mittragenden Breite von normal hohen Verbundträgern im negativen Momentenbereich. Ziel der Arbeit ist die Herleitung einer experimentell ermittelten und mittels FE-Berechnung verifizierten mittragenden Breite für den Stützquerschnitt. In diesem Zusammenhang werden auch Trägerversuche durchgeführt. Die Breite der Betonplatte liegt bei 3,0 m, die Plattendicke bei 15 cm. Das geschweißte Baustahlprofil hat eine Gesamthöhe von 0,64 m. Die zwei Versuchsträger unterscheiden sich durch den Bewehrungsgrad (0,8% / 1,75%).

Es zeigt sich hierbei, dass die Betongurkraft sich über dem Stützquerschnitt aus der Zugkraft in der Bewehrung und der Zugkraft im Beton zusammensetzt. Der Beton liegt hier teils noch im Zustand I vor bzw. entsteht die Zugkraft durch den sog. Tension-Stiffening-Effekt, also der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen.

[Holtkamp 1991] geht bei seinen Trägern davon aus, dass die Betonzugkraft so klein ist, dass diese vernachlässigt werden kann. Daher setzt er für die Bestimmung der mittragenden Breite nur die Zugbewehrung an. Seine Formel für die mittragende Breite leitet er nun über die Beziehung, dass die Krümmung des Baustahlprofils gleich der Verbundquerschnittskrümmung ist. Durch Auflösen erhält er folgenden Berechnungsansatz:

$$b_{\text{eff,neg}} = \frac{A_a \cdot I_a \cdot \left( \frac{M}{M_a} - 1 \right)}{2 \cdot \mu \cdot d \cdot \left( I_a + A_a \cdot z_a^2 - \frac{M}{M_a} \cdot I_a \right)} \quad (\text{Gleichung 3.1})$$

Mit

$\mu$	geometrischer Bewehrungsgrad
$d$	Dicke der Betonplatte
$M$	einwirkendes Moment
$M_a$	Moment des Stahlträgers

Die Annahme, dass der Betongurt über die gesamte Höhe gerissen vorliegt, kann bei der gegebenen Trägergeometrie angenommen werden. Die Null-Line des Verbundquerschnitts liegt im Stahlträgersteg. Die Übertragung dieses Ansatzes auf Slim-Floor Träger, bei denen der Betongurt einen erheblichen Anteil an der Biegetragfähigkeit aufnimmt und sich somit nicht unwesentlich am Lastabtrag beteiligt, wird aber kritisch betrachtet. Da [Holtkamp 1991] die gesamte Zugkraft auf die

Bewehrung ansetzt, ergibt sich auf Basis eines vorhandenen geometrischen Bewehrungsgrades eine sehr große mittragende Breite.

Aus diesem Grund wurde in Rahmen einer Diplomarbeit [Eisele 2009] eine Untersuchung zur Anwendbarkeit des Ansatzes von [Holtkamp 1991] für Slim-Floor Träger (siehe Abschnitt 5.3 – Versuche an zweifeldrigen Slim-Floor Trägern) durchgeführt. Es zeigt sich hierbei, dass sich eine rechnerische mittragende Breite ergibt, die um ein Vielfaches größer war als die geometrische Breite der Versuchsplatte [Eisele 2009]. Dies Ergebnis zeigt einerseits, dass der Ansatz von [Holtkamp 1991] keinesfalls auf Slim-Floor Systeme übertragen werden kann und andererseits sich der Betongurt zu einem großen Teil am Lastabtrag beteiligt.

### **3.3.3 Untersuchungen zur mittragenden Breite an Verbundknoten nach [Schäfer 2005]**

#### **3.3.3.1 Grundsätzliches**

In der Arbeit von Schäfer wird das Tragverhalten von teiltragfähigen Verbundknoten untersucht, wobei das Hauptaugenmerk auf der Rotationskapazität liegt. Zur Verifizierung des Komponentenmodells wird eine Reihe von Versuchen an Anschlüssen durchgeführt, die als Verbundknoten ausgeführt wurden. Die Verbundknoten bilden einen Ausschnitt der Verbundträgersysteme mit einer Mittel- oder Innenstütze nach.

Die Arbeit von Schäfer wird in diesem Zusammenhang aufgeführt, da im Rahmen der Versuchsdurchführung eine Vielzahl von Messungen und Beobachtungen gemacht werden, die auch für das Tragverhalten von Slim-Floor Träger im Bereich des Mittelaufagers und damit unter negativer Momentenbeanspruchung von Bedeutung sind. Diese werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

#### **3.3.3.2 Anordnung der Kopfbolzen – Zugbandeffekt**

Durch die Anordnung der Kopfbolzen mit einem gewissen Randabstand zum Mittelaufleger kann eine günstigere Rissverteilung insbesondere unter Gebrauchslasten erzielt werden. Durch einen vergrößerten Abstand der Kopfbolzen entstehen im Bereich der Mittelstütze über eine größere Länge verteilt kleinere Risse, während, wenn die Kopfbolzendübel bis zur Mittelstütze herangeführt werden, sich auf einer verkürzte Länge wenige aber dafür breite Risse bilden. Dies hängt damit zusammen, dass mit der weiter entfernten Schubkrafteinleitung durch den Kopfbolzendübel die Spannung in den Bewehrungsstäben direkt am Mittelaufleger geringer ist und damit die Dehnung bzw. Rissbildung ein wenig reduziert werden kann. Dieser Effekt wirkt sich damit direkt auf den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit / Rissbreitenbeschränkung aus.

Da der Querschnitt des Slim-Floor Trägers sehr niedrig ist, reißt der Querschnitt sehr schnell und weit über der Mittelstütze auf, so dass durch eine gezielte Anordnung der Kopfbolzen dieser Effekt ein wenig abgemildert werden kann (siehe hierzu auch Abschnitt 5.3).

#### **3.3.3.3 Experimentelle mittragende Breite im Bereich des Verbundknotens**

Zur Bestimmung der Rotationskapazität der Stirnplattenanschlüsse werden im Rahmen der Untersuchung von [Schäfer 2005] mehrere Versuche mit normal hohen Verbundträgern durchgeführt. Acht Versuchsträger werden mit einer Plattenbreite von 1,0 m ausgeführt, der neunte mit einer Breite von 2,0 m. Die Plattenbreite von 1,0 m entspricht hierbei der mittragenden Breite nach [DIN

EN 1994-1-1]. Die Auswertung des Versuches zeigt, dass auch die breite Platte als voll mittragend angesehen werden kann. Das heißt, dass der normative Ansatz für die mittragende Breite das tatsächliche Tragverhalten weit unterschätzt, für die Tragfähigkeit aber genutzt werden sollte.

Die Ergebnisse in der Arbeit von [Schäfer 2005] werden in die Versuchskonzeption der Zweifeldträgerversuche mit Slim-Floor Trägern entsprechend berücksichtigt, siehe hierzu Abschnitt 5.3.

### **3.3.4 Verformungsbezogene mittragende Breite nach [Rieg 2006]**

#### **3.3.4.1 Grundsätzliches**

Die Arbeit von [Rieg 2006] beschäftigt sich mit dem Trag- und Verformungsverhalten von niedrigen Verbundträgern, siehe Abbildung 2.1. Vergleicht man das Tragverhalten dieser niedrigen Verbundträger, so liegen diese zwischen normal hohen Verbundträgern und Slim-Floor Trägern. Unter Gebrauchslasten weisen diese ebenfalls auf der Betonunterseite Risse auf, so dass dies bei der Verformungsberechnung berücksichtigt werden muss. Die Arbeit konzentriert sich hierbei auf das Trag- und insbesondere Verformungsverhalten von Einfeldträgern. Es zeigt sich für niedrige Verbundträger, dass die normative Regelung zur Verformungsberechnung / mittragenden Breite sehr konservative Ergebnisse liefert und somit die Bemessung, die maßgeblich über den Verformungsnachweis bestimmt wird, sehr unwirtschaftlich werden lässt.

#### **3.3.4.2 Untersuchungen zur Scheiben- und Biegetragwirkung des Betongurts**

Ein weiterer Bestandteil der Arbeit beschäftigt sich mit dem Scheiben- und Biegetraganteil des Betongurts. Für den Einfeldträger werden auf Grundlage der Scheiben- und Plattendifferentialgleichung die mittragenden Breiten für den Biegegurt und die Betonscheibe abgeleitet und für die Durchbiegungsberechnung der niedrigen Verbundträger angewandt. Es zeigt sich hierbei, dass die mittragende Breite des Biegegurts größere Werte einnimmt als der entsprechende Wert für den Scheibenzustand, der wiederum Grundlage für die Norm [DIN 18800-5] darstellt.

Ebenso wie auch bei den Slim-Floor Trägern darf der Betongurt für eine wirtschaftliche Bemessung gerade in Hinblick auf die Verformung nicht unberücksichtigt bleiben. Mittels dieser beiden mittragenden Breiten und dem nichtlinearen Berechnungsverfahren auf Grundlage der Momenten-Krümmungs-Beziehung kann die Durchbiegung genauer bestimmt werden und damit die Querschnitte insgesamt wirtschaftlicher bemessen werden.

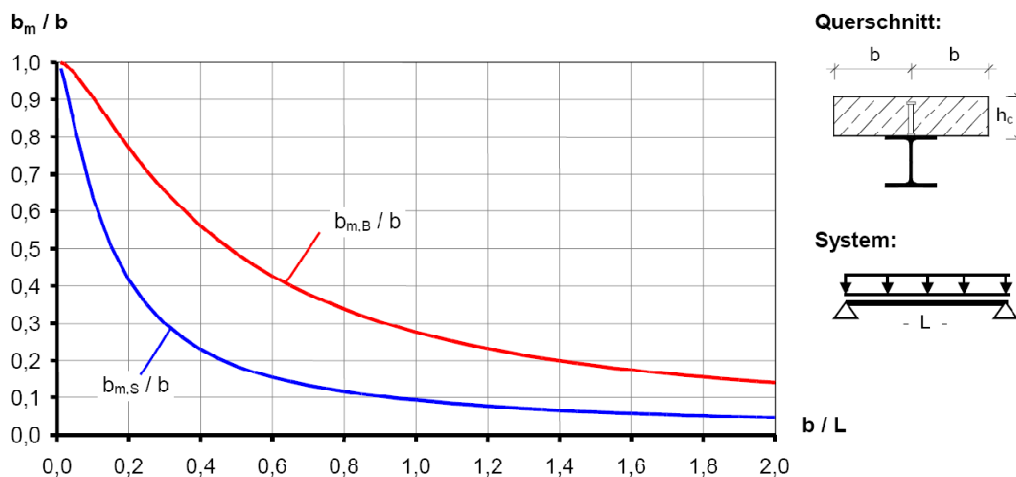


Abbildung 3.3: Mittragende Breite  $b_{m,B}$  und  $b_{m,S}$  des einseitigen Plattenbalkens in Feldmitte unter Gleichlast nach [Rieg 2006]

Detaillierte Informationen zur mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands sind im nachfolgenden Abschnitt 4.5 zu finden, da diese Untersuchungen ebenfalls Grundlage für das Tragverhalten der in dieser Arbeit hier untersuchten Slim-Floor Träger bildet. Rieg führt in seiner Arbeit auch zum ersten Mal den Begriff der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  ein. Es handelt sich hierbei um eine konstante mittragende Breite für die Bestimmung der Trägerdurchbiegung auf Grundlage nichtlinearer Berechnungsverfahren. Dadurch, dass die niedrigen Verbundträger an Steifigkeit durch die Rissbildung im Gebrauchslastzustand verlieren, ist es notwendig dieses Verformungsverhalten durch eine lastabhängige mittragende Breite anzupassen.

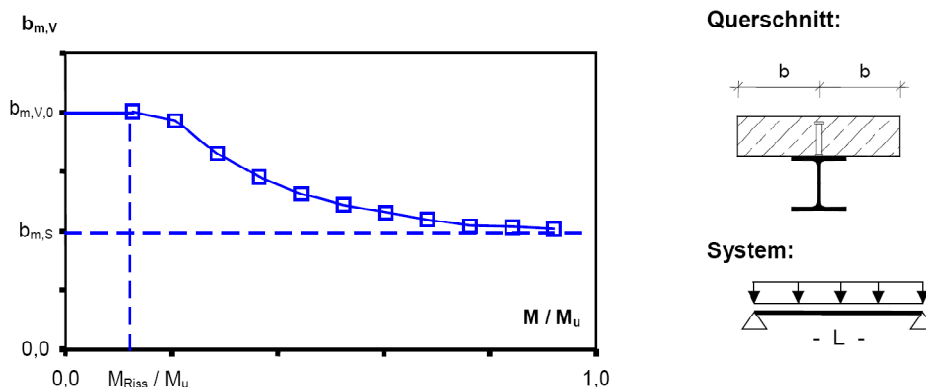


Abbildung 3.4: Mittragende Breite  $b_{m,B}$  und  $b_{m,S}$  des einseitigen Plattenbalkens in Feldmitte unter Gleichlast nach [Rieg 2006]

Durch eine umfangreiche Studie können die einflussreichsten Parameter für die verformungsbezogene mittragende Breite identifiziert werden und ein Berechnungsansatz entwickelt werden. Auch hier wird auf den Abschnitt 7 verwiesen, der grundlegende Gedanken aus der Arbeit von Rieg aufgreift und für Slim-Floor Träger anwendet bzw. für Zweifeldsysteme erweitert.

Da die Berechnung für die praktische Anwendung sehr aufwändig ist, wird auf Basis des nichtlinearen Modells ein linear-elastischer Ansatz für Einfeldträger entwickelt. Grundlage hierfür bildet das Gesamtquerschnittsverfahren, das sich aus dem Verbundquerschnittswert und einem Abminderungsfaktor zusammensetzt.

#### 3.3.4.3 Tragverhalten von Verbundquerschnitten im Stützbereich nach [Elz 1998]

[Elz 1998] beschäftigt sich in seiner Arbeit mit dem Riss-, Trag- und Verformungsverhalten von normal hohen Verbundträgern im Stützbereich. Anhand von Versuchsträgern mit der Variation durchlaufendes Profil und Träger-Stützen-Anschluss soll insbesondere das Rissverhalten und die Rotationskapazität des Anschlusses untersucht werden.

Gleichzeitig aber untersucht [Elz 1998] auch den Einfluss der Bewehrung auf die mittragende Breite. Er stellt hierbei anhand numerischer Berechnungen fest, dass bei einem niedrigen Bewehrungsgrad die Dehnungsverteilung gleichmäßig über die Betonplatte verteilt erscheint, bei einem hohen eine Konzentration zur Trägermitte hin stattfindet. Dies bedeutet rechnerisch eine kleinere mittragende Breite bei einem höheren Bewehrungsgrad. Bei den eigenen Slim-Floor Trägerversuchen konnte dies experimentell bestätigt werden, siehe hierzu Abschnitt 5.3.2.10.

### 3.4 Zusammenfassung

Die hier genannten Arbeiten zeigen sehr deutlich, dass der Betongurt und die damit einhergehende Bestimmung der mittragenden Breite einen sehr großen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern spielen. Zum Tragverhalten von Slim-Floor Trägern, insbesondere unter Berücksichtigung einer Verbundwirkung zwischen dem Baustahlprofil und dem Betongurt, ist jedoch die Zahl der wissenschaftlichen Arbeiten begrenzt, was auch mit der relativ jungen Verbundflachdeckenbauweise zu tun hat. Die in diesem Abschnitt genannte Literatur stellt wichtige das Trag- und Verformungsverhalten betreffende Untersuchungen dar, erhebt aber nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Untersuchungen zum Tragverhalten von Slim-Floor Trägern unter Querkraft sowie der Einfluss des Kriechens und Schwindens werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur kurz angesprochen. Hinweise auf entsprechende Literatur hierzu sind im Abschnitt 9 zu finden.

Weitere Arbeiten und Literaturquellen zur mittragenden Breite von Plattenbalken und Gurten allgemein werden im nachfolgenden Abschnitt aufgeführt.



## 4 Mittragende Breite von Betongurten bei Slim-Floor Trägern

### 4.1 Grundsätzliches

Im vorangegangenen Abschnitt wird das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern und Slim-Floor Trägern dargestellt. Da hierbei der Betongurt (insbesondere für Slim-Floor Träger) keine unwesentliche Rolle spielt, werden im nachfolgenden Abschnitt die mittragende Breite und der Einfluss derer auf das Trag- und Verformungsverhalten näher erläutert. Ein Vergleich der derzeit gültigen normativen Regelung wird ebenso aufgearbeitet wie aktuelle Untersuchungen zur mittragenden Breite nach [Kuhlmann, Rieg 2004a], [Rieg 2006].

Es gibt heutzutage eine Vielzahl von Untersuchungen zur mittragenden Breite. Der nachfolgende Abschnitt fasst diese sehr kompakt zusammen, für weitere Hinweise wird auf folgende Quellen verwiesen, die einen vertieften Einblick gewähren (alphabetisch geordnet):

[Albrecht 1976], [Brendel 1960], [Chawalla 1936], [Grasser, Moosecker 1982], [Grünberg 1978], [Hofmann, Ramm 1993], [Karmann von 1924], [Koepcke, Denecke 1967], [Marguerre 1952], [Metzger 1929], [Nádai 1925], [Nie 2004], [Olsen 1950], [Rose 1965], [Schmidt, Born 1978], [Schmidt, Peil 1976], [Schröder, Stritzke 1978], [Sedlacek, Bild 1990], [Severn 1964], [Trost 1968].

In Zusammenhang mit dem in Abschnitt 4.5.2 dargestellten Scheibenzustand sind die Untersuchungen von [Schmidt, Born 1978] und [Schmidt, Peil 1976] zur mittragenden Breite von orthotropen Gurten in Plattenbalken zu erwähnen. Die hierbei abgeleiteten sehr umfangreichen Tabellen auf Basis der Elastizitätstheorie berücksichtigen dabei eine Vielzahl von unterschiedlichen Randbedingungen wie den Belastungstyp (Einzellast, Gleichlast, symmetrisch, etc.), die Querschnittsform des Hauptträgers, Flächenverhältnis von Gurt zu Hauptträger, etc. Die Untersuchungen basieren auf einer elastischen Lösung der Scheibendifferentialgleichung aber ohne Berücksichtigung einer Rissbildung von Betongurten, Plastizierung von Stahlquerschnitten oder der Biegesteifigkeit des Betongurts.

### 4.2 Tragverhalten von Plattenbalken und Träger mit breiten Gurten

#### 4.2.1 Grundsätzliches

Deckensysteme sind infolge ihrer schlanken Konstruktion in ihrer Anwendung (in Bezug auf die Spannweite) begrenzt. Werden aber Plattenbalkensysteme verwendet, bei denen der Betongurt kraftschlüssig mit einem Balken verbunden wird, können die Spannweiten und damit die möglichen Einsatzmöglichkeiten stark ausgeweitet werden. Hierbei ist eine Vielzahl von Varianten möglich, sowohl im Stahlbetonbau wie auch im Verbundbau. Die nachfolgende Abbildung 4.1 zeigt zwei klassische Querschnitte, die am Häufigsten in der Praxis zur Anwendung kommen.



Abbildung 4.1: Mittragende Breite eines Plattenbalkens und eines Verbundträgers [Kuhlmann, Rieg 2004a]

Plattenbalken im Massivbau werden hierbei monolithisch mit entsprechenden Schubdübeln hergestellt, während bei Stahlverbundträgern zusätzliche Verbundmittel für den Kraftschluss zwischen dem Stahlprofil und dem Betongurt notwendig werden. Über diese Verbundmittel können die Längsschubkräfte zwischen Betongurt und Baustahlprofil übertragen werden und somit der Gesamtquerschnitt aktiviert werden.

Der Betongurt erfährt hierbei eine doppelte Tragwirkung: Während er in Trägerlängsrichtung als Druckgurt wirkt, wird die Platte in Querrichtung dafür benutzt, die Lasten auf der Deckenplatte über Biegung auf den Plattenbalken abzutragen. Der Balken bzw. Stahlträger fungiert dabei als Linienauflager.

Im Zusammenhang mit dem Betongurt und der Haupttragrichtung, also in Trägerlängsrichtung, wird auch der Begriff der mittragenden Breite verwendet, der im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert wird. Zuvor aber soll erst noch der Blick auf den sogenannten Scheiben- und Biegezustand gerichtet werden, der darstellt, welchen Belastungen der Betongurt unterliegt. Ebenfalls wird im Abschnitt 4.2.3 und 4.2.4 der Einfluss der mittragenden Breite auf die Tragfähigkeit und Steifigkeit aufgezeigt.

#### 4.2.2 Scheiben- und Biegezustand der mittragenden Breite

Durch das äußere Moment unterliegt der Betongurt zweier Belastungen, einmal der Normalkraft aus der Kräftepaarbildung (Baustahl unter Zug, Betongurt unter Druck) und dem Eigenbiegemoment der Betonplatte, so dass hier von einer Scheibentragwirkung und einer Biegetragwirkung des Betongurtes gesprochen werden kann.

Der Scheibenzustand resultiert hierbei aus der schubfesten Verbindung zwischen Baustahlträger und Betonplatte und wird in diesem Zusammenhang als eine biegeschlaaffe Scheibe betrachtet. Durch die Biegesteifigkeit des Betongurtes selber ergibt sich ein Biegemoment in der Betonplatte. Die beiden Tragwirkungen sind in der nachfolgenden Abbildung 4.2 nochmals dargestellt.

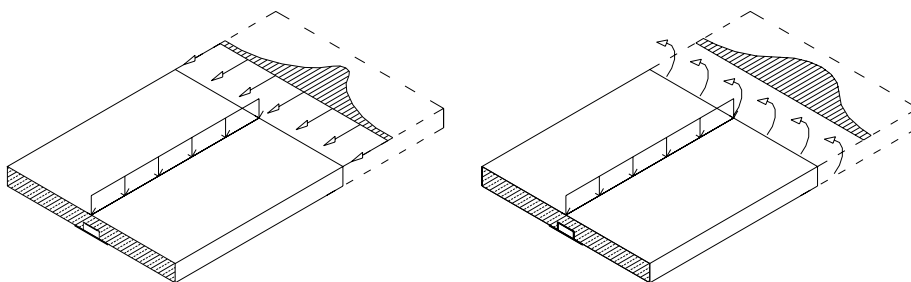


Abbildung 4.2: Scheiben- und Biegetragwirkung des Betongurtes [Kuhlmann, Rieg 2004a]

Wie im Abschnitt 2.2.1 bereits erläutert, ist der Biegetraganteil des Betongurtes bei sehr hohen Verbundträgern vernachlässigbar klein, so dass auch das Biegemoment  $M_c$  vernachlässigt werden kann. Für diesen Querschnitt wird daher meist nur die Scheibentragwirkung des Betongurtes berücksichtigt.

Generell wird in den meisten Veröffentlichungen zur mittragenden Breite der Biegetraganteil des Betongurtes vernachlässigt und der Betongurt nur als Scheibe betrachtet [Kuhlmann et al 2006b].

Für Slim-Floor Träger ist der Biegeanteil des Betongurtes jedoch so hoch, dass er nicht mehr ohne Weiteres vernachlässigt werden kann. Dies bedeutet, dass die Biegetragwirkung für die realistische Bestimmung der Verformung berücksichtigt werden sollte [Hauf 2008]. Allerdings reißt mit

zunehmender Belastung der Querschnitt auf, so dass der Biegeanteil kein lineares Tragverhalten mehr aufweist. Die Rissbildung muss daher bei der Berechnung durch einen abnehmenden Biegetraganteil mit berücksichtigt werden, siehe Abschnitt 6.2.3.

Weitere Untersuchungen und Herleitungen des linear-elastischen Falls für die mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands sind in Abschnitt 4.5 zu finden.

#### 4.2.3 Einfluss der mittragenden Breite auf die Tragfähigkeit

In wieweit die mittragende Breite einen Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Verbundträgers hat, hier im Vergleich ein normal hoher Verbundträger (HEA 500), ein niedriger Verbundträger (HEA 200) und zwei Slim-Floor Träger (UPE 200, 300), zeigt die nachfolgende Abbildung 4.3. Im Diagramm ist jeweils über die vertikale Achse die bezogene Momententragfähigkeit jedes einzelnen Trägers dargestellt. Die horizontale Achse gibt das Verhältnis zwischen einer angenommenen mittragende Breite zur Trägerspannweite wieder. Das hier gezeigte Beispiel geht von einer Stützweite  $L = 6,0$  m und einer Betonplattendicke  $h_c$  von 26 cm aus.

Für normal hohe Verbundträger gilt, dass mit zunehmendem Verhältnis  $b/L$  die Tragfähigkeit insgesamt nur sehr wenig gesteigert werden kann, gleiches gilt für den hier beispielhaft berechneten niedrigen Verbundträger (mit dem Baustahlprofil HEA 200). Für Slim-Floor Querschnitte ist der Einfluss im Vergleich zu normal hohen Verbundträgern etwas größer.

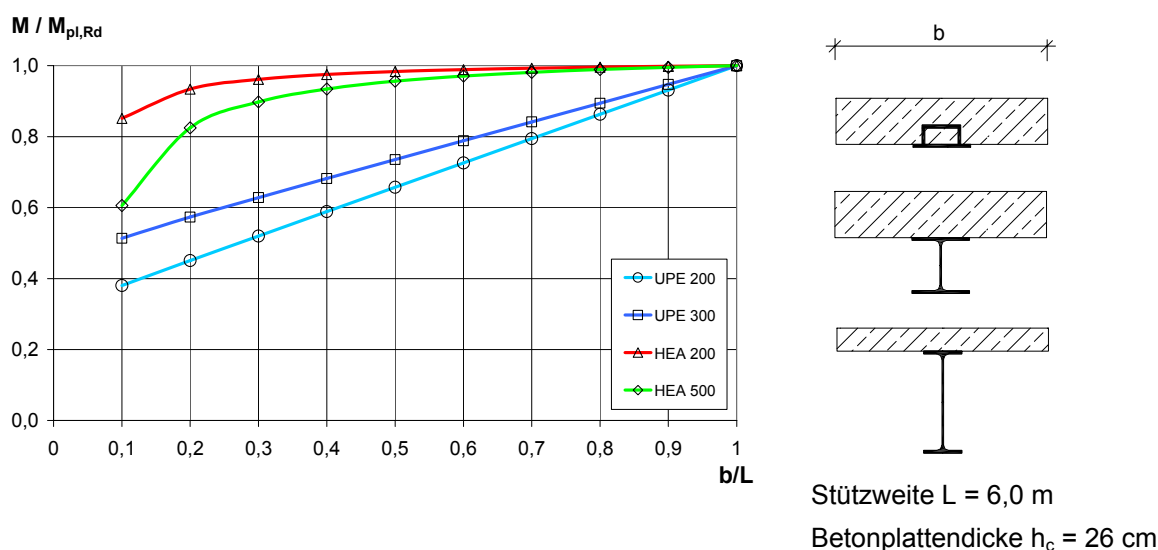


Abbildung 4.3: Einfluss der mittragenden Breite  $b_{\text{eff}}$  auf die Momententragfähigkeit

Der Grund hierfür ist, dass sich mit zunehmender mittragender Plattenbreite  $b$  die Druckzonenhöhe im Querschnitt ändert, insgesamt aber der Hebelarm für das Kräftepaar aus Baustahlzugkraft und Betondruckkraft kaum eine Änderung erfährt und daher auch die Tragfähigkeit nur geringfügig ansteigt.

#### 4.2.4 Einfluss der mittragenden Breite $b_{\text{eff}}$ auf die Steifigkeit

Auf die Trägersteifigkeit hat die mittragende Plattenbreite  $b_{\text{eff}}$  im Gegensatz dazu einen größeren Einfluss. Dies hängt damit zusammen, dass bei der Berechnung des elastischen Trägheitsmoments  $I_{i,0}$  die Plattenbreite proportional eingeht. Da der Biegetraganteil des Betongurts bei Slim-

Floor Trägern im Vergleich zu normal hohen Verbundträgern nicht vernachlässigbar ist, erhöht sich insgesamt der Einfluss auf das Biegeträgheitsmoment merklich, siehe Abbildung 4.4.

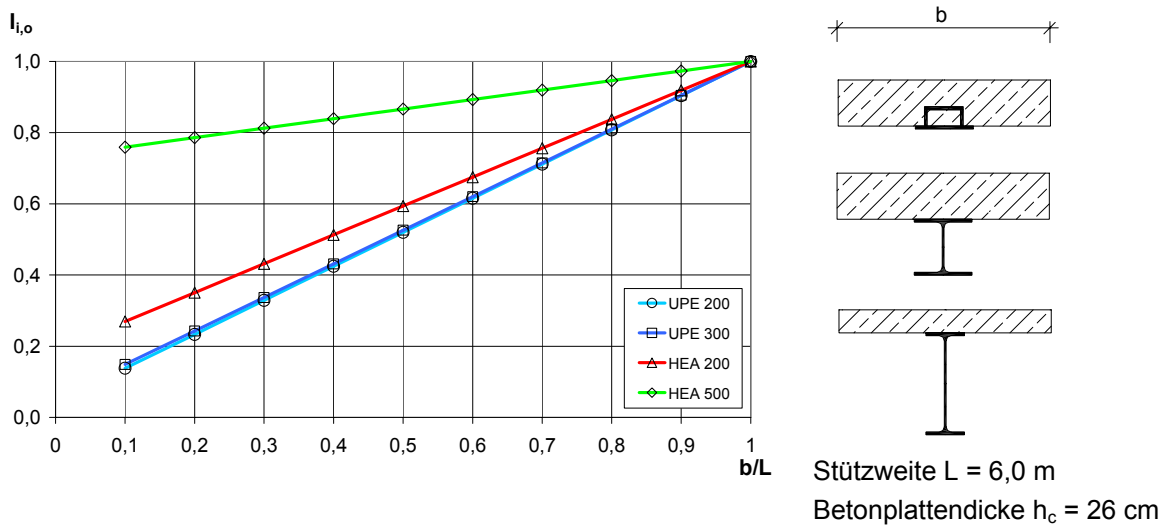


Abbildung 4.4: Einfluss der mittragenden Breite  $b_{\text{eff}}$  auf Trägersteifigkeit

Die Festlegung des Querschnitts bei Slim-Floor Trägern wird in vielen Fällen durch den Nachweis der Verformung bestimmt, bei normal hohen Verbundträgern meist über den Nachweis der Tragfähigkeit. Es zeigt sich daher, dass für eine effiziente Dimensionierung von Slim-Floor Querschnitten die mittragende Breite und der Betongurt eine nicht unwesentliche Rolle dazu beitragen und für die Wirtschaftlichkeit dieser Träger von großer Bedeutung sind.

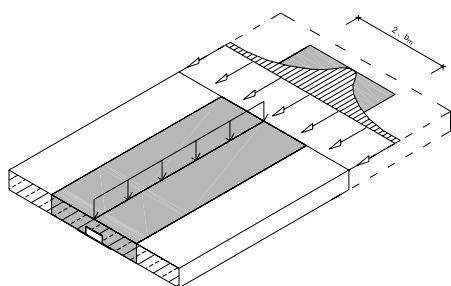
## 4.3 Definition der mittragenden Breite

### 4.3.1 Spannungsbezogene mittragende Breite $b_{\text{eff}}$

Betrachtet man einen Verbundträger mit einem sehr breiten Betongurt, so stellt sich die Frage, in wieweit die äußeren Bereiche sich an der Abtragung der Kräfte beteiligt, denn aufgrund der Schubweichheit des Gurtes stellt sich über die gesamte Trägerbreite keine konstante Spannungsverteilung ein, die Spannungen nehmen nach außen hin ab. Dies deutet auf ein ausgeprägtes dreidimensionales Tragverhalten des Gurtes hin, was die Berechnung sehr aufwändig werden lässt. Zur Vereinfachung wird daher die mittragende Breite eingeführt, eine über die Querrichtung konstant gewählte Spannung, so dass der Träger als ein eindimensionales Tragwerk berechnet werden kann. Daher wird sie auch „spannungsbezogene mittragende Breite“ bezeichnet. Die Bezeichnung der spannungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{\text{eff}}$  wird in der Literatur unterschiedlich bezeichnet: Neben der hier verwendeten Bezeichnung  $b_{\text{eff}}$  liest man oftmals auch die Abkürzung  $b_m$ .

In Abbildung 4.5 ist dargestellt, wie die mittragende Breite bestimmt wird. Auf Höhe der Stahlträgerachse sind aufgrund der Schubweichheit des Betongurtes die Spannungen am größten und nehmen nach außen hin ab. Der Verlauf der Spannung ähnelt hierbei einer Glockenform. Wird nun die maximale Spannung festgehalten und eine zugehörige Breite  $b_{\text{eff}}$  berechnet, die in der Summe die gleiche Spannung besitzt wie der tatsächliche Verlauf (Flächengleiche), so ist die mittragende

Breite des Gurtes bestimmt. Die mittragende Breite  $b_{\text{eff}}$  muss daher nach Definition immer kleiner sein als die vom tatsächlich eingenommenen Spannungsverlauf.



Ermittlung der spannungsbezogenen mittragenden Breite  $b_m$ :

$$b_m = \frac{1}{\sigma_{x,\max}} \cdot \int \sigma_x dy \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

Abbildung 4.5: Definition der mittragende Breite  $b_{\text{eff}}$

Die mittragende Breite verläuft über die Trägerlängsrichtung jedoch nicht konstant [Hasslacher 2001]. Das heißt für die Ermittlung der Schnittgrößen wie auch für die Verformungsberechnung müsste mit einem an jedem Punkt des Trägers unterschiedlichen Wert gerechnet werden, was für die praktische Anwendung zu aufwändig ist.

Untersuchungen von [Rieg 2006] für niedrige Verbundträger und auch die nachfolgenden Untersuchungen zeigen, dass der bestehende normative Ansatz für die mittragende Breite für die Berechnung der Trägerverformung zu unwirtschaftlich gewählt ist. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein Ansatz für eine sog. „verformungsbezogene mittragende Breite“ entwickelt, der eine realitätsnahe Verformungsberechnung ermöglichen soll.

Die Arbeit von Rieg konzentriert sich hierbei auf niedrige Verbundträger und Einfeldträgersysteme. Die hier nachfolgende Arbeit untersucht die mittragende Breite und das Verformungsverhalten für Slim-Floor Systeme als Ein- aber auch als Zweifeldträgersysteme.

#### 4.3.2 Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$

In der Arbeit von [Rieg 2006] wird der Begriff der verformungsbezogenen mittragenden Breite eingeführt. Als Bezeichnung hierfür wurde  $b_{m,v}$  eingeführt. Das „m“ steht für mittragend, das „v“ weist auf den Verformungsbezug hin.

Der Grund für die Einführung dieser verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  liegt darin, dass die Werte für die spannungsbezogene Breite nur die Scheibentragwirkung berücksichtigen, dies aber für Slim-Floor Träger und sehr niedrige Verbundträger zu einer unwirtschaftlichen Verformungsberechnung führt. Der Biegetraganteil  $I_c$  des Betongurtes ist bei diesen schlanken Tragwerken in ausgeprägter Form vorhanden und sollte daher in Hinblick auf eine realitätsnahe Durchbiegungsberechnung angesetzt werden. Als weiterer Grund ist zu nennen, dass die Rissbildung zu einem sehr ungleichmäßigen Verlauf der mittragenden Breite über die Trägerlängsrichtung führt und an der Stelle des größten Moments den kleinsten Wert ( $I_c$  durch die Rissbildung am geringsten) annimmt. Dies führt für den globalen Ansatz einer mittragenden Breite zu einer Unterschätzung der Trägersteifigkeit und einer Überschätzung der Trägerverformung [Kuhlmann, Rieg 2003].

Die hierfür eingeführte verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  wird so definiert, dass die Verformungsberechnung an einem Ersatzbalken mit einer konstanten (verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$ ) die gleiche Verformung besitzt wie die Berechnung an einem realen Plattenbalken.

#### 4.4 Normative Regelungen für die mittragende Breite

Die mittragende Breite ist in den verschiedenen Normen sehr unterschiedlich geregelt, wie die nachfolgende Abbildung 4.6 darstellt. Dies beruht auf verschiedenen Ansätzen, die zur Berechnung der mittragenden Breite angewandt werden. Nachfolgend werden einzelne beispielhafte Normen und Regelungen aufgeführt.

Man erkennt, dass die Werte für die mittragende Breite stark voneinander abweichen und sehr weit streuen, siehe hierzu Abbildung 4.6. Mit zunehmenden  $b/L$ -Verhältnis (zwischen 0,10 und 0,40) fallen die Werte für die mittragende Breite stark ab, um dann ab einem Verhältnis  $b/L > 0,4$  flach auszulaufen. Für das Verhältnis  $b/L = 1,0$  schwanken die Werte für die mittragende Breite zwischen  $0,10 \cdot$  und  $0,35 \cdot b_m/b_i$ , die Zwischenwerte erreichen teils noch größere Differenzen untereinander (bis zu 150% Abweichung, bezogen auf den kleinsten Wert der mittragenden Breite).

Die Werte der mittragenden Breite für Stahlbetonbauteile weisen hierbei durchgehend größere Werte auf als die Regelungen für Verbundtragwerke.

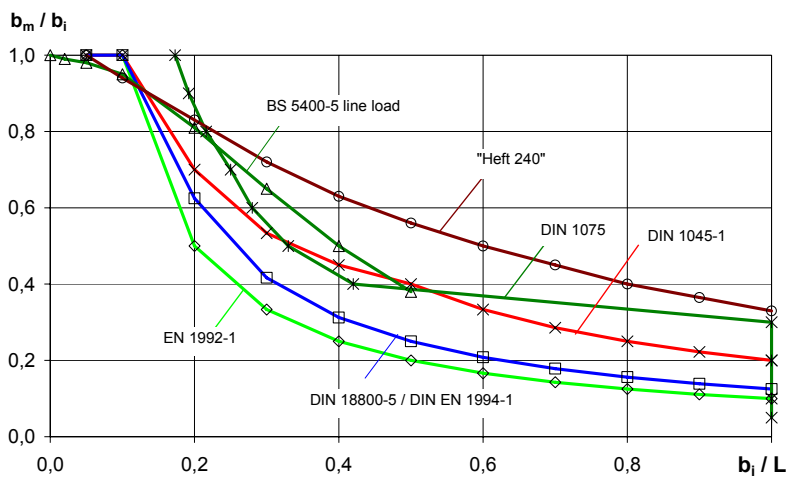


Abbildung 4.6: Mitrtragende Breite verschiedener Normenregelungen

Die Werte nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] z.B. werden mit Hilfe der sog. „äquivalenten Stützweite  $L_e$ “ berechnet. Diese Länge entspricht näherungsweise dem Abstand zwischen den Momenten-Nulldurchgängen des vorliegenden statischen Systems, siehe Abbildung 4.7.

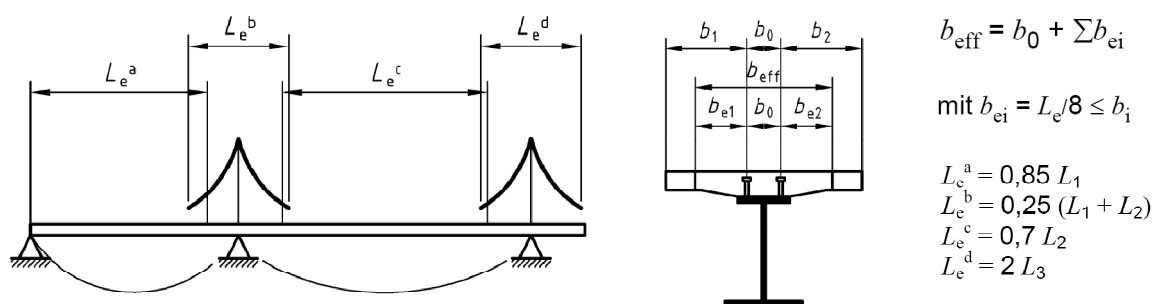


Abbildung 4.7: Mitrtragende Breite für Verbundträger [DIN 18800-5]

Die mittragende Breite hängt alleinig von der Stützweite bzw. dem statischen System ab. Für Einfeldträger berechnet sich die mittragende Breite eines Verbundträgers zu  $L/4$ . Insgesamt liefern

die beiden normativen Regelungen nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] die kleinsten Werte für die mittragende Breite.

Im Gegensatz dazu wird für die mittragende Breite nach Heft 240 [Grasser 1991] die Plattendicke bei der Bestimmung berücksichtigt. Dies wird durch das Verhältnis  $d$  (Dicke des Betongurtes) /  $d_0$  (Gesamthöhe des Plattenbalkens) ausgedrückt. Mit zunehmendem Verhältnis nimmt auch die mittragende Breite zu. Dies deutet darauf hin, dass dadurch der Biegeanteil des Betongurtes mit berücksichtigt wird. Die Werte nach Heft 240 [Grasser 1991] liegen deutlich über den Werten nach [DIN 18800-5] für Verbundträger, siehe Abbildung 4.6, im vorliegenden Vergleich gibt sogar das Heft 240 [Grasser 1991] die größten Werte wieder.

Für eine parabelförmige Momentenverteilung berechnet sich nach Heft 240 [Grasser 1991] die mittragende Breite mit  $b_{mi} = \beta_1 \cdot b_i$ . Der Faktor  $\beta_1$  bestimmt sich entsprechend der Tabelle in Abbildung 4.8, wobei der Wert  $l_0$  den Abstand zwischen den Momenten-Nullpunkten darstellt und vereinfacht für Einfeldträger mit  $l_0 = l$ , für das Mittelfeld eines Durchlaufträgers mit  $l_0 = 0,6 \cdot l$  und das Endfeld eines Durchlaufträgers mit  $l_0 = 0,8 \cdot l$  bestimmt wird.

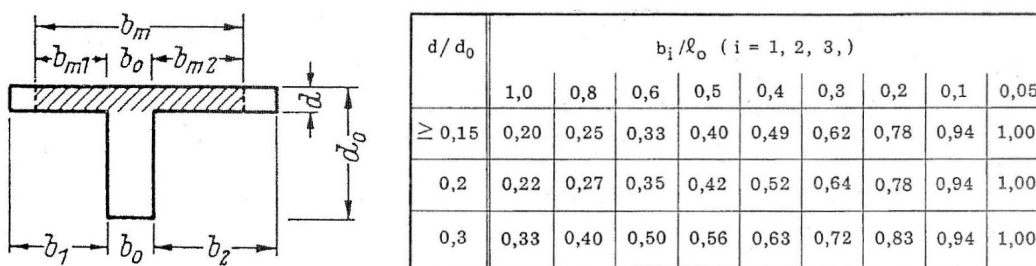


Abbildung 4.8: Mittragende Breite für Plattenbalken aus Beton [Grasser 1991]

Die aktuell gültige Stahlbetonnorm [DIN 1045-1] gibt für die mittragende Breite Werte an, die zwischen den Verbundbauwerten und Heft 240 [Grasser 1991] liegen. Der Grundansatz über die Länge des Momenten-Nulldurchgangs zu gehen, ähnelt hierbei der normativen Regelung nach DIN 18800-5, jedoch wird die weitere Berechnung leicht modifiziert durchgeführt, siehe Abbildung 4.9.

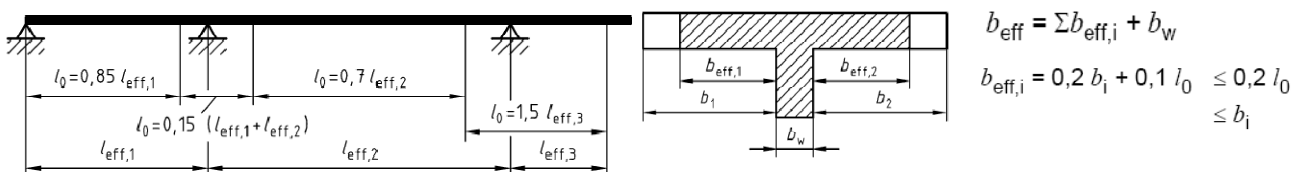


Abbildung 4.9: Mittragende Breite für Plattenbalken aus Beton [DIN 1045-1]

Zum weiteren Vergleich sind noch zwei weitere Normen genannt, diese werden jedoch nicht ausführlicher dargestellt. [DIN 1075] (alte Betonbrückennorm) weist im Vergleich zu den anderen höhere Werte für die mittragende Breite aus. Eine Besonderheit ist, dass nach [DIN 1075] es einen Ansatz für die Spannungsberechnung und einen Ansatz für die Verformungsberechnung gibt. In Abbildung 4.6 ist der Verformungsansatz dargestellt.

Bei den bestehenden Regelungen für die Bestimmung der mittragenden Breite gibt es auch lastabhängige Ansätze. Hierbei wird unterschieden, ob es sich um eine Linienlast (wie in Abbildung 4.6 für den [BS 5400-5]) oder um Punktlasten handelt. In diesem Zusammenhang wird auf die

Untersuchung von [Kuhlmann, Rieg 2004a] verwiesen, die bei der Herleitung der mittragenden Breite aus dem Ansatz der Differentialgleichung verschiedene Belastungsarten untersucht.

In der nachfolgenden Tabelle sind die berechneten mittragenden Breiten nochmals zusammengefasst. Besonders auf die verschiedenen Werte nach Heft 240 [Grasser 1991] sei hierbei hingewiesen, da sich die Werte in Abhängigkeit der Gurtdicke unterscheiden und teils um bis zu 70 % voneinander abweichen.

Tabelle 4.1: Mittragende Breite in [m] verschiedener Normenregelungen

$b_i / L$	$b_{eff} / b_i$							
	EN	DIN EN	DIN	Heft 240				DIN
	1994-1-1	1992-1	1045-1	pauschal	$d/d_0 > 0,15$	$d/d_0 = 0,20$	$d/d_0 = 0,30$	18800-5
0,05	1,00	1,00	1,00	3,33	1,00	1,00	1,00	1,00
0,10	1,00	1,00	1,00	1,67	0,94	0,94	0,94	1,00
0,20	0,63	0,50	0,70	0,83	0,78	0,78	0,83	0,63
0,30	0,42	0,33	0,53	0,56	0,62	0,64	0,72	0,42
0,40	0,31	0,25	0,45	0,42	0,49	0,52	0,63	0,31
0,50	0,25	0,20	0,40	0,33	0,40	0,42	0,56	0,25
0,60	0,21	0,17	0,33	0,28	0,33	0,35	0,50	0,21
0,70	0,18	0,14	0,29	0,24	0,29	0,31	0,45	0,18
0,80	0,16	0,13	0,25	0,21	0,25	0,27	0,40	0,16
0,90	0,14	0,11	0,22	0,19	0,23	0,25	0,37	0,14
1,00	0,13	0,10	0,20	0,17	0,20	0,22	0,33	0,13

## 4.5 Traganteile des Betongurts (Scheiben- und Biegezustand)

### 4.5.1 Grundsätzliches

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse und Untersuchungen zur mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands zusammengefasst. Für die ausführliche mathematische Herleitung der mittragenden Breite auf Basis der Differentialgleichungen für die Scheibe und Platte [Eschenauer 1986] wird auf die Arbeiten von [Haslacher 2001], [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] verwiesen.

Generell gilt, dass der Scheiben- und Biegezustand für lineares Materialverhalten getrennt voneinander betrachtet werden kann und das Superpositionsprinzip angewandt werden kann. Bisherige Untersuchungen zur mittragenden Breite des Biegezustands beschränken sich auf das elastische Materialverhalten, so dass die Rissbildung im Querschnitt außer Acht gelassen wird. Durch das Tragverhalten von Slim-Floor Trägern jedoch reißt der Querschnitt infolge des Biegemoments im Betongurt auf, so dass sich die Frage stellt, in wie fern dieser Ansatz auch unter Berücksichtigung der Rissbildung anwendbar ist.

### 4.5.2 Mittragende Breite des Scheibenzustands für Einfeldträger

Bei der Berücksichtigung des Scheibenzustands wird die Biegetragwirkung des Gurtes völlig vernachlässigt und der Gurt als biegeschlaife Scheibe angesehen. Der Betongurt wirkt als Scheibe



und wird durch die Normalkraft aus dem inneren Kräftepaar des Verbundquerschnitts beansprucht. Hierzu gibt es bereits eine Vielzahl von Untersuchungen. Eine Zusammenfassung der Untersuchungen ist in [Rieg 2006] zu finden.

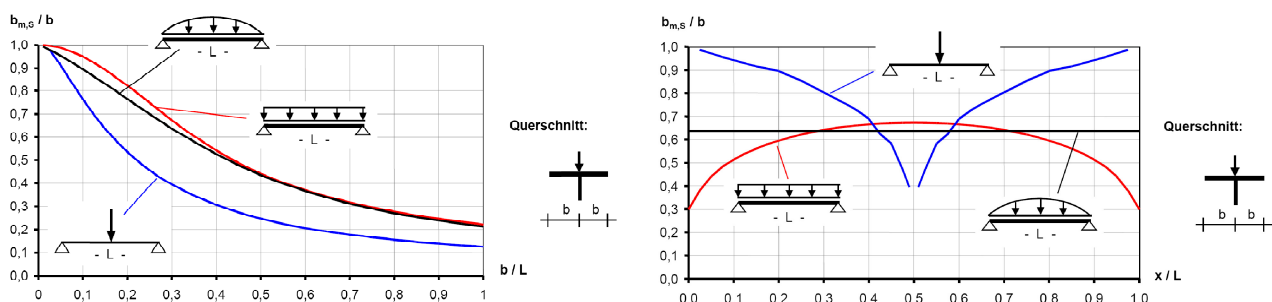
Der Scheibenzustand beruht auf der Dehnsteifigkeit des Gurtes und setzt gleichzeitig eine schubfeste Verbindung zwischen Betongurt und Baustahlträger voraus. Der Betongurt übernimmt hierbei die Normalkraft, die sich mit der Zugkraft im Baustahlträger kurzschließt.

Auf die Herleitung im speziellen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen, sondern auf Veröffentlichungen von [Hasslacher 2001], [Rieg 2004] und [Kuhlmann, Rieg 2004a] verwiesen und die dortige Ableitung für alle weiteren Untersuchungen als gegeben vorausgesetzt.

Durch die Lösung der Scheiben-Differentialgleichung und aus den Berechnungen der mittragenden Breite zieht [Rieg 2006] folgende Schlussfolgerungen:

Die mittragende Breite wird hauptsächlich vom Seitenverhältnis der Gurtscheibe  $b/L$  bestimmt. Steigt das Verhältnis von  $b/L$ , so sinkt der Wert der mittragenden Breite für den Scheibenzustand sehr schnell ab. Ebenso hat die Belastungsart einen Einfluss auf die mittragende Breite. Da bei Deckensystemen überwiegend von einer Flächenlast ausgegangen werden kann, wird in den nachfolgenden Untersuchungen die mittragende Breite für diesen Fall weiter berücksichtigt. Die mittragende Breite ist unabhängig von der Höhe der äußeren Belastung, sofern der Betongurt sich im Zustand I befindet. Ebenso spielt die Plattendicke keine Rolle für die mittragende Breite des Scheibenzustands.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der mittragenden Breite des Scheibenzustands in Abhängigkeit der Belastung in Feldmitte (a), sowie den Verlauf der mittragenden Breite über die Trägerlänge (b). Die mittragende Breite eines Einfeldträgers unter Punktbelastung nimmt hierbei kleinere Werte als eine gleichmäßige Streckenlast. Ebenso ist zu erkennen, dass durch die Punktbelastung die mittragende Breite sehr stark beeinflusst und die Werte mit steigender Entfernung zum Belastungspunkt zunehmen.



a) in Abhängigkeit der Belastung

a) über die Trägerlänge

Abbildung 4.10: Verlauf der Mittragende Breite des Scheibenzustands  $b_{m,S}$  eines einsteigigen Plattenbalkens [Rieg 2006]

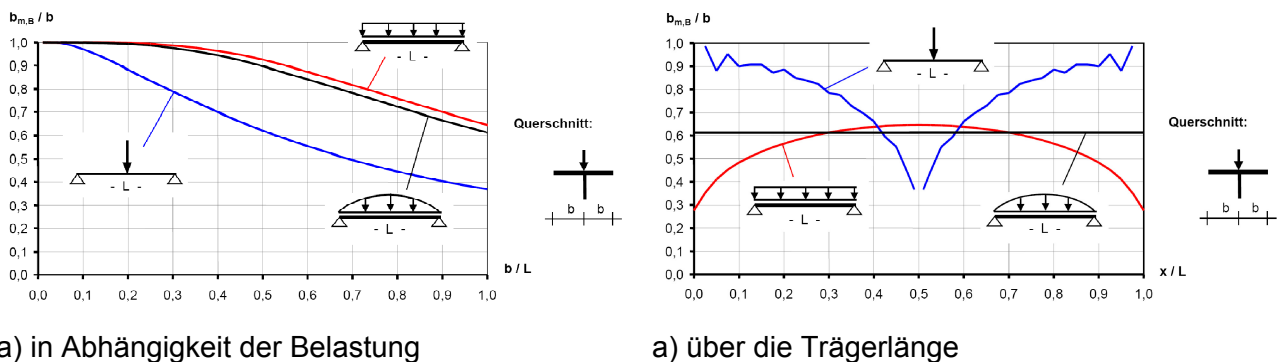
#### 4.5.3 Mittragende Breite des Biegezustands für Einfeldträger

Erste Untersuchungen zur mittragenden Breite des Biegezustands wurden von [Marguerre 1952] durchgeführt. Auf Basis der Differentialgleichung der Platte wurde getrennt voneinander die mittragende Breite für den Scheiben- und Biegezustand abgeleitet und dabei festgestellt, dass die Werte des Scheibenzustands kleiner sind als für den Biegezustand.

Im Biegezustand wirkt der Betongurt als Platte und trägt in Abhängigkeit der Biegesteifigkeit einen Teil des äußeren Moments ab.

Durch die Lösung der Platten-Differentialgleichung und aus den Berechnungen der mittragenden Breite kann nach [Hasslacher 2001], [Rieg 2004], [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] die gleichen Schlussfolgerungen für den Scheiben- und Biegezustand gezogen werden:

Der Haupteinflussparameter ist ebenfalls das geometrische Verhältnis der Plattenbreite zur Trägerlänge. Ebenso wirkt sich die Art der Belastung auf den Wert der mittragenden Breite aus. Über die Trägerlänge hinweg ist die mittragende Breite nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit der Belastung, siehe nachfolgende Abbildung 4.11. Die Plattendicke  $h_c$  besitzt keinen Einfluss bei der Ermittlung der mittragenden Breite.



a) in Abhängigkeit der Belastung

a) über die Trägerlänge

Abbildung 4.11: Verlauf der Mitragende Breite des Biegezustands  $b_{m,B}$  eines einseitigen Plattenbalkens [Rieg 2006]

Im Vergleich zum Scheibenzustand ist die mittragende Breite der Platte größer und verläuft insgesamt flacher abfallend. Qualitativ zeigen die Verläufe der mittragenden Breite  $b_{m,B}$  des Biegezustands eine große Ähnlichkeit zur mittragenden Breite  $b_{m,S}$  des Scheibenzustands. Eine quantitative Betrachtung zeigt, dass die Biegetragwirkung größere Werte der mittragenden Breite erzeugt als die Scheibentragwirkung.

#### 4.5.4 Vergleich des mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands mit der normativen Regelung nach [DIN 18800-5]

Die nachfolgende Abbildung 4.12 greift auf den Abschnitt 4.4 der normativen Regelung der mittragenden Breite zurück und vergleicht die dortigen Werte mit den Werten der mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands.

Es ist sehr schön zu erkennen, dass die Werte aus der Verbundnorm [DIN 18800-5] sehr nahe am Scheibenzustand liegen. Dies bedeutet, dass für die Berechnung der mittragenden Breite für Verbundträger der Biegeanteil vernachlässigt wird, was sich besonders unwirtschaftlich für niedrige Verbundträger und Slim-Floor Träger erweist.

Die Stahlbetonnorm [DIN 1045-1] liegt ca. mittig zwischen dem Scheiben- und Biegezustand, alleinig die [DIN 1075] nähert sich der Biegezustands-Linie entfernt an.

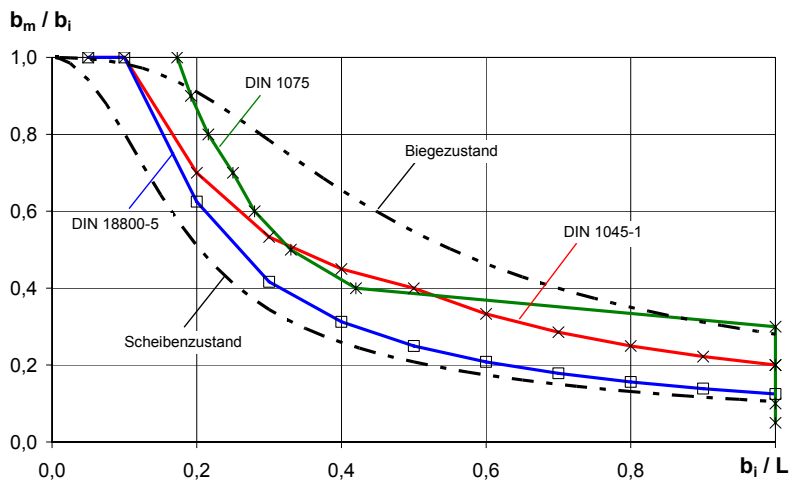


Abbildung 4.12: Mittragende Breite: Vergleich des Scheiben-/Biegezustands mit normativer Regelung

#### 4.5.5 Kombinierte Wirkung des Scheiben- und Biegezustands

Für Einfeldträger unter Gleichlast ist in der nachfolgenden Abbildung 4.13 die mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands in Abhängigkeit des Breiten-Längenverhältnis des Trägers angegeben. Es ist erkennbar, dass die Werte des Biegetraganteils über den des Scheibenzustands liegen. Beide mittragenden Breiten fallen jedoch qualitativ sehr rasch mit zunehmenden Verhältnis  $b/L$  ab. Die hier dargestellten Werte sind für den Bereich der Feldmitte des Einfeldträgers angegeben.

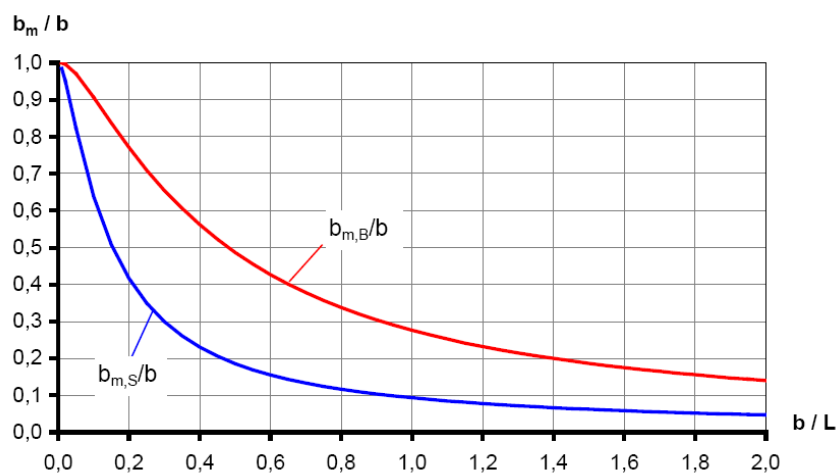
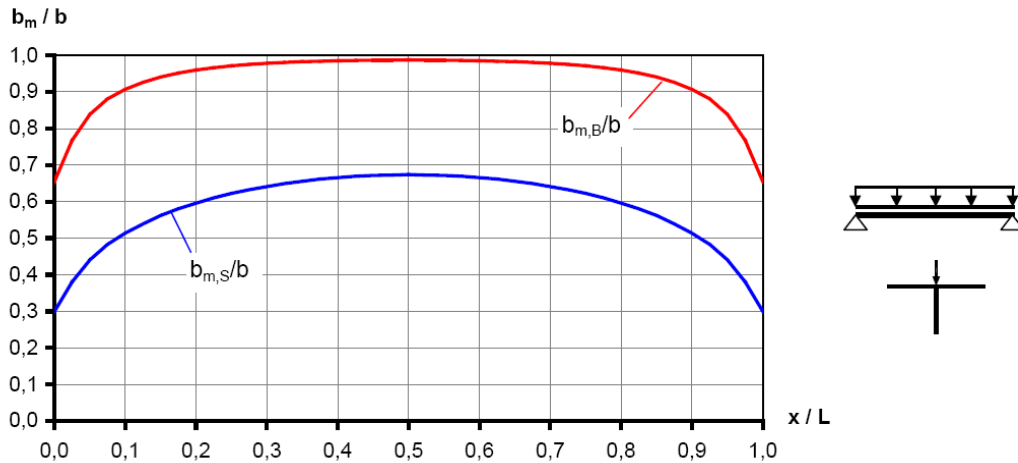


Abbildung 4.13: Mittragende Breite für Scheiben- und Biegezustand [Rieg 2006]

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der mittragenden Breiten des Scheiben- und Biegezustands über die Trägerlänge. Die Kurven sind hierbei auf den maximalen Wert (die mittragende Breite des Biegezustands in Feldmitte) bezogen angegeben.


 Abbildung 4.14: Verlauf der mittragenden Breite  $b_{m,B}$  und  $b_{m,S}$  bei Gleichlast

Zu den Auflagerbereichen hin sinken die Werte leicht ab. Insgesamt besitzt der Biegezustand eine völligeren Kurve im Vergleich zur mittragenden Breite des Scheibenzustands.

Generell berechnet sich die Steifigkeit eines Verbundquerschnitts  $I_{i,0}$  aus drei Anteilen, der Biegesteifigkeit des Baustahlprofils  $I_a$ , dem Biegeträgheitsmoment des Betongurtes  $I_{c,0}$  und dem sog. Steiner Anteil. Werden nun für die jeweiligen Anteile entsprechend die Scheiben- und Biegetragwirkung eingesetzt, so ergibt sich für das Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts  $I_{i,0}$  folgender Ansatz:

$$\begin{aligned}
 I_{i,0} &= I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St} \\
 &= I_a + \frac{b_{m,B} \cdot h_c^3}{12 \cdot n_0} + \frac{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} \cdot A_a}{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} + A_a} \cdot a_{St}^2 \quad (\text{Gleichung 4.2})
 \end{aligned}$$

Die Erklärung der einzelnen Faktoren wird in Abschnitt 6.2.3.2, Gleichung 6.1 näher erläutert.

Dabei wird das Biegeträgheitsmoment des Betongurtes mit der mittragenden Breite des Biegezustands  $b_{m,B}$  berechnet, während für den Steiner Anteil der Scheibenzustand  $b_{m,S}$  eingerechnet wird. Das heißt, dass für die Verbundquerschnittssteifigkeit  $I_{i,0}$  das Superpositionsprinzip für den Scheiben- und Biegezustand angewandt wird. Dieser Ansatz ist jeweils für den Zustand I des Betons gültig und anwendbar, also solange der Beton ungerissen vorliegt.

Da der Biegetraganteil für gewöhnlich vernachlässigt wird, wird in der Praxis das Trägheitsmoment des Betongurtes ebenfalls mit dem Scheibenzustand  $b_{m,S}$  berechnet, was aber zu einem verkleinerten Wert führt und damit zwangsläufig zu einer Überschätzung bei der Verformungsberechnung. Gerade bei niedrigen Querschnitten führt die Vernachlässigung des Biegezustands zu einem stark verkleinerten Wert für das Trägheitsmoment  $I_{i,0}$  des Verbundquerschnitts, wie Vergleichsrechnungen nach [Rieg 2006] darlegen. Dies hängt damit zusammen, dass der Anteil des Biegemoments des Betongurtes bei kleineren Verbundquerschnitten größer ist als z.B. bei normal hohen Verbundquerschnitten.

Somit kann also bei Slim-Floor Trägern und niedrigen Verbundträgern eine realistische Biegesteifigkeit  $I_{i,0}$  nur unter Berücksichtigung des Biegetraganteils ermittelt werden.

Die beiden maßgebenden Einflüsse auf die mittragende Breite sind [Rieg 2006]:

- Verhältnis  $b/L$ : Durch die Wahl der Betongurtbreite  $b$  können die Werte für die mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands stark beeinflusst werden, was sich in den Betontraganteilen widerspiegelt.
- Dicke des Betongurts  $h_c$ : Anhand Gleichung 4.2 ist zu erkennen, dass die Plattendicke einen direkten Einfluss auf das Trägheitsmoment des Betongurtes besitzt und damit den Betonbiegetraganteil an der Gesamtsteifigkeit erhöht

#### 4.5.6 Mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustand für den Zweifeldträger

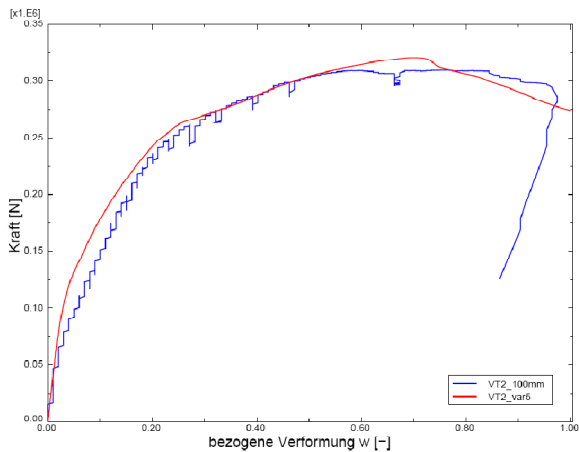
In Anlehnung an die Lösung der Differentialgleichungen für den Scheiben- und Biegezustand des Einfeldträgers wurde in der Diplomarbeit [Grimm 2009] untersucht, ob dieser Ansatz auch für zweifeldrige Systeme erweitert werden kann.

Eine direkte Lösung der Differentialgleichung ist aber wie bei den Einfeldträgern ebenfalls nicht möglich, so dass mit Hilfe der Fourierreihenanalyse eine Lösung gesucht wurde. Durch die Vielzahl von Ansatzfunktionen für die Fourierreihenentwicklung sowie der Ansatz für die Belastungsfunktion, die für die Berechnung anwendbar sind, war es aber nicht möglich eine eindeutige Lösung abzuleiten. Durch rechnerische Singularitäten für die mittragende Breite über die Trägerlängsrichtung hinweg kann keine verwendbare Lösung abgeleitet werden. Dies wurde im Rahmen einer umfangreichen Studie [Grimm 2009] sowie Literaturrecherche, z.B. [Räcke 2006] bestätigt.

Ein möglicher Ansatz zur Bestimmung der mittragenden Breite eines Zweifeldträgers ist die numerische Lösung mittels FE-Berechnungen. In diesem Zusammenhang und im Rahmen der durchgeführten Versuche an Slim-Floor Trägern wurden zwei Diplomarbeiten von [Tontchev 2008] und [Baur 2009] erstellt. Hierbei wurden die FE-Programme ANSYS® und ABAQUS® verwendet und versucht, die Last-Verformungskurven der Slim-Floor Trägerversuche [Kuhlmann et al 2006b] und [Kuhlmann, Hauf 2010a] nachzubilden. Letztendlich muss auch hier darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse kritisch zu bewerten sind und einzeln nachgerechnete Versuchsträger nicht auf weitere Träger mit veränderten Parametern übertragbar sind.

Während die Last-Verformungskurven nachgebildet werden können, stimmen die Last-Schlupf-Nachrechnungen nicht überein, siehe nachfolgende Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16. Für die Kontaktdefinition zwischen Betongurt und Baustahlprofil werden Eingabeparameter (z. B. wie die Reibwirkung) benötigt, deren Größe nicht aus den Versuchen feststellbar ist. Diese wurde in der Arbeit von [Baur 2009] daher entsprechend numerisch so an den Versuchsträger VT1 (Einfeldträgerversuch) angepasst, dass eine Übereinstimmung beim Schlupf zwischen numerischem Model und den Versuchswerten vorhanden ist. Eine Übertragung auf den Versuchsträger VT2 ist mit der gewählten Kontaktdefinition aber nicht möglich, so dass die numerische Berechnung im Rahmen der Diplomarbeiten kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert, siehe nachfolgende Abbildungen.

Um auf Basis einer numerischen Berechnung Rückschlüsse auf die mittragende Breite ziehen zu können, ist es aber dringend notwendig, dass das Last-Verformungsverhalten wie auch das Last-Schlupfverhalten mit den tatsächlichen Versuchswerten übereinstimmen.



Anmerkungen zur Achsbezeichnung:

Abbildung 4.15:

Vertikalachse: Kraft (bezogen auf Wert  $P / P_u$ )

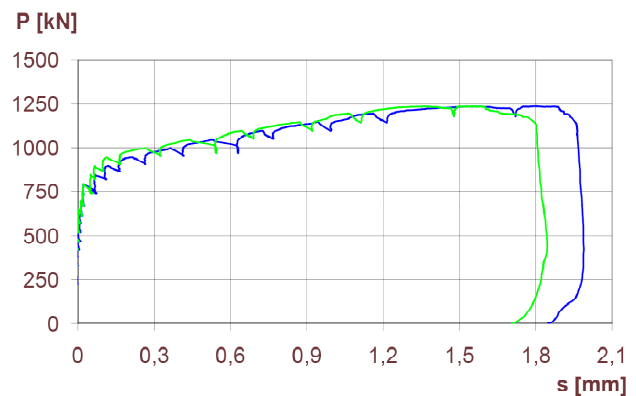
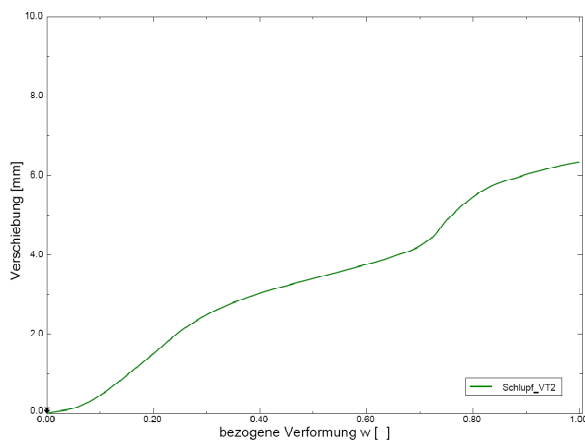
Horizontalachse: Verformung (bezogen auf  $w / w_u$ )

Abbildung 4.16a:

Vertikalachse: Schlupf (Absolutwert)

Horizontalachse: Verformung (bezogen auf  $w / w_u$ )

Abbildung 4.15: Numerische Nachrechnung Last-Verformungskurve VT2 [Baur 2009]



a) rechnerischer Schlupf VT2

b) experimenteller Schlupf VT2

Abbildung 4.16: Numerische Nachrechnung Last-Schlupfkurve VT2 [Baur 2009]

In Hinblick auf die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhalten und des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten analytischen Modells wird auf den Abschnitt 6.2.8.4 verwiesen, der den Einfluss der mittragenden Breite über der Stütze detailliert untersucht.

#### 4.5.7 Zusammenfassung zur linear-elastischen Untersuchung der mittragenden Breite

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben setzt sich das Tragverhalten bei Betongurten aus dem Scheibentrag- und Plattentragverhalten zusammen. Es zeigt sich, dass für niedrige Querschnitte, also Slim-Floor Trägern und niedrigen Verbundträgern, die Vernachlässigung des Biegezustands zu einer unwirtschaftlichen Ermittlung der Trägersteifigkeit führt und damit auch die Verformung überschätzt wird.

Anhand der Differentialgleichungen für die Scheibe und Platte wird in der Arbeit von [Rieg 2006] die mittragenden Breiten abgeleitet. Es zeigt sich hierbei, dass die Werte des Biegezustands über den des Scheibenzustands liegen.

Die Herleitung und Berechnung der Trägersteifigkeit  $I_{i,0}$  beruht hierbei auf linear-elastischen Berechnungsannahmen. Der Beton befindet sich im Zustand I. Da Slim-Floor Träger aber unter Gebrauchslasten aufreißen, vermindert sich der Biegetraganteil des Betons. Dieses nichtlineare Tragverhalten muss somit bei der Verformungsberechnung berücksichtigt werden. Die linear-elastisch ermittelten Werte für die mittragende Breite bilden hierbei aber die Grundlage für die in dieser Arbeit nachfolgend durchgeführten Untersuchungen.

## **5 Experimentelle Untersuchung zur mittragenden Breite**

### **5.1 Allgemeines**

Im Abschnitt 2 wird das Tragverhalten von Slim-Floor Trägern ausführlich beschrieben und gezeigt, dass bei diesen deckengleichen Verbundträgern die Betonsteifigkeit eine entscheidende Rolle für das Tragverhalten im Gebrauchslastzustand spielt. Dies wird durch die mittragende Breite berücksichtigt, die, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, in einen Scheiben- und Biegetraganteil unterschieden werden kann.

Um das nachfolgende analytische Modell zu verifizieren, wurden im Jahre 2006 und 2009 experimentelle Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor im Rahmen zweier Forschungsvorhaben [Kuhlmann et al 2006b] und [Kuhlmann, Hauf 2010a] durchgeführt. Diese sollen nun im folgenden Abschnitt ausführlich beschrieben werden, da die Versuche an Ein- und Zweifeldträgern eine Vielzahl von Aufschlüssen zum Trag- und Verformungsverhalten liefern.

### **5.2 Versuche an Einfeldträgern**

#### **5.2.1 Grundsätzliches**

Im Rahmen des von der Stiftung Industrieforschung geförderten Forschungsvorhabens [Kuhlmann et al 2006b] wurden fünf Versuche an Einfeldträgern und ein Versuch an einem Einfeldträger mit Kragarm jeweils mit breiten Betongurten hinsichtlich ihres Trag- und Verformungsverhaltens an der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMFA) der Universität Stuttgart getestet. Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die Untersuchungen an den Trägern und fassen die wichtigsten Versuchs- und Messergebnisse zusammen.

#### **5.2.2 Experimentelle Untersuchungen**

##### **5.2.2.1 Grundsätzliches**

Im Rahmen des Vorhabens wurden sechs Versuche mit Slim-Floor Trägern mit breiten Betongurten durchgeführt, die ersten fünf als Einfeldträgerversuche, der letzte als ein auskragender Einfeldträger. Auf diesen Trägerversuch VT6 wird nur am Rande eingegangen, da im Mittelpunkt der Untersuchung das Verformungsverhalten der Einfeldträgersysteme steht.

Die Versuchskonzeption knüpft hierbei an die rechnerischen Untersuchungen in Zusammenhang mit [Kuhlmann, Fries 2001], [Kuhlmann, Rieg 2005] und [DIBt 2005] an, so dass als Stahlquerschnitt ein Hutprofil gewählt wurde.

- Verwendung praxisgerechter Abmessungen im Maßstab 1:1
- Verwendung von Slim-Floor Trägern, d.h. bereits unter geringen Lasten im Gebrauchszustand entstanden Risse auf der Betonunterseite.
- Verwendung eines sehr breiten Betongurts (deutlich breiter als die normativ geregelte mittragende Breite), um eine klare Aussage über den Verlauf der Betonspannungen und Betondehnungen in Querrichtung des Betongurts zu erhalten sowie einen deutlichen Einfluss der Schubverformung des Betongurts auf das Trag- und Verformungsverhalten der Versuchsträger zu gewährleisten.
- Verwendung eines statisch bestimmten Systems (Einfeldträgersystem), um klare Aussagen über den Verlauf der Gesamtschnittgrößen und Auflagerreaktionen allein aus den Lage-



rungs- und Belastungsbedingungen ohne Kenntnis der Steifigkeitsverteilung im Träger zu erhalten. Wie bereits erwähnt, wurden für die Versuchsträger VT1 bis VT5 als System ein Einfeldträger gewählt, für den Versuchsträger VT6 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 querkraftfreien Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten.
- Anordnung der Lastpunkte in Stahlträgerenebene der Versuchsträger VT1, VT2, VT5 und VT6, um eine Exzentrizität in Querrichtung und ein damit verbundenes Querbiegemoment des Betongurts zu vermeiden.
- Exzentrische Anordnung der Lastpunkte zur Stahlträgerachse der Versuchsträger VT3 und VT4, 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.
- Bis auf Träger VT5 waren alle Träger vollverdübelt um bei der Versuchsdurchführung für den Traglastzustand die maximale Last des Querschnitts zu bestimmen.

Ausgehend von einem Basisversuch (Versuchskörper VT1) wurde bei jedem weiteren Versuch nur ein einziger Parameter variiert, um dessen Auswirkung auf das Verformungsverhalten und die mittragende Breite zu bestimmen, siehe nachfolgende Tabellen. Damit war es möglich, mit diesem beschränkten Versuchsprogramm eine möglichst große Anzahl an Parametern zu untersuchen.

Die nachfolgende Abbildung 5.1 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau der Einfeldträgerversuche mit einer Trägerlänge von  $L = 4,25$  m und einer Trägerbreite von  $B = 3,50$  m.

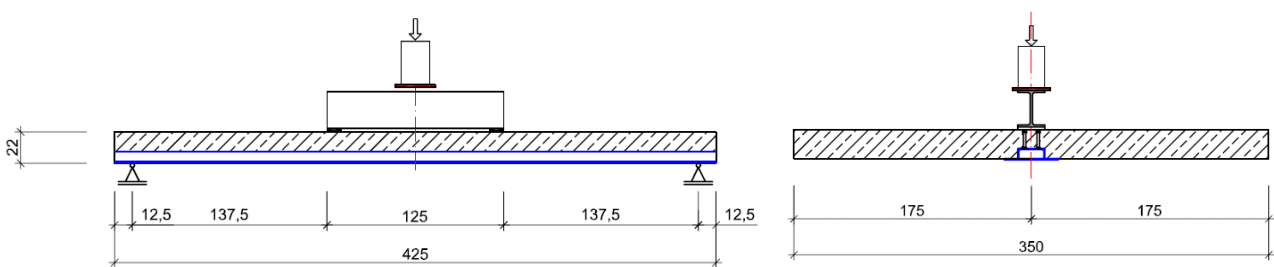


Abbildung 5.1: Versuchsaufbau Einfeldträgerversuch mit zentraler Belastung

#### 5.2.2.2 Geometrie der Träger und Variation der Parameter

Das Versuchsprogramm bestand aus sechs Versuchsträgern. Die hierbei gewählten Abmessungen und variierten Parameter sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst. In Tabelle 5.1 sind die geplanten Betonstahl- und Baustahlgüten sowie die Querschnittsabmessungen des Hutprofils dargestellt, in Tabelle 5.2 die Versuchsträgergeometrie.

Tabelle 5.1: Versuchsprogramm – Plattengeometrie / Verdübelungsgrad / Lastexzentrizität

Versuchs-Nr.	Stahlprofil	Untergurt	Stahl-güte	Betongüte	Bewehrungs-güte
VT 1	UPE 200	400 x 10 mm	S235	C 20/25	S500
VT 2	<b>UPE 220</b>	<b>420 x 15 mm</b>	S235	C 20/25	S500
VT 3	UPE 200	400 x 10 mm	S235	C 20/25	S500
VT 4	UPE 200	400 x 10 mm	S235	C 20/25	S500
VT 5	UPE 200	400 x 10 mm	S235	C 20/25	S500
VT 6	UPE 200	400 x 10 mm	S235	C 20/25	S500

Tabelle 5.2: Versuchsprogramm – Plattengeometrie / Verdübelungsgrad / Lastexzentrizität

Versuchs-Nr.	Stahl-querschnitt	Träger-länge [m]	Träger-breite [m]	Plattendicke $h_c$ [cm]	$\eta^1$ [-]	$e^2$ [m]
VT 1	UPE 200	4,25	3,50	22	1,0	0,0
VT 2	<b>UPE 220</b>	4,25	3,50	<b>30</b>	1,0	0,0
VT 3	UPE 200	4,25	3,50	22	1,0	<b>0,75</b>
VT 4	UPE 200	4,25	3,50	22	1,0	<b>1,25</b>
VT 5	UPE 200	4,25	3,50	22	<b>0,5</b>	0,0

1) Verdübelungsgrad

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

Für jeden getesteten Träger wurde jeweils nur ein Versuchsparameter (Geometrie, Laststellung, etc.) geändert, um Rückschlüsse auf das Trag- und Verformungsverhalten ziehen zu können. Die veränderten Parameter sind in der vorangegangenen Tabelle 5.2 fett gedruckt.

Der Versuchsträger VT6 stellt in der Konfiguration eine Besonderheit dar und wird in den nachfolgenden Abschnitten mit den Versuchsergebnissen jeweils nicht berücksichtigt, vergleiche Abschnitt 5.2.2.10.

Die nachfolgende Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 zeigen die mittige Belastung des Verbundträgers bei den Versuchen VT1, VT2 und VT5, während bei den Versuchsträgern VT3 und VT4 ein zusätzlicher Verteilungsträger für die exzentrische Lasteinleitung eingebaut wurde.



Abbildung 5.2: Mittige Belastung Einfeldträgerversuche VT1, VT2, VT5



Abbildung 5.3: Exzentrische Belastung Einfeldträgerversuche VT3, VT4

Die Versuchsträger VT3 und VT4 wurden unter dem Einfluss einer Querbiegung untersucht. Hierbei wurden die Versuchsträger einer Lastexzentrizität unterzogen, um über dem Stahlträger ein Stützmoment in Querrichtung zu erzeugen. Die Querverteilung wurde zu 0,75 m bei VT3 und 1,25 m bei VT4, jeweils auf die Stahlträgerachse bezogen, gewählt. Ausgehend von einer Exzentrizität der Last von 0,75 m beim Versuchsträger VT3 soll der Lastfall eine gleichmäßig verteilte Flächenlast über die Betonplatte abbilden. Um den Einfluss der Querbiegung auf das Gesamttragverhalten zu untersuchen, wurde bei Versuchsträger VT4 die Lastexzentrizität 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 sollte der Betonquerschnitt entlang des Stahlträgers an der Betonoberseite aufreißen und damit der Einfluss auf die mittragende Breite des Betons in Längsrichtung untersucht werden.

#### 5.2.2.3 Herstellung, Versuchsaufbau und Messeinrichtung

Eine ausführliche Beschreibung der Trägerherstellung, des Versuchsaufbaus und der Messeinrichtung ist im Forschungsbericht [Kuhlmann, Hauf 2010a] gegeben.

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, siehe Abbildung 5.4.



Abbildung 5.4: Verschiebliche Lagerung der Versuchsträger

Die Belastung wurde mit einem servohydraulisch gesteuertem Prüfzylinder und einem Lastverteilungsträger auf die beiden Lastpunkte weggesteuert aufgebracht. Vor dem Betonieren wurden an den Stahlträgern Dehnmessstreifen zur Dehnungsermittlung angebracht. Zusätzlich wurden die Versuchsträger VT1 und VT2 mit Dehnmessrosetten auf dem UPE-Profil versehen. Mittels Dehnmessrosetten kann über die drei Messrichtungen die Querkraft bestimmt werden, siehe hierzu Abschnitt 9.3.3.1.

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 5.5 ist ein solcher Setzdehnungsmesser (in Abbildung 5.7 gekennzeichnet mit SDM) bzw. Dehnmesser (in Abbildung 5.7 gekennzeichnet mit DM) dargestellt.

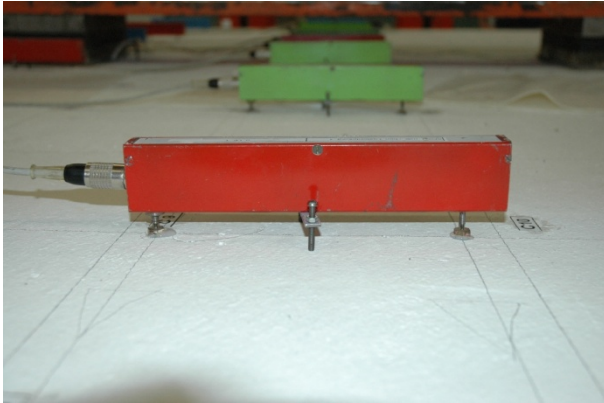


Abbildung 5.5: Setzdehnungsmesser und Dehnmesser

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. 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 erfolgte jeweils genau übereinander liegend. In Kombination mit den Dehnungen an der Trägerunterseite konnten somit Teilschnittgrößen (Biegemomente und Normalkräfte) des Betongurtes ermittelt werden.

Die Verformungsmesser (in Abbildung 5.6 gekennzeichnet mit H und w) und Schlupfmessungen (in Abbildung 5.6 gekennzeichnet mit S) wurden mittels induktiven Wegaufnehmern ermittelt, die verteilt über den Trägern angebracht waren. Eine Übersicht über das durchgeführte Messprogramm ist in Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 dargestellt.

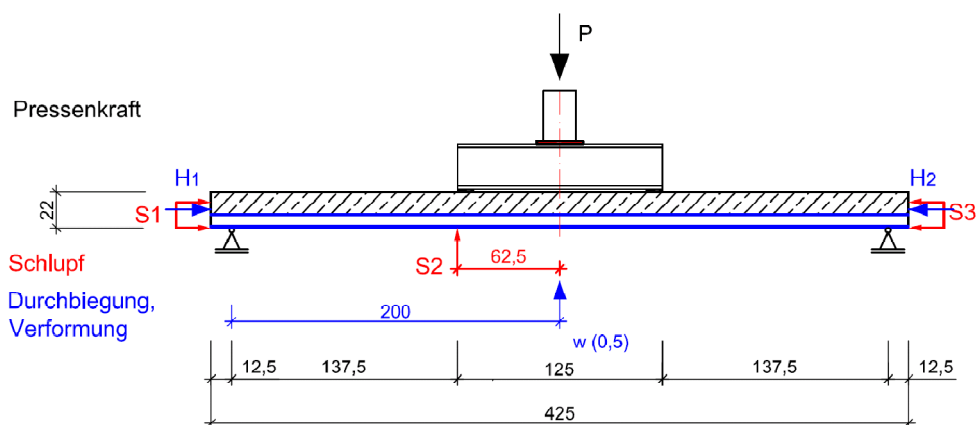


Abbildung 5.6: Versuchsstand Einfeldträger – Aufbau und Belastungsanordnung

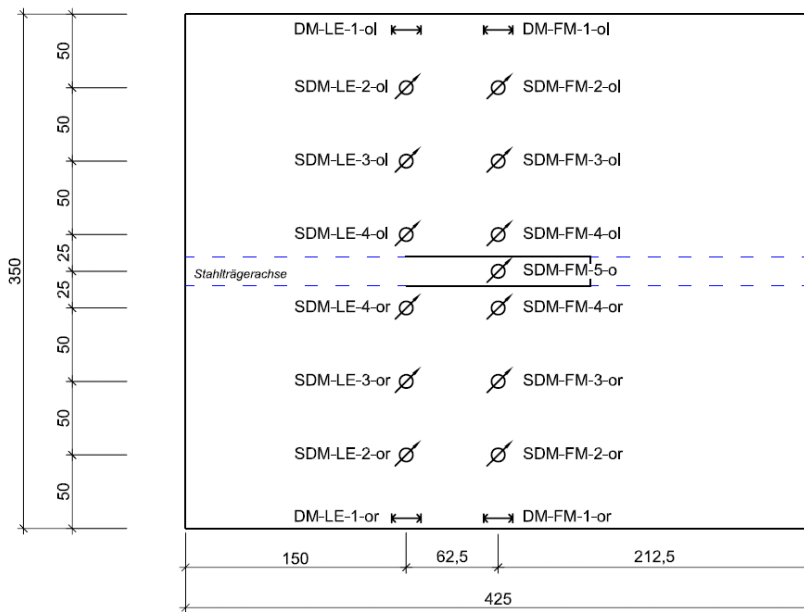


Abbildung 5.7: Betondehnmesser auf dem Betongurt (hier dargestellt: Draufsicht)

#### 5.2.2.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Träger VT1 bis VT5 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 wurde die Rissbildung an der Unterseite des Betongurts inspiziert und das Rissbild markiert und dokumentiert.

Die Rissentwicklung zeigte bereits bei einer Belastung von 150 kN ein in Trägermitte ausgeprägtes Rissbild. 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. Um das Verformungsverhalten der Versuchsträger nach über die Traglast hinaus zu erhalten, wurden alle Versuche weggesteuert gefahren.

#### 5.2.2.5 Werkstoffkennwerte - Festigkeiten

Für die Nachrechnung der Versuche und für weitergehende analytische Untersuchungen war es notwendig, die tatsächlichen Materialparameter zu bestimmen. Die Betonträger wurden jeweils an verschiedenen Tagen hergestellt, so dass bei jedem Betonieren Probewürfel und -balken zur Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit hergestellt wurden. Zusätzlich wurden Probezylinder zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls betoniert. Für den Beton ergaben sich folgenden Materialkennwerte [DIN 12390-3], [DIN 12390-5]:

Tabelle 5.3: Ermittelte Materialkennwerte Beton

Beton	Betondruck- festigkeit	Betonzug- festigkeit	E-Modul
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VT 1	29,5	2,8	23.300
VT 2	24,5	2,4	21.300
VT 3	35,0	2,8	27.800
VT 4	37,0	3,6	27.200
VT 5	35,0	3,4	28.900

Mit Zugproben des Baustahls, sowohl des UPE-Profiles wie auch des Untergurtes, und des Bewehrungsstahls konnten die Fließ- und Bruchgrenzen bestimmt werden. Die nachfolgenden Tabellen listen die einzelnen Materialwerte auf [DIN 50125], [DIN EN 10002-1].

Tabelle 5.4: Ermittelte Materialkennwerte Baustahl und Betonstahl

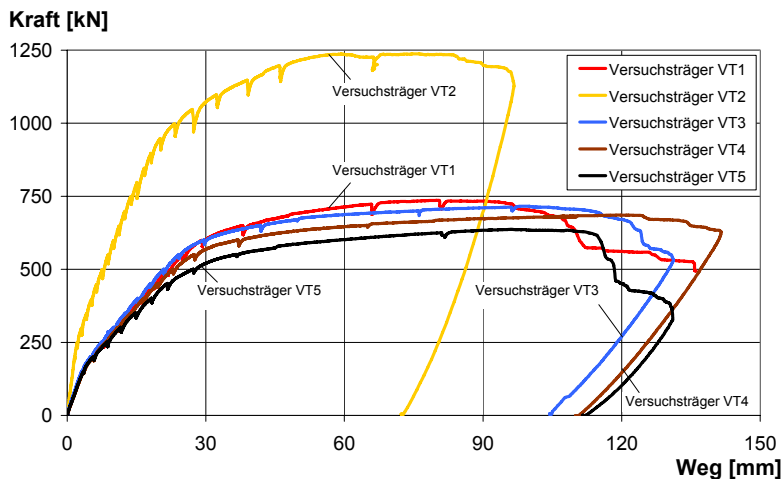
	Fließgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Baustahl</b>		
UPE 200	293	443
UPE 220	286	417
Fl. (Charge A) t=10mm	313	460
Fl. (Charge B) t=10mm	302	449
Fl. t=15mm	272	392
<b>Bewehrungsstahl</b>		
Stab Ø10	594	684
Stab Ø14	558	643

#### 5.2.2.6 Trag- und Verformungsverhalten VT1-VT5

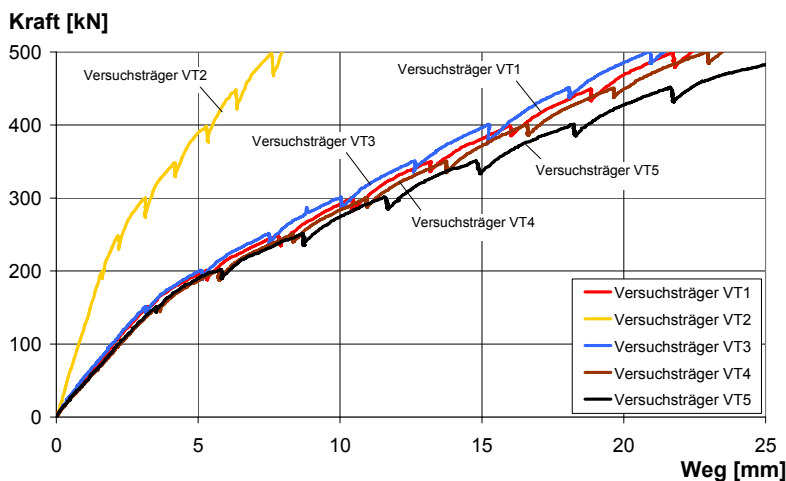
Durch die Variation der einzelnen Versuchsträger VT und jeweils nur einem veränderten Parameter kann auf das unterschiedliche Trag- und Verformungsverhalten geschlossen werden. Der Ablauf der Versuchsdurchführung war hierbei bei allen Trägern gleich.

Anhand der nachfolgenden Abbildung 5.8 können die Unterschiede im Verformungsverhalten in Abhängigkeit der Belastung aufgezeigt werden. Anzumerken ist aber, dass ein direkter quantitativer Vergleich der Versuchswerte anhand der Abbildung nicht durchgeführt werden kann, da für die einzelnen Versuchskörper verschiedene Festigkeitswerte - insbesondere für den Beton - vorlagen.





a) gesamter Lastbereich



b) Anfangsbelastung vergrößert dargestellt

Abbildung 5.8: Last-Verformungskurve Einfeldträgerversuche

Alle Träger verhielten sich äußerst duktil und zeigten im Bereich der Maximallast ein sehr ausgeprägtes Verformungsverhalten (Plateauverlauf). Der Verlauf der Kurven begann jeweils sehr steil, jedoch mit zunehmender Rissbildung flachte sich die Kurve durch den Steifigkeitsverlust ab.

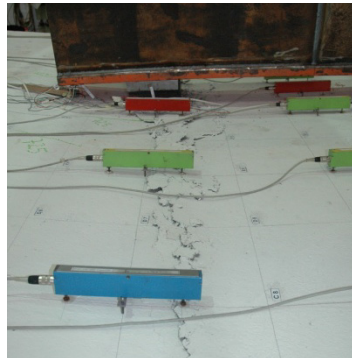
Durch die größere Betonplattendicke (30 statt 22 cm) und dem damit verbundenen höheren Gesamtsteifigkeitsverhalten des Trägers VT2 besaß dieser eine weitaus höhere Traglast als die übrigen Träger. Für die Versuchsträger mit einer Plattendicke von 22 cm galt, dass qualitativ diese Träger ein sehr ähnliches Trag-Verformungsverhalten aufwiesen, ein ähnliches Traglastniveau erreichten und ähnliche Verformungswerte lieferten.

Der Versuchsträger VT1, der als sog. „Basiskörper“ konzipiert wurde, zeigte erste Einzelrisse bereits bei einer sehr geringen Last von 20 % der Traglast. Das „abgeschlossene“ Rissbild konnte bei einer Last von ca. 50 % der Traglast festgestellt werden.

Die Traglast des Versuchsträgers VT2 (mit einer Plattendicke von 30 cm) war weitaus höher als im Vergleich zu den übrigen Trägern. Durch die höhere Gesamtträgersteifigkeit stieg die Last-Verformungskurve im Vergleich zu den anderen Trägern steiler an, die Gesamtverformung bis zum Bruch lag ca. 30 % unterhalb der übrigen Versuchsträger.

Die beiden Versuchsträger VT3 und VT4 wurden im Gegensatz zu den übrigen Trägern durch Querbiegung belastet. Trotz des variierten Hebelarmes der Querverteilung lagen die Traglasten beider Versuchskörper ähnlich nah beieinander. Auch das Last-Verformungsverhalten glich einander sehr.

Durch die teilweise Verdübelung des Versuchsträgers VT5 wurde eine geringfügig kleinere Traglast und eine etwas größere Durchbiegung als zum Basisträger ermittelt. Ein Versagen der Schubfuge trat nicht, wie erwartet, ein. Der Träger versagte, wie alle anderen auch, auf Biegedruckversagen auf Höhe der Lasteinleitung.



a) Versuchsträger VT1

b) Nahaufnahme Lasteinleitungsbereich VT1

Abbildung 5.9: Biegedruckversagen der Einfeldträgerversuche

#### 5.2.2.7 Last-Schlupf-Verhalten

Nachfolgend wird das Last-Schlupfverhalten der Träger genauer untersucht. Bei allen Versuchsträgern wurden Schlupfmessungen an den Trägerenden zwischen dem Baustahlprofil und dem Betongurt durchgeführt. Generell ist festzuhalten, dass bei den Versuchsträgern der Schlupf im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) keine merkliche Rolle spielte. Bei voller Verdübelung des Trägers VT1 trat ein erkennbarer Schlupf erst bei ca. 80 % der Traglast ein, beim Versuchsträger VT5 (mit einem rechnerischen Verdübelungsgrad von 50 %) ab einer Ausnutzung von ca. 70 %, siehe Abbildung 5.10. Bei den vollverdübelteten Trägern (VT1 bis VT4) blieb der gemessene Schlupf am Endauflager jeweils kleiner als 2 mm.

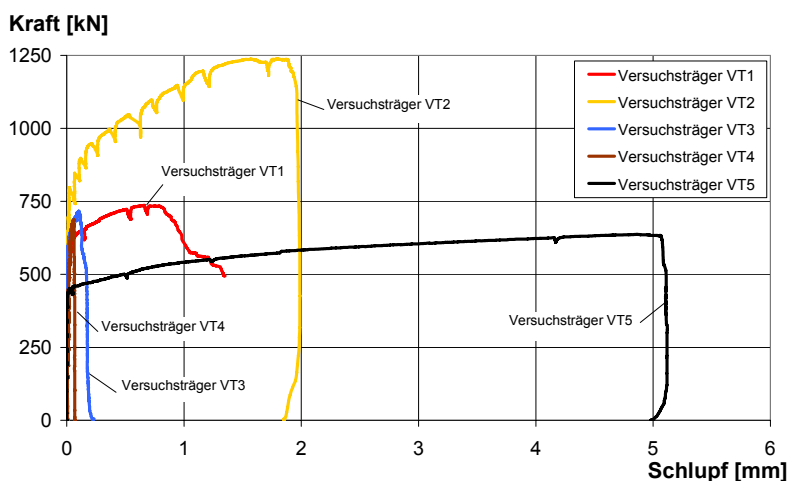


Abbildung 5.10: Last-Schlupfverhalten Einfeldträgerversuche



Beim Erreichen der Tragfähigkeit besaß der teilverdübete Versuchsträger VT5 einen ca. 10-fach höheren Schlupf als der vergleichbare Versuchsträger VT1 mit Vollverdübelung. Der Schlupf der vollverdübten Träger lag bei maximal 2 mm (Versuchsträger VT 2).

#### 5.2.2.8 Last-Riss-Verhalten

Im Allgemeinen weisen Verbundflachdecken 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 Gebrauchstauglichkeit 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. Die nachfolgende Abbildung zeigt das bei Traglast vorhandene Rissbild am Beispiel des Versuchsträgers VT1.

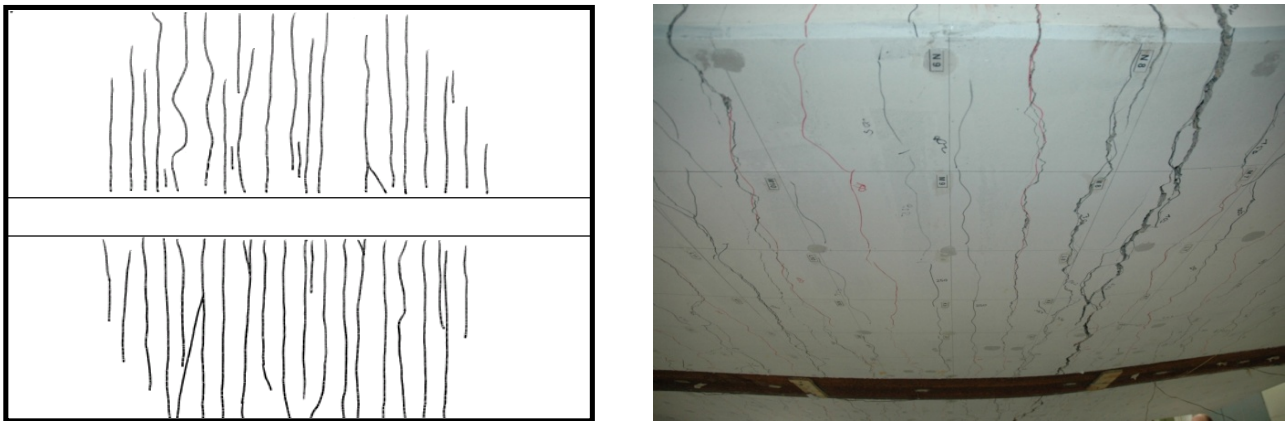


Abbildung 5.11: Schematische Skizze und Foto des Rissbilds auf der Betonunterseite bei Erreichen der Traglast des Versuchsträgers VT1

Die Auswertung im Gebrauchszustand ( $\sim 50\%$  der Traglast) zeigt, dass die Rissbreiten 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 riss (siehe ausgeprägtes Fließplateau, Abbildung 5.12). Für den Versuchsträger VT3 und VT4 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. Auch hier lagen die gemessenen Rissbreiten im Bereich des Gebrauchszustandes zwischen 0,1 – 0,4 mm. Der Vergleich mit anderen Trägern ohne Querbiegung zeigte hierbei einen kaum erkennbaren Unterschied. Alleinig der teilverdübete Versuchsträger VT5 besaß größere Rissbreiten. Entsprechend der größeren Durchbiegung weiteten sich die Risse auf der Betonunterseite auf.

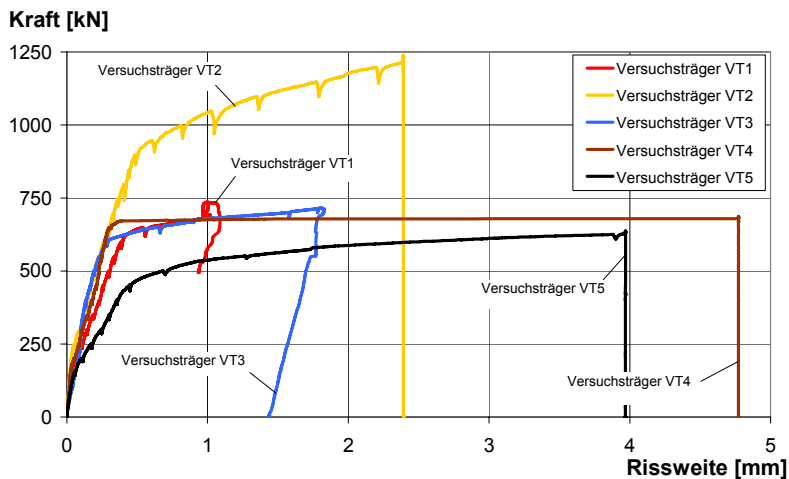


Abbildung 5.12: Last-Rissbreitenkurven der Einfeldträgerversuche

#### 5.2.2.9 Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite - Einfeldträger

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. Hierzu wurden die Setzdehnungsmesser in gleichen Abständen untereinander quer über die Betonplatte verteilt.

Bei den beiden nachfolgenden Abbildungen sind jeweils die Betondehnungen (vertikale Diagrammchse) über die Trägerbreite (horizontale Diagrammchse) 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.

Beispielhaft sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen die Betonstauchungen (hier: vorzeichenneutral) der Versuchsträger VT2 und VT3 zu sehen.

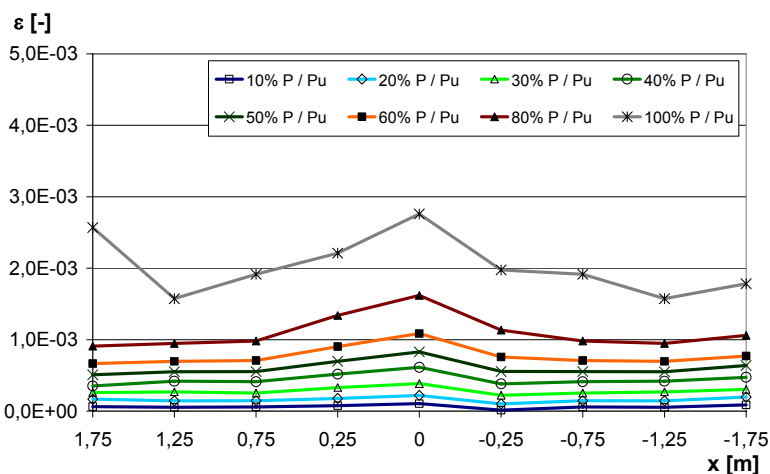


Abbildung 5.13: Verteilung der Betonstauchung im Querrichtung (Feldmitte) – VT 2

Es ist gut zu erkennen, dass sich in der Mitte (also in der Achse des Baustahlprofils,  $x = 0$ ) die größten Stauchungen einstellten und diese mit zunehmender Belastung sich verstärkten. Nach außen hin fielen die Kurven ganz leicht ab, d.h. infolge der Schubverzerrung waren die Dehnungen

nach außen hin geringer. Jedoch war der Abfall bei weitem nicht sehr ausgeprägt. Mit zunehmender Belastung, insbesondere im Grenzzustand der Tragfähigkeit, nahmen die Dehnungs-/Spannungsunterschiede zwischen Trägermitte und den Außenbereichen zu. Das Ansteigen der Dehnung an den Trägerseiten ist durch den freien Trägerrand zu erklären.

Auch trotz der Querbiegung durch die außermittige Belastung der Versuchsträger stellte sich eine zur Mitte hin höhere Dehnungsverteilung ein (Abbildung 5.14).

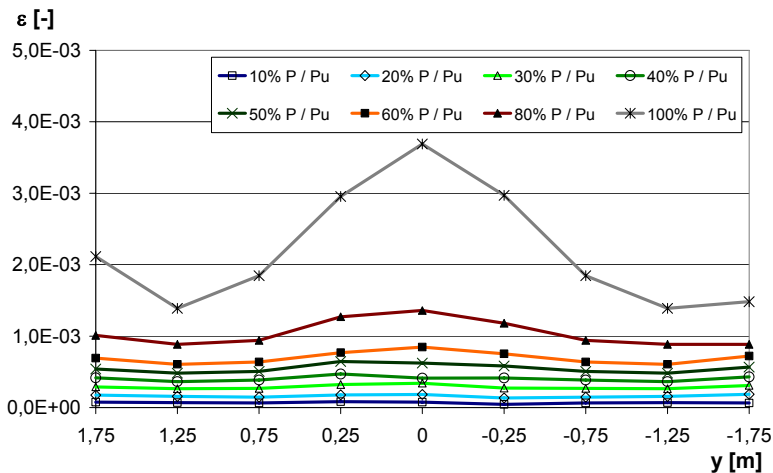


Abbildung 5.14: Verteilung der Betonstauchungen im Querrichtung (Feldmitte) – VT 3

In Abschnitt 4.3.1 wird die Definition für die mittragende Breite wie folgt angegeben: Es handelt sich hierbei um eine über die Breite des Trägers hinweg konstante Spannung, die flächengleich mit dem tatsächlichen Spannungsverlauf ist. Die berechnete Spannung ist hierbei die maximal gemessene Spannung auf der Betonoberfläche.

Das bedeutet, dass aus den Dehnungen eine spannungsbezogene mittragende Breite berechnet werden kann. Es kann jedoch nicht für den gesamten Bereich (bis zur Traglast) von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden. Die Norm [DIN 1045-1] bzw. die Erläuterungen zur Norm [Curbach et al 2003] geben hierfür verschiedene Modelle zur Berechnung der Spannungs-Dehnungsbeziehung an:

- Spannungsdehnungslinie für die Querschnittsbemessung (Parabel-Rechteck-Diagramm)
- Spannungsdehnungslinie für die Querschnittsbemessung (bilineare Kurve)
- Spannungsdehnungslinie für nichtlineare Berechnungsverfahren der Schnittgrößen und Verformung

Für die Berechnung der mittragenden Breite wird auf das letztgenannte Verfahren zurückgegriffen und entsprechend die Dehnungen in Betondruckspannungen umgerechnet. Das Diagramm (Abbildung 5.15) über den Spannungs-Dehnungsverlauf zeigt, dass im unteren Lastbereich (bis ca. 40 % der Bruchfestigkeit des Betons) die Beziehung als linear angenommen werden kann. Mit Erreichen der nach Norm festgelegten Grenzdehnung  $\varepsilon_{c1}$  ist die maximale Spannung erreicht. Für Normalbeton ist diese Dehnung  $\varepsilon_{c1}$  mit -2,1 ‰ (C20/25) bis -2,6 ‰ (C50/60) angegeben.

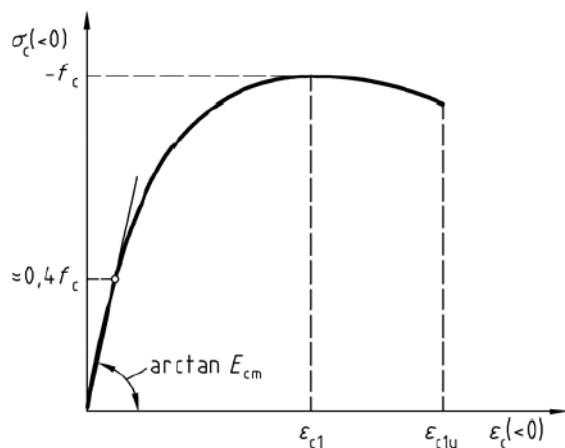


Abbildung 5.15: Nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung für Beton [DIN 1045-1]

Bei der experimentellen Bestimmung der Dehnungen wurde nahe dem Traglastzustand diese Grenzdehnung  $\epsilon_{c1}$  jeweils überschritten, so dass rechnerisch eine nahezu vollwirksame mittragende Plattenbreite ermittelt wurde.

Dies ist in Abbildung 5.16 sehr deutlich zu sehen. Mit zunehmender Belastung nimmt die rechnerische mittragende Breite zu und erreicht sogar das Maximum, die geometrische Breite des Betongurtes.

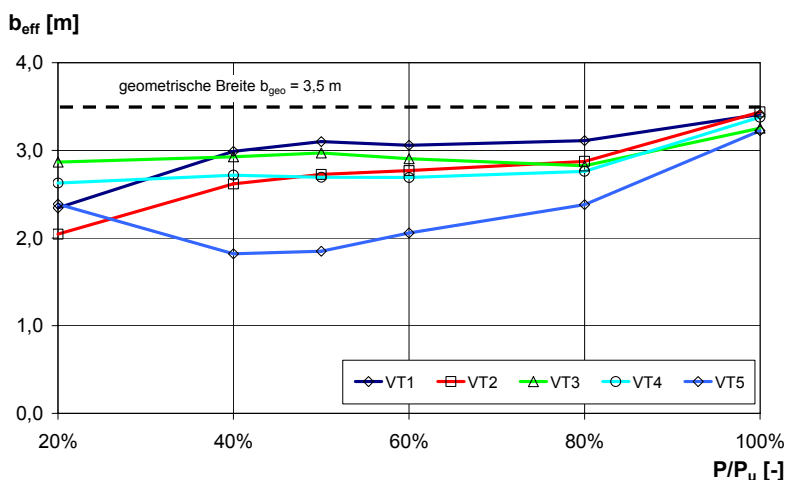


Abbildung 5.16: Mittragende Breite in Feldmitte (Einfeldträger), rückgerechnet aus Beton-  
dehnung an Oberkante des Betons

Für den Träger mit der teilweisen Verdübelung (VT5) ergibt sich die geringste mittragende Breite. Durch die geringere Anzahl an Verbundmittel kann der Betongurt nicht vollständig aktiviert werden, so dass auch die rechnerische mittragende Breite unter Gebrauchslasten geringer ausfällt. Bei allen Trägern nimmt die berechnete mittragende Breite mit zunehmenden Lasten leicht ab. In Tabelle 5.5 sind die rückgerechneten Werte für die mittragende Breite nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.5: Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite – Einfeldträgerversuche

P / P <sub>u</sub>	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
20%	2,34	2,04	2,87	2,63	2,39
40%	2,99	2,62	2,93	2,72	1,82
50%	3,10	2,73	2,97	2,69	1,85
60%	3,06	2,77	2,90	2,69	2,06
80%	3,11	2,87	2,82	2,76	2,38
100%	3,41	3,44	3,25	3,38	3,22

Nach [DIN 18800-5] bestimmt sich die mittragende Breite für einen Einfeldträger mit einer Stützweite von 4.0 m zu 1,0 m, so dass im Vergleich zu den Versuchen festgestellt werden kann, dass die experimentell ermittelten Werte um ein Vielfaches über der normativen Regelung liegt, siehe hierzu auch Tabelle 5.6.

Tabelle 5.6: Vergleich der experimentellen mit normativ mittragender Breite

P / P <sub>u</sub>	b <sub>eff</sub>	VT1	Δ	VT2	Δ	VT3	Δ	VT4	Δ	VT5	Δ
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]
20%	1,00	2,34	134%	2,04	104%	2,87	187%	2,63	163%	2,39	139%
40%	1,00	2,99	199%	2,62	162%	2,93	193%	2,72	172%	1,82	82%
50%	1,00	3,10	210%	2,73	173%	2,97	197%	2,69	169%	1,85	85%
60%	1,00	3,06	206%	2,77	177%	2,90	190%	2,69	169%	2,06	106%
80%	1,00	3,11	211%	2,87	187%	2,82	182%	2,76	176%	2,38	138%
100%	1,00	3,41	241%	3,44	244%	3,25	225%	3,38	238%	3,22	222%

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich bei den Versuchen an der Oberseite des Betongurts 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.

#### 5.2.2.10 Voruntersuchung Stützmenteinwirkung – Versuchsträger VT6

Versuchsträger VT6 stellte in Bezug auf die Belastung und das System eine Besonderheit im Vergleich zu den anderen Trägern dar. Der Träger 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.

Im Vorgriff auf das in Abschnitt 6.2 erläuterte analytische Modell zeigt ein Vergleich zwischen der experimentellen Untersuchung und der analytischen Vergleichsrechnung das günstige Verformungsverhalten durch die Einspannwirkung des Versuchsträgers, siehe Tabelle 5.7.

Tabelle 5.7: Vergleich analytische Berechnung mit experimentellen Ergebnissen VT 6

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

Es kann festgestellt werden, 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, siehe Abbildung 5.17. 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.

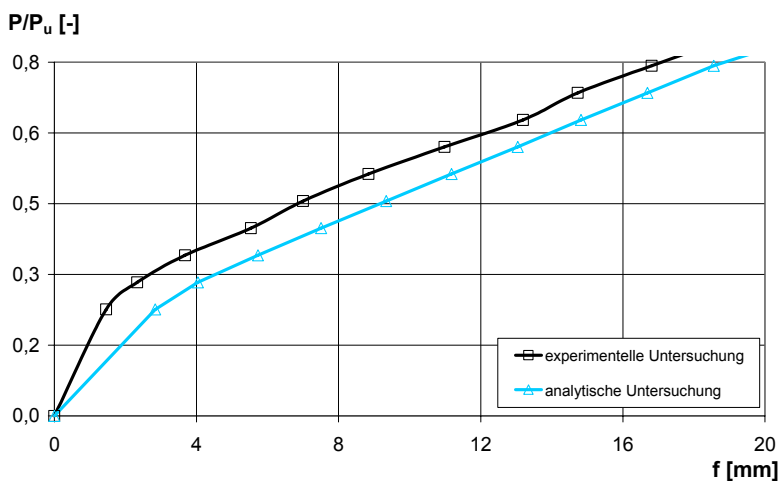


Abbildung 5.17: Vergleich analytisches Modell mit Versuchsträger VT6

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 Trägern ist ein Versuch nicht ausreichend, so dass in diesem Bereich weitergehende Untersuchungen erforderlich sind.

#### 5.2.2.11 Verifizierung der Dehnungsmessungen

Für die Verifizierung der Versuchsergebnisse und der mittels Dehnmessstreifen und Setzdehnmessern ermittelten Dehnungen im Querschnitt werden exemplarisch für die Versuchsträger VT1 und VT2 zwei Rückrechnungen der Biegetragfähigkeit infolge der Dehnungsmessungen im Querschnitt durchgeführt.

Für die Momententragfähigkeit unter positiver Momenteneinwirkung werden folgende Kraftkomponenten berücksichtigt:

Zugkomponenten:

- Baustahlprofil (Nulllinie liegt oberhalb des Profils)
- Bewehrung in der unteren Lage
- Beton im Zugbereich (Ansatz einer reduzierten Betonzugfestigkeit (nach Hilsdorf))

Druckkomponenten:

- Beton im Druckbereich (unter Berücksichtigung der ermittelten mittragenden Breite)
- Bewehrung in der oberen Lage

Die für die zwei Versuchsträger gewählten Lastbereiche liegen jeweils im Bereich der Gebrauchstauglichkeit, d.h. es tritt kein Fließen im Baustahlquerschnitt bzw. Bewehrungsquerschnitt auf.

Die Abbildung 5.18 zeigt skizzenhaft die Spannungen im Querschnitt infolge einer gemessenen Dehnungsverteilung.

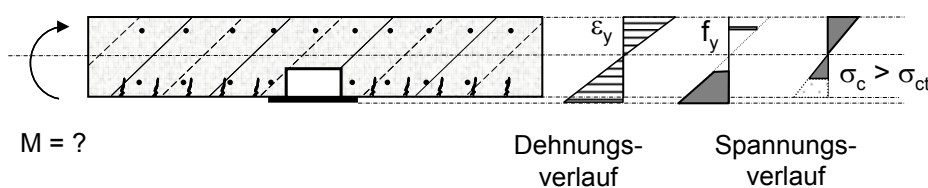


Abbildung 5.18: Dehnungs- und Spannungsverteilung eines Slim-Floor Querschnitts

Für die Berechnung werden folgende Messergebnisse aus den Versuchen herangezogen:

- VT1 bei einer Belastung  $P/P_u = 30 \%$
- VT 2 bei einer Belastung  $P/P_u = 40 \%$

Mittels der gemessenen Dehnungen kann über die Materialsteifigkeit die Spannungen in diskreten Querschnittspunkten rückgerechnet werden, wie in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Experimentell gemessene Dehnungswerte am Einfeldträger – Rückrechnung des Biegemoments

	Versuchsträger VT1	Versuchsträger VT2
Gewählte Belastung: % der Traglast	30 %	40 %
Mittragende Breite des Betongurtes:	2,12 m	1,81 m
Dehnung des Baustahlprofils (Unterkante Untergurt):	$4,60 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-4}$
Dehnung des Baustahlprofils (Oberkante Obergurt):	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-4}$
Dehnung des Betons (Oberkante Betongurt):	$-3,60 \cdot 10^{-4}$	$-6,13 \cdot 10^{-4}$
Ermittelte Krümmung:	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Momententragfähigkeit des Querschnitts (Rückrechnung):	148,6 kNm	310,5 kNm
Momenteneinwirkung:	151,9 kNm	340,2 kNm
Abweichung:	2,2 %	8,7 %

Nach [DIN 1045-1] und [Curbach et al 2003] kann bis zu einer Betonspannung von  $\sigma_c = 0,4 \cdot f_{cm}$  von einer vereinfachten Spannungs-Dehnungs-Beziehung ausgegangen werden, so dass bei den hier dargestellten Beispielen die gemessene Dehnung linear in eine Betonspannung umgerechnet werden kann. Die beiden stichprobenartig gewählten Versuchsträger zeigen, dass die Ergebnisse der Messdaten für die Rückrechnung der Momententragfähigkeit herangezogen werden können und somit plausibel sind. Für Bereiche oberhalb des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit

und der damit verbundenen fortgeschrittenen Rissbildung ist eine Rückrechnung meist nicht mehr direkt möglich, da die gemessene Dehnung einzeln aufgehenden Risse berücksichtigt und daher die Betondehnungen im Zugbereich teilweise keine brauchbaren Werte wiedergeben.

## **5.3 Versuche an Zweifeldträgern**

### **5.3.1 Grundsätzliches**

Nachdem das Trag- und Verformungsverhalten am Einfeldträger experimentell untersucht wurde, stellt sich nun weitergehend die Frage nach einer weiteren Optimierung des Trag- und Verformungsverhaltens. Dies kann konstruktiv durch eine Durchlaufträgerwirkung erfolgen, d. h. dass durch die Stützwirkung die Verformung im Feldbereich reduziert werden kann. Neben der Erweiterung des analytischen Modells wurden im Sommer 2009 Versuche an Zweifeldträgern durchgeführt [Kuhlmann, Hauf 2010a], die im nachfolgenden Abschnitt dargestellt werden.

### **5.3.2 Experimentelle Untersuchungen**

#### **5.3.2.1 Grundsätzliches**

Zwei- oder Mehrfeldträger zeigen im Gegensatz zum Einfeldträger, bei dem im Feld auf der Betonunterseite aufgrund der Zugspannungen Risse entstehen, dass durch die Einwirkung der Träger auf der Betonoberseite über der Stütze sowie im Feld auf der Trägerunterseite Risse auftreten und damit den Querschnitt (Biegesteifigkeit) reduzieren.

Die geplanten Versuche wurden daher unter folgenden Gesichtspunkten - auch in Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit den bereits durchgeführten Einfeldträgerversuchen - konzipiert:

- Verwendung praxisgerechter Abmessungen im Maßstab 1:1
- Im Stützbereich wurde bis auf den Versuchsträger V3 bei allen Versuchsträgern ein Stirnplattenanschluss ausgeführt. Dies entspricht der gängigsten Anschlussart für diesen Trägertyp und stellt somit eine praxisgerechte Ausführung für die Versuche dar.
- Verwendung von Slim-Floor Trägern, bei denen die elastische Nulllinie im Beton liegt, d. h., dass bereits unter geringen Lasten im Gebrauchszustand Risse auf der Betonunterseite, sowie über der Innenstütze auf der Betonoberseite entstanden.
- Verwendung eines sehr breiten Betongurts (deutlich breiter als die mittragende Breite nach Norm), 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.
- Da es sich beim Zweifeldträger um ein statisch unbestimmtes System handelt und um eine klare Aussage für den Momenten- und Querkraftverlauf zu bekommen, wurden die Auflagerreaktionen gemessen. Damit erhält man den Verlauf der Gesamtschnittgrößen ohne Kenntnis der Steifigkeitsverteilung im Träger. Alle Versuchsträger wurden als Zweifeldträger ausgeführt.
- Verwendung einer Vierpunktbelastung (je Feld) zur ausreichend genauen Approximation einer gleichmäßig verteilten Belastung in Trägerlängsrichtung, die den wichtigsten Lastfall in der Praxis darstellt. Ein völlig querkraftfreier Bereich zwischen den Einzellasten, die mit-



tig in den einzelnen Feldern aufgebracht werden, war im Unterschied zu den Einfeldträgerversuchen nicht möglich.

- Anordnung der Lastpunkte in Stahlträgerebene der Versuchsträger, um eine Exzentrizität in Querrichtung und ein damit verbundenes Querbiegemoment des Betongurts zu vermeiden.
- 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 und Gewichtsbeschränkungen des Versuchsstands einhielten.
- Die Geometrie der Zweifeldträger wurde in Bezug auf die Stützweite und die Lasteinleitung an die Einfeldträgerversuche angepasst, so dass ein direkter Vergleich der beiden Versuchsreihen möglich ist. Ebenso flossen die Erkenntnisse der bereits durchgeführten Versuche in die Ausführung der Zweifeldträgerversuche ein.

#### 5.3.2.2 Versuchsprogramm - Trägerabmessungen und Variation der Parameter

Die für die Versuche gewählten Abmessungen und Materialgüten des Baustahlprofils sind in der nachfolgenden Tabelle 5.9 angegeben. Wie auch bei den Einfeldträgerversuchen wurden sog. Hutprofile (UPE-Profil zusammengeschweißt mit einem Flachstahlblech als Untergurt) sowie SFB-Profile, bestehend aus einem HEB 140 Profil und einem Flachstahluntergurtblech verwendet. Der Flachstahl als Untergurt wurde jeweils um 10 cm an beiden Seiten des Baustahlprofils verbreitert angeschweißt.

Tabelle 5.9: Versuchsprogramm - Werkstoffe und Profilgrößen der Stahlquerschnitte

Versuchs-Nr.	Stahlprofil	Untergurt	Stahlgüte
V 1	UPE 200	400 x 10 mm	S355
V 2	SFB (HEB 140)	340 x 10 mm	S355
V 3	UPE 200	400 x 10 mm	S355
V 4	UPE 200	400 x 10 mm	S355
V 5	SFB (HEB 140)	340 x 10 mm	S355
V 6	SFB (HEB 140)	340 x 10 mm	S355

In Tabelle 5.10 wird die Plattengeometrie der sechs Versuchsträger V1 bis V6 aufgeführt. Alle Träger wurden mit einer Gesamtlänge von 8,0 m hergestellt, so dass wiederum analog zu den Einfeldträgern eine Einzelfeldlänge von 4,0 m entstand. Aufgrund der zu erwartenden Durchlaufträgerwirkung und damit reduzierten mittragenden Breite wurden die Plattenbreite auf 2,5 m bzw. 2,4 m verringert. Aus Gewichtsgründen (maximale Traglast des Krans in der Versuchshalle) wurden die Träger mit SFB-Profil und einer 1 cm höheren Plattendicke in Ihrer Breite auf 2,4 m reduziert. Wie auch bei den Einfeldträgerversuchen wurde die Betonplatte deckengleich wie die Unterkante des Stahlprofils betoniert.

Tabelle 5.10: Versuchsprogramm – Plattengeometrie

Versuchs-Nr.	Stahlquerschnitt	L [m]	b [m]	$h_c$ [cm]	Betongüte	Betonstahl
V 1	UPE 200	8,00	2,50	22	C 25/30	S500
V 2	SFB (HEB 140)	8,00	2,40	23	C 25/30	S500
V 3	UPE 200	8,00	2,50	22	C 25/30	S500
V 4	UPE 200	8,00	2,50	18	C 25/30	S500
V 5	SFB (HEB 140)	8,00	2,40	23	C 25/30	S500
V 6	SFB (HEB 140)	8,00	2,40	23	C 25/30	S500

Zur Identifikation der wichtigsten Versuchsparameter wurde bei jedem Versuchsträger jeweils nur ein Parameter variiert. Eine Übersicht hierzu ist in der nachfolgenden Tabelle zu finden.

Tabelle 5.11: Versuchsprogramm – Parametervariation

Versuchs-Nr.	Variierter Parameter	Parameter
V 1	Basisträger (Hutprofil)	UPE 200
V 2	Basisträger (SFB-Profil)	HEB 140
V 3	durchlaufender Träger	keine Mittelstütze
V 4	Plattendicke	$h_c = 18$ cm
V 5	Hoher Bewehrungsgrad*	Längsbewehrung (über Stütze – obere Lage) - 20,5 cm <sup>2</sup> /m
V 6	Niedriger Bewehrungsgrad*	Längsbewehrung (über Stütze – obere Lage) - 5,2 cm <sup>2</sup> /m

\* Bewehrungsgrad Versuchsträger V1-V4: 11,3 cm<sup>2</sup>/m

Anzumerken ist, dass bei der Versuchsdurchführung die Schrauben des Stirnplattenanschlusses gelöst wurden (siehe nachfolgende Abbildung 5.19), so dass über die Schrauben lediglich nur noch eine Querkraft übertragen werden konnte.

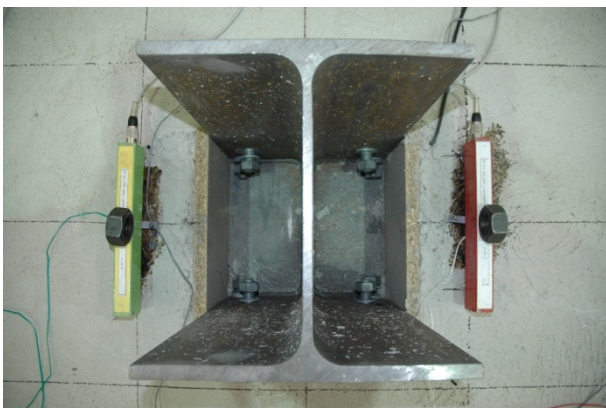


Abbildung 5.19: Mittelstütze mit gelösten Schrauben (hier: Versuchsträger V1)

Zur Kontrolle des „momentenfreien“ Querkraftanschlusses an der Mittelstütze wurde ein DMS-Streifens auf dem Stützenprofil angebracht.

### 5.3.2.3 Herstellung, Versuchsaufbau und Messeinrichtung

In der Abbildung 5.20 ist der grundlegende Versuchsaufbau zu sehen. Die Träger wurden jeweils an den Enden sowie über der Mittelstütze gelagert. Versuchsträger V3 besaß im Gegensatz zu den restlichen Trägern keine Mittelstütze, das Profil war hier über die Mittelauflagerung durchlaufend. Die Auflagerung selbst erfolgte auf dem Baustahluntergurt, die Betonplatte selbst war an den Endauflagern sowie dem Mittelaufleger frei.

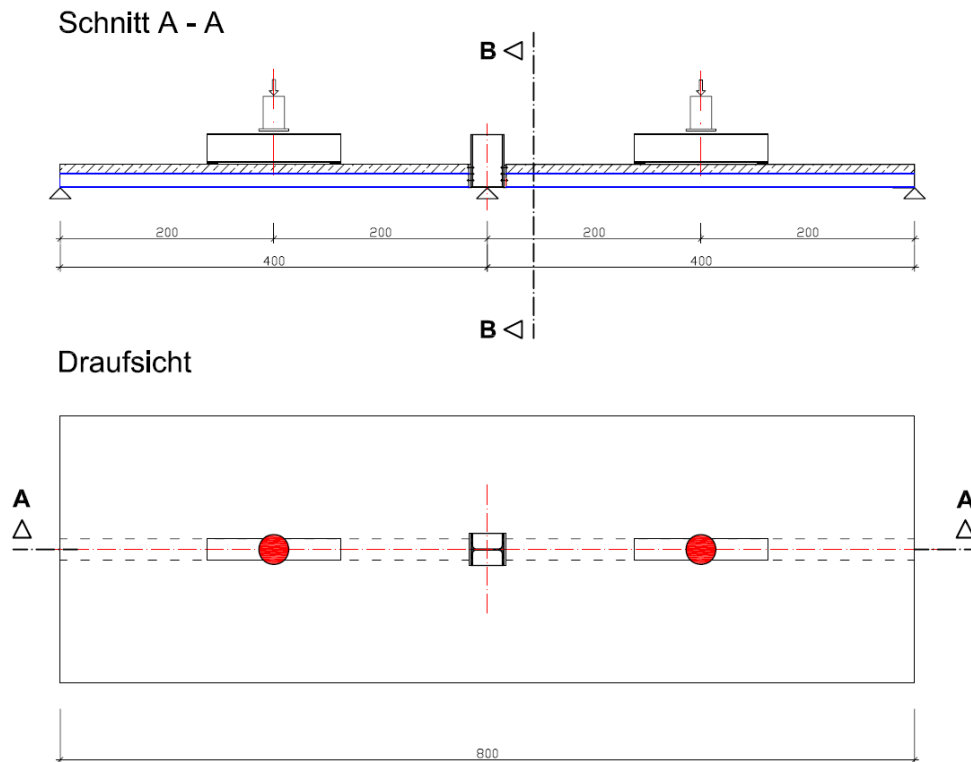


Abbildung 5.20: Versuchsstand Zweifeldträger – Aufbau und Belastungsanordnung

Im Rahmen der Versuche wurden folgende Messungen durchgeführt (Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22):

- Messung der Pressenkraft in den Prüfzylindern
- Messung des Pressenweges in den Prüfzylindern
- Durchbiegungsmessung (gekennzeichnet mit  $w$ ) in Feldmitte bei  $0,5 \cdot L$  und  $0,4 \cdot L$  (Abstand zum Randaufleger)
- Schlupfmessung (insgesamt zehn Stück, gekennzeichnet mit  $S$ ) zwischen Baustahluntergurt und Betonuntergurt an den Endpunkten sowie über den Träger in Längsrichtung verteilt
- Vertikalschlupfmessung am Mittelaufleger (jeweils auf beiden Seiten des Auflagers, gekennzeichnet als Lager 1 und Lager 2) zwischen Beton und Baustahlprofil (Auflagerpunkt unterhalb des Baustahluntergurt)
- Messung der Auflagerkräfte (gekennzeichnet mit  $A$ ) mittels Kraftmessdosen an den Randauflagern
- Dehnungsmessung mittels DMS an ausgewählten Bewehrungsstäben (insgesamt 7 bzw. 8 Stück je Träger) im Stützbereich (Längsbewehrung in oberer Lage)

- Dehnungsmessung mittels DMS auf Obergurt und Untergurt des Baustahlprofils, verteilt über Trägerlängsrichtung
- Dehnungsmessung mittels Setzdehnungsmesser (gekennzeichnet als bom, bol) auf der Betonober- und Unterseite in Trägerquerrichtung über dem Mittelaufleger und Feldmitte

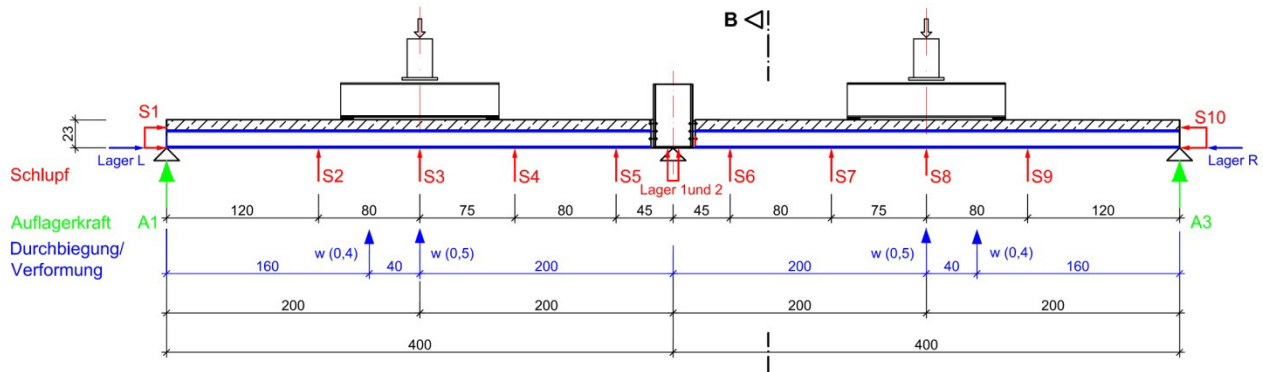


Abbildung 5.21: Messung der Durchbiegung, des Schlupfs und der Auflagerkräfte

Im Gegensatz zu den restlichen Versuchsträgern wurde für den Versuchsträger V3 mit einem durchlaufenden Baustahlprofil die Messungen analog durchgeführt, um eventuelle Unterschiede im Trag- und Verformungsverhalten klären zu können.

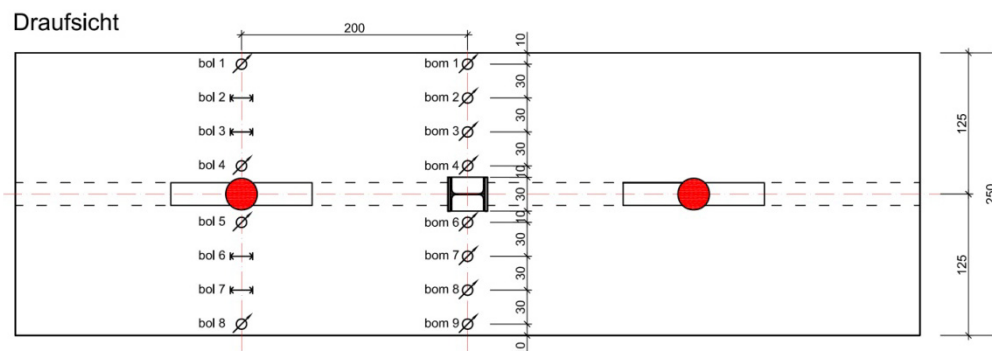


Abbildung 5.22: Setzdehnungsmesser auf dem Betongurt (hier nur Oberseite dargestellt)

#### 5.3.2.4 Versuchsdurchführung

Alle Versuchsträger wurden bis zum Erreichen der Traglast belastet und darüber hinaus verformt. Die Erfassung aller Messwerte erfolgte kontinuierlich ca. alle 10 Sekunden. Die Abbildung 5.23 zeigt den im Versuchsstand eingebauten Träger V1.



Abbildung 5.23: Versuchsstand Zweifeldträger V1

#### 5.3.2.5 Werkstoffkennwerte - Festigkeiten

Für die Nachrechnung der Versuche und Kontrolle des analytischen Berechnungsmodells (siehe Abschnitt 6.2) ist die Kenntnis der tatsächlichen Materialkennwerte notwendig. In den nachfolgenden Tabellen sind die Materialfestigkeiten für den Beton, das Baustahlprofil und die Bewehrung wiedergegeben [DIN 12390-3], [DIN 12390-5], [DIN 50125], [DIN EN 10002-1]. Die in Tabelle 5.12 angegebenen Betondruckfestigkeiten sind die aus der Würfeldruckfestigkeit zurückgerechnete Zylinderdruckfestigkeit nach [DIN 1045-1].

Tabelle 5.12: Betondruckfestigkeit - Zweifeldträgerversuche

Versuchsträger	Betondruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
V1	38,7	2,3
V2	39,6	1,9
V3	35,7	2,1
V4	37,3	1,8
V5	33,1	1,7
V6	31,4	1,6

Die Zweifeldträgerversuche wurden mit einem sog. Hutprofil-Querschnitt (Fa. Peiner) und einem sog. SFB-Querschnitt (Fa. ArcelorMittal) durchgeführt, so dass zwei verschiedene (wenn auch sehr ähnliche) Festigkeitsgrenzen für das Baustahlprofil vorliegen. Die Profile wurden durch die Fa. Haller Industriebau zusammengeschweißt, die gleichzeitig auch das Flachstahlblech lieferten. Aus diesem Grund besaßen die Untergurtbleche aller Versuchsträger die gleiche Stahlgüte, siehe nachfolgende Tabelle.

Tabelle 5.13: Materialkennwerte Baustahlprofile - Zweifeldträgerversuche

Baustahl	Fließgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]
UPE 200	409	538	30
HEB 140	415	539	26
Fl. t=10mm	443	554	28

Bei der Herstellung der Betongurte wurde darauf geachtet, dass der Bewehrungsstahl gleichen Durchmessers jeweils aus der gleichen Charge verwendet wurde, so dass für alle Versuchsträger die gleichen Materialkennwerte vorlagen, siehe nachfolgende Tabelle.

Tabelle 5.14: Materialkennwerte Betonstahl - Zweifeldträgerversuche

Bewehrungsstahl	Fließgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Stab Ø10	575	598
Stab Ø12	577	597
Stab Ø14	525	596

### 5.3.2.6 Last- und Verformungsverhalten Zweifeldträgerversuche V1 bis V6

Alle Träger verhielten sich äußerst duktil und zeigten im Bereich der Maximallast ein sehr ausgeprägtes Verformungsverhalten, siehe Abbildung 5.24. Der Verlauf der Kurven begann jeweils sehr steil, jedoch mit zunehmender Rissbildung flachte sich die Kurve durch den Steifigkeitsverlust ein wenig ab.

Alle Träger versagten im Bereich der Mittelstütze infolge Querkraft/Durchstanzen. Das Versagen kündigte sich durch eine radiale Rissentwicklung um das Mittelauger und einer sehr großen Vertikalverformung (Vertikalschlupf) zwischen Betongurt und dem durch das Auflager unterstützten Baustahlprofil an.

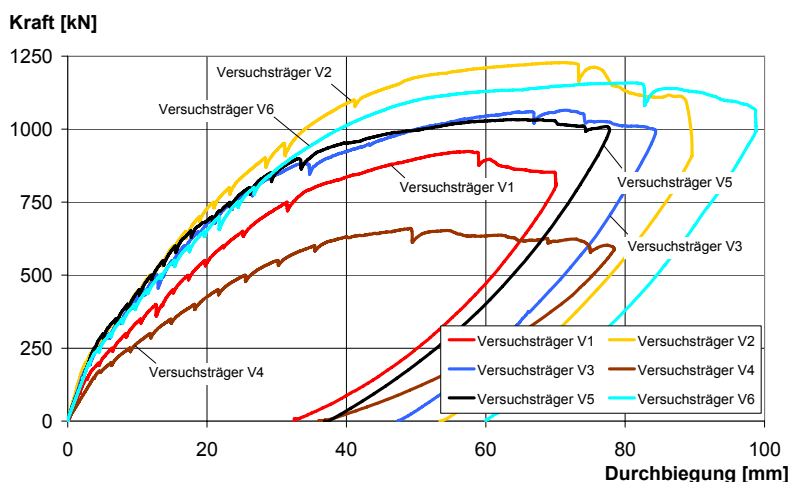


Abbildung 5.24: Last-Verformungskurve Zweifeldträgerversuche

Durch die niedrigere Betonplattendicke (18 statt 22 cm) und der damit verbundenen kleineren Gesamtsteifigkeitsverhalten des Trägers V4 wies dieser eine kleinere Traglast auf als die restlichen Träger. Für die restlichen Träger mit Plattendicken von 22 cm galt, dass diese Träger qualitativ ein sehr ähnliches Trag-Verformungsverhalten zeigten, ein ähnliches Traglastniveau erreichten und ähnliche Verformungswerte lieferten.

Die Versuchsträger V2, V5, V6, die im Gegensatz zu den anderen Trägern mit einem steiferen Baustahlprofil verwendet wurden, zeigten im Vergleich zum Hupprofil eine etwas höhere Traglast. Die unterschiedlichen Bewehrungsgrade jedoch zeigten keinen merklichen Unterschied beim Verformungsverhalten oder der maximalen Traglast.

Versuchsträger V3 der im Gegensatz zum Basisträger V1 mit einer durchlaufenden Platte verwendet wurde, zeigte eine etwas steifere Verformungsverhalten und eine geringfügig höhere Traglast. Zu beachten ist hierbei, dass beim Stützenanschluss im Bereich des Mittelaufagers die Schrauben gelöst wurden, so dass keine Zugkraft übertragen und damit auch keine Momententragfähigkeit über der Mittelstütze aufgebaut werden konnte.

In Abbildung 5.25 werden die Versuchsträger V1 und V3 als Zweifeldträgerversuche mit und ohne Mittelstütze und der Basisträger VT1 als Einfeldträgerversuch miteinander verglichen. Da die gleichen Querschnitte (Plattendicke und Baustahlprofil) und Spannweiten (Feldlänge jeweils 4,0 m) verwendet wurden, zeigt sich hier der Unterschied im Verformungsverhalten dieser drei getesteten Träger sehr deutlich.

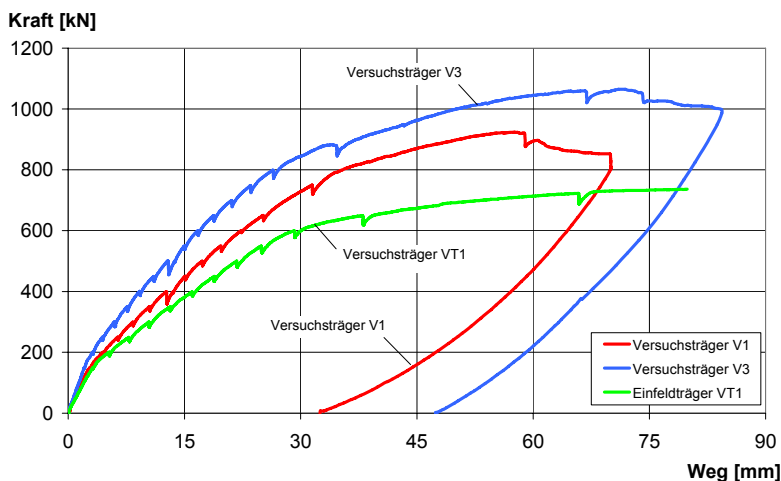


Abbildung 5.25: Vergleich Ein- und Zweifeldträgerversuche mit Hutprofil

In Hinblick auf die Tragfähigkeit und die Verformung zeigten die Zweifeldträgerversuche ein günstigeres Verhalten. Dies bedeutet, dass durch die gezielte Ausbildung einer Stützmomentenwirkung die Last-Verformungskurve steiler verlief und insgesamt die Tragfähigkeit größer war. Zwischen den beiden Zweifeldträgerversuchen zeigte sich ebenfalls ein Unterschied, der durch die unterschiedliche Ausbildung an der Mittelstütze begründet ist. Während beim Träger V1 ein Stirnplattenanschluss mit gelösten Schrauben (keine Zugkraftübertragung) zur Anwendung kam, erreichte der Versuchsträger V3 mit einem durchgehenden Baustahlprofil die größte Tragfähigkeit, sowie ein noch steiferes Verformungsvermögen. Dies ist gerade für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Nachweis der Verformung) von entscheidender Bedeutung.

#### 5.3.2.7 Schlupfmessung Zweifeldträgerversuche

An den Endauflagern sowie an den Zwischenstellen des Versuchsträgers wurde jeweils der Schlupf zwischen dem Baustahluntergurt und dem Betonuntergurt gemessen, siehe Abbildung 5.26. Erwartungsgemäß zeigte sich erst ab einer Belastung größer als 50% der Traglast ein messbarer Schlupf in der Verbundfuge. Auch der Maximalwert des Schlupfs am Endauflager bei Erreichen der Traglast war nur sehr klein ( $< 2,5$  mm). Dies zeigt, dass die Verbundwirkung im Träger vollständig vorhanden war und sich die Kraftkomponenten aus Zug im Baustahlprofil und Betondruckkraft über die Verbindungsmittel kurzschlossen.



Für den Bereich der Gebrauchstauglichkeit und die nachfolgenden analytischen Betrachtungen konnte daher von einer vollständigen Verbundwirkung und somit einem starren Verbund ausgegangen werden.

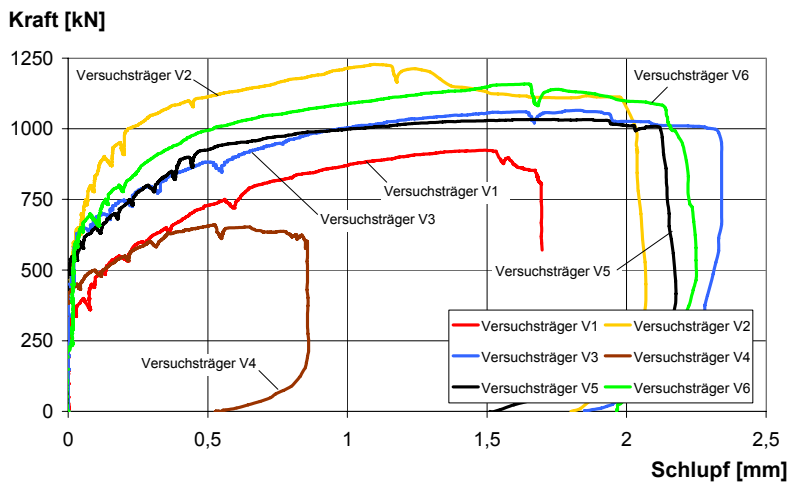


Abbildung 5.26: Last-Schlupfcurve Zweifeldträgerversuche

Wie zu erwarten war, versagten alle Träger im Bereich der Mittelstütze und wiesen hierbei alle eine sehr große Vertikalverformung (Schlupf) zwischen dem unterstützten Baustahluntergurt und dem danebenliegenden Betongurt auf. Mit Ausnahme des ersten Trägers wurde daher zusätzlich ein Schlupfmesser im Bereich des Mittelaufagers angebracht. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Bereich der Mittelstützauflagerung bei Erreichen der maximalen Traglast. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5.28 dargestellt.

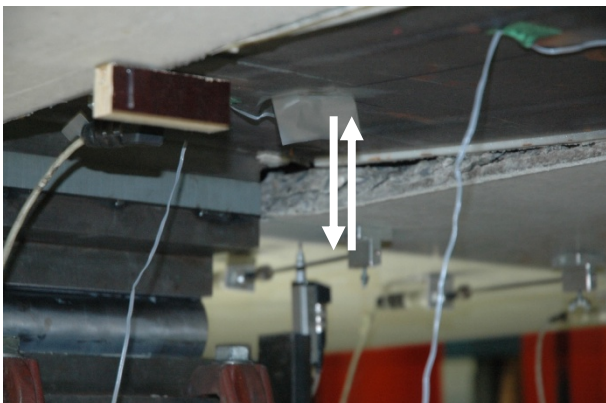


Abbildung 5.27: Vertikalschlupf im Bereich des Mittelaufagers (Versuchsträger V4)



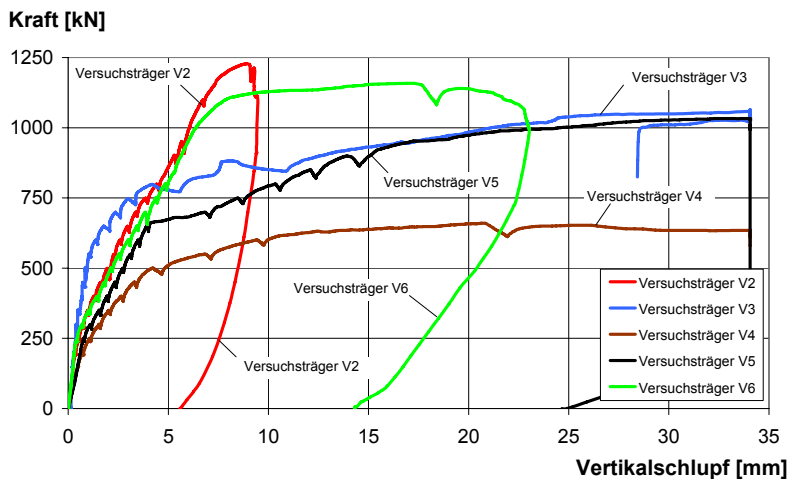


Abbildung 5.28: Last-Schlupfcurve Zweifeldträgerversuche – Vertikalschlupf Mittelaufleger

### 5.3.2.8 Rissmessung Zweifeldträgerversuche

Bei allen Versuchsträgern wurden Rissmesser auf der Betonoberseite im Bereich der Mittelstütze und auf der Betonunterseite im Feldbereich angebracht, so dass die Rissentwicklung im Betonzugbereich aufgenommen werden konnte. Für den Stützbereich ist mit Ausnahme des Versuchsträgers V3 (ohne Stützenstummel) zu beachten, dass beim Stirnplattenanschluss die Schrauben als reiner Querkraftanschluss ausgebildet wurde und daher die Öffnung der Fuge zwischen Stirnplatte und Mittelstützenprofil erhöhte Werte wiedergibt.

Auf der Trägerunterseite traten die ersten Risse erst ab einer Belastung von ca. 150 kN auf, senkrecht zur Stahlträgerachse. Die Rissbreiten öffneten sich mit zunehmender Belastung. Für den Feldbereich und damit der Rissmessung auf der Unterseite lagen die Rissbreiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (bis ca. 50% der Traglast) jeweils unter 0,3 bis 0,4 mm. Die maximalen Rissbreiten bei Erreichen der Traglast lagen zwischen 0,7 und 1,1 mm, siehe nachfolgende Abbildung.

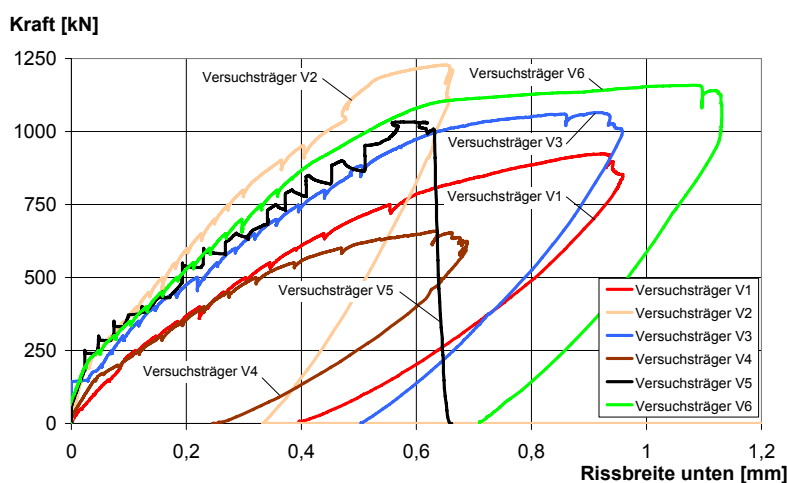


Abbildung 5.29: Last-Rissbreitenkurven der Zweifeldträgerversuche (Betonuntergurt)

In der Abbildung 5.30 sind die Rissbreiten auf dem Betonobergurt im Bereich der Mittelstütze abgetragen. Erste erkennbare Risse traten bereits bei sehr geringen Pressenkräften von 50 kN

auf. Während zu Beginn der Querschnitt um das Mittelaufleger senkrecht zur Stahlträgerachse riss, traten mit zunehmender Belastung immer mehr Radialrisse um das Mittelstützenprofil auf. Bei Erreichen der Bruchlast traten Risse in Form eines Bruchkegels um das Mittelaufleger auf. Die Rissbreiten waren auf der Betonoberseite entsprechend ausgeprägter und erreichten für den Traglastzustand Werte zwischen 2,0 und 3,0 mm.

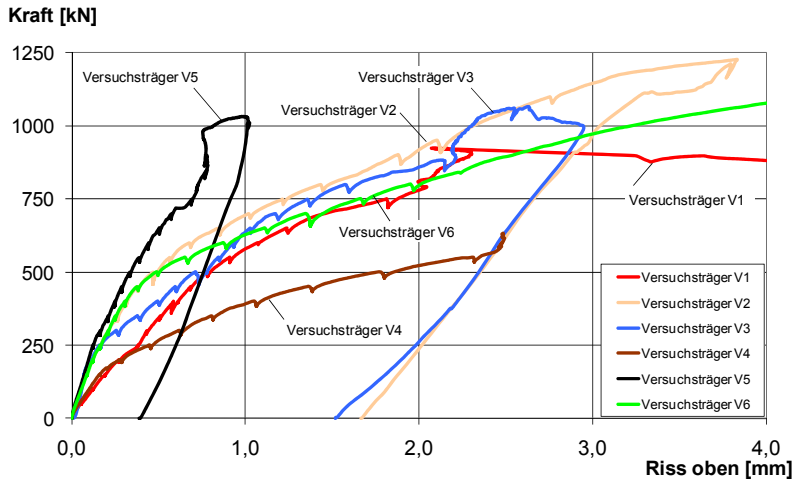
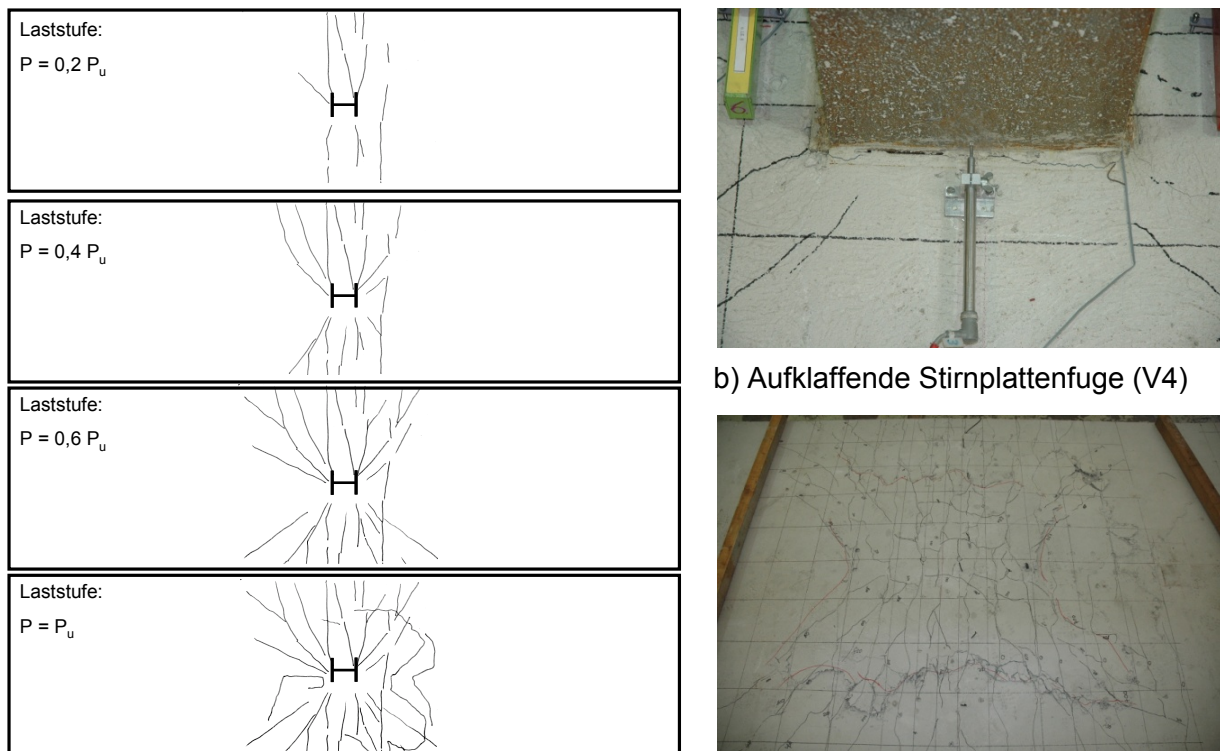


Abbildung 5.30: Last-Rissbreitenkurve Zweifeldträgerversuche (Riss unten)

Die Abbildung 5.31 zeigt eine grafische Darstellung des Rissfortschritts auf der Betonoberseite mit zunehmender Belastung. Anzumerken ist, dass die Stirnplatten durch das Lösen der Schrauben aufklafften und daher an allen Ecken verstärkte Schrägrisse auftraten.



a) Rissbild des Zweifeldträgers V1 (Trägeroberseite) c) Rissbild (Bruchbild Versuchsträger V3)

Abbildung 5.31: Rissentwicklung Betonplattenoberseite Zweifeldträgerversuche

### 5.3.2.9 Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite - Zweifeldträger

Analog zur Anordnung der Setzdehnmessmer bei den Einfeldträgerversuchen wurden auch bei den Zweifeldträgern Dehnmessmer auf dem Betongurt in Querrichtung verteilt angebracht, siehe Abbildung 5.22. Mittels dieser Messungen kann die experimentelle mittragende Breite des Betongurtes bestimmt werden, für den Feldbereich im Betongurt auf der Oberseite, entsprechend im Stützbereich auf der Trägerunterseite.

Die Auswertung der experimentell ermittelten mittragenden Breite wird nachfolgend für den Feldbereich in Abbildung 5.32 und in Tabelle 5.15 und für den Stützbereich in Abbildung 5.33 und Tabelle 5.16 dargestellt.

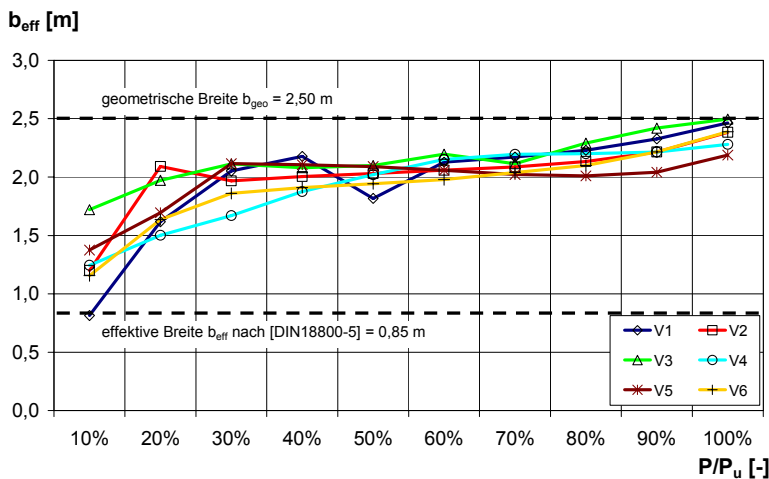


Abbildung 5.32: Rechnerische mittragende Breite in Feldmitte (Druckbereich)

Tabelle 5.15: Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite in Feldmitte - Zweifeldträger

$P / P_u$ [-]	V1 [m]	V2 [m]	V3 [m]	V4 [m]	V5 [m]	V6 [m]	geometrische Breite [m]	$b_{eff}$ nach [DIN 18800-5]
10%	0,81	1,20	1,72	1,24	1,37	1,16	2,50	0,85
20%	1,62	2,09	1,97	1,50	1,69	1,63		
30%	2,05	1,97	2,11	1,67	2,12	1,86		
40%	2,18	2,01	2,08	1,88	2,11	1,91		
50%	1,82	2,03	2,10	2,02	2,09	1,94		
60%	2,13	2,06	2,20	2,15	2,06	1,98		
70%	2,17	2,09	2,11	2,19	2,02	2,04		
80%	2,23	2,13	2,29	2,20	2,01	2,10		
90%	2,33	2,22	2,42	2,22	2,04	2,22		
100%	2,46	2,38	2,50	2,28	2,19	2,39		

Es zeigt sich sehr deutlich, dass die mittragende Breite relativ konstant ist und sich unabhängig von den variierten Parametern bei allen Versuchsträgern gleich verhält. Mit zunehmender Belastung steigt die rechnerische mittragende Breite an. Dies hängt jedoch mit der nichtlinearen Berechnung der Betonspannungen (siehe Abschnitt 5.2.2.9) zusammen, da die maximalen Betonspannungen begrenzt sind und sich nicht linear bis zum Bruch verhalten. Anhand der Grafik fallen die niedrigen Werte bei Belastungsbeginn auf. Dies hängt damit zusammen, dass bei niedrigen Lasten noch keine ausgeprägte Verbundwirkung vorliegt, da die Aktivierung der Verbunddübel erst

mit einem notwendigen minimalen Schlupf in der Fuge einhergehen muss. Kommt die Verbundwirkung voll zum Tragen (zwischen 10 und 20 % der Traglast), steigt die mittragende Breite stark an, wie in Abbildung 5.32 ersichtlich ist.

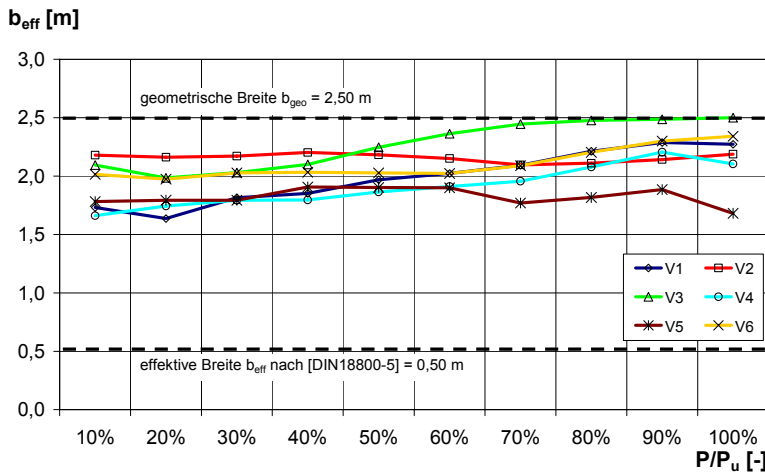


Abbildung 5.33: Rechnerische mittragende Breite am Mittelaufleger (Druckbereich)

Die Tabelle 5.16 zeigt für die einzelnen Laststufen die anhand der Versuchsergebnisse berechnete mittragende Breite am Mittelaufleger. Im Vergleich zur normativen Regelung, z.B. nach [DIN 18800-5] weist die experimentelle mittragende Breite Werte auf, die ca. doppelt so hoch sind. Für den Feldbereich berechnet sich die mittragende Breite nach [DIN 18800-5] zu ca. 1,0 m.

Die Messungen am Mittelaufleger im Druckbereich des Querschnitts zeigen ähnlich hohe Werte wie für den Feldbereich. Im Vergleich der Versuchsträger untereinander sind kleinere Unterschiede zu erkennen. Im Gegensatz zum Feldbereich sieht man mit zunehmender Belastung einen kleinen Abfall der Werte für die mittragende Breite. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.16: Bestimmung der mittragenden Breite am Mittelaufleger (Betondruckkräfte)

$P / P_u$ [-]	V1 [m]	V2 [m]	V3 [m]	V4 [m]	V5 [m]	V6 [m]	geometrische Breite [m]	$b_{eff}$ nach [DIN 18800-5]
10%	1,73	2,18	2,09	1,66	1,78	2,02	2,50	0,50
20%	1,64	2,16	1,99	1,74	1,79	1,97		
30%	1,81	2,17	2,03	1,79	1,79	2,03		
40%	1,85	2,20	2,10	1,80	1,91	2,03		
50%	1,97	2,18	2,25	1,86	1,90	2,03		
60%	2,02	2,15	2,36	1,91	1,90	2,02		
70%	2,09	2,10	2,44	1,96	1,77	2,09		
80%	2,21	2,11	2,48	2,08	1,82	2,20		
90%	2,29	2,14	2,49	2,21	1,88	2,30		
100%	2,27	2,19	2,50	2,11	1,68	2,34		

### 5.3.2.10 Experimentelle Dehnungsverteilung der Bewehrung im Stützbereich

In Abbildung 5.34 ist der Dehnungsverlauf der Zugbewehrung über der Mittelstütze für eine Last von 50 und 100% der Traglast dargestellt. Hierzu wurden an acht Trägern Bewehrungsstäbe DMS aufgeklebt. In der Abbildung sind die Versuchsträger V2, V5 und V6 zu sehen, die alle den gleichen Baustahlquerschnitt besaßen, sich jedoch im Bewehrungsgehalt differenzierten. Bei einer Belastung von 50% der Traglast kann ein sehr schwach ausgebildeter glockenförmiger Verlauf über die Trägerbreite ausgemacht werden, der bei Traglast etwas stärker ausgeprägt ist. Der stark bewehrte Versuchsträger V5 zeigt absolut gesehen die geringsten Dehnungen auf, während natürlich der schwach bewehrte Versuchskörper insgesamt die größten Dehnungen aufweist. Die Versuchsträger mit dem Hutprofil-Querschnitt besitzen ähnliche Ergebnisse.

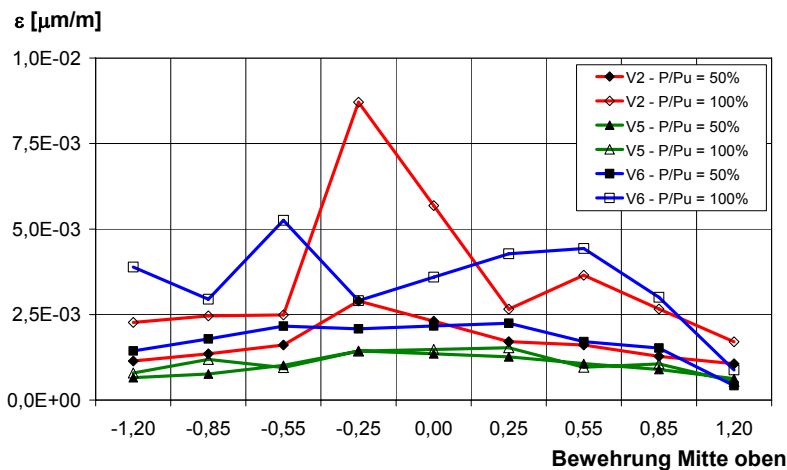


Abbildung 5.34: Dehnungsverteilung bei 50 und 100% der Traglast – Stützbewehrung Versuchsträger V1, V3, V4

Wird nun die Dehnungsverteilung als Grundlage für die Ermittlung einer mittragenden Breite des Zugbereiches herangezogen, kann bei einzelnen Trägern (V2, V3 und V6) mit zunehmender Belastung eine leichte Abnahme der mittragenden Breite festgestellt werden, siehe Abbildung 5.35. Für die übrigen Träger verläuft die ermittelte mittragende Breite in Abhängigkeit der Belastung sehr konstant. Die berechneten mittragenden Breiten auf Grundlage der Dehnungsverteilung in der Zugbewehrung sind in der nachfolgenden Abbildung 5.35 zusammengefasst.

Im Vergleich zu den rechnerischen Ergebnissen von [Elz 1998], siehe hierzu Abschnitt 3.3.4.3, kann eine Konzentration der Dehnungen zur Trägermittemitte hin bei höher bewehrten Querschnitten nicht bestätigt werden.

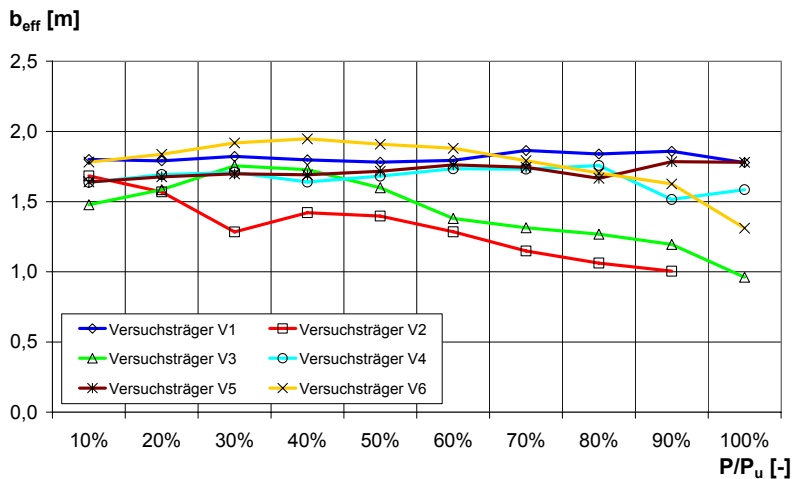


Abbildung 5.35: Rückrechnung einer mittragenden Breite der Zugbewehrung auf Basis der Dehnungsverteilung

### 5.3.2.11 Rückrechnung auf die Momententragfähigkeit anhand der Dehnungsmessungen

Wie bereits für die Einfeldträgerversuche (siehe Kapitel 5.2.2.11) durchgeführt, werden nachfolgend exemplarisch auch die Ergebnisse aus den Dehnungsmessungen der Zweifeldträgerversuche in eine Momententragfähigkeit rückgerechnet und mit dem äußeren einwirkenden Moment verglichen, um damit die durchgeführten Messungen zu verifizieren.

Der untersuchte Bereich beschränkt sich hierbei stichprobenartig auf drei Versuchsträger im Bereich der Gebrauchslasten, d.h. es lag kein Fließen des Baustahlprofils bzw. der Bewehrung vor.

In der Abbildung 5.36 sind die gemessenen Dehnungen des Baustahlprofils an der Ober- und Unterkante sowie die Betondehnung an der Oberseite dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass für den Bereich der Gebrauchstauglichkeit ein linearer Dehnungsverlauf für die Rückrechnung der Momententragfähigkeit angenommen werden kann. Der Verlauf zeigt die Dehnungsverteilung über den Querschnitt des Versuchsträgers V2. Das gleiche Ergebnis weisen die Verläufe der Dehnungen über die Höhe des Versuchsquerschnitts für den Träger V4 und V5 (hier nicht abgebildet) auf.

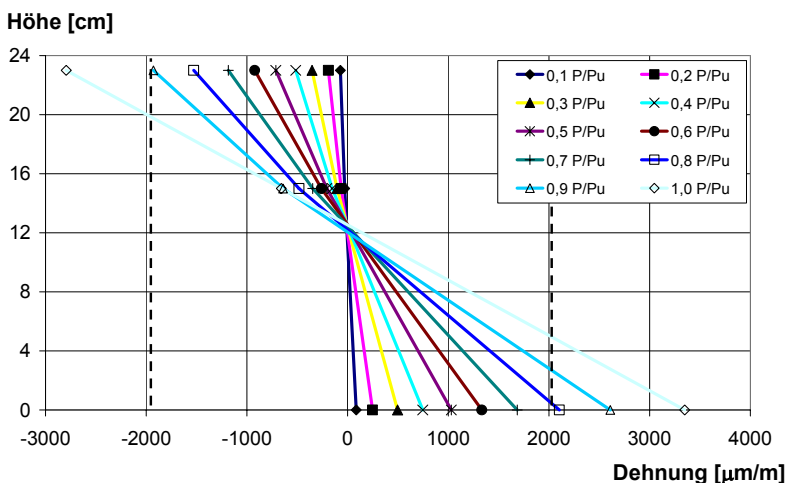


Abbildung 5.36: Dehnungsverteilung über die Höhe des Querschnitts (Versuchsträger V2)

Die Rückrechnung des inneren Momentes infolge der gemessenen Dehnungen ist für die drei Beispiele in Tabelle 5.17 zusammengefasst dargestellt. Dem gegenüber wird das äußere Moment aus der Rückrechnung über die Pressen- und Auflagerkraft berechnet und verglichen.

Tabelle 5.17: Experimentell gemessene Dehnungswerte am Zweifeldträger – Rückrechnung des Biegemoments

	Träger V2	Träger V4	Träger V5
Gewählte Belastung: % der Traglast	40 %	30 %	40 %
Mittragende Breite des Betongurtes:	1,96 m	1,65 m	2,07 m
Dehnung des Baustahlprofils (Unterkante Untergurt):	$7,47 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-4}$
Dehnung des Baustahlprofils (Oberkante Obergurt):	$-1,53 \cdot 10^{-4}$	$-8,43 \cdot 10^{-6}$	$-1,71 \cdot 10^{-4}$
Dehnung des Betons (Oberkante Betongurt):	$-5,98 \cdot 10^{-4}$	$-3,17 \cdot 10^{-4}$	$-5,02 \cdot 10^{-4}$
Ermittelte Krümmung:	$6,29 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
Momententragfähigkeit des Querschnitts:	246,9 kNm	90,4 kNm	193,4 kNm
Momenteneinwirkung:	232,8 kNm	86,7 kNm	181,1 kNm
Abweichung:	6,1%	4,2%	6,7%

Die drei aufgeführten Beispiele zeigen, dass die Messergebnisse für die Rückrechnung der Momententragfähigkeit herangezogen und mit dem äußeren Moment verglichen werden können. Die Abweichungen liegen zwischen 4 und 7 % und können daher als ausreichend genau angesehen werden. Dieser Vergleich kann auf die übrigen Versuchsträger ebenfalls erweitert und durchgeführt werden.

## 5.4 Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen

Die wichtigsten Versuchsergebnisse lassen sich für die Einfeldträgerversuche wie folgt zusammenfassen:

- Die Versuchsträger wiesen bereits unter geringen Lasten Risse auf der Betonunterseite auf.
- Ein mess- und erkennbarer Schlupf trat erst oberhalb des Gebrauchslastniveaus auf, dies galt ebenso für den teilverdübelteten Träger (VT5).
- Durch die Lastexzentrizität (Querbiegung des Trägers) entstanden auf der Betonoberseite oberhalb des Baustahls Längsrisse.
- Der Einfluss der Querbiegung war nur von untergeordneter Rolle.
- Mittels der Dehnungsverteilung konnte das einwirkende äußere Moment rückgerechnet werden und damit die Dehnmessungen verifiziert werden.
- Die Querverteilung der Betonstauchung an der Betonoberseite war über die Trägerbreite erkennbar ausgeprägt (und fällt nach außen hin ab).
- Anhand der Setzdehnungsmessungen auf dem Betongurt konnte eine mittragende Breite ermittelt werden, die größer ist als die berechneten Werte nach Norm.
- Im Bereich der Gebrauchslasten kam es nicht zum Fließen des Baustahlprofils, der Stahl erreichte die Fließgrenze im Mittel bei einer Belastung von > 60 % der maximalen Traglast.

Die Versuche zu den Zweifeldträgern zeigten im Vergleich zu den Einfeldträgerversuchen niedrigere Verformungen, insbesondere im Gebrauchslastniveau. Weitere wichtige Ergebnisse waren:

- Die Versuchsträger rissen unter sehr geringen Lasten zuerst über der Mittelstütze auf dem Betonobergurt auf, Risse auf der Betonunterseite traten erst später in Erscheinung.
- Ein Fließen des Baustahlprofils trat erst ab einer Last von  $> 80\%$  der Traglast ein, die eingelegte Stützbewehrung erreichte die Fließgrenze bei einzelnen Trägern bei  $50\%$  der Traglast.
- Ein mess- und erkennbarer Schlupf trat erst oberhalb des Gebrauchslastniveaus auf.
- Die aus der Setzdehnungsmessung rückgerechnete mittragende Breite lag weitaus höher als nach Norm berechnet, jedoch ist sie im Vergleich zu den Einfeldträgern im Feldbereich etwas geringer.
- Die berechnete mittragende Breite über der Mittelstütze lag unterhalb der Werte im Feldbereich, jedoch im Verhältnis zur Norm weitaus höher.
- Die Versuchsträger versagten infolge Durchstanzen/Querkraftversagen im Bereich der Mittelstütze. In diesem Zusammenhang wird auch auf den Abschnitt 9.3 und das Forschungsvorhaben [Kuhlmann, Hauf 2010b] verwiesen.

Die nachfolgende Abbildung 5.37 zeigt den experimentellen Vergleich zwischen einem Zweifeldträger mit durchgehendem Profil (V3), einem Zweifeldträger mit Mittelstützenprofil und gelöster Schraubung (V1) und einem Einfeldträger, jeweils mit einer Stützweite von 4,0 m. Die hier miteinander verglichenen Querschnitte (Baustahlprofil, Bewehrungsgehalt) waren identisch.

Gerade im Bereich der Gebrauchslasten (hier durch die Durchbiegungsbegrenzungen  $L/200$  und  $L/300$  dargestellt) kann man die Verformungsunterschiede und die Vorteile bei der Ausbildung von Slim-Floor Trägern als Zweifeld- bzw. Durchlaufträger erkennen.

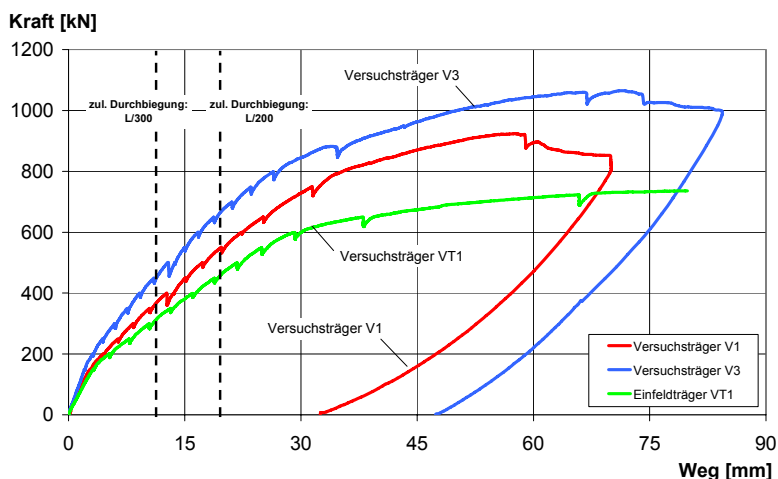


Abbildung 5.37: Trägerdurchbiegung Ein- und Zweifeldträgerversuche im Vergleich

Anhand der Ergebnisse der Einfeldträgerversuche und im Hinblick, dass die normative Regelung für die mittragende Breite zu konservative Werte zulässt, kann durch die gezielte Ausbildung einer Durchlaufträgerwirkung das Verformungsverhalten noch weiter verbessert werden. Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, einen Ansatz für die mittragende Breite zu entwickeln, der das nichtlineare Tragverhalten unter Berücksichtigung des Biegetraganteils des Betongurtes einschließt.



## **6 Analytisches Berechnungsmodell zur Berechnung der Trägerverformung**

### **6.1 Grundsätzliches**

Für Verbundquerschnitte, die unter Belastung im Beton noch keine Risse aufweisen, kann mit elastischen Berechnungsansätzen bei vorgegebener Belastung die Durchbiegung sehr einfach bestimmt werden. Dies gilt im Allgemeinen für normal hohe Verbundträger, deren Betongurt unter Gebrauchslasten ungerissen bleibt.

Der Betongurt von Slim-Floor Trägern reißt aber bereits bei sehr geringen Belastungen, so dass ein linearer Berechnungsansatz für die Verformung nicht mehr gilt, da er rechnerisch zu niedrige Durchbiegungen liefert. Für die Bestimmung wird deshalb nachfolgend ein analytisches Berechnungsmodell vorgestellt, das das materiell nichtlineare Tragverhalten berücksichtigt. Da die Biegetragwirkung des Betongurtes bei Slim-Floor Trägern nicht vernachlässigt werden kann, werden die Traganteile nicht nur aus der Scheiben- sondern auch aus der Plattenwirkung (siehe Abschnitt 4.5) mit in das analytische Modell integriert.

### **6.2 Beschreibung des analytischen Berechnungsmodells**

#### **6.2.1 Allgemeines**

Das analytische Berechnungsmodell wurde mit Hilfe von Microsoft Excel und VBA (Visual Basic for Applications) erstellt und ermöglicht die Berechnung der Verformung von Slim-Floor Trägern auf Grundlage einer nichtlinearen Berechnung.

Durch das nichtlineare Tragverhalten des Betonquerschnitts (Rissbildung im Feldbereich und Stützbereich) vergrößert sich der Berechnungsaufwand entsprechend, da je nach Belastung der Betonquerschnitt unterschiedlich stark aufreißt und damit jeweils im Stütz- und Feldbereich eine veränderte Steifigkeit besitzt.

#### **6.2.2 Voraussetzungen und Vereinfachungen**

Im Folgenden sollen die dem entwickelten Berechnungsmodell zugrunde liegenden Annahmen, die die Voraussetzungen und getroffenen Vereinfachungen erklären, kurz beschrieben werden:

- Der Betongurt weist über die Trägerbreite eine konstante Dicke auf.
- Der Verbundträger wird als Einfeldträger oder Zweifeldträger ausgeführt.
- Die Träger sind mit starrem Verbund ausgeführt (siehe Abschnitt 5.3.2.7)
- Zwischen Beton und Stahlträger entsteht kein nennenswerter Schlupf. Für Verbundträger mit voller Verdübelung stellt dies im Gebrauchszustand im Allgemeinen eine ausreichend genaue Vereinfachung dar. Ein Versagen der Verbundfuge wird ausgeschlossen. Die Bernoulli-Hypothese ist gültig. Für Verbundträger mit starrem Verbund ist diese Annahme ausreichend genau.
- Die in Abschnitt 6.2.4 dargestellten 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- $\kappa$ -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 6.2.5.
- Die Betondruckkraft wird in zwei Teile unterteilt: den Druckkraftanteil  $N_{c1}$ , der im Gleichgewicht mit der Zugkraft im Stahlträger steht, und den Druckkraftanteil  $N_{c2}$ , der im Gleichgewicht mit der Betonzugkraft  $N_{ct}$  und der Zugkraft in der Bewehrung  $N_s$  steht.
- Der Betondruckkraftanteil  $N_{c1}$  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.
- Der Betondruckkraftanteil  $N_{c2}$ , der im Gleichgewicht mit der Betonzugkraft  $N_{ct}$  und Zugkraft der Bewehrung  $N_s$  steht, wird unter der Annahme berechnet, dass die Breite des Betondruckbereichs gleich der spannungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,B}$  des reinen Biegezustands ist.
- 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.
- 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 Zunahme der mittragenden Breite bei großen Betondehnungen wird vernachlässigt.

Die beschriebenen Annahmen wurden so getroffen, dass hiermit eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung von Slim-Floor Trägern möglich ist. Insbesondere ist die Querverteilung der Betonspannungen nicht bekannt. Verbundträger mit ausgeprägtem Schlupf zwischen Beton und Stahlträger, zum Beispiel infolge einer deutlichen Unterverdübelung, sind bei diesem Modell nicht berücksichtigt.

### 6.2.3 Berechnungsablauf des analytischen Modells

#### 6.2.3.1 Grundsätzliches

Da es sich bei Slim-Floor Träger um ein Trägersystem handelt, dass bereits unter geringen Gebrauchslasten zu reißen beginnt, verliert der Träger mit zunehmender Belastung an Steifigkeit der Betonplatte. Beim Einfeldträger treten die Risse im Feldbereich auf der Betonunterseite auf, bei den Zweifeldträgern im Stützbereich auf der Betonoberseite und im Feldbereich auf der Betonunterseite. Um dies bei der Berechnung der Durchbiegung zu berücksichtigen, muss das Momenten-Krümmungs-Verhalten berücksichtigt werden, bei dem zu jeder äußeren Belastung ein innerer Spannungs-Dehnungszustand gefunden werden kann. Hierbei wird der Träger in einzelne Elemente unterteilt. Im Rahmen des eigens entwickelten analytischen Modells wird der Einfeldträger in 40 Elemente unterteilt, für das Zweifeldträgersystem entsprechend in 80 Elemente. Jedes Element

erhält hierbei eine vom Nachelement verschiedene mittragende Breite, so dass sich jedes Element unterscheidet und es somit notwendig wird, für jedes Einzelement eine  $M$ - $\kappa$ -Berechnung durchzuführen. Hierbei wird jeweils eine mittragende Breite für den Scheiben- und eine für den Biegezustand definiert. Die Werte hierfür werden entsprechend der in Abschnitt 4.5 hergeleiteten Differentialgleichungen verwendet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Elementierung des Trägers, sowohl für den Einfeld- wie auch Zweifeldträger.

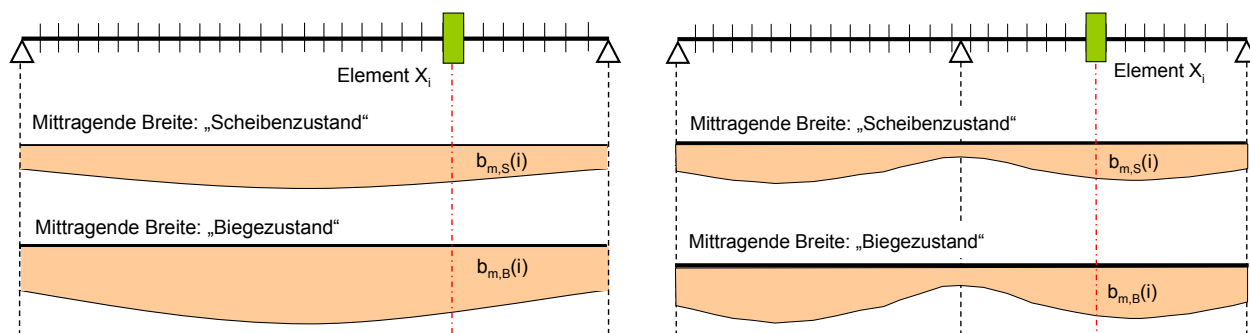


Abbildung 6.1: Elementierung Ein- und Zweifeldträger

Vereinfacht wird die Momenten-Krümmungsbeziehung für Slim-Floor Träger an vier diskreten Punkten bestimmt. Während für den Einfeldträger nur der positive Momentenbereich berücksichtigt werden muss, wird dieser beim Zweifeldträger um den negativen Bereich erweitert, siehe Abbildung 6.2. Die Werte zwischen diesen Punkten werden linear berechnet. Die diskreten Punkte und deren Berechnung werden im nachfolgenden Abschnitt näher erklärt.

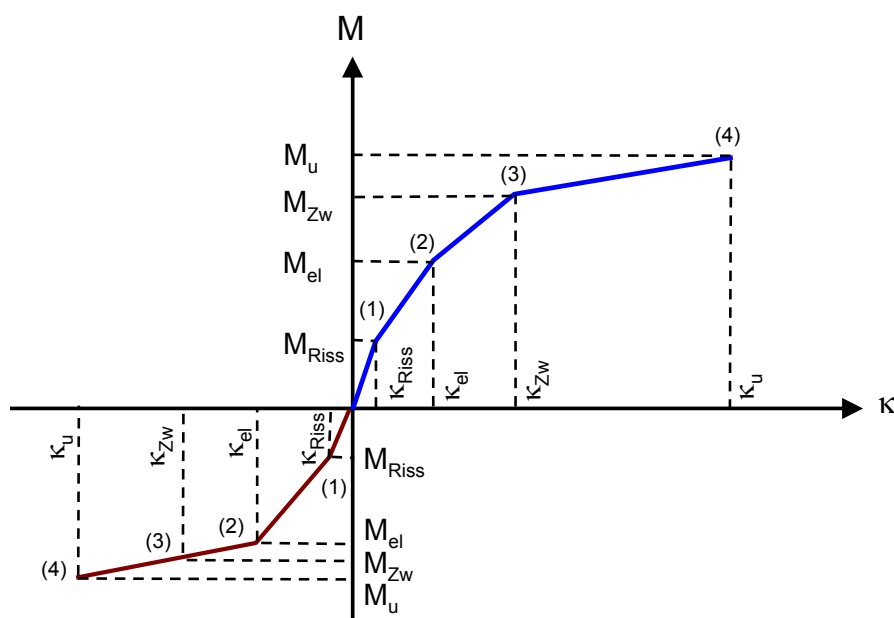
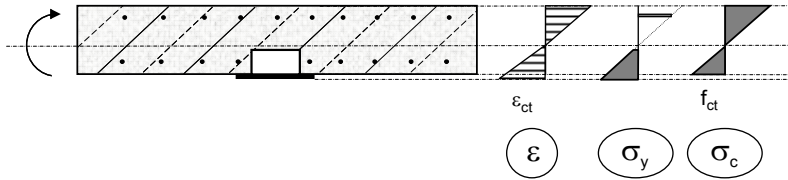


Abbildung 6.2:  $M$ - $\kappa$ -Linie für positive und negative Momentenbelastung

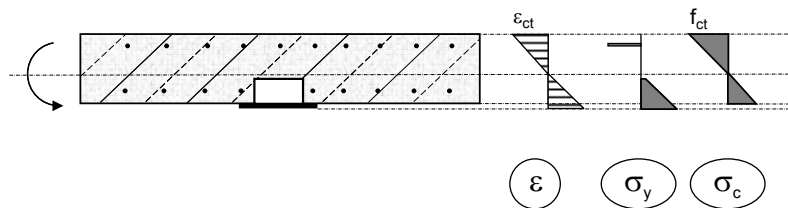
### 6.2.3.2 Rissmoment $M_{\text{Riss}}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{\text{Riss}}$ (1)

Bis kurz vor Erreichen der Betonzugspannung bleibt der Beton auf der Spannungszugseite ungerissen, d.h. eine linear-elastische Berechnung ist bis zu diesem Belastungspunkt möglich. Die

zugehörige Krümmung  $\kappa_{\text{Riss}}$  kann aus dem elastischen Ansatz über das Moment und das Widerstandsmoment des Trägers bestimmt werden. Geht die Belastung über diesen Punkt hinaus, verhält sich der Träger fortan nicht mehr linear, der Beton reißt.



a) positives Moment



a) negatives Moment

Abbildung 6.3: Spannungs-Dehnungsbeziehung - Rissmoment

Unter positivem Moment wird der Stahluntergurt, die unteren Bereiche des Stahlsteges, die untere Bewehrungslage und der Betonuntergurt gezogen, während der Betonobergurt und die obere Bewehrungslage gedrückt wird.

Bei negativem Moment liegt auf der Zugseite der Betonobergurt und die eingelegte Bewehrung in der oberen Lage, während der Beton auf der Trägerunterseite, sowie das Stahlprofil unter Druck stehen. Die Spannungsnull-Linie liegt jeweils ca. in Trägermitte.

Bis zum Erreichen der Risskrümmung  $\kappa_{\text{Riss}}$  verhält sich der Querschnitt elastisch. Der Risszustand kann somit nach den Regeln der Elastizitätstheorie berechnet werden. Die Bedingung für den Grenzzustand der Rissbildung ist, dass an der Stelle im Beton mit der größten Zugdehnung die Rissdehnung  $\epsilon_{\text{ct}}$  erreicht wird. Das effektive Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts bis zum Erreichen des Rissmoments wird nach 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.

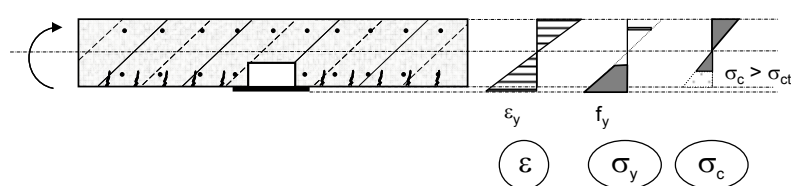
$$\begin{aligned}
 I_{i,0} &= I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{\text{St}} \\
 &= I_a + \frac{b_{m,B} \cdot h_c^3}{12 \cdot n_0} + \frac{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} \cdot A_a}{\frac{b_{m,S} \cdot h_c}{n_0} + A_a} \cdot a_{\text{St}}^2
 \end{aligned}
 \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

mit	$I_{i,0}$	elastisches Trägheitsmoment des Gesamtverbundquerschnitts
	$I_a$	Trägheitsmoment des Stahlquerschnitts
	$A_a$	Querschnittsfläche des Stahlquerschnitts
	$n_0 = E_a/E_{cm}$	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
	$a_{St}$	Schwerpunktabstand zwischen Beton- und Stahlquerschnitt

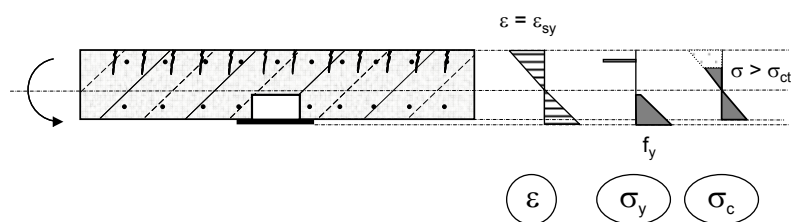
### 6.2.3.3 Fließmoment $M_{el}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{el}$ (2)

Nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit reißt der Querschnitt immer mehr auf, die Nulllinie wandert entsprechend mehr in den Druckzonenbereich. Die Zugkraft wird bei positivem Moment durch das Baustahlprofil, sowie der im Zugbereich liegenden Bewehrung übernommen. Der gerissene Beton wird nur zu einem reduzierten Anteil berücksichtigt (vereinfachtes Modell zur Berücksichtigung der Betonzugkraft im gerissenen Bereich, siehe Abschnitt 6.2.4). Unter negativem Moment muss die Zugkraft allein von der Bewehrung bzw. sofern die Spannungs-Nulllinie in das Baustahlprofil hinein wandert, vom Baustahlprofil aufgenommen werden.

Der diskrete Berechnungspunkt (2) für die Momenten-Krümmungs-Beziehung unter positiver Momenteneinwirkung wird für das Erreichen der Fließgrenze des Baustahlprofils am Untergurt angenommen. Unter negativem Moment wird das Erreichen der Fließgrenze der in der Zugzone liegenden Bewehrung gewählt. Durch Variation der Krümmung kann über die Dehnungsverteilung der einzelnen Komponenten im Druck- und Zugbereich ein Gleichgewicht bestimmt werden, siehe nachfolgende Abbildung.



a) positives Moment

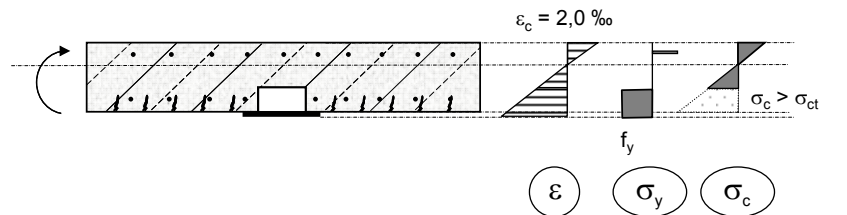


b) negatives Moment

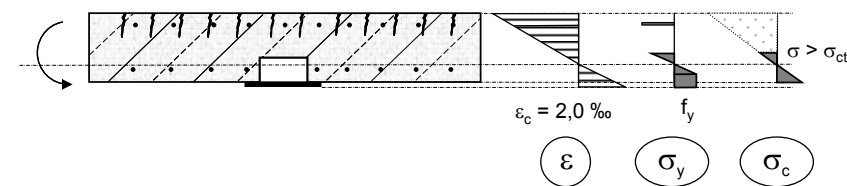
Abbildung 6.4: Spannungs-Dehnungsbeziehung - Fließmoment

#### 6.2.3.4 Zwischenpunkt – Moment $M_{Zw}$ und zugehörige Krümmung $\kappa_{Zw}$ (3)

Mit zunehmender Belastung wird der Druckbereich weiter eingeschnürt und der Beton erreicht seine maximale Druckspannung  $f_c$  bei einer Dehnung von 2 ‰. Dieser Beanspruchungspunkt ist der dritte diskrete Berechnungspunkt (3) für die Momenten-Krümmungs-Beziehung. Die Grenzdehnung für den Beton wird für den positiven wie auch negativen Bereich angesetzt, wie in der nachfolgenden Abbildung 6.5 dargestellt. Durch Variation der Krümmung wird das Kräftegleichgewicht des Druck- und Zugbereiches bestimmt. Der Bereich des Baustahls sowie der Bewehrung, die bereits fließen, nehmen nur noch in der Dehnung, nicht aber mit ihren Kraftanteilen zu. Die Spannungsnull-Linie wandert weiter in Richtung des Druckbereiches.



a) positives Moment



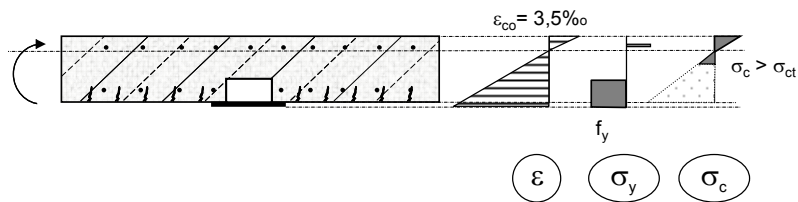
b) negatives Moment

Abbildung 6.5: Spannungs-Dehnungsbeziehung – Zwischenwert (plastisches Moment)

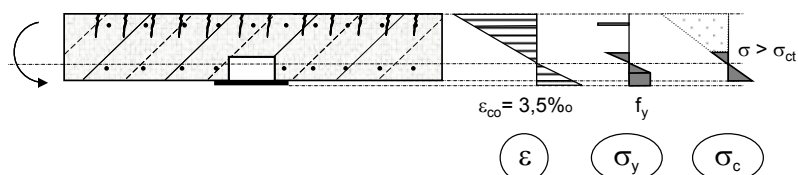
#### 6.2.3.5 Bruchmoment $M_u$ und zugehörige Krümmung $\kappa_u$ (4)

Der Querschnitt versagt, wenn die Bruchdehnung (auf Zug oder Druck) erreicht wird. Unter positiver Momentenbelastung geschieht dies auf der Bauteiloberseite auf Druck, entsprechend für den negativen Momentenbereich auf der Unterseite, wie in der Abbildung 6.6 zu sehen ist. Die Betondruckzone und damit die Spannungs-Nulllinie schnüren sich weiter ein. Die hier bestimmte Krümmung ist die maximale Krümmung, die der Querschnitt erreichen kann.

Ebenso kann das Querschnittsversagen im Stützbereich durch das Erreichen der Bruchdehnung der oberen Bewehrungslage eintreten. Ob der Baustahlquerschnitt sich bereits im Fließbereich befindet, hängt von der Geometrie des Verbundquerschnittes und des Bewehrungsgrades ab. Mittels der vier diskreten Berechnungspunkte kann für jeden Querschnitt unter positiver und negativer Momentenbeanspruchung eine Momenten-Krümmungs-Beziehung erstellt werden.



a) positives Moment



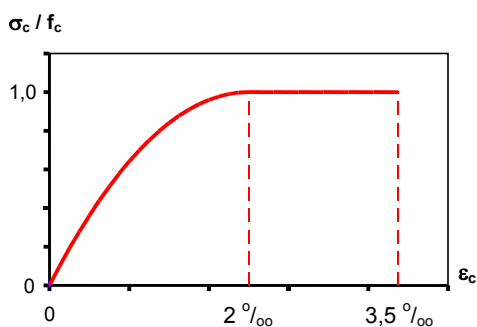
b) negatives Moment

Abbildung 6.6: Spannungs-Dehnungsbeziehung – Bruchmoment

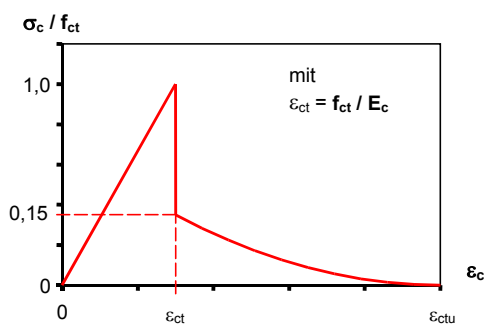
## 6.2.4 Implementierte Materialmodelle

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 [DIN 1045-1] verwendet. Das Betonverhalten auf Zug wurde entsprechend Abbildung 6.7 (b) angesetzt. Bis zur Betonzugfestigkeit wird ein lineares Verhalten angenommen. Mit Erreichen der Rissdehnung  $\epsilon_{ct}$  fällt die Betonspannung auf 15 % der Betonzugfestigkeit ab. Mit weiterer Steigerung der Dehnung nimmt die Spannung ab, bis mit Erreichen der Dehnung  $\epsilon_{ctu}$  die Spannung null wird. Dieser Verlauf ist an die von [Hilsdorf, Reinhardt 1998] beschriebene Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung angelehnt.



a) Beton auf Druck

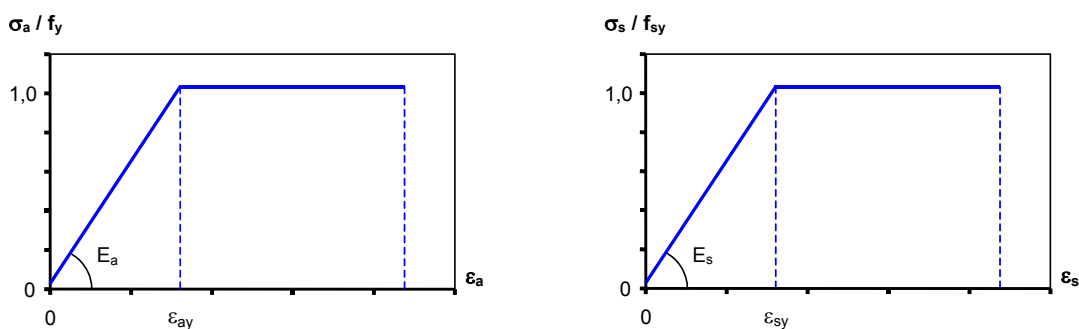


b) Beton auf Zug

Abbildung 6.7: Materialmodelle für den Beton nach [Hilsdorf, Reinhardt 1998]

Nach [DIN 1045-1], Abschnitt 9.1.5 ist für die nichtlineare Schnittgrößenermittlung und für die Verformungsberechnung die Spannungs-Dehnungslinie nach [DIN 1045-1] Gleichung (62) zu verwenden. Hierbei wird das E-Modul also Tangentenmodul  $E_{c0} \sim E_{c0m}$  angesetzt, das in [DIN 1045-1], Tabelle 12 entsprechend der Betongüte angegeben ist. Für die nachfolgenden Verformungsberechnungen werden somit die Werte des Tangentenmoduls angewandt. Im Vergleich zum Sekantenmodul nimmt das Tangentenmodul geringfügig größere Werte an.

Für den Stahlträger als auch die Bewehrung wird ein linearelastisch-idealplastisches Materialmodell verwendet, siehe Abbildung 6.8. Für die Berechnung der Verformungen im Gebrauchszustand der Verbundträger ist eine genauere Definition der Materialgesetze für Baustahl und Bewehrung z.B. mit Berücksichtigung der Wiederverfestigung des Stahls nicht erforderlich, da bis zum Erreichen des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit sowohl Baustahl als auch Bewehrung elastisch bleiben.



a) Baustahl

b) Stahlbeton-Bewehrung

Abbildung 6.8: Materialmodelle für den Baustahl und Betonstahl

### 6.2.5 Kraftanteile – Ansätze der mittragenden Breite

Die (Momenten-)Tragfähigkeit eines Verbundträgers setzt sich im Allgemeinen aus drei Anteilen zusammen, dem Kräftepaar aus Zug und Druck, der Biegetragfähigkeit des Baustahlquerschnittes und der Biegetragfähigkeit des Betonquerschnittes. Für normal hohe Verbundträger kann der Biegeanteil des Betongurtes vernachlässigt werden (siehe Abschnitt 2.2.1.1), für Slim-Floor Träger jedoch ist der Betongurtbiegeanteil im Verhältnis zur Gesamtsteifigkeit weitaus größer, so dass dieser nicht vernachlässigt wird.

Unter Berücksichtigung des Scheiben- und Plattenzustands wird die mittragende Breite jeweils den einzelnen Kraftanteilen zugeordnet, Biegeanteile werden entsprechend mit der mittragenden Breite des Plattenzustands berechnet, analog die Normalkraftanteile mit den Werten für den Scheibenzustand.

Dies bedeutet, 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 (nachfolgend als Glgw. bezeichnet) 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 Breite nochmals zusammengefasst.



Tabelle 6.1: Einzelkraftkomponenten – Zuweisung des Scheiben- und Biegezustands

Traganteil	Bezeichnung	Mittragende Breite
$N_{ct}$	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
$N_S$	Druckkraft in Bewehrung	$b_{m,B}$ - Biegezustand
$M_a$	Biegetragfähigkeit des Baustahlquerschnittes	-

Für das Berechnungsmodell wird angenommen, dass sich die Baustahlzugkraft mit der Betondruckkraft im Gurt kurzschließt und daher der Scheibenzustand für die mittragende Breite anzusetzen ist. Die Berechnung der Betonzugkräfte erfolgt unter Verwendung der spannungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,B}$  des reinen Biegezustands.

Bei weiterer Laststeigerung ist der Beton im Zustand II und die Berechnung kann daher nicht mehr linear-elastisch erfolgen. Die weiteren Punkte der M- $\kappa$ -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- $\kappa$ -Linie folgendermaßen vorgenommen: Da für die charakteristischen Punkte der M- $\kappa$ -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  $\varepsilon_{cu}$ .

### 6.2.6 Einfluss der Bewehrung in der Druckzone

In der nachfolgenden Abbildung 6.9 ist anhand der Dehnungsverteilung zu erkennen, dass bei Slim-Floor Trägern die eingelegte Bewehrung im Zug- und Druckbereich eine größere Dehnung erfährt als bei einem niedrigen Verbundträger.

Während beim niedrigen Verbundträger die untere Bewehrungslage nahe dem Spannungsnullpunkt liegt und aufgrund der gesamten Dehnungsverteilung nur einen sehr geringen Kraftanteil beisteuert, besitzt die Bewehrung einen nicht allzu großen Einfluss auf die Momententragfähigkeit.

Für Slim-Floor Träger kann die Bewehrung nicht ohne Weiteres unberücksichtigt bleiben, da bei Slim-Floor Trägern die Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe stärker ausgeprägt ist und daher die Kraftanteile der Druckbewehrung stärker ins Gewicht fallen und damit einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil an der Momententragfähigkeit liefert. Für die nachfolgenden Berechnungen auf Grundlage des analytischen Berechnungsmodells wird die Druckbewehrung daher rechnerisch berücksichtigt.

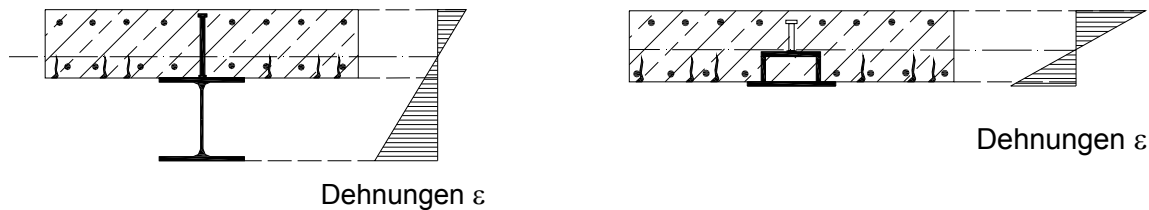


Abbildung 6.9: Abstand Bewehrungslage zur Spannungsnull-Linie

## 6.2.7 Berechnungsverfahren des analytischen Modells

### 6.2.7.1 Berechnungsverfahren für Einfeldträger

Im nachfolgenden Abschnitt wird das Berechnungsverfahren auf Grundlage des analytischen Modells zur Bestimmung der Durchbiegung bei Einfeldträgern erklärt.

Gegeben ist die Belastung  $q$ , die auf den Einfeldträger wirkt. Bei entsprechend großer Belastung reißt der Betonquerschnitt auf der Zugseite auf und der Träger verliert in den gerissenen Bereichen an Biegesteifigkeit.

Da es sich um ein statisch bestimmtes System handelt, können die Schnittgrößen (Moment) direkt bestimmt werden, siehe Abbildung 6.10. Für die Ermittlung der Durchbiegung wird der Träger in einem ersten Schritt in eine Vielzahl von Elementen unterteilt. Für jedes Element werden die in Abschnitt 6.2.3 erwähnten diskreten Berechnungspunkte ermittelt unter Berücksichtigung der Materialkennwerte. Die in Abschnitt 4.5 ermittelten Werte für die mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands werden entsprechend für jedes Element berücksichtigt.

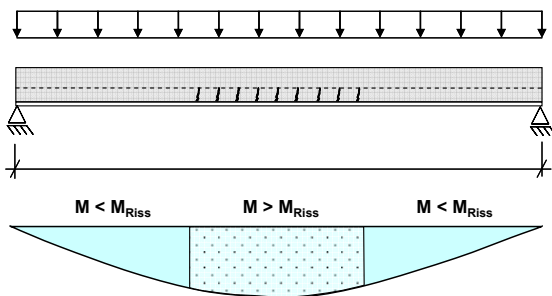


Abbildung 6.10: Ungerissener und gerissener Bereich des Einfeldträgers

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

Dieser Vorgang muss jeweils neu wiederholt werden, da sich für jede Belastung eine neue Krümmungsverteilung über den Träger hinweg einstellt und daher der Krümmungsverlauf neu bestimmt werden muss. Ein linearer Zusammenhang zwischen Belastung und Krümmung besteht aufgrund der Rissbildung und des damit verbundenen Steifigkeitsverlustes nicht. Der Berechnungsablauf ist schematisch in Abbildung 6.11 dargestellt.

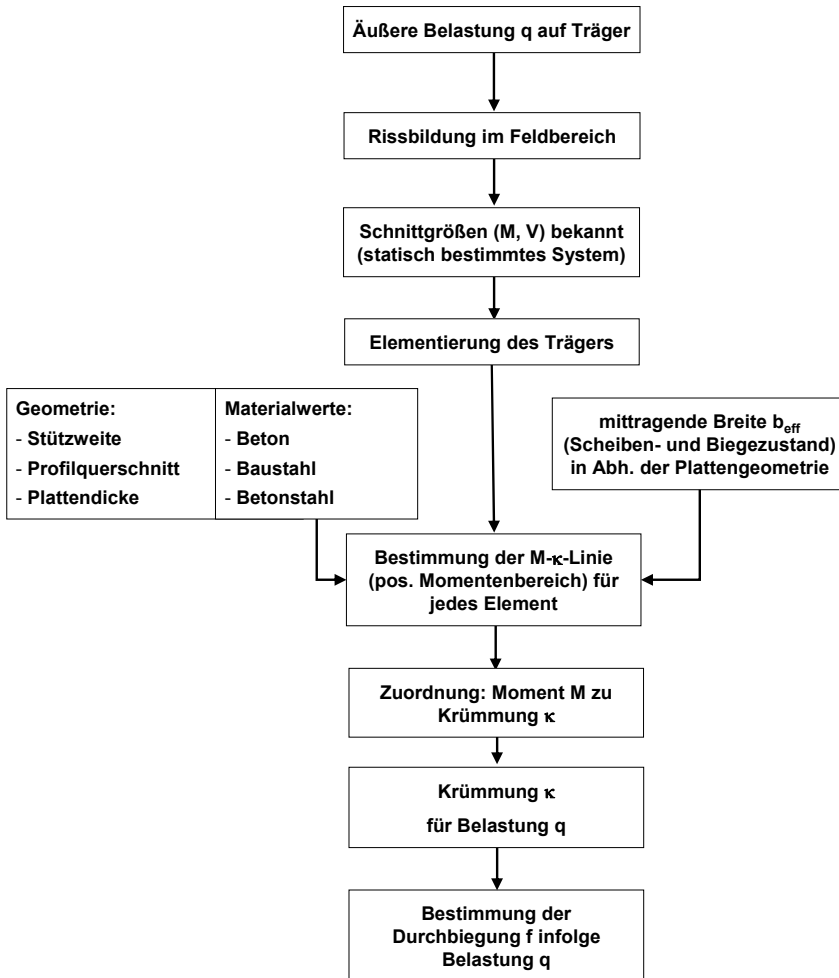


Abbildung 6.11: Schematische Darstellung – Durchbiegungsberechnung für Einfeldträger

### 6.2.7.2 Berechnungsverfahren für Zweifeldträger

Die Berechnung der Durchbiegung für den Zweifeldträger unterscheidet sich von der sehr systematischen Bestimmung beim Einfeldträger durch die statisch unbestimmte Berechnung. Im Gegensatz zum Einfeldträger, reißt der Querschnitt nicht nur in Feldmitte auf der Betonunterseite, sondern auch durch das Stützmoment über dem Mittelauger auf der Betonoberseite, siehe Abbildung 6.12.

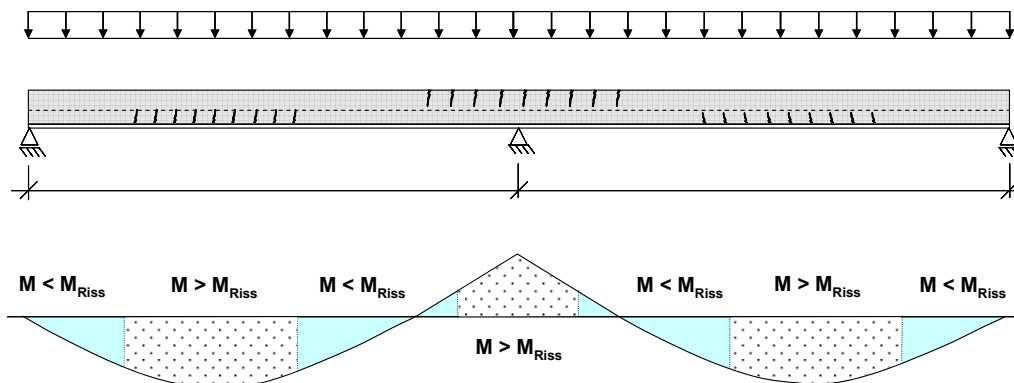


Abbildung 6.12: Ungerissene und gerissene Bereiche eines Zweifeldträgers

Durch den Steifigkeitsverlust über der Stütze und in beiden Feldbereichen kann die Schnittgrößen-ermittlung (Momentenverlauf) nicht mehr direkt bestimmt werden, da ein statisch unbestimmtes System vorliegt.

Im ersten Schritt wird der Träger ebenfalls in Elemente unterteilt und für jedes Element die Momenten-Krümmungs-Beziehung bestimmt. Hierbei werden die Materialkennwerte, ebenso wie die Geometriewerte und die Ansätze für die mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands eingesetzt. Für die Ermittlung der Werte der mittragenden Breite wird auf den Abschnitt 4.5 verwiesen.

Nun wird für die Bestimmung des Momentenverlaufs infolge einer diskret gegebenen Belastung die Solver-Funktion in Excel verwendet. Der Solver verwendet hierbei das Newton-Iterationsverfahren und beruht darauf, dass mittels der unten angegebenen Differentialgleichungen, siehe nachfolgende Gleichung 6.2, und vorgegebenen Randbedingungen Gleichgewichtsbedingungen aufgestellt werden. Sofern alle Gleichgewichtsbedingungen eingehalten sind, liegt eine Lösung vor.

$$q(x) = \text{konstant} = q$$

$$V(x) = - (q \cdot x + C_1)$$

$$M(x) = - (q \cdot x^2 / 2 + C_1 \cdot x + C_2) \quad \text{(Gleichung 6.2)}$$

$$\beta(x) = (q \cdot x^3 / 6 + C_1 \cdot x^2 / 2 + C_2 \cdot x + C_3) / EI$$

$$w(x) = (q \cdot x^4 / 24 + C_1 \cdot x^3 / 6 + C_2 \cdot x^2 / 2 + C_3 \cdot x + C_4) / EI$$

Die Differentialgleichungen beruhen auf den Gleichungen für den Biegebalken und stellen die Beziehung zwischen der einwirkenden Last  $q$ , der Querkraft  $V$ , dem Moment  $M$ , der Verdrehung  $\beta$  und der Durchbiegung  $w$  her [Gross et al 1998], [Schnell 1998]. Die geometrischen Randbedingungen sind wie folgt festgelegt, siehe hierzu auch Abbildung 6.13:

Die Durchbiegung an den Randauflagern und an der Mittelstütze ist gleich Null. Die Krümmung an den Endauflagern ist ebenfalls gleich Null. Durch das Mittelauger ist gegeben, dass die Verdrehwinkel links und rechts der Mittelstütze gleich groß sein müssen. Die Trägersteifigkeiten werden nun so lange durch das Newton-Verfahren variiert, bis alle Randbedingungen erfüllt werden. Hierbei zeigte sich, dass die Einstellung der Genauigkeit des Solvers einen großen Einfluss auf die berechneten Ergebnisse besitzt. Weitere Hinweise zu den Randbedingungen sowie dem Newton-Verfahren sind in der Diplomarbeit von [Bott 2007] zu finden.

Ausgehend von der gegebenen diskreten Belastung  $q$  kann durch die mehrfache „Auf“-Integration die Querkraft, das Moment, der Verdrehwinkel und die Durchbiegung bestimmt werden jeweils unter Berücksichtigung von Integrations-Konstanten  $C_i$ . Für die Laufvariable  $x = 0$  gilt, dass die Konstante  $C_1$  gleich der Auflagerkraft der Randstütze ist und die Konstante  $C_2$  gleich Null sein muss (Moment am Endauflager ist Null). Gleiches gilt für die Konstante  $C_4$  (Durchbiegung am Endauflager ist Null).

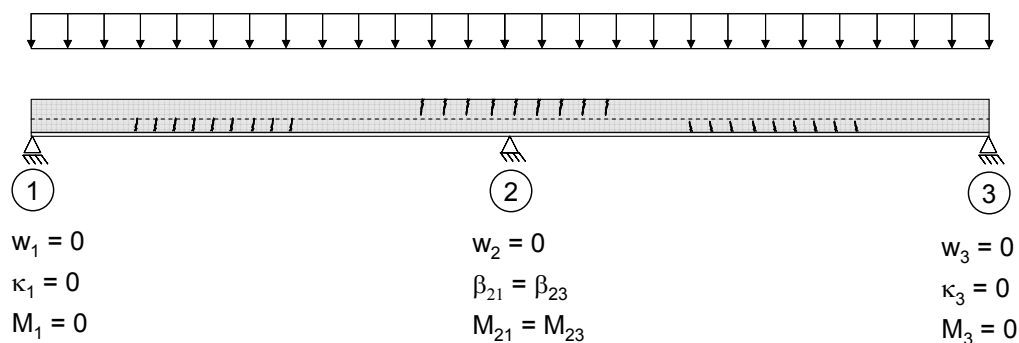


Abbildung 6.13: Randbedingungen für Solver-Anwendung

Der Berechnungsablauf ist in der nachfolgenden Abbildung 6.14 nochmals systematisch dargestellt und erklärt. Die Änderungen beim Berechnungsablauf im Vergleich zum Einfeldträger sind farblich gekennzeichnet.

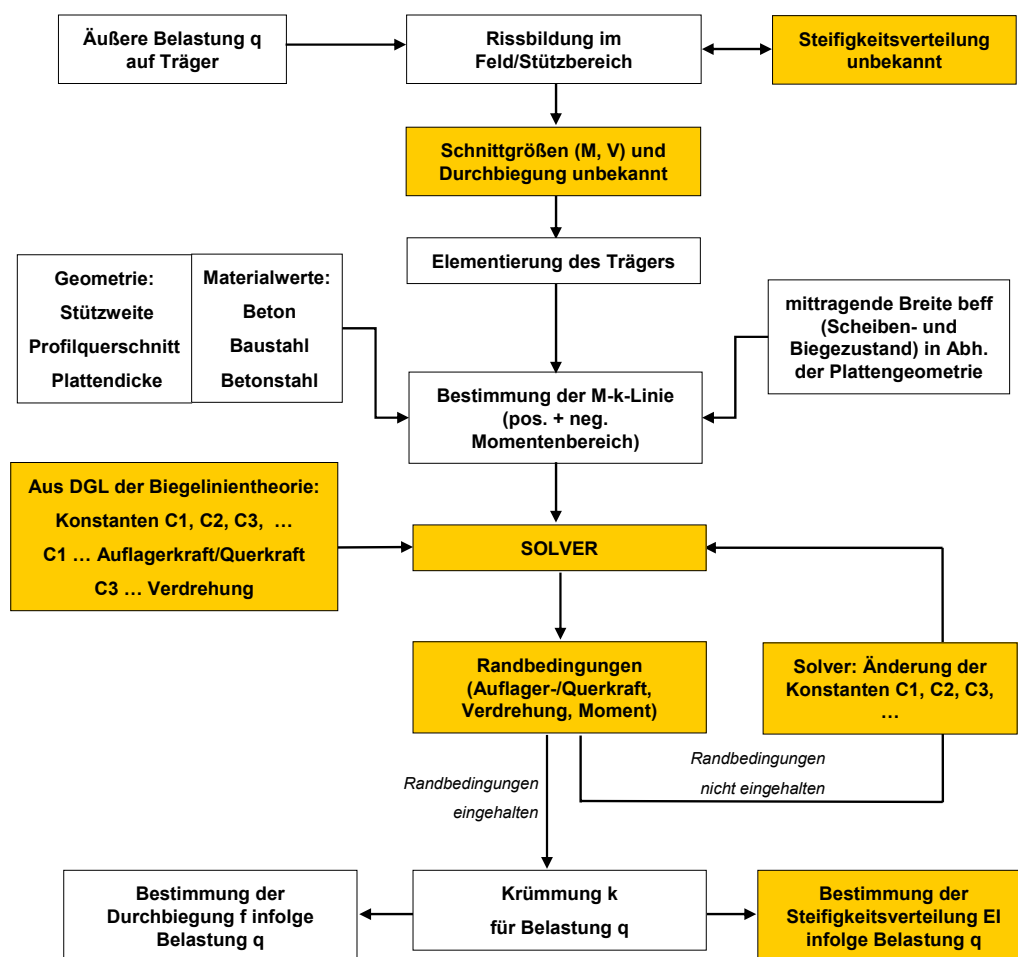
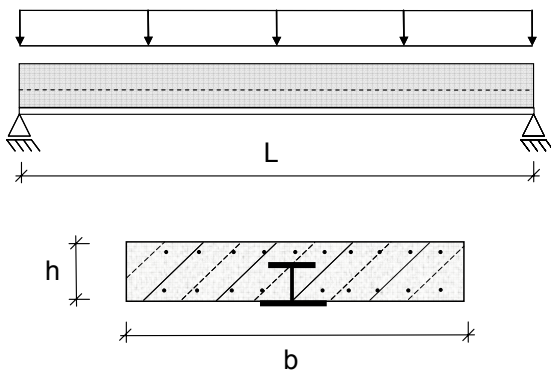


Abbildung 6.14: Schematische Darstellung – Durchbiegungsberechnung für Zweifeldträger

Zur Veranschaulichung wird das Trag- und Verformungsverhalten an einem durchgerechneten Beispielträger dargestellt.



Stützweite:	$L = 6,0 \text{ m}$
Plattendicke:	$h_c = 26 \text{ cm}$
Plattenbreite:	$b = 4,50 \text{ m}$
Stahlprofil:	HEB 140 / Fl. 340x15
Betondruckfestigkeit:	$f_c = 40 \text{ N/mm}^2$
Betonzugfestigkeit:	$f_{ct} = 2,5 \text{ N/mm}^2$
E-Modul Beton:	$E = 30.000 \text{ N/mm}^2$
Stahlzugfestigkeit:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
E-Modul Baustahl:	$E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
Bewehrung unten / oben:	$a_{s,o} = 10 \text{ cm}^2/\text{m}$

Abbildung 6.15: Beispielrechnung für Zweifeldträger - Eingabeparameter

Entsprechend der Steifigkeitsverteilung über den Träger zeigt sich, dass der Träger sehr schnell und bei sehr kleinen Lasten über der Stütze reißt, siehe hierzu Abbildung 6.16. Durch diesen Steifigkeitsverlust kommt es bei einer weiteren Laststeigerung im Feld zu ersten Rissen. Der nächste diskret berechnete Punkt zeigt sich durch den Fließbeginn der Bewehrung über der Stütze und anschließend des Baustahluntergurts im Feldbereich, der die Fließgrenze erreicht. Im nächsten Schritt erreicht der unter Druck stehende Betongurt im Stützbereich die 2 ‰ plastische Dehngrenze und der Bruch erfolgt nach kleiner weiterer Laststeigerung durch Versagen des Betonuntergurts über der Stütze infolge zu hoher Druckspannungen. Ob der Feldbereich noch die 2 ‰ Dehngrenze des Betons erreicht, hängt von den gewählten Querschnitten (Baustahlprofil, Bewehrungsgrad der Stütze) ab.

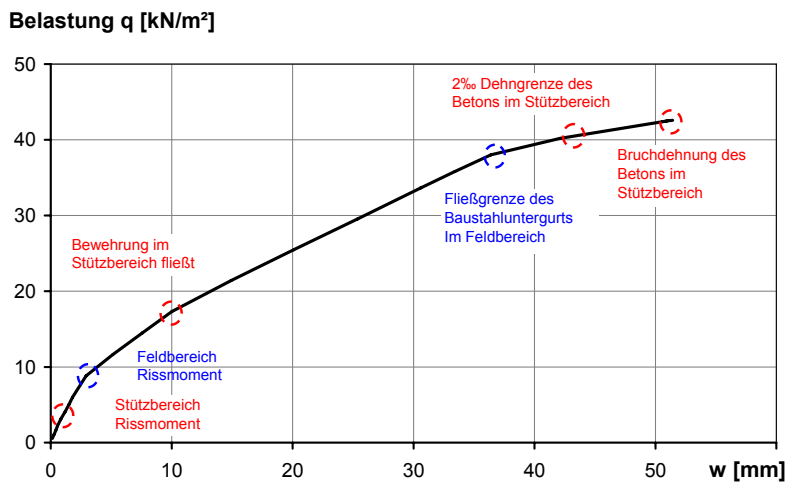


Abbildung 6.16: Last-Verformungskurve Beispielrechnung eines Zweifeldträgers

Auffallend an der Last-Verformungskurve ist, dass kein besonders ausgeprägtes plastisches Verformungsniveau (horizontaler Last-Verformungsverlauf) vorhanden ist. Dies hängt damit zusammen, dass die mitttragende Breite über der Stütze geringer ist als im Feld und daher die aufnehmbare Betondruckkraft im Vergleich zum Feld viel kleiner ist. Für das Kräftegleichgewicht des Verbundquerschnitts ist daher kein ausgeprägtes Fließen der Bewehrung im Zugbereich der Stütze notwendig. Ein mögliches Fließen im Feldbereich kann durch den vorzeitigen Bruch der Stütze nicht aktiviert werden.

## 6.2.8 Mittragende Breite für den Zweifeldträger – Momenten-Nulldurchgang

### 6.2.8.1 Allgemeines

In Abschnitt 4.5.6 wird dargelegt, dass die Ableitung einer mittragenden Breite für den Stützbereich von Zweifeldträgern auf Grundlage und durch Herleitung über die Differentialgleichungen nicht ohne Weiteres möglich ist [Grimm 2009]. Daher soll im nachfolgenden Abschnitt grundlegend der Einfluss der mittragenden Breite über der Stütze untersucht werden. Im Vorgriff auf die Verifikation des analytischen Modells werden bereits hier Ergebnisse aus der analytischen Untersuchung zum Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich verwendet.

### 6.2.8.2 Mittragende Breite im Stützbereich

Die mittragende Breite für den Feld- und Stützbereich für Zwei- und Mehrfeldträger ist in [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] geregelt und berechnet sich in Abhängigkeit der Stützweiten. Hierbei ergibt sich ein Verhältnis von 1:1,7 zwischen der mittragenden Breite im Stütz- zum Feldbereich, siehe nachfolgende Abbildung 6.17, unter der Annahme, dass die beiden angrenzenden Felder die gleichen Stützweiten besitzen.

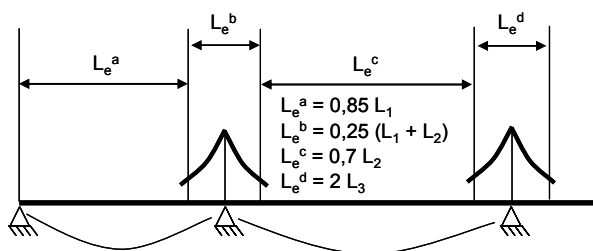


Abbildung 6.17: Berechnung der mittragenden Breite  $b_{\text{eff}}$  nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1]

Für die Ermittlung der Schnittgrößen und Berechnung der Durchbiegung ist in der Norm ein vereinfachtes Verfahren angegeben, bei dem auf einer Länge von  $0,85 \cdot L$  der ungerissene Verbundquerschnitt und für den Restbereich ein gerissener Zustand (Verbundquerschnittswert „Gesamtstahl“) angenommen werden kann, siehe Abbildung 6.18.

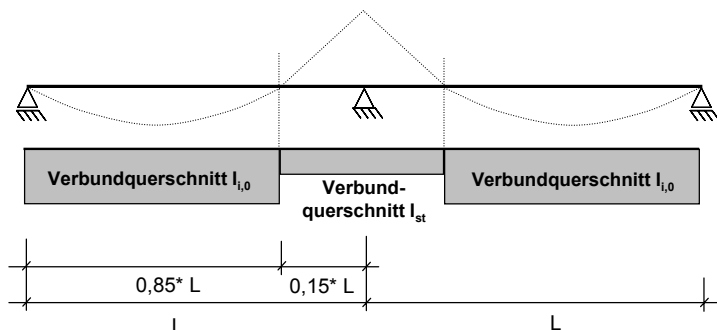


Abbildung 6.18: Vereinfachter Ansatz für Schnittgrößenermittlung im gerissenen Bereich

Der Momenten-Nulldurchgang bei  $0,85 \cdot L$  stellt hierbei eine Vereinfachung dar. Bei genauer Betrachtung und Untersuchung ist der Nulldurchgang abhängig von der Belastung und der Steifig-

keitsverteilung zwischen Feld- und Stützbereich. Bei Verbundträgern, die für den positiven und negativen Momentenbereich ein unterschiedliches (nichtlineares) Werkstoffverhalten aufweisen, ändert sich durch die Rissbildung und dem damit verbundenen Steifigkeitsverlust der Nulldurchgang stetig mit steigender Belastung.

#### 6.2.8.3 Analytische Untersuchung zum Nulldurchgang bei Zweifeldträgersystemen

Berechnungen mit dem oben beschriebenen analytischen Modell zeigen, dass mit zunehmender Belastung (und damit einhergehendem Aufreißen des Stützquerschnitts) die Momenten-Nulllinie von  $0,8 \cdot L$  bis  $0,95 \cdot L$  ansteigt.

Die Lage des Momenten-Nulldurchgangs hängt hierbei von der Belastung aber auch der Steifigkeitsverteilung zwischen dem Feld- und Stützbereich ab. Für das analytische Modell wird die Länge zwischen den Momenten-Nulldurchgängen als Bezugslänge für die Werte der mittragenden Breite des Schieben- und Biegezustands ermittelt. Da diese Länge aber nicht konstant ist, müsste ein iterativer Rechenprozess angewandt werden, um für diskrete Belastungen den exakten Punkt für den Momenten-Nulldurchgang zu bestimmen, was aber einen erheblichen Rechen- und Zeitaufwand bedeutet. Aus diesem Grund wurde vereinfacht in der [DIN 18800-5] der Nulldurchgang bei einer Länge von  $0,85 \cdot L$  festgelegt.

Im Folgenden wird überprüft, in wie fern dieser Ansatz für Slim-Floor Träger ebenfalls anwendbar und für die Verformungsberechnung genutzt werden kann. Um den Einfluss zu überprüfen, wurde eine Vielzahl von nichtlinearen Berechnungen auf Grundlage des nichtlinearen Modells durchgeführt. Die hierbei untersuchten Träger wurden (in Vorgriff auf die später durchgeführte Parameteruntersuchung) für den in Abschnitt 7.3.3, Abbildung 7.5 angegebenen Bereich durchgeführt. Der hierbei im Mittelpunkt der Untersuchung stehende Bereich beschränkt sich auf den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Die Abbildung 6.19 zeigt eine Auswahl von Rechenergebnissen, deren Nulldurchgang in Verhältnis zur einwirkenden Belastung dargestellt wird.

Nulldurchgang bei  $x \cdot L$

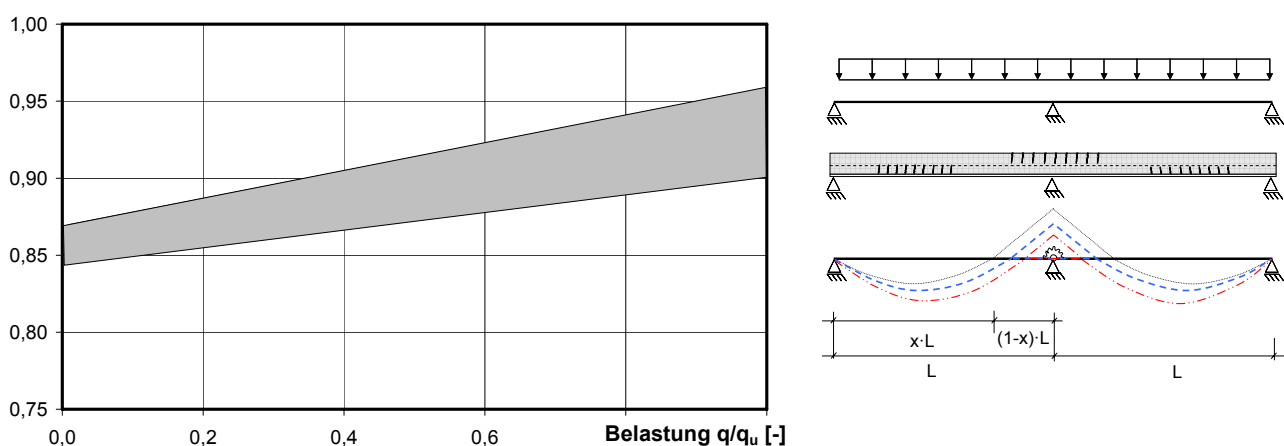


Abbildung 6.19: Veränderung des Momenten-Nulldurchgangs bei veränderlicher Last

Für den Bereich  $q/q_u$  bis zu einem Verhältnis von 0,6 liegt der Nulldurchgang zwischen  $0,85 \cdot L$  bis  $0,925 \cdot L$ , für kleinere Belastung entsprechend niedriger.



Tendenziell kann festgehalten werden, dass der Nulldurchgang im Mittel und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit leicht über dem normativ vorgegebenen Wert von  $0,85 \cdot L$  liegt. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit liegt der mittlere Wert auf Basis der untersuchten Träger bei ca.  $0,925 \cdot L$ .

Es stellt sich daher die Frage, ob durch den weiter zum Mittelaufleger hin verschobenen Nulldurchgang der Berechnungsansatz der Norm für Gebrauchslasten angepasst werden muss, bzw. ob dieser für die Verformung einen vernachlässigbaren Einfluss besitzt.

Um diese Frage zu klären, wurde die bereits oben erwähnte Parameteruntersuchung an Zweifeldträgern erweitert und dabei für die Werte der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand der Nulldurchgang variiert. Entsprechend dem vorgegebenen Nulldurchgang wurden auch die Werte der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand angepasst. Hierdurch unterscheiden sich jeweils die Steifigkeiten des Querschnitts der verschiedenen untersuchten Träger. Bei entsprechend größer gewähltem Nulldurchgang sind die Werte der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand entsprechend höher.

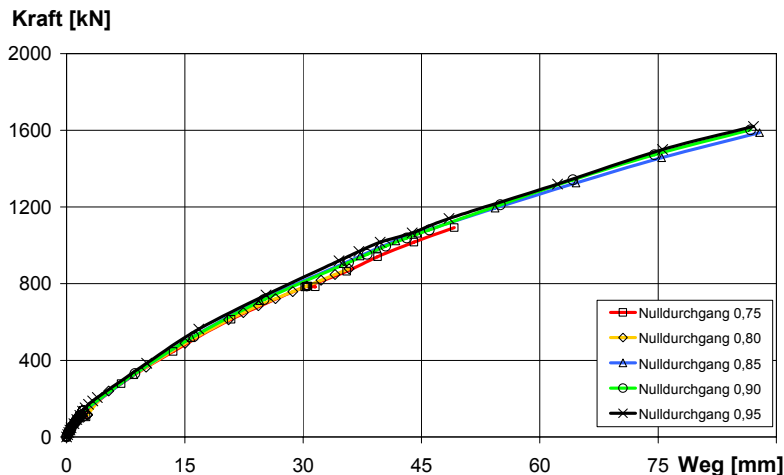
Exemplarisch sollen an einem Träger die Ergebnisse aufgezeigt werden. In Tabelle 6.2 ist eine Zusammenstellung der Werte für die mittragende Breite des Feldbereiches angegeben. Die mittragende Breite im Stützbereich wurde bei allen Trägern gleich gewählt. Die Trägerkonfiguration ist in Abbildung 6.20 gegeben.

Tabelle 6.2: Ermittlung der mittragenden Breite für Scheiben- und Biegezustand in Abhängigkeit des Momenten-Nulldurchgangs

Berechnung mit		$0,75 \cdot L$	$0,80 \cdot L$	$0,85 \cdot L$	$0,90 \cdot L$	$0,95 \cdot L$
Stützweite	[m]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Nulldurchgang bei x	[m]	4,50	4,80	5,10	5,40	5,70
$b_{m,S}$ (max.)	[m]	1,69	1,76	1,82	1,88	1,93
$b_{m,B}$ (max.)	[m]	2,41	2,42	2,43	2,44	2,45

Die Last-Verformungskurve, Abbildung 6.20, veranschaulicht, dass durch die Variation des Nulldurchgangs die Verformung nicht merklich beeinflusst wird. Die Last-Verformungskurven der hier untersuchten fünf Träger liegen fast identisch übereinander. Die auf der Vertikalachse angegebene Kraft [kN] ist die Summation der Flächenlast  $q$  [kN/m<sup>2</sup>] auf den Träger.

Es kann daher zusammenfassend festgehalten werden, dass für die weiteren Untersuchungen der normative Ansatz für den Momenten-Nulldurchgang mit ausreichender Genauigkeit auch für Slim-Floor Träger angewandt werden kann. Der Einfluss ist dabei vernachlässigbar klein, so dass eine gesonderte Ermittlung des lastabhängigen Nulldurchgangs für nicht notwendig gehalten wird. Auch wenn unter Gebrauchslasten der im Rahmen der Parameterstudie untersuchte Nulldurchgang leicht über dem normativen Wert liegt, wird in Anlehnung an die Regelung nach [DIN 18800-5] der rechnerische Nulldurchgang zu  $0,85 \cdot L$  vorgeschlagen.



Berechnungsbeispiel:

Stützweite:  $L = 6,0 \text{ m}$

Plattendicke:  $h_c = 26 \text{ cm}$

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

Stahlprofil: UPE 300 / Fl. 500x10

Betondruckfestigkeit:  $f_c = 35 \text{ N/mm}^2$

Stahlzugfestigkeit:  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Bewehrung oben:  $a_{s,o} = 7,5 \text{ cm}^2/\text{m}$

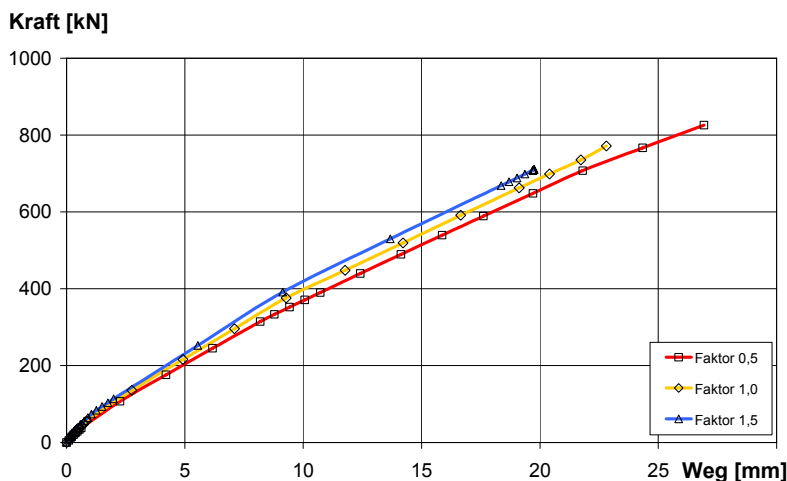
Bewehrung unten:  $a_{s,u} = 7,5 \text{ cm}^2/\text{m}$

Abbildung 6.20: Einfluss eines veränderten rechnerischen Momenten-Nulldurchgangs auf die Last-Verformungskurve

#### 6.2.8.4 Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich

Um den Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich zu untersuchen, wurde eine Vielzahl von Vergleichsrechnungen durchgeführt, bei der gezielt die mittragende Breite im Stützbereich variiert wurde.

In Abbildung 6.21 ist an einem Beispielträger der Einfluss der mittragenden Breite des Stützbereichs auf das Trag- und Verformungsverhalten dargestellt. Hierbei wurde der normative Wert für die mittragende Breite mit Werten zwischen 0,5 und 1,5 multipliziert.



Berechnungsbeispiel:

Stützweite:  $L = 4,0 \text{ m}$

Plattendicke:  $h_c = 22 \text{ cm}$

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

Stahlprofil: UPE 200 / Fl. 400x10

Betondruckfestigkeit:  $f_c = 35 \text{ N/mm}^2$

Stahlzugfestigkeit:  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Bewehrung oben:  $a_{s,o} = 11,3 \text{ cm}^2/\text{m}$

Bewehrung unten:  $a_{s,u} = 7,8 \text{ cm}^2/\text{m}$

Abbildung 6.21: Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich

Es zeigt sich, dass vor allem im Bereich der Gebrauchslasten kein Einfluss auf die Durchbiegung festzustellen ist.

Im negativen Momentenbereich setzt sich das Kräftepaar aus einer Zugkomponente der eingelegten Betonstahlbewehrung und aus einer Druckkomponente, die aus dem Baustahlprofil und dem Betongurt besteht, zusammen. Durch die eingelegte Bewehrung über der Stütze kann das Moment

am Stärksten beeinflusst werden, da auf der Seite der Zugkomponente nur die Bewehrung angesetzt werden kann, im Druckbereich jedoch das Baustahlprofil und der Betongurt wirken.

Werden die einzelnen Kraftkomponenten näher betrachtet, so stellt sich für geringere Lasten heraus, dass sich die Druckkräfte infolge der Steifigkeitsverteilung zwischen Baustahl und Beton hauptsächlich im Baustahl befinden. Dies bedeutet, dass die Betondruckkraft und damit auch die mittragende Breite nur eine untergeordnete Rolle spielen. Daher ist auch, wie in Abbildung 6.21 dargestellt, trotz stark vergrößerter mittragender Breite im Stützbereich, keine merkliche Veränderung bei der Trägerverformung erkennbar.

Im Traglastzustand wird der Betongurt verstärkt aktiviert, da das Baustahlprofil bereits seine maximale Druckkomponente ausgebildet hat, so dass der Einfluss der mittragenden Breite zunimmt und die Durchbiegungswerte sich für verschieden gewählte mittragende Breiten leicht unterscheiden.

Für die nachfolgenden Untersuchungen und mit dem hier entwickelten analytischen Berechnungsmodell für die Verformungsermittlung wird daher die mittragende Breite über der Stütze nach [DIN 18800-5] angesetzt. Eine Unterscheidung zwischen Scheiben- und Biegezustand wird nicht getroffen, da der Querschnitt über der Stütze bereits bei sehr geringen Lasten reißt und daher die Biegetragwirkung sehr schnell verloren geht.

## **6.3 Verifikation des analytischen Berechnungsmodells**

### **6.3.1 Allgemeines**

Das beschriebene analytische Modell zur Berechnung der Verformung von Slim-Floor Trägern soll im folgenden Abschnitt an eigenen, wie auch fremd durchgeführten Versuchen überprüft und verifiziert werden. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht hierbei der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

### **6.3.2 Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen (Einfeldträger)**

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens der Stiftung Industrieforschung durchgeführten Versuche [Kuhlmann et al 2006b] werden in Abschnitt 5.2 ausführlich dargestellt.

Für die Nachrechnung der Versuchsträger werden die tatsächlichen Geometriewerte aber insbesondere auch die gemessenen Materialkennwerte eingegeben. Beispielhaft werden die Vergleichsrechnungen für die Versuchsträger VT1 bis VT3 aufgeführt.

Der Vergleich (Abbildung 6.22) zeigt, dass das analytische Modell die Last-Verformungskurve des Versuchsträgers VT1 sehr gut nachbildet. Die Verformung des Trägers ist hierbei über das Moment des Trägers abgetragen.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit bricht die Rechnung bei einer rechnerischen Dehnung von 3,5 % ab, während der Trägerversuch ein weitaus größeres plastisches Verhalten aufweist und daher das Fließverhalten ausgeprägter erscheint. Dies hängt damit zusammen, dass die experimentellen maximalen Dehnungen die nach Abschnitt 6.2.4 festgelegten Dehngrenzen doch teilweise stark überschreiten und daher die Last-Verformungskurve ein größeres Fließplateau zeigen. Da die Untersuchungen sich hier aber vorwiegend auf das Last-Verformungsverhalten im Gebrauchslastzustand konzentrieren, fällt dieser Effekt nicht weiter ins Gewicht.

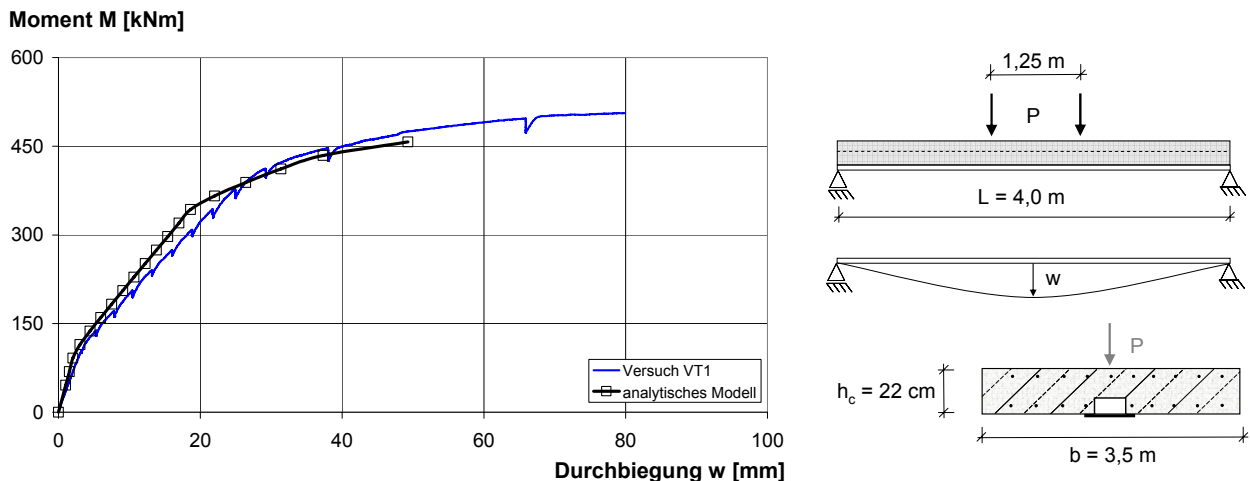


Abbildung 6.22: Vergleich Versuch/analytisches Modell – Träger VT1

Die Vergleichsrechnung für den zweiten Versuchsträger mit einer Betonplattendicke von 30 cm zeigt ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 6.23. Auch hier kann das plastische Verhalten im Traglastzustand (große Verformungen) nicht nachgebildet werden, jedoch liegt die berechnete Last-Verformungskurve im Bereich der Gebrauchstauglichkeit sehr nahe an den experimentellen Ergebnissen.

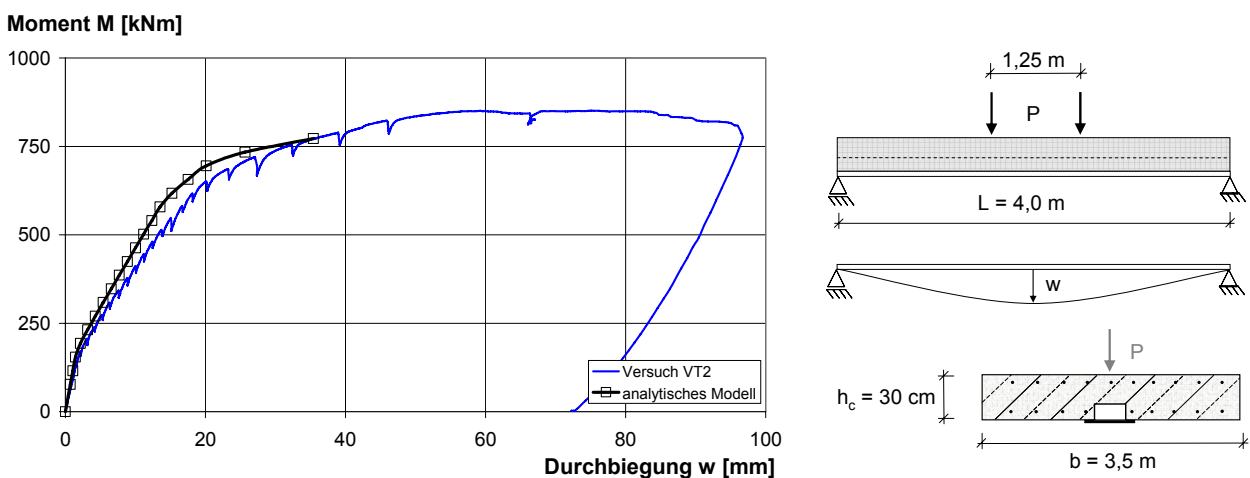


Abbildung 6.23: Vergleich Versuch/analytisches Modell – Träger VT2

Wie der Versuch VT3 zeigt, führt die durch die Last eingebaute Exzentrizität in Querrichtung zu einer gegenüber Versuchsträger VT1 kaum verminderten Tragfähigkeit beim Versuch VT3. Da das analytische Modell von einer ein-axialen Belastung (in Trägerlängsrichtung ausgeht), zeigt die Nachrechnung ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen, siehe Abbildung 6.24.

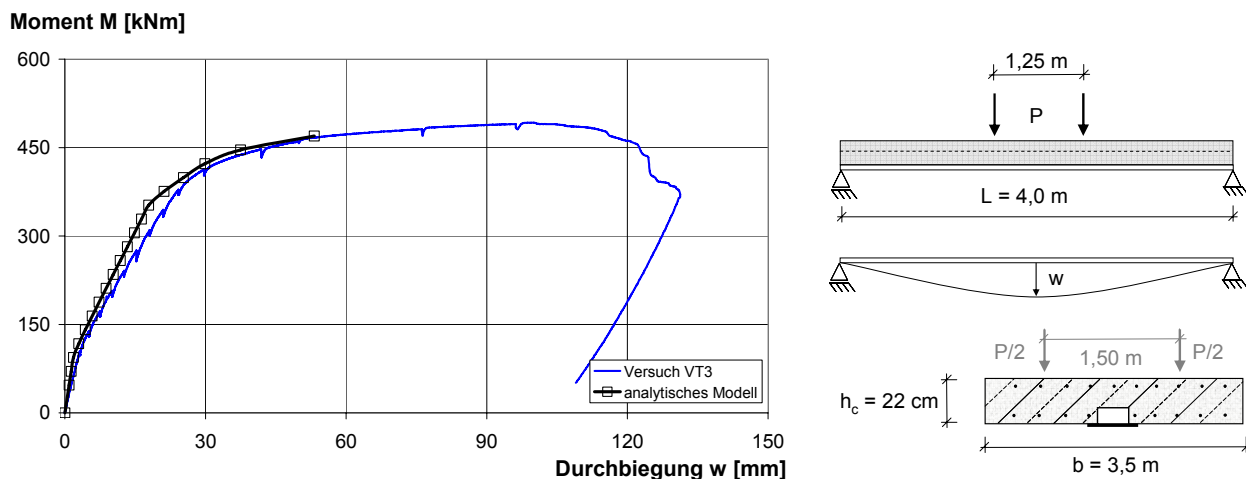


Abbildung 6.24: Vergleich Versuch/analytisches Modell – Träger VT3

Insgesamt kann also festgehalten werden, dass das analytische Modell durch die Vergleichsrechnungen mit den durchgeführten Versuchen zu sehr guten Ergebnissen führt und für die nachfolgend in Abschnitt 7.3 durchgeführte Parameteruntersuchung herangezogen werden kann.

Das plastische Tragverhalten über die maximale Bruchlast hinaus kann mit dem analytischen Modell nicht untersucht bzw. nachgerechnet werden, spielt jedoch in Hinblick auf die Untersuchungen für die Verformungen der Slim-Floor Träger im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit keine Rolle.

Gleichzeitig kann mit der Vergleichsberechnung festgehalten werden, dass die rechnerische Berücksichtigung der mittragenden Breite für den Biege- und Scheibenzustand im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eine gute Basis darstellt, bzw. im Umkehrschluss, dass die Vernachlässigung des Betonbiegetraganteils zu unwirtschaftlicheren Berechnungsergebnissen (größere Verformungen) führen würde.

### 6.3.3 Vergleich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen (Zweifeldträger)

Durch die Erweiterung des analytischen Modells auf Zweifeldsysteme wird im nachfolgenden Abschnitt der Vergleich zwischen dem Modell und den experimentell durchgeführten Versuche an Zweifeldträgern fortgesetzt und das analytische Modell daran verifiziert.

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 6.2.8.3 und Abschnitt 6.2.8.4 genannten Einflussfaktoren und Untersuchungen zur mittragenden Breite im Bereich der Stütze wurden für die Versuchsnachrechnungen folgende Annahmen getroffen:

- Ermittlung der mittragenden Breite (Werte auf Basis der Differentialgleichung für den Scheiben- und Biegezustand) für den Feldbereich unter der Annahme, dass der Momenten-Nulldurchgang bei  $0,85 \cdot L$  der Einzelfeldlänge vorliegt
- die mittragende Breite für den Stützbereich wird analog [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] angenommen.

Die Verformung des Trägers ist hierbei über die aufgebrachte Pressenkraft abgetragen.

Weiterhin ist zu beachten, dass zur Verformungsberechnung der Versuchsträger die Belastung nicht als Streckenlast aufgebracht werden kann, sondern entsprechend der Versuche als eine Vierpunktbelastung je Feld in das Berechnungstool implementiert wurde.

Die erste Abbildung 6.25 zeigt die Vergleichsrechnung aller Träger mit einem integrierten UPE-Profil (V1, V3, V4). Wie bereits auch bei den Einfeldträgern ist sehr schön zu erkennen, dass bis zu 70 % der maximalen Pressenkraft die Ergebnisse des Modells sehr gut mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist damit sehr gut abgebildet. Mit steigender Belastung zeigen die analytischen Berechnungen einen weiteren Anstieg der Kurve. Da die Träger vorzeitig infolge Querkraft bzw. Durchstanzen versagten, kann die Momententragfähigkeit dieser Träger nicht voll ausgenutzt werden und die Versuchskurve verlässt ihren relativ konstant steilen Anstieg und geht in einen horizontalen plastischen Zweig über.

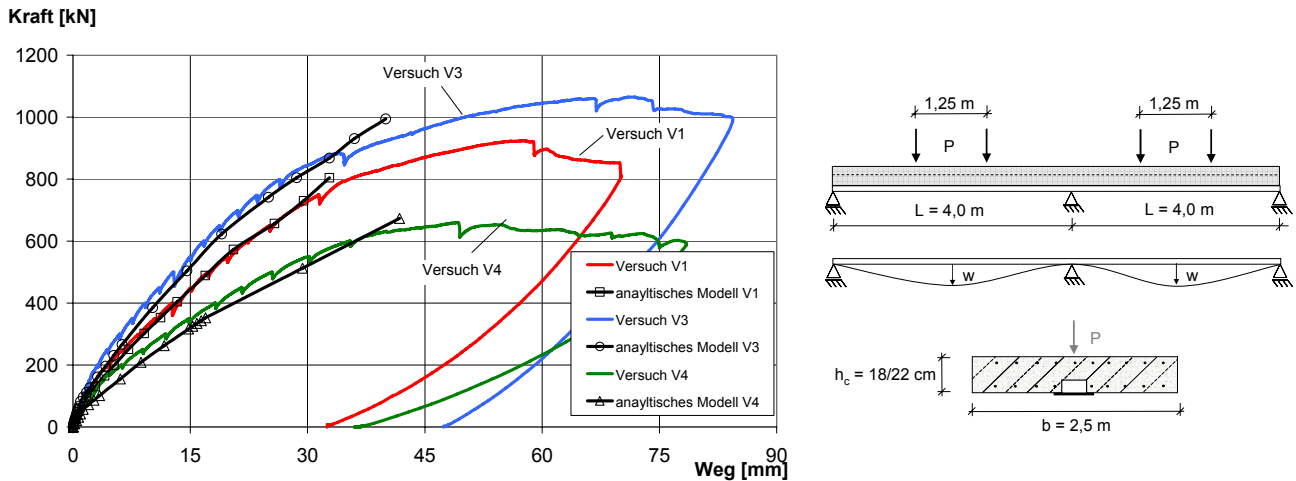


Abbildung 6.25: Vergleich analytisches Modell mit Versuchsträgern V1, V3, V4

Für die Träger mit eingebautem SFB-Profil zeigt sich das gleiche Ergebnisse, siehe Abbildung 6.26. Bis 70 % der maximalen Pressenkraft stimmen auch hier die rechnerischen Ergebnisse sehr gut mit den Versuchskurven überein. Der Einfluss der Bewehrung der bei den Versuchsträgern nur kleine Unterschiede aufzeigt, wiederholt sich auch bei der Berechnung. Der schwach bewehrte Träger V6 zeigt insgesamt größere Verformungen.

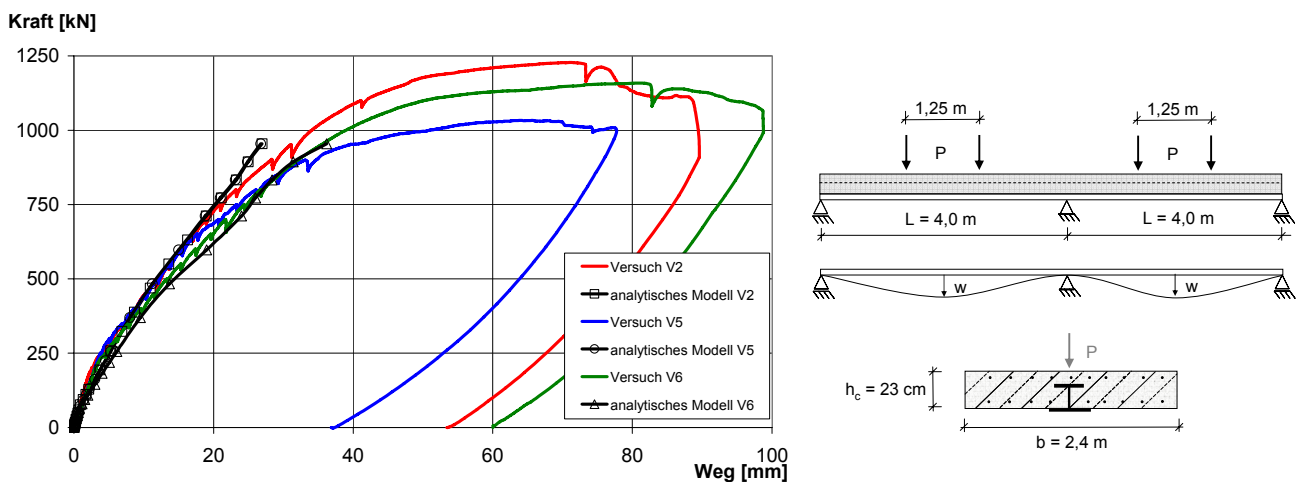


Abbildung 6.26: Vergleich analytisches Modell mit Versuchsträgern V2, V5, V6

Für die sechs untersuchten Träger kann für das Berechnungsmodell insgesamt auch eine gute Übereinstimmung festgestellt und damit das Modell als verifiziert angesehen werden. Mit dieser Grundlage können nun im Weiteren parametrische Untersuchungen durchgeführt werden, die es erlauben, den engen Bereich der experimentellen Versuche zu erweitern.

### 6.3.4 Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen nach [Kuhlmann, Fries 2001]

Im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens [Kuhlmann, Fries 2001] wurden erste experimentelle Versuche an Slim-Floor Trägern mit UPE-Hutprofilen durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchung stand damals das Tragverhalten dieser Querschnitte. Aus diesem Grund wurde die Trägerbreite relativ klein gewählt, so dass die Mitwirkung des gesamten Betongurtes garantiert werden konnte. Der Träger SFT6 wurde als Einfeldträger unter positiver Momentenbelastung ausgeführt und kann daher mit dem hier entwickelten analytischen Modell verglichen werden.

Die Abbildung 6.27 zeigt den Trägerquerschnitt und die Versuchskonzeption. Mittels der tatsächlichen Materialparameter wurde die analytische Rechnung durchgeführt, siehe Abbildung 6.28.

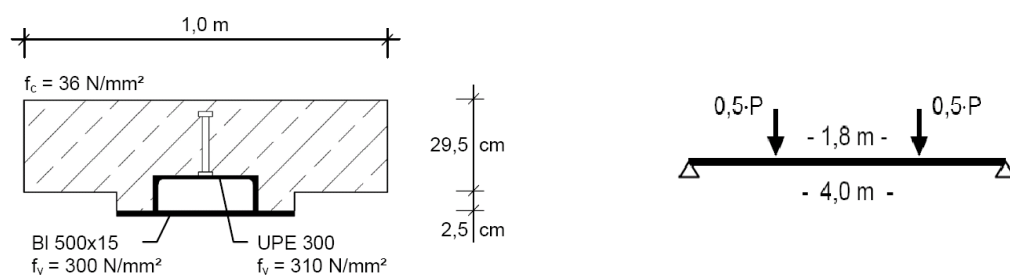


Abbildung 6.27: Versuchsträger und Versuchskonzeption - SFT6 [Fries 2001]

Die Berechnungsergebnisse zeigen ebenfalls für den Gebrauchslastzustand eine gute Übereinstimmung und liegen jeweils leicht über den experimentellen Ergebnissen. Die Berechnung wird unter der Annahme des voll mitwirkenden Betongurtes durchgeführt. Für weitere Informationen zur Versuchsdurchführung wird auf das Forschungsvorhaben [Kuhlmann, Fries 2004] hingewiesen.

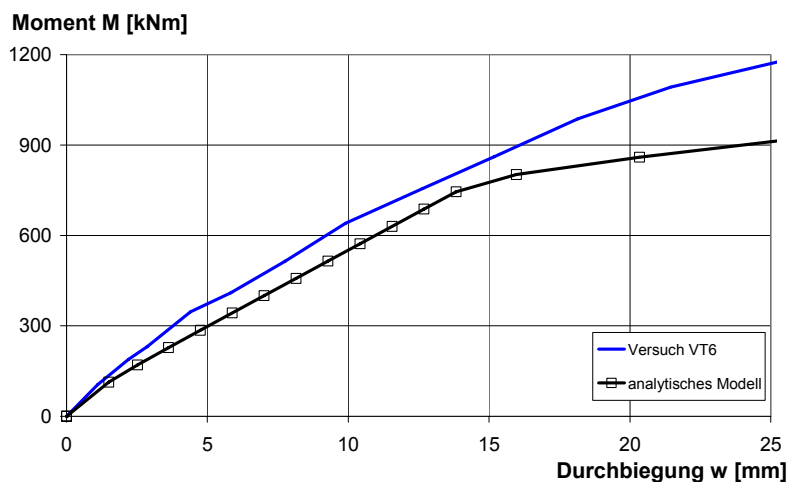


Abbildung 6.28: Vergleich Versuch/analytisches Modell - SFT6 [Fries 2001]

### 6.3.5 Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen von [Kuhlmann et al 2010]

Für Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten wurden 2009 am Institut für Konstruktion und Entwurf Versuche im Auftrag der Fa. ArcelorMittal durchgeführt [Kuhlmann et al 2010], [Braun et al 2009]. Hierbei wurden zwei 8,0 m lange Einfeldträgerversuche mit einer Plattenbreite von 2,50 m getestet. Anstatt einer voll ausbetonierten Platte wurden Cofradal 200® Elemente als „verlorene Schalung“ mit einer Aufbetonschicht verwendet, siehe nachfolgende Abbildung 6.29. Als Verbundmittel wurden Betondübel eingesetzt. D.h. im oberen Bereich des Baustahlträgersteges wurden Öffnungen vorgesehen, durch die Bewehrungsstäbe geführt wurden.

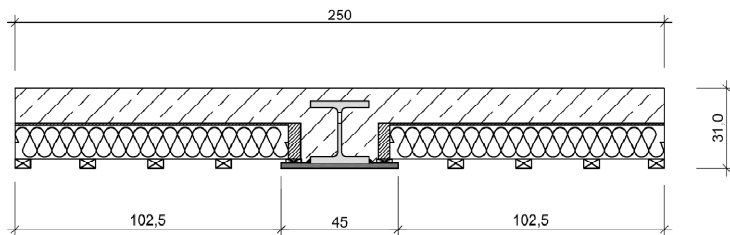


Abbildung 6.29: Versuchsquerschnitt Slim-Floor Träger mit Cofradal200®-Elementen

Da die Plattenbreite zur Untersuchung des mittragenden Betongurts sehr breit gewählt wurde, eignen sich diese Versuche, um das analytische Modell verifizieren. Die Last wurde als 4-Punkt-Biegeversuch über einen Lastverteilungsträger (Abstand der Lasteinleitungspunkte 1,25 m) in den Träger eingebracht. Beide Träger versagten infolge Biegedruckversagen im Bereich der Lasteinleitung und erreichten hierbei ähnliche Traglasten.

Für die Nachrechnung der Versuche wurden jeweils die Materialkennwerte des Betons, der Bewehrung wie auch des Baustahls ermittelt. In der Abbildung 6.30 ist die Last-Verformungskurve des Versuchsträgers B1 dargestellt, ebenso wie das rechnerische Ergebnis auf Grundlage des analytischen Berechnungsmodells mit den gemessenen Materialwerten.

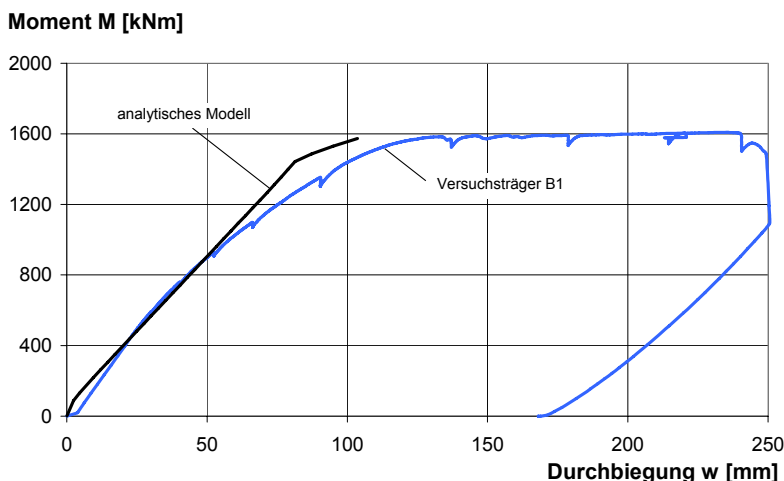


Abbildung 6.30: Vergleich Versuch/analytisches Modell – B1

Die Vergleichsrechnungen zeigen, dass das analytische Modell insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den experimentell durchgeführten Versuchen im Bereich der Gebrauchstauglichkeit liefert. Die Annahme der mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustand als Grundlage für die Verformungsberechnung konnten ebenfalls hiermit bestätigt werden.



## 6.4 Vergleich analytisches Modell mit [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1]

### 6.4.1 Grundsätzliches

Die Ausführungen in Abschnitt 4.5 zeigen, dass die Werte der mittragenden Breite nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] die Scheibentragwirkung berücksichtigen, die Biegetragwirkung jedoch vernachlässigt wird. Da der Biegeanteil des Betongurts bei Slim-Floor Trägern vor allem im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend zur Tragwirkung beisteuert, ist der nach Norm vorgegebene Ansatz sehr unwirtschaftlich. Der nachfolgende Vergleich soll dies darstellen. Da [DIN 18800-5] und [DIN EN 1994-1-1] die gleichen Werte der mittragenden Breite wiedergeben, wird fortan vereinfacht für beide Regelungen nur [DIN 18800-5] zitiert.

### 6.4.2 Vergleich normative Regelung zu Einfeldträgerversuche

Am Beispiel des Versuchsträgers VT1 wird die nichtlineare Berechnung unter Berücksichtigung der mittragenden Breite einmal nach [DIN 18800-5] und einmal mit den Werten für die mittragende Breite des Biege- und Scheibenzustands auf Grundlage der Differentialgleichungen durchgeführt.

Die Abbildung 6.31 zeigt vorweg die ermittelten Werte für die mittragende Breite. Nach [DIN 18800-5] berechnet sich die konstante mittragende Breite zu 1,0 m, während der elastische Scheiben- und Biegezustand viel höhere (spannungsbezogene) Werte annehmen. Auf der Vertikalachse ist der Wert der mittragenden Breite abgetragen, auf der Horizontalachse die Laufvariable  $x$  in Längsrichtung des Verbundträgers mit der Länge  $L$ .

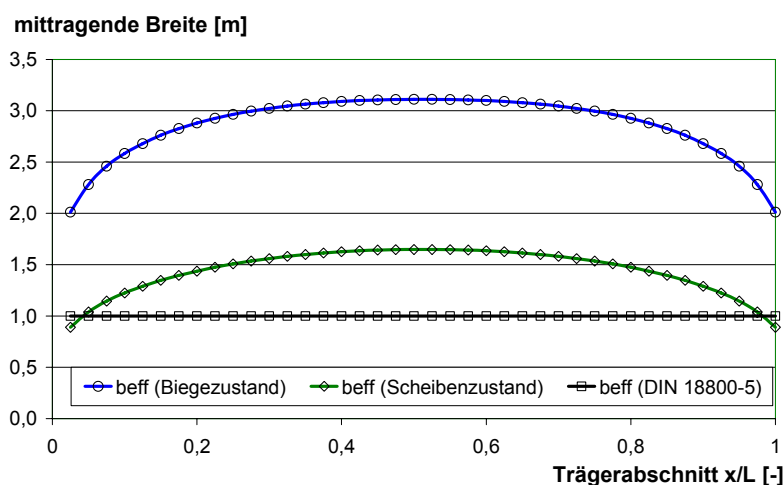


Abbildung 6.31: Mittragende Breite des elastischen Scheiben-/Biegezustands und nach [DIN 18800-5]

Die Abbildung 6.32 zeigt die Berechnungsergebnisse (Bereich der Gebrauchstauglichkeit) im Vergleich. Die schwarze Versuchskurve wird hierbei dem analytischen Modell mit zwei verschiedenen angesetzten mittragenden Breiten gegenübergestellt.

Die Verformungskurven zeigen hierbei sehr schön, dass die Berechnung nach [DIN 18800-5] durchgängig größere Verformungen im Vergleich zur analytischen Untersuchung bzw. der experimentellen Kurve aufweist. Die Werte weichen um ca. 30 - 40 % ab, so dass die nach [DIN 18800-5] berechnete Verformung zu große Werte wiedergibt.

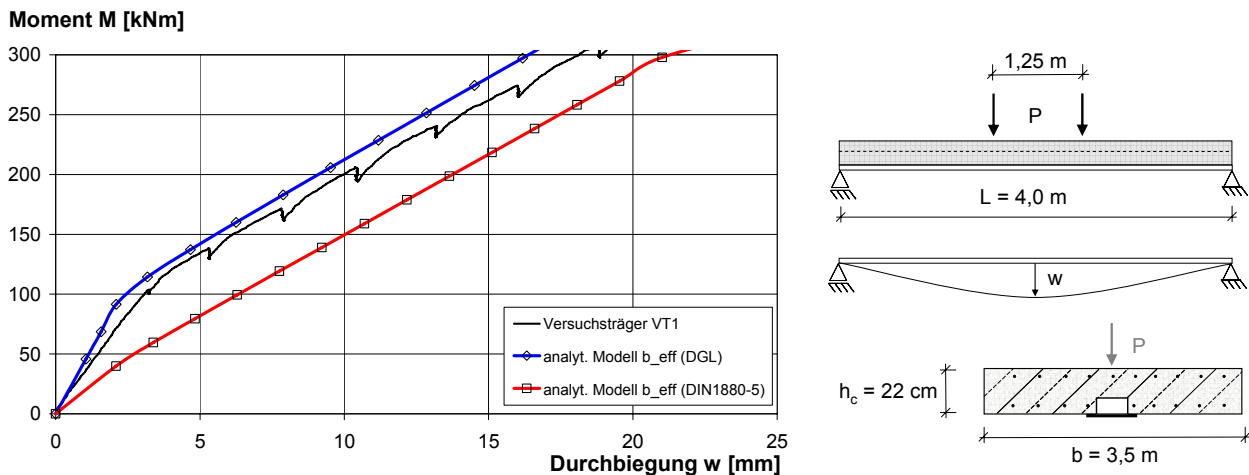


Abbildung 6.32: Analytische Vergleichsrechnung [DIN 18800-5] mit Scheiben-/Biegezustand – VT1

Die Werte für die mittragende Breite des Biegezustands in Feldmitte liegen im Vergleich zur mittragenden Breite nach [DIN 18800-5] um das Dreifache höher. Dies wirkt sehr deutlich auf den Anfangsbereich der Last-Verformungskurven aus, da sich das Rissmoment dadurch erheblich im Wert unterscheidet. Durch die größere mittragende Breite erhöht sich die Trägersteifigkeit entsprechend, so dass die Verformungskurve mit den Werten des Biege- und Scheibenzustands steiler startet und erst nach der ersten Rissbildung beide Kurven parallel zueinander verlaufen.

Dies zeigt, dass die mittragende Breite ein sehr wichtiger Einflussparameter für die Verformungsberechnung bei Slim-Floor Trägern und die richtige Annahme entscheidende Vorteile für die Bestimmung der Trägerdurchbiegung darstellt.

#### 6.4.3 Vergleich normative Regelung zu Zweifeldträgerversuchen

Der Vergleich wird nun ebenfalls für den getesteten Zweifeldträger V1 durchgeführt. Auch hier zeigt sich, dass die Berechnung nach [DIN 18800-5] für die mittragende Breite die Durchbiegung des Trägers überschätzt und daher zu ungünstige Werte liefert.

Bezüglich der Werte der mittragenden Breite unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands gerade in Hinblick auf den Stützbereich wird auf den Abschnitt 6.2.8.4 verwiesen.

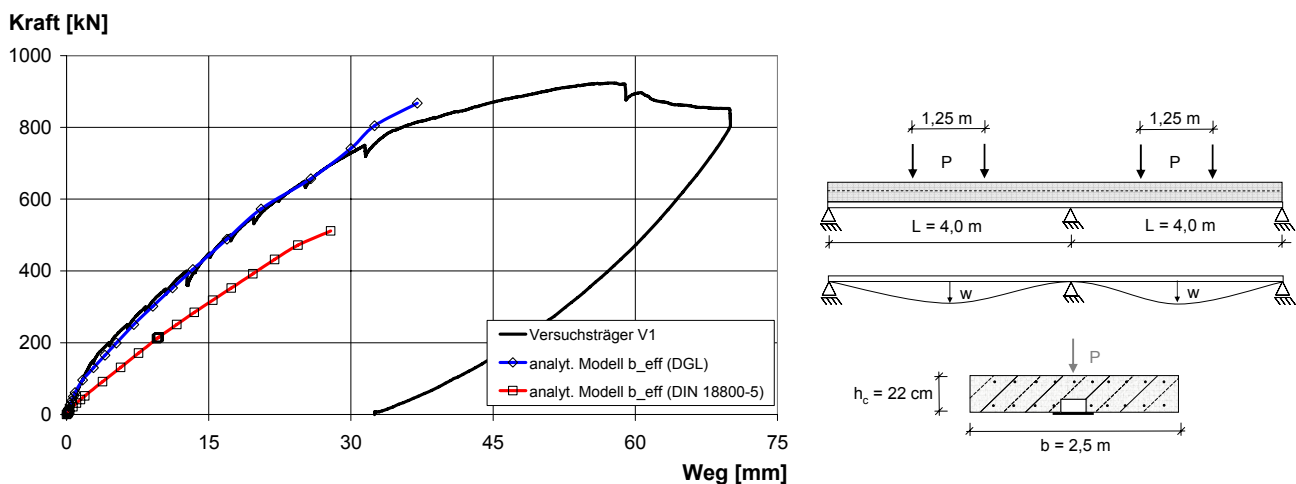


Abbildung 6.33: Analytische Vergleichsrechnung DIN18800-5 mit Scheiben-/Biegezustand – V1

Der Vergleich zeigt wie auch schon beim Einfeldträger, dass die Berechnung unter Ansatz der mittragenden Breite nach [DIN 18800-5] die Trägerverformung weit überschätzt. Die Werte liegen ca. 30 % über den experimentell ermittelten Werten.

## 6.5 Analytische Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Verformung

### 6.5.1 Allgemeines

Nachdem das auf Excel basierte analytische Modell anhand von Versuchen verifiziert ist, sollen nachfolgend die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Trag- und Verformungsverhalten identifiziert werden. Dies ist von Bedeutung, da die maßgebenden Parameter zur Verminderung der Verformung bzw. Erhöhung der Tragfähigkeit untersucht werden und dadurch auch den jeweiligen quantitativen Einfluss dargestellt werden sollen.

Die hier aufgezeigten Beispielrechnungen und gewonnenen Ergebnisse werden im Abschnitt 7.2 zur Bestimmung der verformungsbezogenen Breite  $b_{m,V}$  nochmals aufgegriffen.

### 6.5.2 Untersuchung für Einfeldträgersysteme

#### 6.5.2.1 Grundsätzliches

Zur Identifikation der maßgebenden Einflussfaktoren werden bei den nachfolgenden Berechnungsbeispielen jeweils mehrere Träger berechnet, dabei aber nur ein Parameter variiert. Dies ermöglicht nicht nur den qualitativen Vergleich, sondern ebenso den quantitativen Einfluss eines Parameters auf die Verformung bzw. die Tragfähigkeit des Slim-Floor Querschnitts zu identifizieren. Neben der geometrischen Variation werden ebenso die Materialwerte untersucht, jeweils unter Berücksichtigung baupraktischer und bauüblicher Abmessungen und Materialien.

Die gewählte Basiskonfiguration für die Parameteruntersuchung ist in der nachfolgenden Abbildung 6.34 angegeben und wird beispielhaft für einen Hutprofil-Querschnitt durchgeführt.

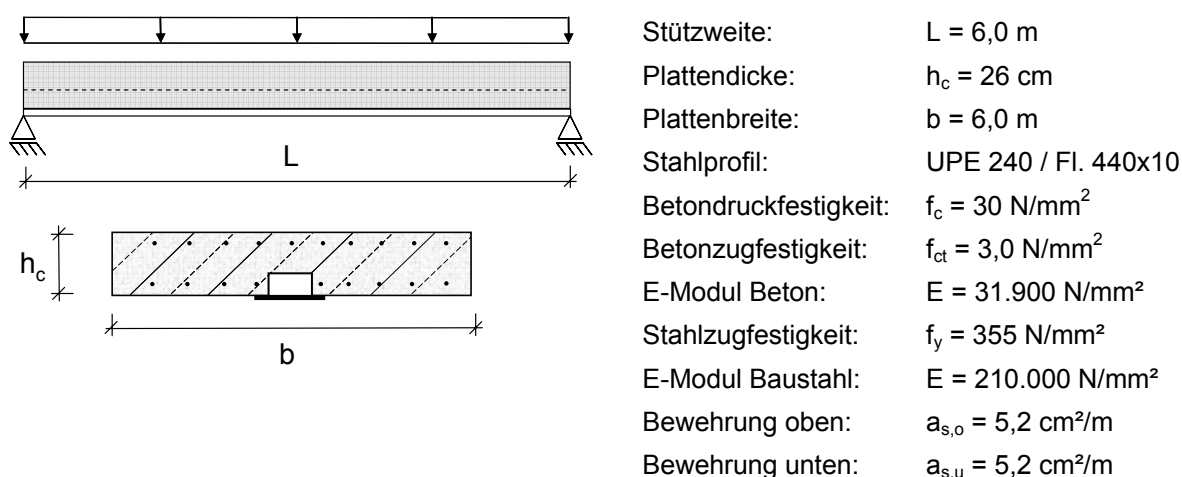


Abbildung 6.34: Basis-Einfeldträger für Parameteruntersuchung

### 6.5.2.2 Betonzugfestigkeit $f_{ct}$

Das hier gezeigte Beispiel (Abbildung 6.35) zeigt den Einfluss der Betonzugfestigkeit, die bei sonst konstanten Geometrie- und Materialkennwerten zwischen 1,0 und 3,0 N/mm<sup>2</sup> variiert wird.

Es ist zu erkennen, dass sich hierdurch die Erstrissbildung und damit das Rissmoment beeinflussen lassen, mit zunehmender Zugfestigkeit wird die Belastung für den Erstriss im Verhältnis zur Gesamttraglast größer. Auf die Traglast jedoch hat die Betonzugfestigkeit keinen Einfluss, da mit steigender Last der Beton reißt und somit die gerissenen Betongurte keinen maßgebenden Traganteil beisteuern.

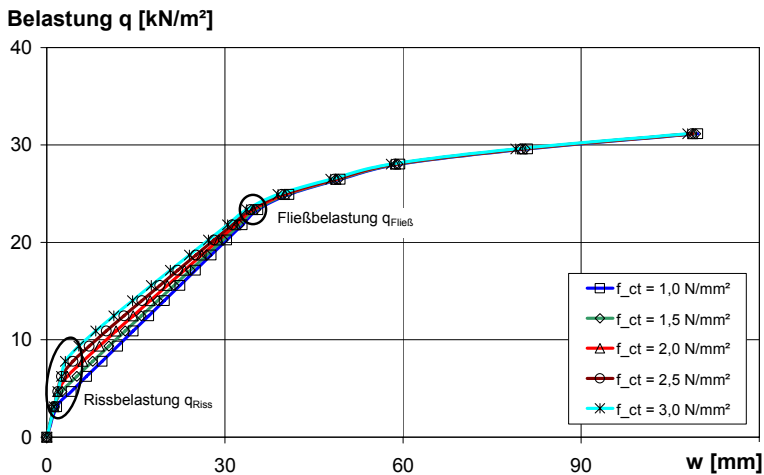


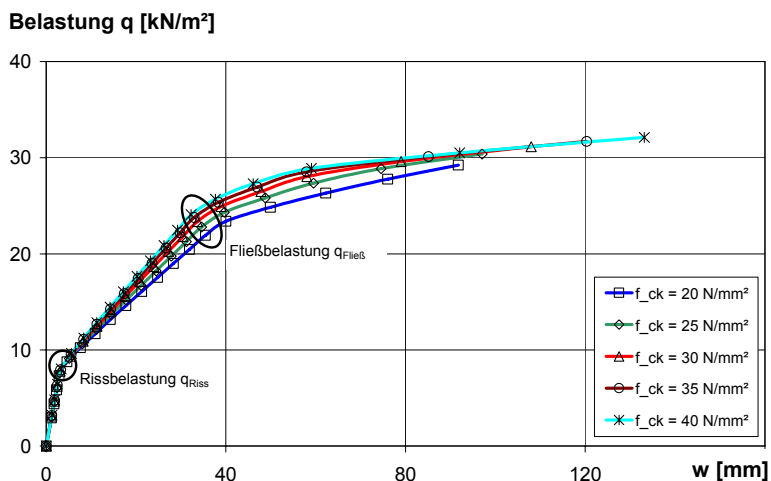
Abbildung 6.35: Einfluss Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  – Einfeldträger

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann somit mit der Variation der Betonzugfestigkeit die Verformung positiv beeinflusst werden. Die Kurven fächern sich hierbei bis zum Rissmoment auf und laufen anschließend mit steigender Last wieder aufeinander zu.

### 6.5.2.3 Betondruckfestigkeit $f_c$

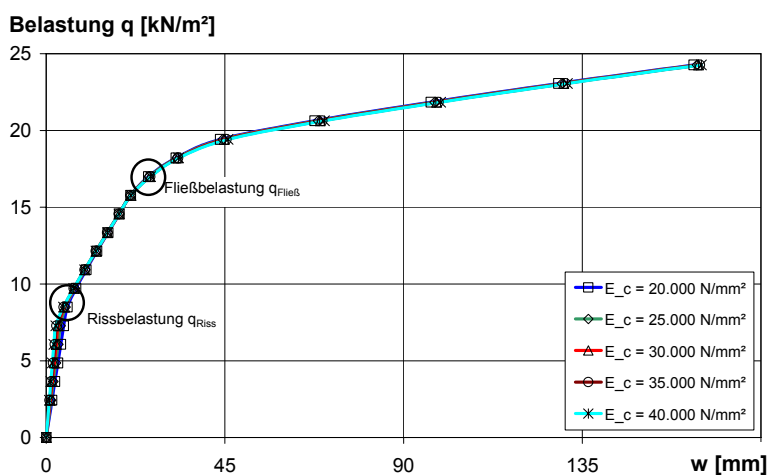
Die Betondruckfestigkeit wird zwischen 20 und 40 N/mm<sup>2</sup> variiert. Für niedrige Lasten (vor allem im Grenzbereich der Gebrauchstauglichkeit) ist kein Unterschied im Verformungsverhalten zu erkennen.

Jedoch nimmt die Traglast mit zunehmender Druckfestigkeit des Betons zu (Abbildung 6.36), da durch die höhere Druckfestigkeit die Kraftanteile des Kräftepaars zwischen Betondruckkraft und Baustahlzugkraft im Verbundquerschnitt steigen. Da die Rissbelastung bzw. das Rissmoment unabhängig von der Betondruckfestigkeit bestimmt wird, verlaufen die Last-Verformungskurven bis zum Rissmoment identisch.


Abbildung 6.36: Einfluss Betondruckfestigkeit  $f_c$  - Einfeldträger

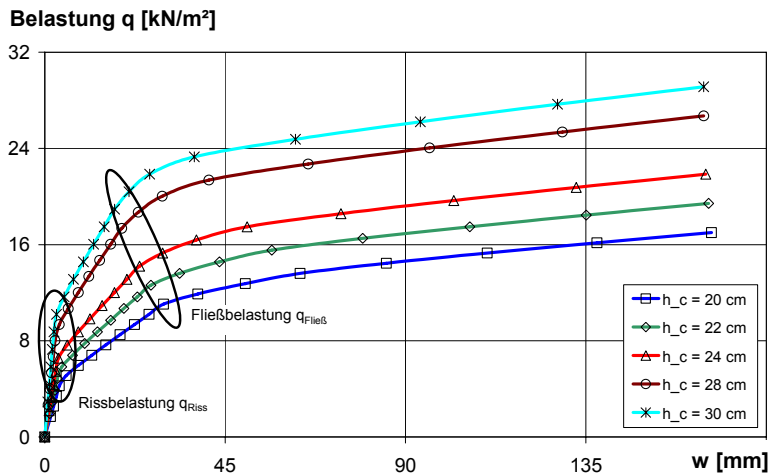
#### 6.5.2.4 E-Modul des Betons $E_c$

Eine Variation des E-Moduls des Betons zeigt keinen erkennbaren Einfluss auf das Verformungsverhalten wie auch die Traglast des Trägers (Abbildung 6.37). Der Betonquerschnitt wird im Rahmen des analytischen Modells in einen ideellen Betonquerschnitt im Verhältnis des E-Moduls des Baustahls zum Beton umgerechnet. Da der Querschnitt des Betons durch die Rissbildung zunehmend reduziert in Erscheinung tritt, kann der Einfluss des E-Moduls des Betons vernachlässigt werden. Die Kurven verlaufen identisch, sowohl im Gebrauchs- als auch im Traglastzustand.


Abbildung 6.37: Einfluss E-Modul des Betons  $E_c$  - Einfeldträger

#### 6.5.2.5 Plattendicke $h_c$

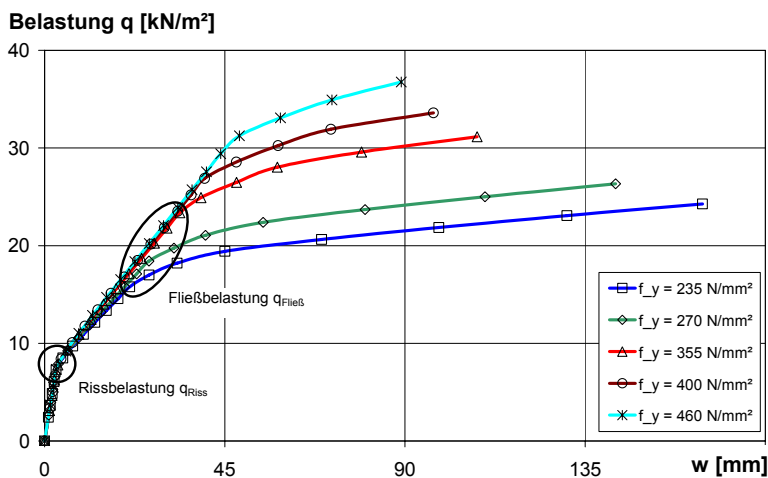
Die Biegetragwirkung des Betongurts nimmt mit zunehmender Dicke des Betongurts zu. Dies liegt daran, dass die Eigenbiegesteifigkeit  $I_c$  des Betongurts in dritter Potenz mit der Gurtdicke  $h_c$  ansteigt, während der Steifigkeitsanteil des inneren Kräftepaars im Verbundquerschnitt für die Berechnung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


Abbildung 6.38: Einfluss Betonplattendicke  $h_c$  - Einfeldträger

Die Abbildung 6.38 zeigt ebenso sehr deutlich, dass die Plattendicke  $h_c$  einen maßgebenden Einfluss auf das Verformungsverhalten wie auch die maximale Belastung des Slim-Floor Trägers besitzt. Mit steigender Plattendicke nimmt ebenso das Rissmoment im Verbundquerschnitt zu, was sich positiv auf das Verformungsverhalten bei niedrigen Lasten auswirkt.

#### 6.5.2.6 Fließgrenze des Baustahls $f_y$

Die Fließgrenze des Baustahls wird zwischen 235 und 460 N/mm<sup>2</sup> variiert. Es zeigt sich, dass mit steigender Fließgrenze die Traglast des Trägers erhöht werden kann, sie jedoch wie auch die Betondruckfestigkeit keinen Einfluss auf das Verformungsverhalten unter Gebrauchslasten besitzt (Abbildung 6.39). Dies liegt daran, dass bei niedrigen Lasten der Baustahl die Fließgrenze nicht erreicht und daher eine höhere Stahlgüte keinen Einfluss auf die Verformung besitzt. Ebenso besitzt die Stahlfestigkeit keinen Einfluss auf die Erstrissbildung bzw. das Rissmoment, so dass die Kurven im Anfangsbereich identisch verlaufen.


Abbildung 6.39: Einfluss Fließgrenze des Baustahls  $f_y$  - Einfeldträger

### 6.5.2.7 E-Modul des Baustahls $E_a$

Wie auch für den Beton zeigt sich kein erkennbarer Einfluss des E-Moduls des Baustahls auf das Verformungsverhalten und die Momententragfähigkeit des Trägers, wie aus der nachfolgenden Abbildung ersichtlich ist.

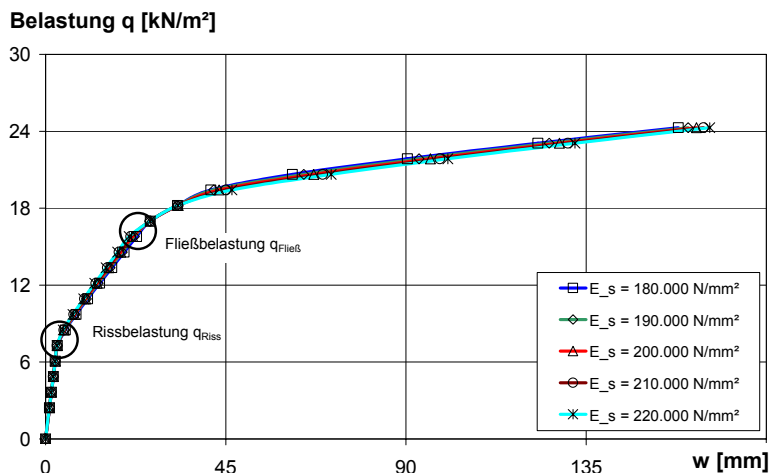


Abbildung 6.40: Einfluss E-Modul des Baustahls  $E_a$  - Einfeldträger

### 6.5.2.8 Querschnittsfläche des Baustahlprofils $A_a$

Eine Variation des Baustahlprofils (hier das UPE-Profil) zeigt wiederum bei niedrigen Lasten keinen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten, siehe Abbildung 6.41. Das Baustahlprofil besitzt unterhalb des Fließbereiches nur einen untergeordneten Einfluss, da das Verhältnis des Trägheitsmoments des Baustahlprofils zum Betongurt sehr gering ist. Auf die Rissbildung bzw. das Rissmoment ist daher ein nur sehr geringer Einfluss vorhanden.

Jedoch durch die höhere Trägersteifigkeit und erhöhte Querschnittsfläche des Baustahls nimmt die Tragfähigkeit des Verbundquerschnitts zu. Dieser Einfluss ist jedoch erst nach Überschreiten der Fließgrenze zu erkennen und liegt daher außerhalb des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit.

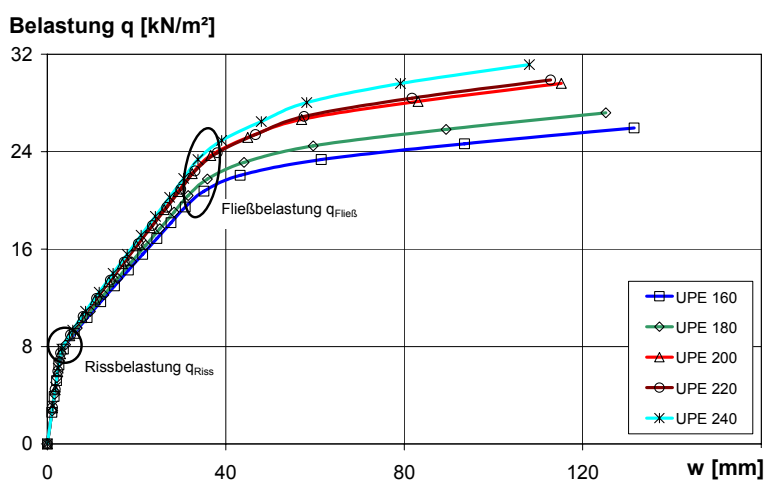


Abbildung 6.41: Einfluss der Baustahlquerschnitts  $A_a$  - Einfeldträger

### 6.5.2.9 Bewehrungsgehalt $a_{s,u}$ – untere Lage

Durch die Erhöhung des Bewehrungsgehalts in der unteren Lage wird die Zugkraft im Verbundquerschnitt erhöht, so dass insgesamt die Tragfähigkeit gesteigert werden kann (Abbildung 6.42). Da der Trägheitsanteil der Bewehrung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Gesamtträgersteifigkeit besitzt, ergibt sich kein Einfluss auf die Rissbelastung bzw. das Rissmoment und somit auf das Verformungsverhalten im Gebrauchslastzustand.

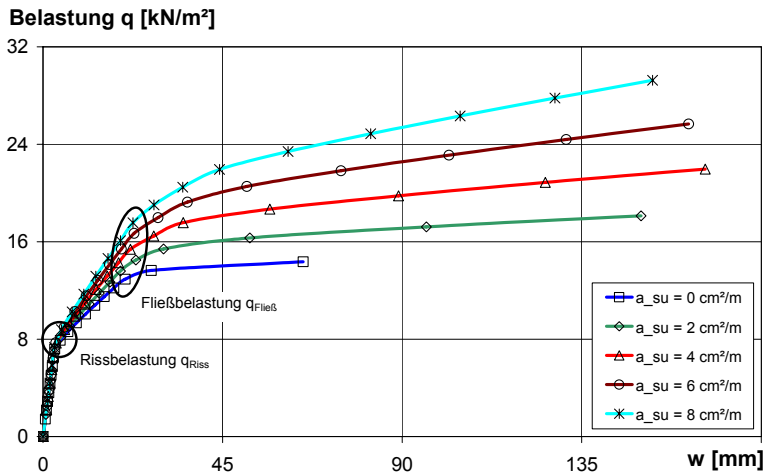


Abbildung 6.42: Einfluss untere Bewehrung  $a_{s,u}$  - Einfeldträger

### 6.5.2.10 Bewehrungsgehalt $a_{s,o}$ – obere Lage

Die in der Druckzone eingelegte Bewehrung erhöht im Verhältnis zur Betondruckkraft die Druckkraftkomponente leicht, so dass der Einfluss auf die Gesamttraglast erkennbar ist (Abbildung 6.43). Im Bereich der Gebrauchstauglichkeit tritt kein erkennbarer Unterschied auf. Die eingelegte Bewehrung besitzt keinen merklichen Einfluss auf das Verbundträgheitsmoment, so dass das Rissmoment beeinflusst werden könnte. Die Last-Verformungskurven verlaufen daher bei niedrigen Lasten identisch.

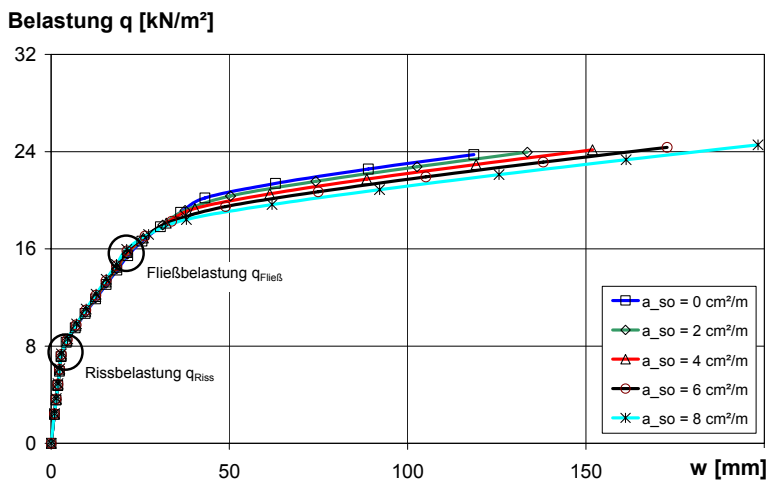


Abbildung 6.43: Einfluss obere Bewehrung  $a_{s,o}$  - Einfeldträger



### 6.5.2.11 Geometrisches Verhältnis $b/L$

Der hier vorgestellte und untersuchte Parameter ist das Verhältnis der Gurtbreite zur Stützweite des Slim-Floor Trägers. Da die Bestimmung der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand maßgebend vom Verhältnis der Gurtbreite zur Spannweite abhängig ist, steigen die Werte für die mittragende Breite mit zunehmender Gurtbreite an, siehe hierzu auch Abschnitt 4.5. Die hier berechneten Werte für die mittragende Breite sind in Abbildung 6.44 gegeben.

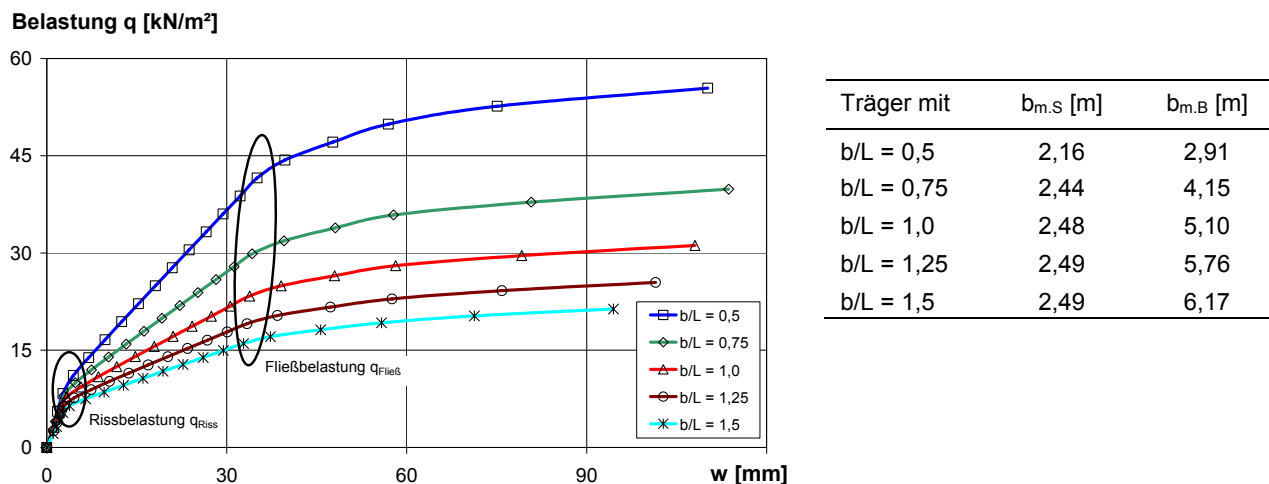


Abbildung 6.44: Einfluss des geometrischen Verhältnis  $b/L$  - Einfeldträger

Es zeigt sich, dass die mittragende Breite für den Biegezustand mit zunehmender Betongurtbreite sehr viel größere Werte annimmt als der Scheibenzustand. Dies hat in erster Linie einen direkten Einfluss auf das Rissmoment der Träger, da die Trägersteifigkeit zunimmt. Mit zunehmender Belastung und damit einhergehender Rissbildung schwächt sich der Einfluss des Biegezustands ab und im Bruchlastzustand spielt alleinig nur noch der Scheibenzustand eine Rolle, so dass sich hier die Werte für das Bruchmoment für große Gurtbreiten nicht mehr unterscheiden, für kleinere Gurtbreiten ( $b/L < 1,0$ ) nur geringfügig. Die Werte zeigen zugleich, dass wenn die Gurtbreite das Verhältnis von 1,0 der Stützweite überschreitet, die Werte für die mittragende Breite des Scheibenzustands nicht mehr zunehmen. Hierbei wird auf die Abbildung 4.3 hingewiesen.

Der Einflussfaktor  $b/L$  verdeutlicht, dass die Wahl der geometrischen Abmessungen des vorliegenden Deckensystems einen Einfluss auf die Durchbiegung besitzt, da die Werte für die mittragende Breite (des Scheiben- und Biegezustands) in Abhängigkeit der Stützweite und Plattenbreite bestimmt werden.

## 6.5.3 Untersuchung für Zweifeldträgersysteme

### 6.5.3.1 Grundsätzliches

Für die Untersuchung der Zweifeldträgersysteme werden die in Abschnitt 6.5.2 ermittelten maßgebenden Einflussfaktoren variiert:

- Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$
- Betondruckfestigkeit  $f_c$
- Baustahlprofil / Querschnittsfläche  $A_a$
- Plattendicke des Betongurts  $h_c$

- Fließgrenze des Baustahls  $f_y$
- Bewehrungsgehalt (obere Lage)  $a_{s,o}$

Die hierbei untersuchten Eingabeparameter orientieren sich hierbei an den Abmessungen der zweifeldrigen Versuchsträger.

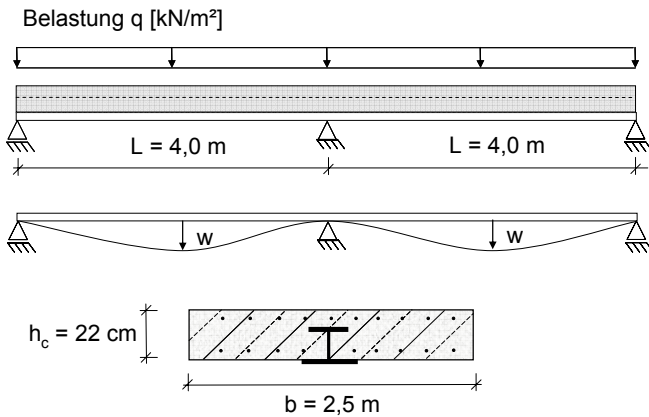


Abbildung 6.45: Basis-Zweifeldträger für Parameteruntersuchung

### 6.5.3.2 Betonzugfestigkeit $f_{ct}$

Wie auch bei den Einfeldträgern kann durch die Variation der Betonzugfestigkeit das Rissmoment und damit die Verformung in Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit verbessert werden. Für die Gesamttragfähigkeit spielt diese aber keine Rolle, da die Querschnitte im Bruchzustand weitestgehend gerissen sind und daher der Biegetraganteil des Betongurtes vernachlässigbar wird (Abbildung 6.46). Die Last-Verformungskurven nähern sich somit im Traglastzustand wieder einander an, während sie vor allem im Bereich des Rissmoments die größten Verformungsdifferenzen aufweisen.

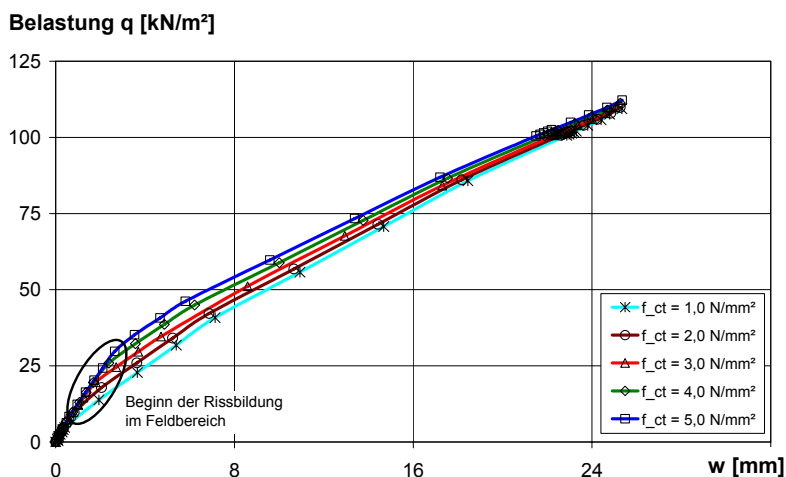


Abbildung 6.46: Einfluss Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  - Zweifeldträger

### 6.5.3.3 Betondruckfestigkeit $f_c$

Die Betondruckfestigkeit erhöht die Traglast, da insgesamt höhere Druckkräfte im Querschnitt aufgebaut werden können, wodurch sich das Kräftepaar und damit das Bruchmoment steigern lassen (Abbildung 6.47). Die Betondruckfestigkeit besitzt im Gebrauchslastzustand bei sehr geringen Lasten keinen Einfluss und die Verformungen sind identisch. Mit steigender Belastung sind Verformungsdifferenzen der untersuchten Träger festzustellen, die stetig zunehmen. Rechnerisch versagen die Träger infolge Biegedruckversagen des Betonuntergurtes im Stützbereich. Ein ausgeprägtes Fließverhalten der Träger ist nicht vorhanden.

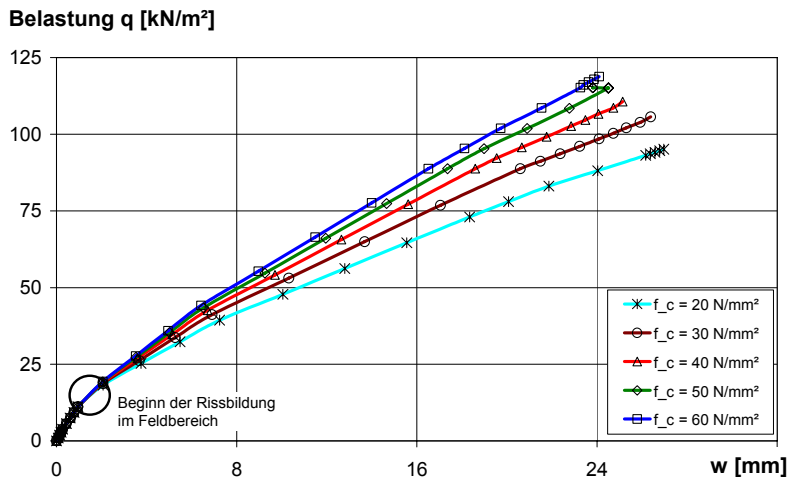


Abbildung 6.47: Einfluss Betondruckfestigkeit  $f_c$  - Zweifeldträger

### 6.5.3.4 Querschnittsfläche des Baustahlprofils $A_a$

Der Vergleich mit unterschiedlichen Baustahlprofilen zeigt ein ähnliches Ergebnis wie bei den Einfeldträgern. Der Einfluss auf die Verformung nimmt linear mit der Belastung zu. Dies hängt mit der erhöhten Stahlzugkraft im Feldbereich und Stahldruckkraft im Druckbereich zusammen. Die Verformung im Gebrauchslastzustand kann durch die Wahl des Baustahlprofils ebenso wie mit der Betongurthöhe stark beeinflusst werden, wie die nachfolgende Abbildung 6.48 zeigt.

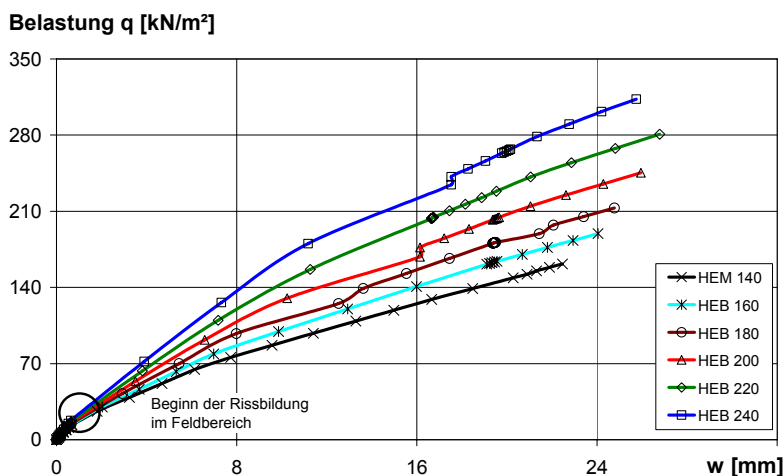


Abbildung 6.48: Einfluss der Baustahlquerschnitts  $A_a$  - Zweifeldträger

Ein steiferes Baustahlprofil erhöht die Stützmomentenwirkung über dem Mittelaufleger, so dass dadurch die Trägerverformung in Feldmitte reduziert werden kann.

#### 6.5.3.5 Betonplattendicke $h_c$

Durch die steigende Betonplattendicke wird das Trägheitsmoment des Querschnitts erhöht, was sich durch das steigende Rissmoment widerspiegelt (Abbildung 6.49). Ebenso wirkt es sich positiv auf den Traglastzustand aus, da der Hebelarm des inneren Kräftepaars anwächst und auch so das Bruchmoment gesteigert werden kann. Für die Verformung im Gebrauchszustand besitzt die Variation der Plattendicke einen maßgebenden Einfluss.

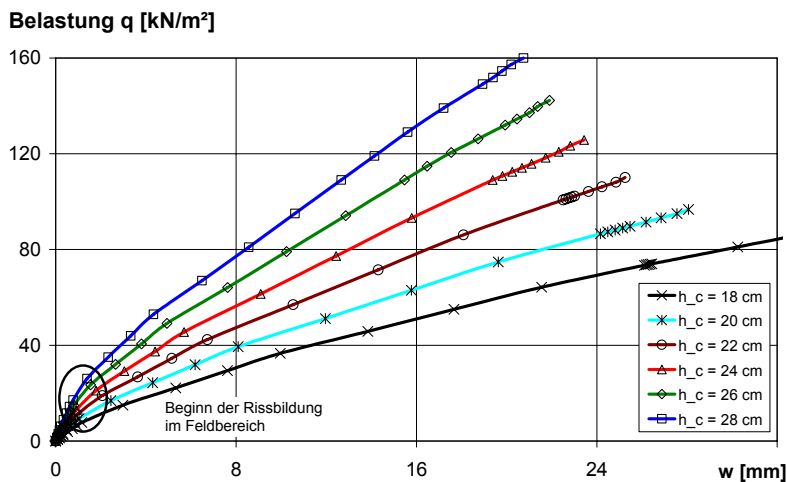
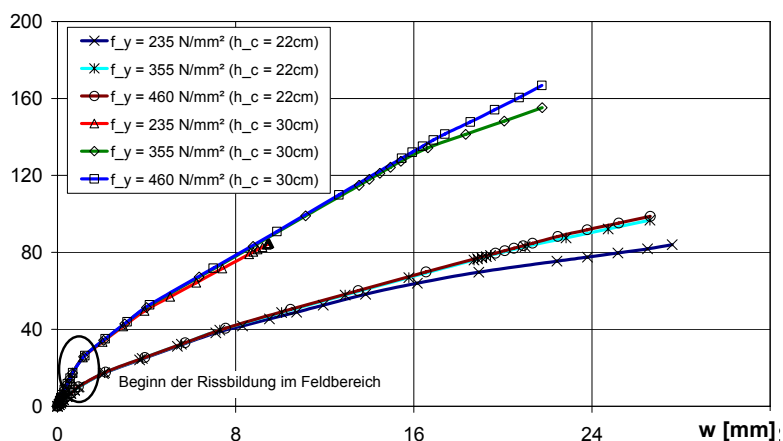


Abbildung 6.49: Einfluss Betonplattendicke  $h_c$  - Zweifeldträger

#### 6.5.3.6 Fließgrenze des Baustahls $f_y$

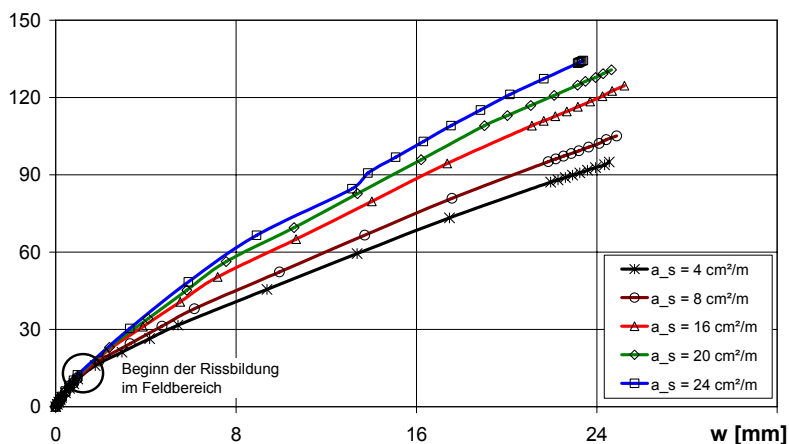
Die Berechnung wird für die Stahlgüten S235, S355 und S460 durchgeführt. Die Plattendicke des Betongurts wird hierbei jeweils zwischen 22 cm und 30 cm variiert, siehe Abbildung 6.50.

Es zeigt sich, dass im Bereich der Gebrauchstauglichkeit keine nennenswerten Unterschiede auftreten. Der Grund hierfür ist, dass der Baustahl bei niedrigen Lasten (Gebrauchslasten) den Fließbereich nicht erreicht. Erst bei höheren Lasten und Beginn des Fließens des Baustahls sind Unterschiede bei der Verformung und maximalen Tragfähigkeit feststellbar. Je höher die Stahlgüte gewählt wird, desto größer ist auch die Traglast. Ein qualitativer Unterschied zwischen den verschiedenen Betonplattendicken ist dahingehend zu erkennen, dass die Streckgrenze beim kleineren Betongurt einen etwas größeren Einfluss hat.

Belastung  $q$  [kN/m<sup>2</sup>]

Abbildung 6.50: Einfluss der Fließgrenze des Baustahlprofils  $f_y$  in Abhängigkeit der Plattendicke  $h_c$  - Zweifeldträger

### 6.5.3.7 Bewehrungsgehalt $a_{s0}$ – obere Lage

Die in die obere Lage eingelegte Bewehrung wirkt sich erkennbar auf das Last-Verformungsverhalten aus, siehe Abbildung 6.51. Durch einen höheren Bewehrungsgrad steigt die Momententragfähigkeit über der Mittelstütze an. Die Stütze wirkt dadurch steifer und die Verformung im Feldbereich verringert sich. Im unteren Lastbereich, insbesondere im ungerissenen Zustand, sind keine Verformungsunterschiede erkennbar, da die eingelegte Bewehrung das Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts nicht merklich beeinflusst.

Belastung  $q$  [kN/m<sup>2</sup>]

Abbildung 6.51: Einfluss der oberen Bewehrung  $a_{s0}$  - Zweifeldträger

## 6.6 Zusammenfassung

Auf Grundlage des mechanischen Modells für die Momenten-Krümmungs-Beziehung für Querschnitte wurde in Excel (VBA-basiert) ein Modul entwickelt, das die Möglichkeit bietet, das Trag- und Verformungsverhalten der Slim-Floor Träger zu berechnen. Durch die Eingabe von Materialkenn- und Geometriewerten ist es möglich für beliebige Querschnitte die Verformung infolge einer äußeren Last zu berechnen. Hierbei werden auf die Werte für die elastische mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands nach Abschnitt 4.5 zurückgegriffen und entsprechend die Verbundquerschnittswerte bestimmt.

Das analytische Modell kann anhand der eigenen wie auch fremd durchgeführten Versuche verifiziert werden. Das Modell bildet daher nun gleichzeitig die Basis für eine umfangreiche Parameteruntersuchung, bei der der experimentelle Anwendungsbereich vergrößert und die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Verformungs- und Tragverhalten bestimmt werden können. Es zeigt sich hierbei, dass durch die Erhöhung der Trägersteifigkeit, z.B. infolge der eingelegten Stützbewehrung, der Plattendicke sowie des verwendeten Baustahlprofils, die Trägerverformung in Feldmitte reduziert werden kann.

Mittels des analytischen Modells kann nun das nichtlineare Trag- und Verformungsverhalten der Slim-Floor Träger nachgebildet werden.

## 7 Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite

### 7.1 Einführung

Die äußeren Bereiche des Betongurtes entziehen sich aufgrund der Schubweichheit des Betons der Lastabtragung. Dies wird bei der Spannungsberechnung durch die mittragende Breite berücksichtigt. Hinzu kommt, dass sich auch in Trägerlängsrichtung die spannungsbezogene mittragende Breite verändert, so nimmt sie in Feldmitte einen maximalen Wert an und verjüngt sich zu den Auflagern hin. Da diese Änderung für die Planungspraxis einen erheblichen rechnerischen Aufwand bedeutet, ist man bestrebt, die Berechnung der mittragenden Breite zu vereinfachen und über die Trägerlängsrichtung konstant anzunehmen.

Aus diesem Grund wird von Rieg [Kuhlmann, Rieg 2004a] und [Rieg 2006] für niedrige Verbundträger erstmals der Begriff der „verformungsbezogenen mittragenden Breite“ eingeführt. Die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  wird hierbei über die gesamte Trägerlänge als konstant angenommen. Da diese mittragende Breite aus der Übereinstimmung der Verformungen hergeleitet wird, kann sie jedoch nur für die Berechnung von Verformungen verwendet und nicht für die Bestimmung von Spannungen im Querschnitt.

Die zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  durchgeführten Untersuchungen werden in diesem Kapitel beschrieben. Dabei wird besonders auf das spezielle Trag- und Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern hingewiesen und die wesentlichen Einflüsse auf die mittragende Breite dargestellt.

Grundlage für die Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite ist das in Abschnitt 6.2 vorgestellte analytische Berechnungsverfahren, im Rahmen dessen eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt wird und die maßgebenden Einflussfaktoren quantifiziert werden. Im ersten Schritt gilt es, dies für Einfeldträgersysteme durchzuführen, im Anschluss daran wird das Modell auf Zweifeldträger erweitert.

Das Ziel der Untersuchung ist es, einen anwenderfreundlichen Berechnungsansatz zu entwickeln, der eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung von Slim-Floor Trägern ermöglicht.

Für die Berechnung und Ermittlung der verformungsbezogenen mittragenden Breite für niedrige Verbundträger wird auf die Arbeit von [Rieg 2006] verwiesen. Rieg entwickelt hierbei einen Berechnungsansatz für niedrige Verbundträger als Einfeldträgersysteme.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird nun der Ansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  für Slim-Floor Träger abgeleitet, jeweils für den Einfeldträger wie auch den Zweifeldträger. Für Slim-Floor Träger liegen keine Arbeiten und Versuche vor, die eine verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  unter Berücksichtigung der Biegetragwirkung und der Rissbildung des Betongurtes (sowohl für Einfeld- und Zweifeldträger) untersuchen.

### 7.2 Ablauf zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$

#### 7.2.1 Grundsätzliches

Zur Berechnung der Durchbiegung von Slim-Floor Trägern, die bereits unter Gebrauchslasten reißen und damit in Abhängigkeit der Einwirkung eine veränderte Steifigkeit aufweisen, soll eine rechnerische Breite des Betongurtes ermittelt werden, der sogenannten verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  die als ein ideeller Wert angenommen wird [Rieg, Hauf 2006].

### 7.2.2 Verfahren zur Bestimmung am Einfeldträger

Die Berechnung findet vereinfacht an einem Träger mit konstanter Breite und konstantem Querschnitt statt, der im Folgenden mit Ersatzbalken bezeichnet wird. Die Breite des Betongurts des Ersatzbalkens wird dabei so groß gewählt, dass bei gleicher Belastung  $q$  der Wert der rechnerischen Verformung  $w$  des Ersatzbalkens der Verformung  $f$  des realen dreidimensionalen Systems (siehe Abbildung 7.1) entspricht. Diese ermittelte Breite wird als verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  definiert.

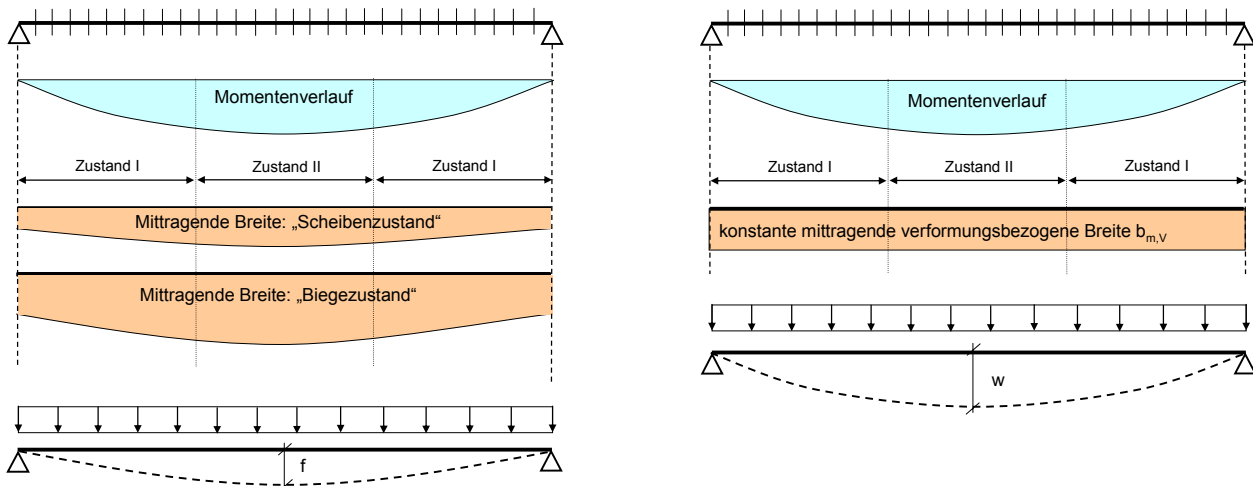


Abbildung 7.1: Verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$

Die tatsächliche Durchbiegung des Slim-Floor Trägers wird hierbei mittels des analytischen Modells ermittelt (siehe Abschnitt 6.2), das wiederum an den Versuchsträgern verifiziert wurde. Die so gefundene Breite des Ersatzbalkens wird als verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  definiert. Zu beachten ist, dass eine direkte Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  dabei aufgrund des nichtlinearen Material- und Tragverhaltens von Slim-Floor Trägern in der Regel nicht möglich ist. Durch das stetige Aufreißen des Betonquerschnitts in Abhängigkeit der Belastung und dem damit verbundenen nichtlinearen Verformungsverhalten, muss die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  stetig angepasst werden.

In Abbildung 7.2 ist systematisch der Ablauf zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  dargestellt. Da dieser Wert kein fester Systemwert darstellt, der nur aus der Geometrie und den Materialkennwerten berechnet werden kann, sondern hauptsächlich von der Belastung abhängt, wird dieser über die Vergleichsrechnung bestimmt.

Während auf der linken Seite des Diagramms der Ablauf des analytischen Berechnungsverfahrens dargestellt ist, wird auf der rechten Seite mit einem konstanten Wert für die mittragende Breite die nichtlineare Berechnung durchgeführt.

Die Durchbiegung des Trägers wird, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, mittels der Momenten-Krümmungs-Methode berechnet. Der Unterschied liegt darin, dass für das genaue Berechnungsmodell der Träger eine über die Länge hinweg veränderliche mittragende Breite für den Scheiben- und Biegezustand besitzt und so die Momenten-Krümmungs-Beziehung für jedes Element berechnet werden muss. Durch die Integration der Krümmungen erhält man die Durchbiegung  $f$ . Für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  muss nur eine Momenten-Krümmungs-Beziehung abgeleitet werden, da die Breite über die gesamte Trägelänge als konstant angenommen wird. Die Integration der Krümmungen liefert auch hier die Verformung  $w$  des Trägers, die mit der analy-



tisch bestimmten Durchbiegung  $w$  verglichen und ggfs. mit einer neuen veränderten mittragenden Breite berechnet wird.

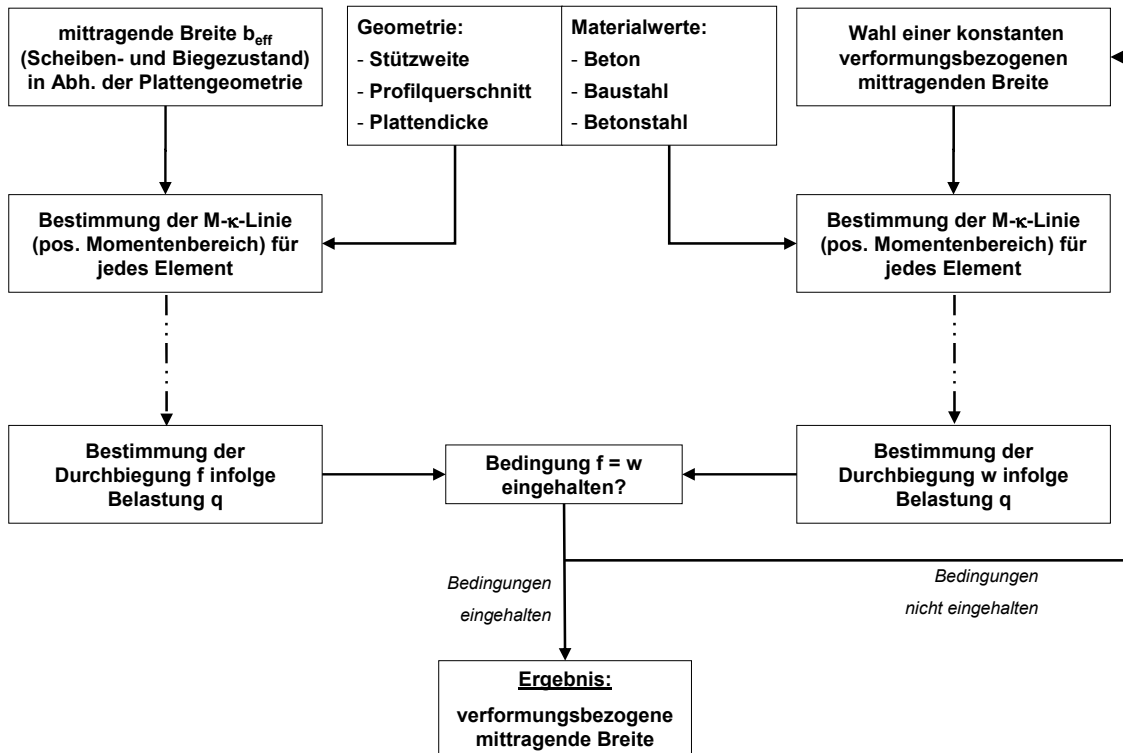


Abbildung 7.2: Systemskizze zur Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite

### 7.2.3 Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,v}$ für Einfeldträger

Da mit zunehmender Belastung die Steifigkeit des Slim-Floor Trägers abnimmt, reduziert sich auch der Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite, siehe hierzu das charakteristische  $b_{m,v}$ - $M/M_u$ -Diagramm in Abbildung 7.3.

Hierbei wird die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  mit dem Ausnutzungsgrad (Belastungsgrad) des einwirkenden Momentes zum Bruchmoment  $M_u$  in Relation gesetzt. Da bis zur Rissbildung (Belastungsgrad  $M_{Riss}/M_u$ ) von einem linear-elastischen Verhalten ausgegangen wird, verläuft die verformungsbezogene mittragende Breite konstant. Die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  ist gleich dem elastischen Wert  $b_{m,v,0}$ , der beide Einflüsse des Scheiben- und Biegezustands berücksichtigt.

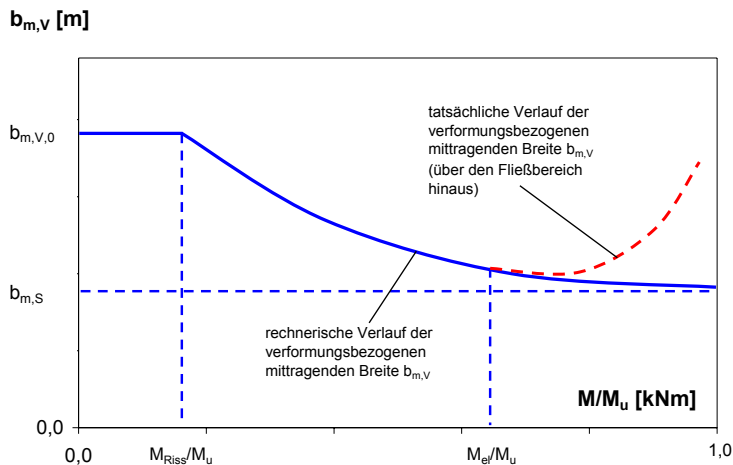


Abbildung 7.3: Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite [Rieg 2006]

Mit zunehmender Belastung reißt der Querschnitt auf der Betonunterseite in Feldmitte auf und der Verbundquerschnitt verliert damit an Steifigkeit. Dies zeigt sich durch eine überproportionale Zunahme der Durchbiegung, die sich rechnerisch durch eine abnehmende verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  zeigt. Dies liegt daran, dass die Biegetragwirkung und entsprechend die zugehörige mittragende Breite des Biegezustand  $b_{m,B}$ , die weitaus größer ist als die zum Scheibenzustand gehörende Breite  $b_{m,S}$ , abnimmt.

Bei weiterer Belastung reißt der Querschnitt weiter auf und das Baustahlprofil erreicht auf der Untergurtseite die Fließgrenze. Ab diesem Ausnutzungsgrad ( $M_{el}/M_u$ ) tritt eine Umkehr ein. Mit zunehmender Belastung wird die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Betons flacher und dadurch wird die Querverteilung der Spannungen völliger als die der Dehnungen, was schließlich zu einer Vergrößerung der mittragenden Breite führt.

Der Träger verformt sich oberhalb der Fließgrenze sehr stark, gleichzeitig muss unter der Bedingung, dass das Kräftegleichgewicht im Träger vorherrschen muss, der Betongurt, der sich aufgrund der starken Krümmung einschnürt, eine entsprechende Betongurtbreite aufweisen. Aus diesem Grund nimmt die rechnerische Breite wieder stark zu. Rechnerisch ergeben sich hierbei Werte für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$ , die z. T. einen vielfachen Wert der tatsächlichen geometrischen Breite annehmen.

Dieser Anstieg wird bei der weiteren Berechnung vereinfacht vernachlässigt. Berechnungen mit dem analytischen Programm zur Rückrechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite zeigten den Wiederanstieg im Bereich einer Belastung (Ausnutzung) des Slim-Floor Trägers von mehr als 80 % Prozent. Da dies den Bereich der Gebrauchstauglichkeit übersteigt, also außerhalb des baupraktischen Bereichs der Durchbiegung liegt, kann auf eine gesonderte Berücksichtigung des Anstiegs verzichtet werden. Unter Gebrauchslasten erreicht der Stahlträger für gewöhnlich nicht den Fließbereich, sondern bleibt im linear-elastischen Materialbereich.

Idealisiert nähert sich die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  dem Wert des reinen Scheibenzustands  $b_{m,S}$  an. Es wird für den Grenzfall der Tragfähigkeit angenommen, dass der Betongurt keine Biegesteifigkeit aufgrund der Rissbildung mehr besitzt. Der untere Grenzwert  $b_{m,S}$  ist hierbei vom Seitenverhältnis  $b/L$  und der Belastungsart abhängig. Der Querschnitt und die Belastungshöhe spielen hierbei eine Rolle.

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- $\kappa$ -Linie, siehe Abschnitt 6.2.3.

Da bei normal hohen Verbundträgern der Biegetraganteil des Betongurtes nur eine untergeordnete Rolle bzw. keine Rolle spielt, ist der Verlauf der verformungsbezogenen Breite  $b_{m,V}$  weniger stark ausgeprägt, d.h. der Abstand zwischen  $b_{m,V,0}$  und  $b_{m,S}$  ist entsprechend gering. Bei niedrigen Verbundträgern [Kuhlmann, Rieg 2004a] wird dieser entsprechend größer und bei den hier untersuchten Slim-Floor Trägern ist er noch stärker ausgeprägt.

### 7.3 Parameterstudie zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ bei Einfeldträgern

#### 7.3.1 Grundsätzliches

Das in Abschnitt 6 vorgestellte analytische Modell beruht auf mechanischen Gesetzen unter Berücksichtigung des Materialverhaltens und der vorliegenden Geometrie. Anhand der durchgeführten Versuche wurde das analytische Modell verifiziert und soll nun als Grundlage für eine Parameteranalyse herangezogen werden.

Ziel ist es, den in der beschränkten Anzahl der Versuche untersuchten Parameterbereich zu erweitern und weitere Einflussfaktoren zu identifizieren. Die rechnerischen Untersuchungen spielen sich jedoch alle innerhalb des baupraktischen Bereichs ab und verwenden hierbei bauübliche Werkstoffe, Abmessungen und Querschnitte.

Im nachfolgenden Abschnitt wird die durchgeführte Parameteranalyse für den Einfeldträgerbereich dargestellt und ausgewertet.

#### 7.3.2 Bisherige Untersuchung zur verformungsbezogenen mittragenden Breite für Hutprofile

Im Rahmen der Versuche an Einfeldträgern mit Hutprofilen [Kuhlmann et al 2006b] wurde eine erste Parameteruntersuchung durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Im Mittelpunkt der Untersuchung standen hierbei die getesteten Hutprofile (Abbildung 7.4), mittels derer eine Berechnungsformel für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  abgeleitet wurde.

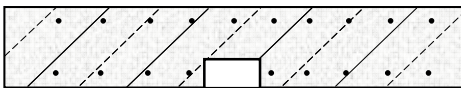


Abbildung 7.4: Slim-Floor Querschnitt mit Hutprofil (UPE-Profil)

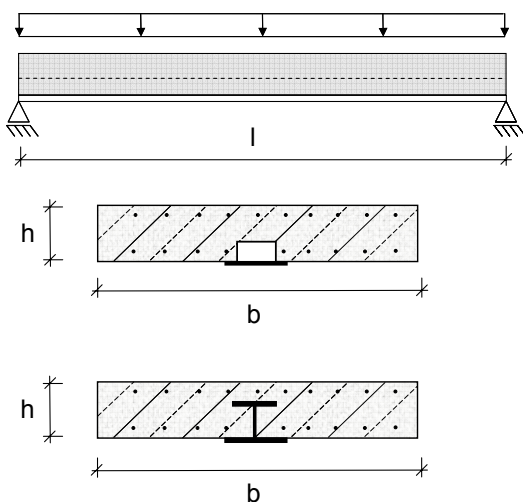
Da bei diesem Berechnungsansatz die Trägersteifigkeit des Baustahlprofils unberücksichtigt bleibt, schränkt dies den Einsatz entsprechend ein, so dass nun in einer weitergehenden Parameteranalyse der Einfluss des Baustahlprofils genauer untersucht und der bestehende Ansatz erweitert wird. Eine ausführliche Beschreibung des eingeschränkten Berechnungsansatzes ist im Bericht für das Forschungsvorhaben „Effiziente Dimensionierung niedriger Verbundträger“ [Kuhlmann et al 2006b] zu finden.

### 7.3.3 Parameterstudie zur verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$

Ziel der Parameterstudie ist es, den im Versuch begrenzten Untersuchungsbereich zu erweitern. Mit Hilfe des analytischen und an den Versuchen verifizierten Modells werden die folgenden Parameter variiert, siehe hierzu auch Abbildung 7.5:

- Stützweite  $L$  der Slim-Floor Träger
- Plattendicke  $h_c$
- Plattenbreite  $b$
- Baustahlprofil (Hutprofil, SFB, IFB, HEA, HEB. Und weitere)
- Materialkennwerte ( $f_c$ ,  $f_{ct}$ ,  $f_y$ )
- Bewehrungsgehalt in der oberen und untere Lage

Anhand der aufgeführten möglichen Parameter und der sich daraus ergebenden Kombination wurden ca. 3.000 Trägerberechnungen durchgeführt und untersucht. Für jeden Träger wurden wiederum zwanzig diskrete Belastungspunkte berechnet, beginnend von einer minimalen Last bis hin zur Bruchlast. Die in der nachfolgenden Abbildung in Klammern angegebenen Werte stellen hierbei den für die Untersuchung gewählten Basisträger dar.



Gewählter Parameterbereich:

Stützweite:	$L = 4,0 - 9,0 \text{ m}$ (6,0 m)
Plattendicke:	$h_c = 16 - 34 \text{ cm}$ (26 cm)
Plattenbreite:	$b = 2,0 - 8,0 \text{ m}$ (6,0 m)
Stahlprofil:	UPE-, IFB-, SFB-Profile (UPE240)
Betondruckfestigkeit:	$f_c = 20 - 50 \text{ N/mm}^2$ (30 N/mm <sup>2</sup> )
Betonzugfestigkeit:	$f_{ct} = 1,0 - 5,5 \text{ N/mm}^2$ (2,9 N/mm <sup>2</sup> )
Stahlzugfestigkeit:	$f_y = 235 - 460 \text{ N/mm}^2$ (355 N/mm <sup>2</sup> )
Bewehrung oben:	$a_{s,o} = 0 - 18 \text{ cm}^2/\text{m}$ (5,2 cm <sup>2</sup> /m)
Bewehrung unten:	$a_{s,u} = 0 - 18 \text{ cm}^2/\text{m}$ (5,2 cm <sup>2</sup> /m)

Werte des Basisträgers in Klammer

Abbildung 7.5: Parameteruntersuchung zur verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$

Die Berechnung wurde mit dem in Abschnitt 6.2.7 beschriebenen Excel-Programm durchgeführt, das gleichzeitig die Durchbiegung unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands der mittragenden Breite berechnet, aber ebenfalls auch mittels der mittragenden Breite nach [DIN 18800-5]. Gleichzeitig wurde für jede Belastung eines jeden Trägers die zugehörige verformungsbezogene mittragende Breite bestimmt, so dass die mit  $b_{m,v}$  bestimmte Durchbiegung gleich der Durchbiegung des analytischen Modells unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustand ist.

Bei der Auswertung der Berechnungsergebnisse konnten hierbei folgende Einflussparameter identifiziert werden:

- Ausnutzungsgrad: einwirkende Belastung zur maximal möglichen Belastung
- Materialfestigkeiten: Betonzugfestigkeit, Streckgrenze des Baustahls
- Geometrie: Steifigkeitsverteilung zwischen Betonplatte und Baustahlprofil

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

#### 7.3.4.1 Grundsätzliches

Nachfolgend werden die einzelnen variierten Parameter und deren Einfluss auf die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  aufgezeigt. Grundlage hierfür ist die Auswertung des analytischen Modells und die Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite, die aus den Verformungen des analytischen Modells unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands rückgerechnet wird.

Die gezeigten Ergebnisse beruhen hierbei auf der Beispielrechnung eines Trägers (sog. „Basis-konfiguration“) mit einer Stützweite von 6,0 m, einer Plattendicke von 26 cm und einer Betongurtbreite von ebenfalls 6,0 m. Ausgehend von dieser Konfiguration wird jeweils nur ein Parameter variiert, um den Einfluss bestimmen zu können.

Generell ist zu beachten, dass die Diagramme zur verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  für den Ausnutzungsgrad immer in Bezug auf das Bruchmoment berechnet werden, so dass alle hier dargestellten Trägerkurven relativ zu sehen sind. Der absolute Unterschied im Traglastzustand bzw. zum Bruchmoment ist anhand der Momenten-Verformungskurve zu erkennen.

Der bei manchen Trägern zu beobachtende Anstieg (siehe z. B. Abbildung 7.6 ff.) der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  nach Erreichen des Rissmoments lässt sich wie folgt erklären:

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  $b_{m,v}$  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  $b_{m,v}$  des Ersatzbalkens vergrößert werden.

#### 7.3.4.2 Ausnutzungsgrad des Verbundträgers $M/M_u$

In der Abbildung 7.6 ist der lastabhängige Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  des berechneten Basisträgers (vgl. Abbildung 7.5) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ab dem Rissmoment (Punkt  $M_{Riss}/M_u$ ) die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  abnimmt und mit zunehmender Belastung auf den Scheibenzustand hin ausläuft. Zur Bestimmung der mittragenden Breite des Scheibenzustands wird auf Abschnitt 4.5.2 verwiesen. Vor Erreichen des Rissmoments  $M_{Riss}$  verläuft die mittragende Breite aufgrund des linear-elastischen Verhaltens des Betons konstant. Durch das kontinuierliche Aufreißen des Betongurtes geht jedoch die Biegesteifigkeit der Betonplatte verloren, so dass der Wert für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  stetig abnimmt.

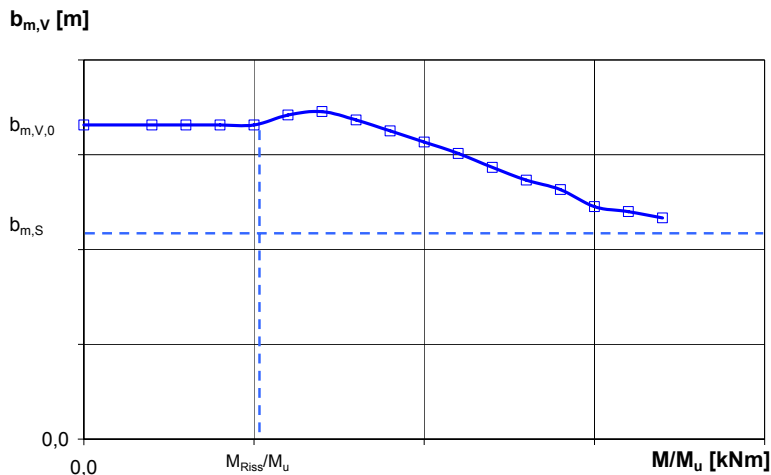


Abbildung 7.6: Einfluss des Ausnutzungsgrades  $M/M_u$  auf die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  für Basisträger nach Abbildung 7.5

Anzumerken ist, dass für die dargestellten Kurven immer das Verhältnis des einwirkenden Momentes zum Gesamtmoment des jeweiligen Trägers dargestellt wird. Die Absolutwerte der einzelnen untersuchten Träger können daher im Vergleich zueinander abweichen, vgl. hierzu Abbildung 7.16.

In Abbildung 7.7 ist die Last-Verformungskurve des Basisträgers dargestellt. Auch hier sind die verschiedenen berechneten Laststufen zu erkennen. Während der Träger noch ungerissen ist, verläuft die Last-Verformungs-Kurve konstant steil. Durch das Reißen verliert der Träger an Steifigkeit, so dass die Verformung mit steigender Belastung stärker zunimmt. Die Kurve verläuft weniger steil. Mit dem Beginn des Fließens (zu beachten ist, dass der Fließbereich außerhalb des Bereiches der Gebrauchslasten liegt), flacht die Kurve noch weiter ab und die Trägerverformung nimmt stark zu.

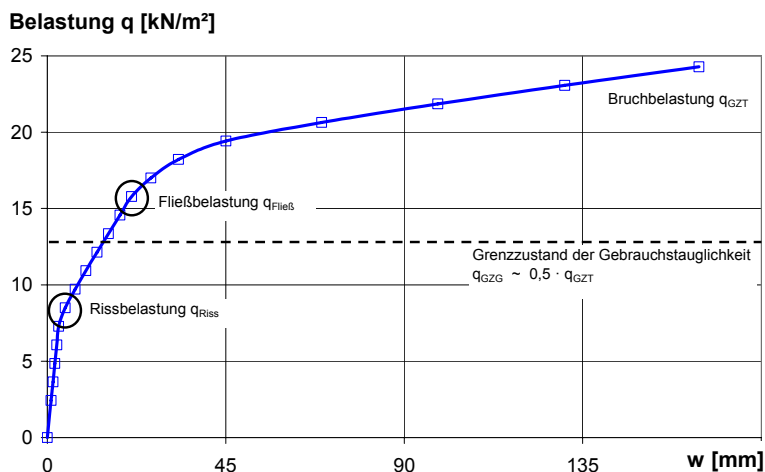


Abbildung 7.7: Last-Verformungskurve des Basisträgers nach Abbildung 7.5

### 7.3.4.3 Betonzugfestigkeit $f_{ct}$

Die Betonzugfestigkeit besitzt (neben den Querschnittswerten) einen erheblichen Einfluss auf das Rissmoment des Querschnitts. In der nachfolgenden Abbildung 7.8 ist der Vergleich fünf verschiedener Betonzugfestigkeiten dargestellt, beginnend mit  $1,0 \text{ N/mm}^2$  bis hin zu  $3,0 \text{ N/mm}^2$ . Mit zunehmender Zugfestigkeit steigt das Rissmoment des Trägerquerschnitts an, so dass der elastische Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,0}$  länger konstant bleibt und ein Verlust an Steifigkeit erst verspätet eintritt. Da die Zugfestigkeit auf das Bruchmoment  $M_u$  keinen Einfluss besitzt, führt es dazu, dass der Verlauf von  $b_{m,V}$  für die berechneten Träger mit einer höheren Zugfestigkeit steiler verläuft. Weiterhin ist zu anmerken, dass durch die geringere Zugfestigkeit des Betons größere Bereiche des Trägers aufreißen, wodurch der Träger an Steifigkeit verliert, die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  nimmt dadurch im Vergleich insgesamt stärker ab.

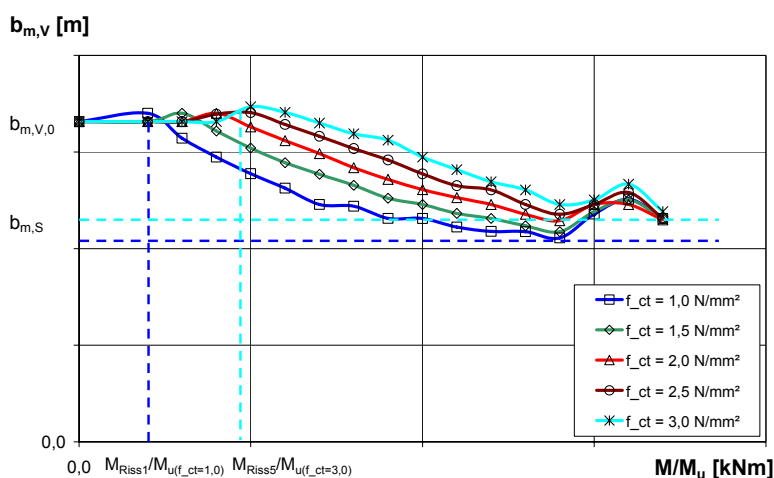
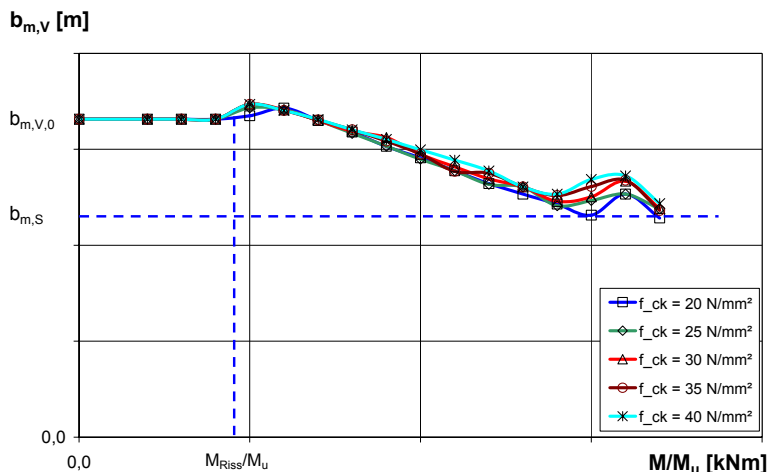


Abbildung 7.8: Einfluss der Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  auf  $b_{m,V}$  für den Basisträger

### 7.3.4.4 Druckfestigkeit des Betongurts $f_c$

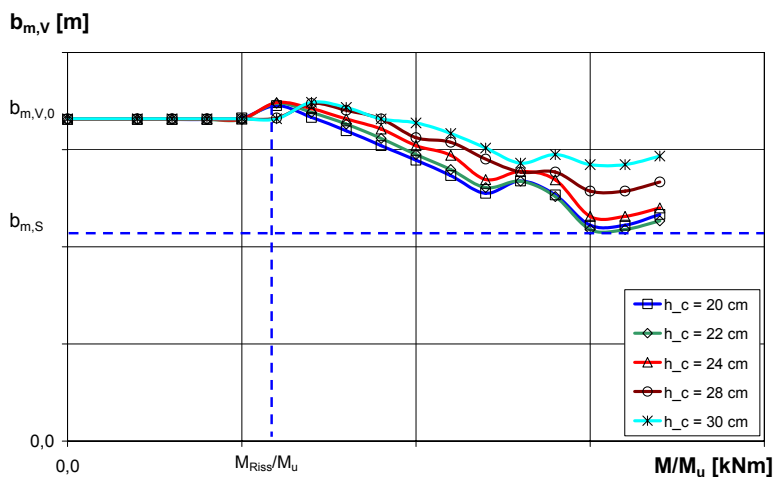
Die Druckfestigkeit  $f_c$  des Betongurts hat nur einen geringen Einfluss auf die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  von Verbundträgern, siehe Abbildung 7.9. Grund hierfür ist, dass die Druckfestigkeit des Betons das Rissverhalten des Verbundträgers nur unwesentlich beeinflusst, so dass alle Kurven für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  sehr ähnliche Verläufe aufzeigen. Einzig bei Erreichen der Traglast zeigen sich leichte Unterschiede, die auf den Einfluss der Druckfestigkeit auf die Traglast zurückzuführen sind.

Die Untersuchung des E-Moduls (Abschnitt 6.5.2.4) zeigte keinen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten, so dass auf die Darstellung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  verzichtet wird.

Abbildung 7.9: Einfluss der Betondruckfestigkeit  $f_c$  auf  $b_{m,V}$  für den Basisträger

#### 7.3.4.5 Plattendicke $h_c$

Das Rissmoment verändert sich in Abhängigkeit der Plattendicke des Verbundträgers. Gleichzeitig aber erhöht sich auch das maximale Biegemoment des Trägers, so dass in der nachfolgenden Abbildung 7.10 die Kurven für den Rissbereich sehr nah beieinander verlaufen. Da das Biegetragmoment im Verhältnis weniger stark ansteigt wie das Rissmoment, ergeben sich für die höheren Querschnitte flachere Kurven für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$ .

Abbildung 7.10: Einfluss der Betonplattendicke  $h_c$  auf  $b_{m,V}$  für den Basisträger

#### 7.3.4.6 Streckgrenze des Baustahls $f_y$

Das Bruchmoment  $M_u$  von Verbundquerschnitten wird maßgebend von der Streckgrenze des Stahlträgers bestimmt. Das Rissmoment  $M_{Riss}$  wird durch die veränderte Streckgrenze nicht beeinflusst (siehe Abbildung 6.39). Durch Erhöhung der Streckgrenze nimmt das Bruchmoment zu und daher 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 Abbil-



dung 7.11. Es ergibt sich automatisch ein kleinerer Bereich mit dem elastischen (ungerissenen) Wert für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$ .

Wie auch für das E-Modul des Betons zeigt sich durch Änderung des E-Moduls des Baustahls keine Änderung beim Trag- und Verformungsverhalten, vgl. hierzu Abbildung 6.40. Auf eine Darstellung der verformungsbezogenen mittragenden Breite wird daher verzichtet.

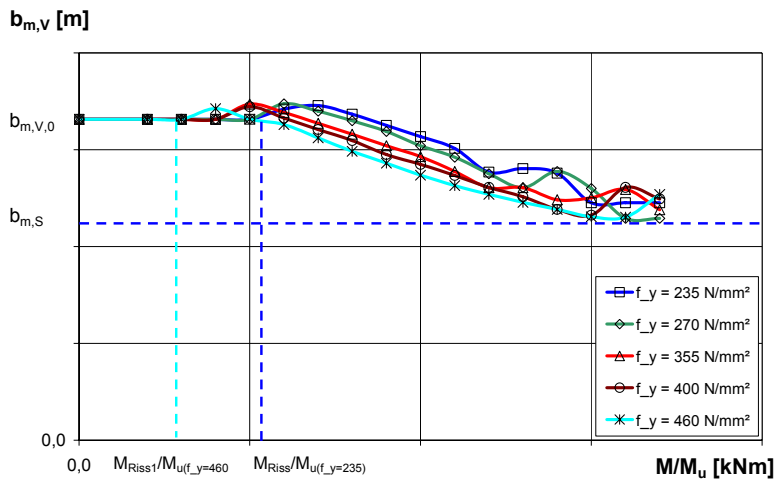
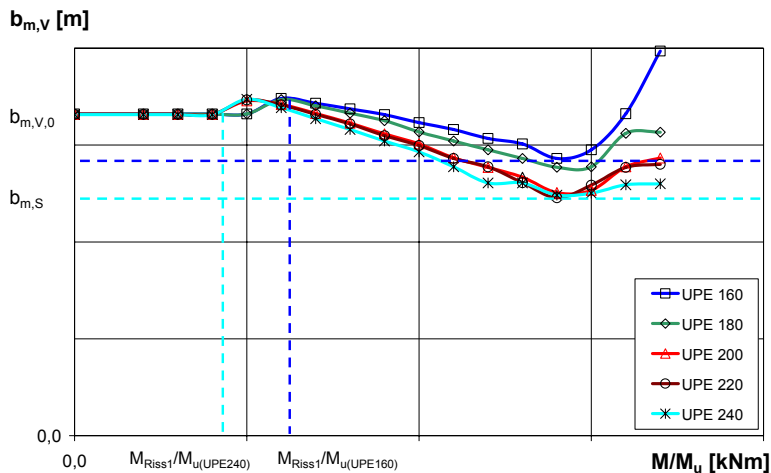


Abbildung 7.11: Einfluss der Fließgrenze des Baustahls  $f_y$  auf  $b_{m,V}$  für den Basisträger

#### 7.3.4.7 Querschnitt des Baustahlträgers $A_a$

Die Querschnittsgröße des Baustahlprofils beeinflusst die Steifigkeitsverteilung im Verbundquerschnitt und somit die verformungsbezogene mittragende 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 mittragende Breite geschwächt. Es ergibt sich eine kleinere verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$ , siehe Abbildung 7.12.

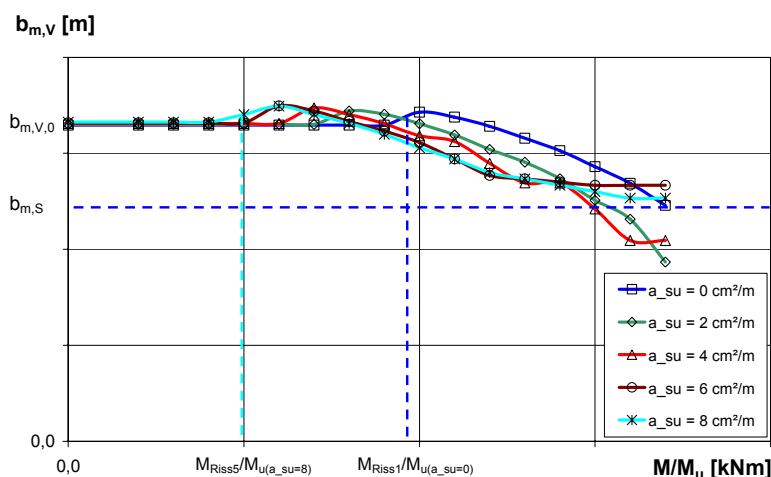
Ein weiterer Grund ist, dass mit kleinerem Stahlquerschnitt des Stahlprofils dessen Querschnittsfläche  $A_a$  und damit auch das Bruchmoment  $M_u$  kleiner wird, während das Rissmoment  $M_{Riss}$  im Vergleich zum Bruchmoment weniger stark beeinflusst wird. Dieser Einfluss ist umso schwächer ausgeprägt, je dicker und größer der Betongurt im Vergleich zum Querschnitt des Stahlträgers ist. Bei niedrigen Verbundträgern, deren Steifigkeit und damit auch deren mittragende Breite überwiegend vom Biegezustand des Betongurts bestimmt werden, ist dieser Effekt im Vergleich zu weiteren Einflüsse deshalb klein.

Abbildung 7.12: Einfluss der Baustahlquerschnitts  $A_a$  auf  $b_{m,V}$  für den Basisträger

#### 7.3.4.8 Untere Bewehrungslage $a_{s,u}$

Der Einfluss der unteren Längsbewehrung  $a_{s,u}$  bei niedrigen Verbundträgern, vgl. Abbildung 6.9, ist entsprechend klein und vernachlässigbar, da der Kräfteanteil der Bewehrung durch die Lage nahe der Spannungsnull-Linie 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 die Tragkraft einen deutlichen Anteil besitzt.

Mit steigendem Längsbewehrungsgehalt steigt die Momententragfähigkeit 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  $b_{m,V}$  bei gleichem Ausnutzungsgrad ab, siehe Abbildung 7.13. Das Verhalten ist vergleichbar mit der Veränderung der Streckgrenze des Baustahls nach Abschnitt 7.3.4.6.

Abbildung 7.13: Einfluss der unteren Bewehrung  $a_{su}$  auf  $b_{m,V}$  für den Basisträger

### 7.3.4.9 Obere Bewehrungslage $a_{s,o}$

Wie die Last-Verformungskurve bereits in Abschnitt 6.5.2.10 zeigt, hat die obere Längsbewehrung einen kleineren, aber dennoch nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf das Traglastverhalten, für die Verformung kann der Einfluss vernachlässigt werden, siehe hierzu Abbildung 7.14. Aus diesem Grund verlaufen die Kurven für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  mit erhöhtem Bewehrungsgehalt flacher als im Vergleich zu den schwach bewehrten Querschnitten.

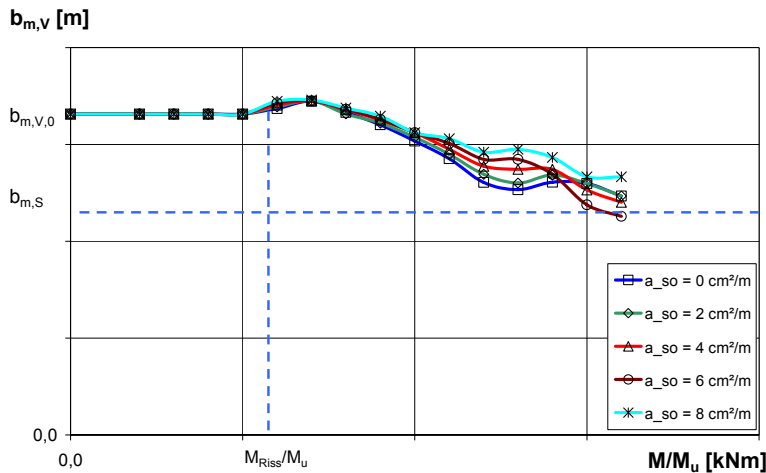


Abbildung 7.14: Einfluss der oberen Bewehrung  $a_{s,o}$  auf  $b_{m,v}$

### 7.3.4.10 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  $b/L$  [Kuhlmann et al 2006b]. 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.

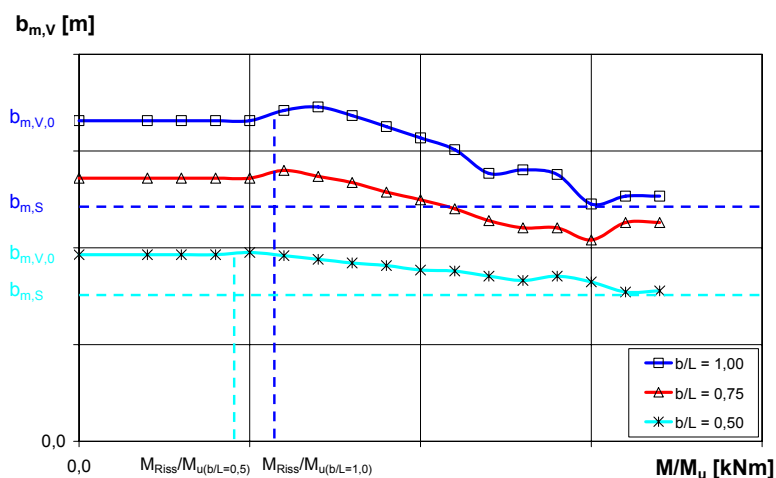
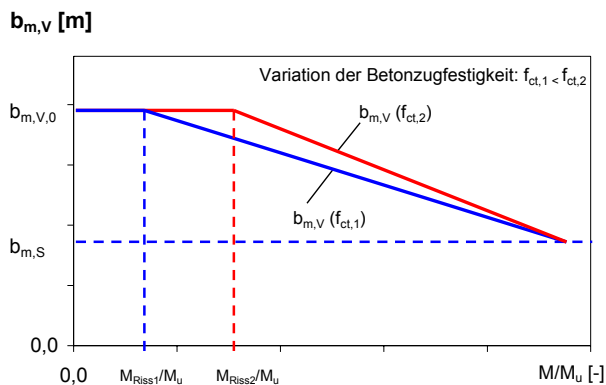
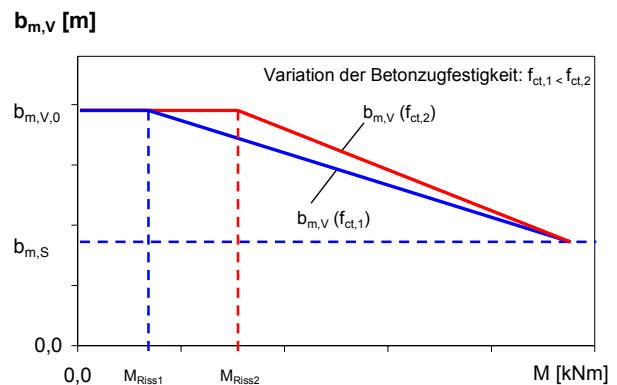
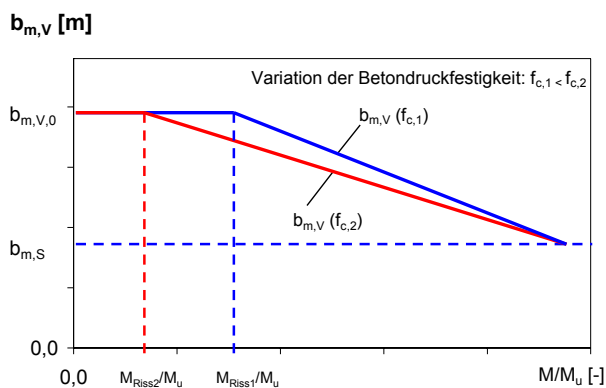
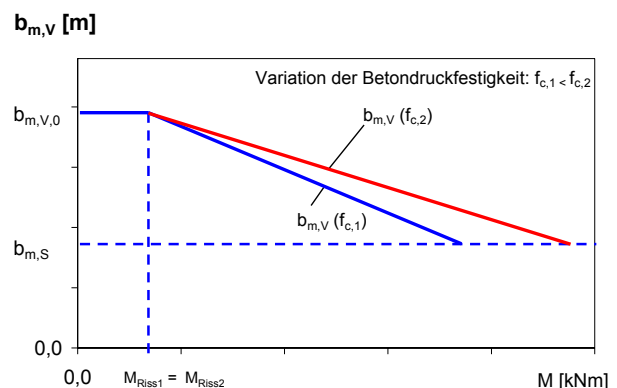
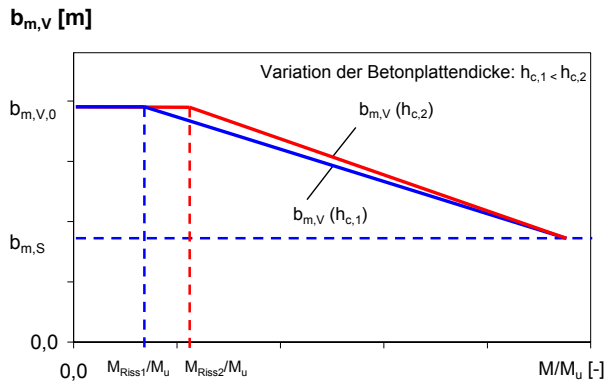


Abbildung 7.15: Einfluss des geometrischen Verhältnis  $b/L$  auf  $b_{m,v}$

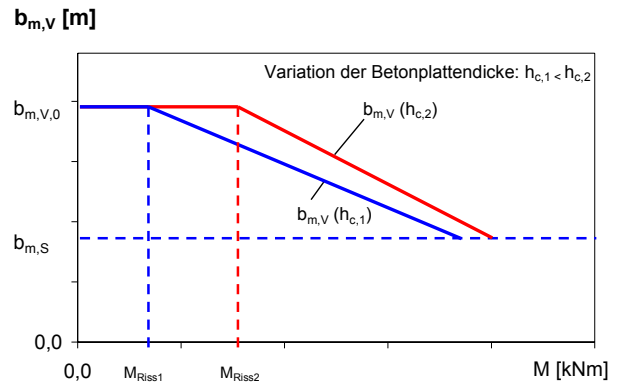
### 7.3.5 Zusammenstellung der Einflussfaktoren auf $b_{m,V}$ für Einfeldträger

Die Berechnungsbeispiele zeigen, dass die untersuchten Parameter jeweils verschiedene Einflüsse auf das Trag- wie auch Verformungsverhalten aufweisen. Ebenso verschieden sind daher auch die Kennlinien für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$ . Die wichtigsten Faktoren sind in der nachfolgenden Abbildung 7.16 nochmals zusammengestellt. Die verformungsbezogene Breite  $b_{m,V}$  wird einmal für die bezogenen Momente  $M/M_u$  (jeweils linke Spalte) und einmal für die absoluten Momente  $M_u$  (jeweils rechte Spalte) schematisch dargestellt.

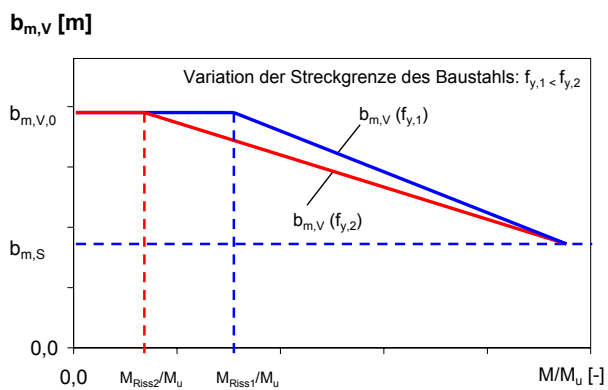
a) Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  - relativb) Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  - absolutc) Betondruckfestigkeit  $f_c$  - relativd) Betondruckfestigkeit  $f_c$  - absolut



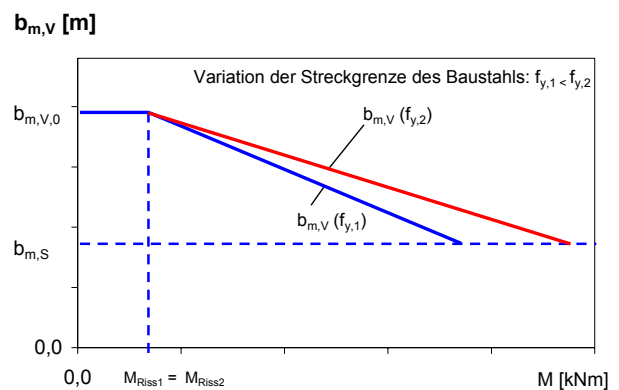
e) Plattendicke  $h_c$  - relativ



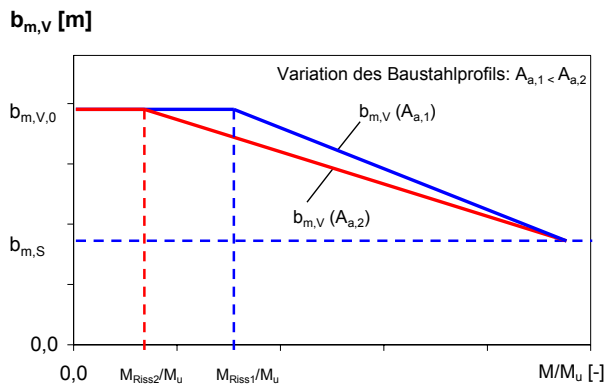
f) Plattendicke  $h_c$  - absolut



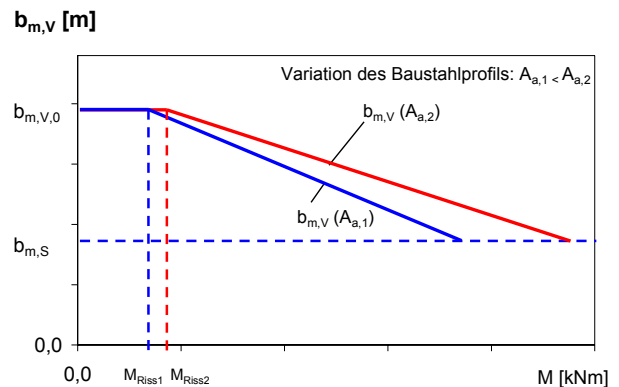
g) Streckgrenze des Baustahls  $f_y$  - relativ



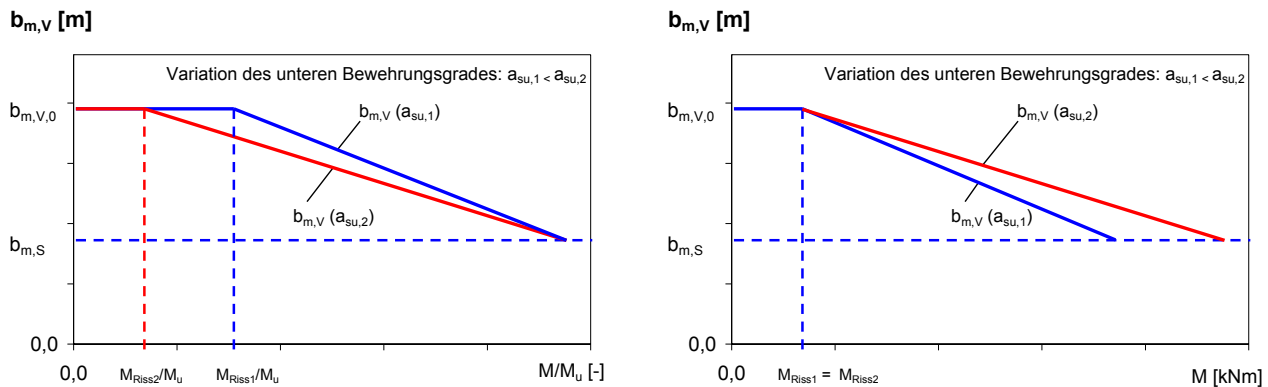
h) Streckgrenze des Baustahls  $f_y$  - absolut



i) Querschnitt des Baustahlträgers  $A_a$  - relativ



j) Querschnitt des Baustahlträgers  $A_a$  - absolut



k) Untere Bewehrungslage  $a_{s,U}$  - relativ

l) Untere Bewehrungslage  $a_{s,U}$  - absolut

Abbildung 7.16: Zusammenstellung der maßgebenden Einflussfaktoren auf  $b_{m,V}$

### 7.3.6 Berechnungsansatz für die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ von Einfeldträgern

#### 7.3.6.1 Grundsätzliches

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten aufgezeigt, werden die Verformungen unter dem Ansatz der [DIN 18800-5] weit überschätzt, was zu einer sehr ineffizienten Bemessung der Querschnitte führt, gerade im Hinblick darauf, dass die Verformungsnachweise im Allgemeinen für Slim-Floor Träger bemessungsbestimmend werden.

Durch die hier durchgeführte Untersuchung soll ein verbesserter Berechnungsansatz für die Verformungsberechnung entwickelt werden, um die Durchbiegung realistischer bestimmen zu können. Da Slim-Floor Träger bereits unter Gebrauchslasten eine ausgeprägte Rissbildung aufweisen, muss diese für eine wirklichkeitsnahe Verformungsberechnung in der Rechnung berücksichtigt werden. Abbildung 7.17 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 Momenten-Krümmungs-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.

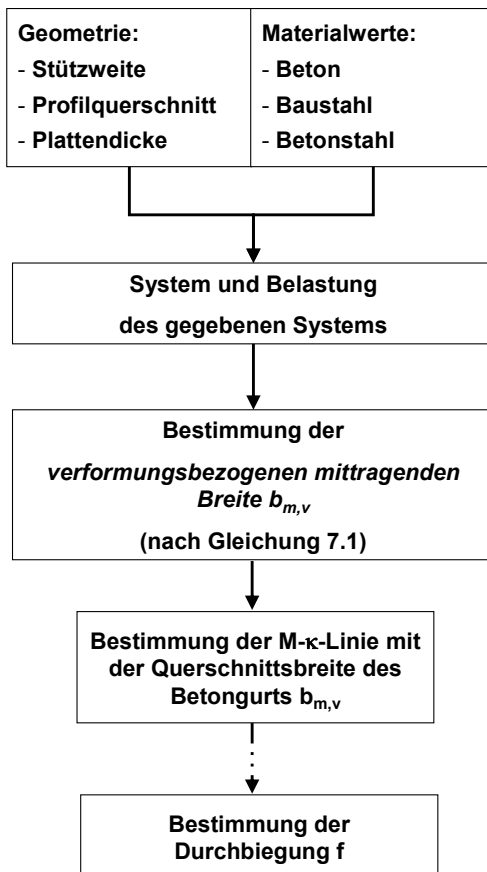


Abbildung 7.17: Ablaufschema zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$  für Einfeldträger

Der Berechnungsansatz wird auf Basis der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Parameterstudie entwickelt. Er unterliegt daher folgenden Einschränkungen, kann jedoch auch bei vergleichbaren Querschnitten und Systemen näherungsweise angewendet werden:

- 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
- Eigenspannungen im Stahlträger haben keinen nennenswerten Einfluss auf das Verformungsverhalten des Verbundträgers
- die Abmessungen und Werkstoffkennwerte liegen im Rahmen der durchgeführten Parameterstudie, vgl. Abbildung 7.5.

Der Berechnungsansatz wird hierbei durch eine systematische Auswertung entwickelt. Auf Basis der analytischen Verformungsberechnung unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands werden die Trägerverformungen bestimmt. Im ersten Schritt wird nun über eine Rückrechnung die exakte Lösung für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  bestimmt, siehe Abschnitt 7.2.2. Die dabei berechnete Trägerverformung  $f$  wird nun als Vergleichswert herangezogen, um auf Grundlage eines empirisch ermittelten Ansatzes die verformungsbezogene mittragen-

de Breite  $b_{m,V,(1)}$  so zu bestimmen, dass die mit  $b_{m,V,(1)}$  bestimmte Trägerverformung  $w$  die gleiche Durchbiegung besitzt, siehe hierzu auch Abbildung 7.1.

Für den Ansatz werden die in Abschnitt 7.3.4 ermittelten maßgebenden Faktoren verwendet. Es werden für die in der Berechnungsformel verwendeten Materialkennwerte entsprechende Basiswerte für die Betonzugfestigkeit  $f_{c,0}$  und Fließgrenze des Baustahls  $f_{y,0}$  als Referenz eingeführt.

Mittels der Solver-Funktion wird nun die empirische Näherungsfunktion über die Minimierung der Fehlerquadrate bestimmt. Die einzelnen Exponenten des Berechnungsansatzes werden mittels des Solvers so gewählt, dass die Abweichung des empirischen Ansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  bezogen auf die analytisch ermittelte verformungsbezogene Breite  $b_{m,V}$  minimiert wird.

Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht die Durchbiegungsrechnung, so dass für die Auswertung und Entwicklung des Berechnungsansatzes die M- $\kappa$ -Berechnung nur bis ca. 60 % der Traglast herangezogen wird, die Werte darüber hinaus werden vernachlässigt. Der Berechnungsansatz wird hierbei an den bestehenden Ansatz für niedrige Verbundträger [Rieg 2006] angelehnt.

### 7.3.6.2 Genaue Berechnungsansatz (Stufe 1)

Dieser Berechnungsansatz berücksichtigt die maßgebenden Einflüsse und liefert einen realistischen Wert für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  von Slim-Floor Querschnitten. Die Grundgleichung für die Ermittlung der verformungsbezogenen mittragenden Breiten  $b_{m,V,(1)}$  lautet hierbei wie folgt:

$$b_{m,V,(1)} = b_{m,S} + (b_{m,V,0} - b_{m,S}) \cdot \beta_{m,V,(1)} \quad (\text{Gleichung 7.1})$$

mit

$b_{m,V,(1)}$	verformungsbezogene mittragende Breite (genauer Berechnungsansatz – Stufe 1)
$b_{m,S}$	mittragende Breite des reinen Scheibenzustands nach Abschnitt 4.2.2
$b_{m,V,0}$	elastischer Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite (Beton im ungerissenen Zustand)
$\beta_{m,V,(1)}$	Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite nach Gleichung 7.2

$$\beta_{m,V,(1)} = 0,07 \cdot (1 - k_m)^{1,33} \cdot \left(\frac{f_y}{f_{y,0}}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{f_{ct}}{f_{ct,0}}\right)^{0,28} \cdot \left(\frac{h_a}{h_c}\right)^{-0,15} \cdot \left(\frac{l_a}{A_{ges} \cdot L^2}\right)^{-0,25} \quad (\text{Gleichung 7.2})$$

mit

$k_m$	Abminderungsfaktor für Belastung bzw. Momenteneinwirkung $= \frac{q - q_{Riss}}{q_u - q_{Riss}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{M - M_{Riss}}{M_u - M_{Riss}}$
$q$	Belastung des Verbundträgers in kN/m
$q_{Riss}$	Rissbelastung des Slim-Floor Trägers in kN/m
$q_u$	Bruchbelastung des Slim-Floor Trägers in kN/m
$M$	einwirkendes Moment des Verbundträgers in Feldmitte in kNm

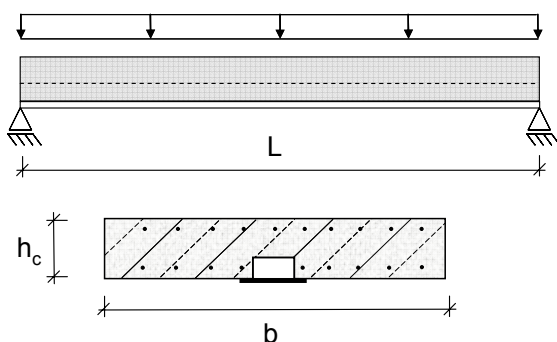


$M_{\text{Riss}}$	Rissmoment des Slim-Floor Trägers in Feldmitte in kNm
$M_u$	Bruchmoment des Slim-Floor Trägers in Feldmitte in kNm
$f_{\text{ct}}$	Betonzugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> ; $1,0 \text{ N/mm}^2 \leq f_{\text{ct}} \leq 4,0 \text{ N/mm}^2$
$f_{\text{ct},0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$	Bezugswert für die Betonzugfestigkeit
$h_c$	Dicke des Betongurtes in cm; $16 \text{ cm} \leq h_c \leq 34 \text{ cm}$
$h_a$	Höhe des Stahlprofils (innerhalb des Betongurtes; in cm)
$f_y$	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
$L$	Spannweite eines Feldes
$I_a$	Trägheitsmoment des Baustahlprofils
$A_{\text{ges}}$	Gesamtstahlfläche Baustahl und Betonstahl; ansetzbare (mittragende) Betonstahlbewehrung wird hierbei (vereinfacht) anteilmäßig über Momentenausnutzung ermittelt
Anmerkung:	Die Einheiten der einzelnen Faktoren sind innerhalb der Quotienten einheitengetreu einzusetzen.

Im Gegensatz zum bestehenden Ansatz nach [Kuhlmann, Hauf 2008] für Hutprofile wird der Berechnungsterm durch die Hinzunahme eines Faktors für die Querschnittsfläche und das Trägheitsmoment des Baustahlprofils angepasst, so dass die Einflüsse verschiedenster Baustahlquerschnitte berücksichtigt werden kann.

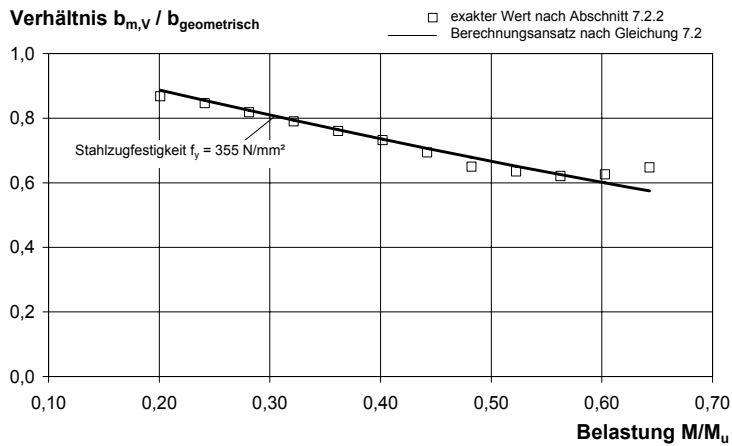
Die Exponenten und Koeffizienten für den Berechnungsansatz nach Gleichung 7.2 werden so gewählt, dass der Mittelwert ( $b_{m,V,(1)} / b_{m,V}$ ) gegen 1,0 läuft und die Werte für die Standardabweichung, sowie der Varianz minimiert werden. Dies wird durch die Regression über die Minimierung der Fehlerquadrate mit Hilfe des in Excel implementierten Solver durchgeführt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch einen Vergleich des Berechnungsansatzes für  $b_{m,V,(1)}$  nach Gleichung 7.2 mit den genauen Ergebnissen aus der Rückrechnung für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  auf Basis der nichtlinearen Verformungsberechnung unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands nach Abschnitt 7.2.2. Hierbei werden die verformungsbezogenen mittragenden Breiten jeweils im Verhältnis zur geometrischen Breite des untersuchten Trägers angegeben.

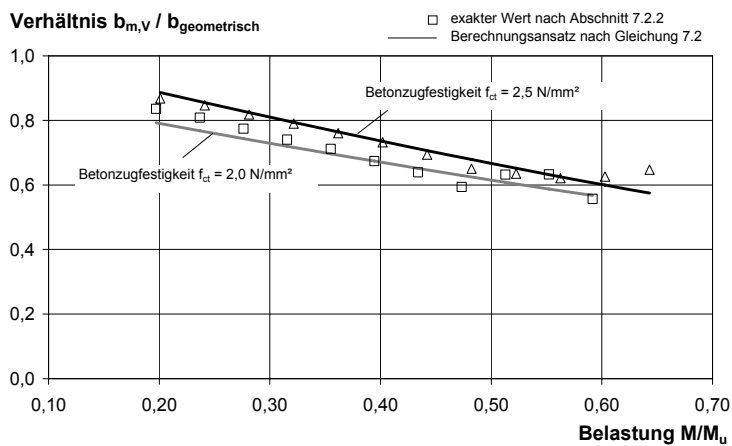


Stützweite:  $L = 6,0 \text{ m}$   
 Plattenbreite:  $b = 6,0 \text{ m}$   
 Plattendicke:  $h_c = 26 \text{ cm}$   
 Betondruckfestigkeit:  $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$   
 Betonzugfestigkeit:  $f_{\text{ct}} = 2,5 \text{ N/mm}^2$   
 Stahldruckfestigkeit:  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$   
 Stahlprofil: UPE 240; Fl. 440 x 10  
 Bewehrungsgehalt:  $a_{s,o+u} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$

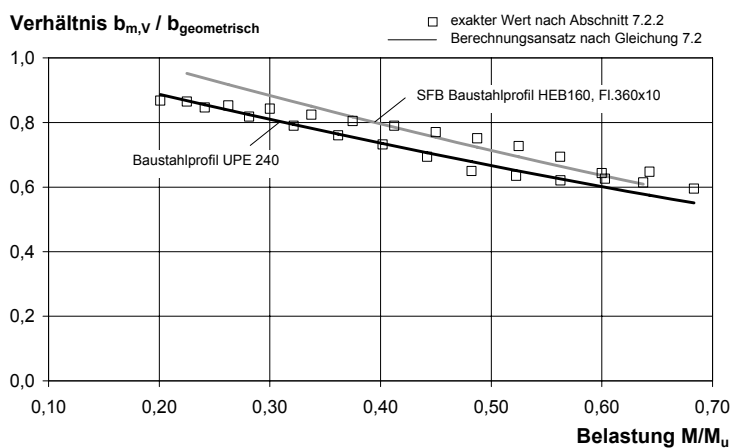
#### a) Beispielrechnung – Einfeldträger – gewählte Parameter



## b) Basisträger



## c) Variation der Betonzugfestigkeit - $f_{ct} = 2,0 \text{ N/mm}^2$



## d) Variation des Baustahlprofils - HEB360; Fl. 360 x 10

Abbildung 7.18: Vergleich des Berechnungsansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite nach Gleichung 7.2 mit dem genauen Ansatz nach Abschnitt 7.2.2

Die Abbildung 7.19 zeigt die statistische Auswertung auf Basis der Regression über die Fehlerquadrate erhaltene verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  nach Gleichung 7.2 im Verhältnis zur verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$ . Entsprechend ist in Abbildung 7.20 das Verhältnis der Ergebnisse der Verformungsberechnung zu sehen, die mittels der verformungsbezogenen mittragenden Breiten  $b_{m,V,(1)}$  und  $b_{m,V}$  bestimmt und ins Verhältnis zueinander gesetzt werden.

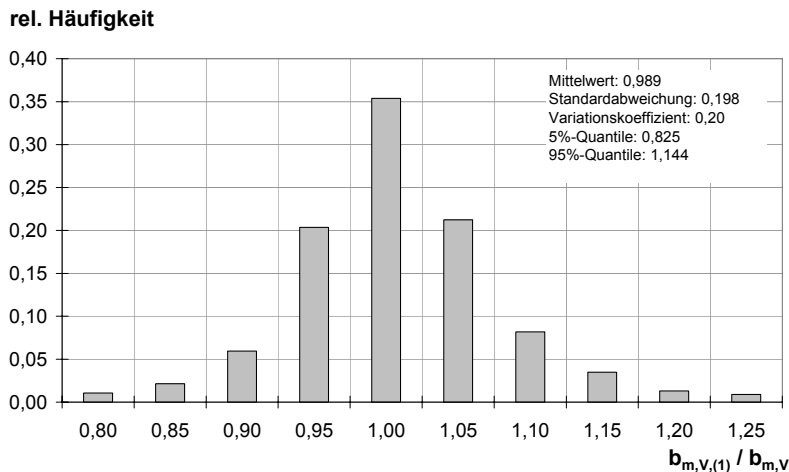


Abbildung 7.19: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  mit vereinfachtem Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(1)}$  nach Gleichung 7.2

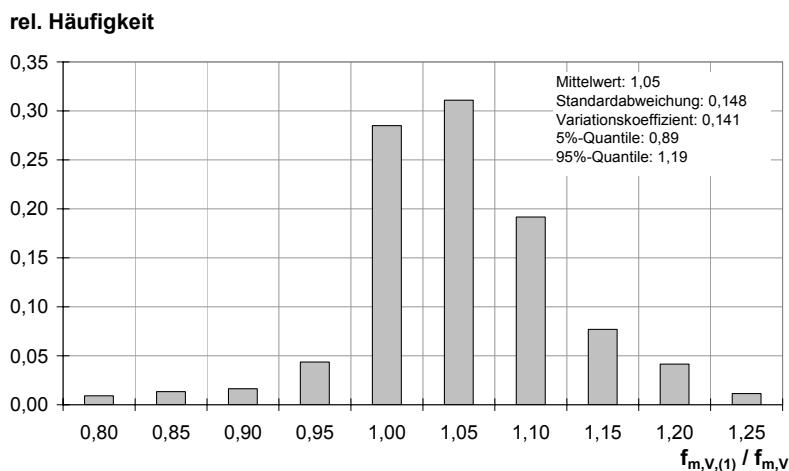


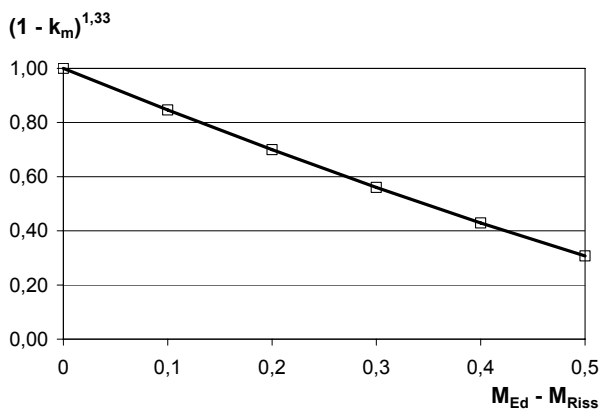
Abbildung 7.20: Vergleich der Durchbiegung  $f_{m,V}$  mit Durchbiegung nach vereinfachtem Ansatz  $f_{m,V,(1)}$

Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Werten aus Stufe 1 mit dem genauen analytischen Modell (unter Berücksichtigung der mittragenden Breite der Scheiben- und Biegetragwirkung) liefert hierfür folgende Ergebnisse:

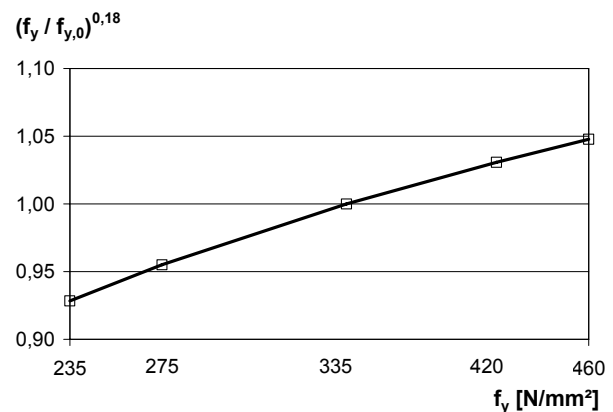
Tabelle 7.1: Statistische Auswertung Verformungsberechnung – Stufe 1

	Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$	Trägerdurchbiegung $f$
Mittelwert	0,989	1,050
Standardabweichung	0,198	0,148
Variationskoeffizient	0,200	0,141
5%-Quantile	0,825	0,890
95%-Quantile	1,144	1,190

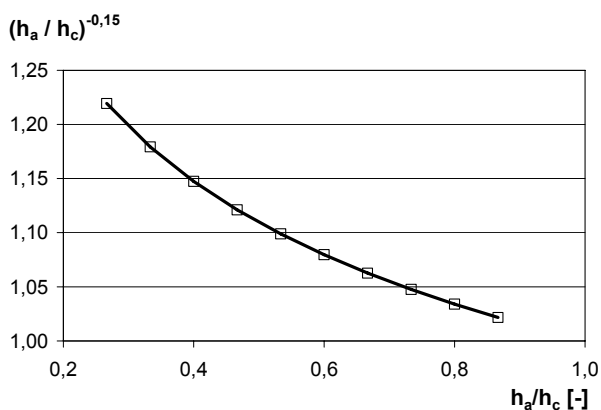
Im Einzelnen werden nun in der nachfolgenden Abbildung 7.21 die Faktoren des Berechnungsansatzes herausgelöst und die Berechnungsformel einzeln untersucht, in wie fern durch die beispielhafte Änderung des isolierten Parameters die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  beeinflusst wird.



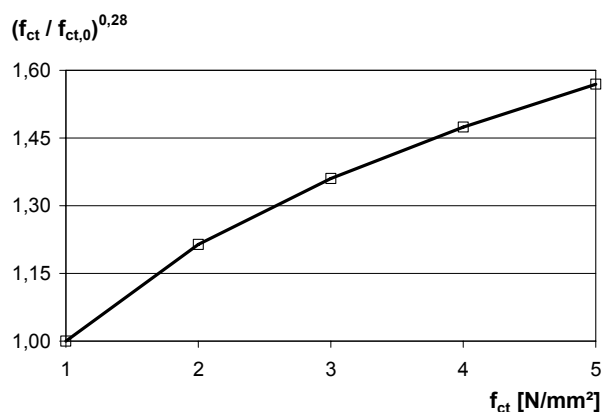
a) Einfluss des einwirkenden Moments  $M_{Ed}$  mit  
 $M_{Riss} / M_{Bruch} = 0,15$



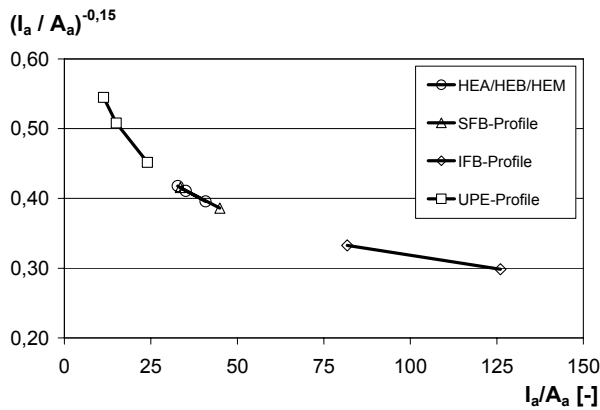
b) Einfluss der Baustahlfestigkeit  $f_y$  ( $f_{y,0} = 355$  N/mm²)



c) Einfluss der Querschnittshöhen  $h_a$ ,  $h_c$



d) Einfluss der Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  ( $f_{ct,0} = 1$  N/mm²)



Vergleich folgender Baustahlprofile/-querschnitte:

HE140A, HE140B, HE140M

SFB140: HE140B / 340x10mm

SFB160: HE160B / 360x10mm

IFB400: ½ IPE400 / 380x10mm

IFB500: ½ IP5400 / 400x12mm

Hutprofil: UPE200 / 400x10mm

Hutprofil: UPE360 / 560x10mm

(die konstante Länge L bleibt unberücksichtigt)

e) Einfluss des Baustahlprofils  $A_a$ ,  $I_a$

Abbildung 7.21: Einfluss der in Formel angegebenen Faktoren auf die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$

Die Untersuchung der einzelnen Parameter auf die verformungsbezogene mittragende Breite zeigen, dass für die Verformung unter Gebrauchslasten die Betonzugfestigkeit, das Baustahlprofil und die Betonplattendicke einen großen Einfluss besitzen, vgl. hierzu auch Abschnitt 7.3.4. So zeigt sich auch anhand der Kurven, dass die genannten Faktoren den größten Einfluss auf den Faktor  $\beta_{m,V,(1)}$  besitzen.

### 7.3.6.3 Vereinfachter Berechnungsansatz (Stufe 2)

Die Berechnungsgleichung für die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  (Gleichung 7.1) ist in ihrer Anwendung sehr aufwändig und verlangt vorab eine umfangreiche Bestimmung einzelner Parameter und Querschnittswerte. Aus diesem Grund wurde ein zweiter Ansatz (Stufe 2) entwickelt, der eine Vereinfachung des genauen Berechnungsansatzes darstellt. Die Berechnung berücksichtigt im Unterschied zur Stufe 1 pauschal nur den maßgebenden Einfluss des Ausnutzungsgrads und damit implizit der Rissbildung:

$$b_{m,V,(2)} = b_{m,S} + (b_{m,V,0} - b_{m,S}) \cdot \beta_{m,V,(2)} \quad (\text{Gleichung 7.3})$$

mit

$b_{m,V,(2)}$  verformungsbezogene mittragende Breite mit dem vereinfachten Berechnungsansatz (Stufe 2)

$b_{m,S}$  mittragende Breite des reinen Scheibenzustands nach Abschnitt 4.2.2

$b_{m,V,0}$  elastischer Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite (Beton im ungerissenen Zustand)

$\beta_{m,V,(2)}$  Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite nach Gleichung 7.4

$$\beta_{m,V,(2)} = (1 - k_m)^2 \leq 1,0 \quad (\text{Gleichung 7.4})$$

mit

 $k_m$ 

Abminderungsfaktor für Momenteneinwirkung

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

 $M$ 

einwirkendes Moment des Verbundträgers in Feldmitte in kNm

 $M_{\text{Riss}}$ 

Rissmoment des Slim-Floor Trägers in kNm

 $M_u$ 

Bruchmoment des Slim-Floor Trägers in kNm

Um die Genauigkeit dieses Ansatzes bewerten zu können, wird ebenfalls die Durchbiegungsrechnung durchgeführt und die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(2)}$ , sowie die berechnete Trägerdurchbiegung  $f_{m,V}$  mit dem analytischen Ansatz unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands verglichen, siehe nachfolgende Abbildung 7.22.

rel. Häufigkeit

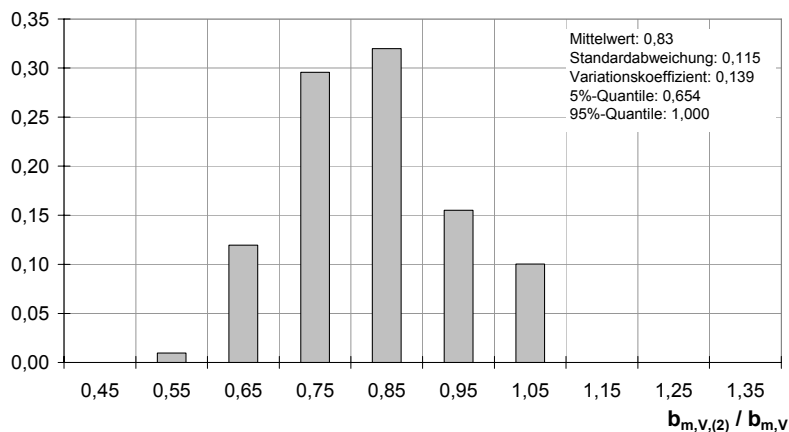


Abbildung 7.22: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  mit vereinfachtem Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(2)}$

rel. Häufigkeit

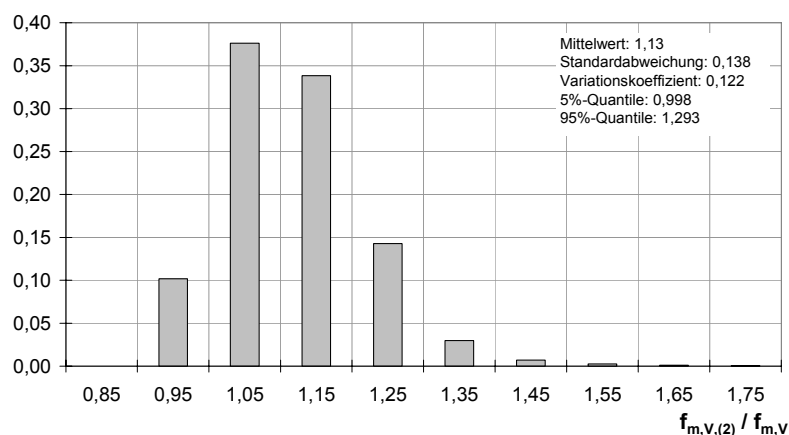


Abbildung 7.23: Vergleich der Durchbiegung  $f_{m,V}$  mit Durchbiegung nach vereinfachtem Ansatz  $f_{m,V,(2)}$

Ein Vergleich der Ergebniswerte aus Stufe 2 mit dem genauen analytischen Modell (unter Berücksichtigung der mittragenden Breite der Scheiben- und Biegetragwirkung) liefert hierfür folgende Ergebnisse:

Tabelle 7.2: Statistische Auswertung Verformungsberechnung – Stufe 2

	Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V,(2)}$	Trägerdurchbiegung $f$
Mittelwert	0,830	1,130
Standardabweichung	0,115	0,138
Variationskoeffizient	0,139	0,122
5%-Quantile	0,654	0,998
95%-Quantile	1,000	1,293

Es zeigt sich, dass der Berechnungsansatz zur Ermittlung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(2)}$  die exakt bestimmte verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  ein wenig unterschätzt wird, die Werte daher also kleiner sind als im Vergleich dazu die analytisch ermittelten Werte des Scheiben- und Biegezustands, im Mittel um 17 %. Hieraus ergeben sich bei der Berechnung natürlich auch leicht überschätzte Verformungen, im Mittel um 13 % vgl. Tabelle 7.2.

### 7.3.7 Vergleich mit bestehenden Normregelungen

#### 7.3.7.1 Grundsätzliches

Da die normativen Regelungen für Slim-Floor Träger sehr konservativ sind, soll im nachfolgenden Abschnitt ein Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  mit der normativen mittragenden Breite durchgeführt werden. Dementsprechend wird die Parameterstudie nach Abschnitt 7.3.3 ebenfalls mit dem Ansatz der mittragenden Breite nach [DIN 18800-5] durchgeführt.

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse anhand der Versuchsträger (siehe Abschnitt 6.4) lässt vorweg bereits darauf schließen, dass die normative Regelung eine zu kleine mittragende Breite vorgibt und dadurch die Verformungen überschätzt werden.

#### 7.3.7.2 Vergleich mit [DIN 18800-5]

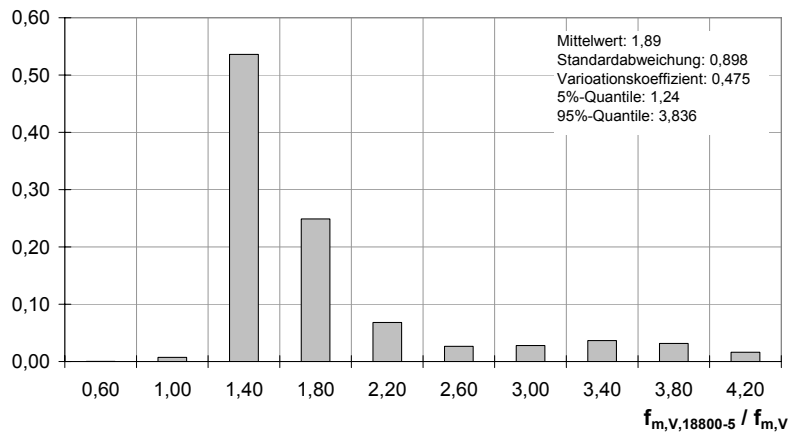
Das analytische Modell unter Berücksichtigung der mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands, das auf dem mechanischen Modell für die Momenten-Krümmungsbeziehung basiert, wird anhand der Versuchsträger verifiziert. Die Annahme der Werte der mittragenden Breite anhand der Differentialgleichungen für den linear-elastischen (ungerissen) Zustand erweist sich als ausreichend genau.

Im folgenden Abschnitt soll das mechanische Modell mit der normativen Regelung der Verbundbaunorm [DIN 18800-5] verglichen werden. Zur Bestimmung der mittragenden Breite wird auf den Abschnitt 4.4 verwiesen.

Die Werte der mittragenden Breite nach Norm werden hierbei in das analytische Modell implementiert und die nichtlineare Durchbiegungsberechnung durchgeführt. So werden im ersten Schritt die berechneten Durchbiegungen miteinander verglichen, siehe Abbildung 7.24. Es zeigt sich sehr deutlich, dass die ermittelten Verformungswerte  $f_{m,V,18800-5}$  nach [DIN 18800-5] teils um ein Vielfa-

ches größer sind als die genaue Berechnung der Trägerverformung  $f_{m,V}$  unter Berücksichtigung der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand.

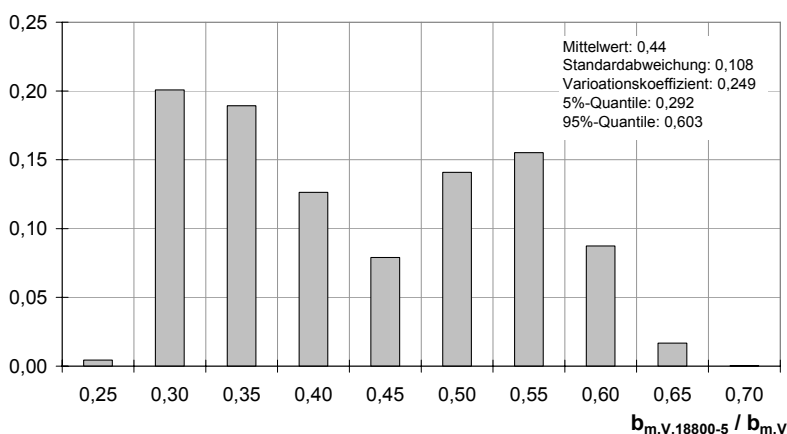
rel. Häufigkeit

Abbildung 7.24: Vergleich der Durchbiegung  $f_{m,V}$  mit Durchbiegung  $f_{m,V,18800-5}$ 

Die statistische Auswertung von ca. 3000 Trägern und jeweils im Schnitt 10 Berechnungs- und Belastungspunkten zeigt, dass der Mittelwert bei 1,89 liegt ( $f_{m,V,18800-5} / f_{m,V}$ ). Ebenfalls fällt die starke Streuung der Ergebnisse auf (Standardabweichung 0,898, Variationskoeffizient 0,475).

Der Vergleich der lastabhängig ermittelten verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  mit der lastunabhängigen mittragenden Breite  $b_{m,V,18800-5}$  nach [DIN 18800-5] zeigt in Abbildung 7.25 ebenfalls sehr deutlich, dass die Werte sehr stark streuen.

rel. Häufigkeit

Abbildung 7.25: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  mit der spannungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,18800-5}$



### 7.3.8 Schlussfolgerung

Durch die Auswertung der umfangreichen Parameteranalyse konnte in zwei Genauigkeitsstufen eine verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  und  $b_{m,V,(2)}$  entwickelt werden, die es nun ermöglicht, für eine Streckenlast eine wirklichkeitsnahe Verformung für Einfeldträger zu berechnen. Der rechnerische Vergleich mit den nach Norm vorgegebenen Werten für die mittragende Breite zeigt insbesondere, dass damit die Verformungen stark überschätzt werden.

## 7.4 Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ für Zweifeldträger

### 7.4.1 Grundsätzliches

In Abschnitt 6.2.8 wird ausführlich über den Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich berichtet. Es zeigt sich, dass die Variation der mittragenden Breite des Stützbereichs auf die Trägerverformung keinen Einfluss hat bzw. dieser im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 7.3.4) vernachlässigt werden kann.

Aus diesem Grund und auch in Hinblick auf die praktische Anwendung wird darauf verzichtet, für den Zweifeldträger jeweils eine verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V}$  für den Feld- und Stützbereich zu definieren. Es erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoller, den Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite des Einfeldträgers zu verwenden und durch einen globalen Anpassungsfaktor, definiert über die Momentenbelastung/-ausnutzung, anzupassen. Der Berechnungsansatz und die Bestimmung des globalen Faktors werden in den nächsten Abschnitten dargestellt.

### 7.4.2 Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ für den Zweifeldträger

In Abschnitt 6.2.8 werden verschiedene Berechnungen durchgeführt, die zeigen, dass der Einfluss der mittragenden Breite über der Stütze als gering angesehen werden kann. Die Variation des Wertes der mittragenden Breite zeigt hierbei keinen merklichen Einfluss auf die Trägerdurchbiegung. Dies hat folgende Gründe:

- Der Bereich des Stützmoments ist bezogen auf die gesamte Trägerlänge sehr klein. Die Untersuchungen zeigen, dass mit zunehmender Belastung und der damit verbundenen Rissbildung und Querschnittsschwächung der Nulldurchgang zum Mittelaufleger sich verschiebt und damit der Stützbereich und das Stützmoment immer kleiner werden. Dies wirkt sich auch direkt auf die Verformung des Trägers aus.
- Das Stützmoment wird hauptsächlich von der in der oberen Lage eingelegten Bewehrung und dem verwendeten Baustahlprofil beeinflusst. Das Stützmoment wird im Querschnitt über die Bewehrung als Zugkomponente und das Baustahlprofil und dem Beton als Druckkomponente erzeugt. Da das Stützmoment aber im Vergleich zum Feldmoment viel kleiner ist, wird der Beton im Stützbereich wenig aktiviert. Entsprechend der Steifigkeit, „zieht“ das Baustahlprofil die Druckkomponente an sich. Der Betontraganteil ist entsprechend kleiner ausgebildet und benötigt für das Kräftegleichgewicht nur einen kleinen Druckbereich. Die mittragende Breite im Beton spielt also keine große Rolle.

Daher wird für die nichtlineare Berechnung des Zweifeldträgers und zur Bestimmung einer verformungsbezogenen mittragenden Breite der in Abschnitt 7.3.6 für Einfeldträger entwickelte Ansatz verwendet.

Ausgehend von einem Einfeldträger mit der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(1)}$  soll nun durch den Anpassungsfaktor  $\alpha_{m,V}$  die Verformung  $w$  so bestimmt werden, dass diese der analytischen Durchbiegung  $f$  des Zweifeldträgers entspricht. Da die Verformung des Zweifeldträgers unter Gebrauchslasten gewöhnlich geringer ist als beim Einfeldträger, nimmt der Anpassungsfaktor Werte größer 1,0 an. Durch die größere mittragende Breite nimmt die Trägersteifigkeit zu und damit die Verformung des Einfeldträgers ab.

$$b_{m,V, \text{Zweifeldträger}} = \alpha_{b_{m,V}} \cdot b_{m,V, \text{Einfeldträger}}$$

bzw. (Gleichung 7.5)

$$b_{m,V, \text{Zweifeldträger}} = \alpha_{b_{m,V}} \cdot b_{m,V, (1)}$$

Da wie eben beschrieben der Stützbereich nur eine untergeordnete Rolle spielt, wird der Wert für die verformungsbezogene Breite des Einfeldträgers nach Gleichung 7.1 und 7.2 auf die gesamte Stützweite des Feldes angesetzt, siehe nachfolgende Abbildung 7.26.

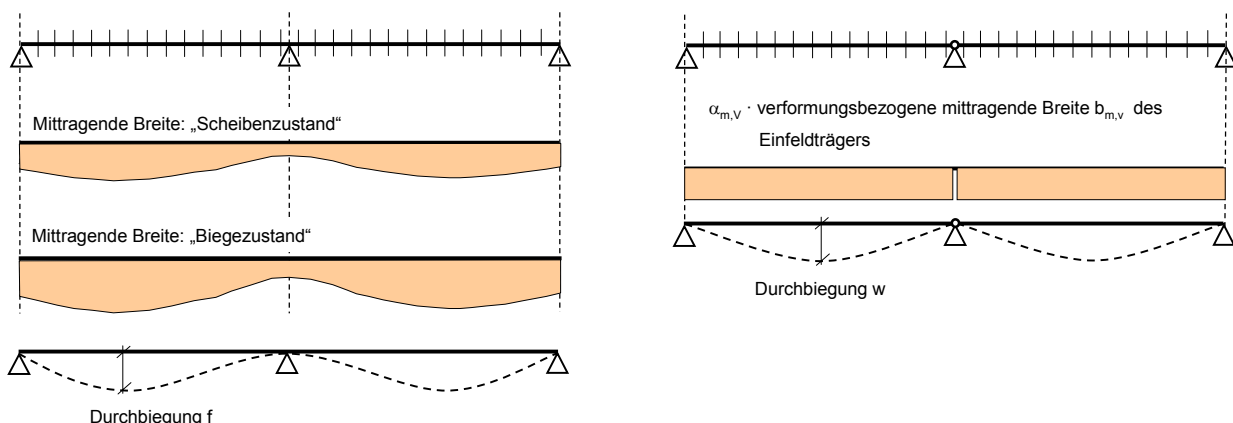


Abbildung 7.26: Verformungsbezogene mittragende Breite für den Zweifeldträger

Wie in Gleichung 7.2 angegeben, wird die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  in Abhängigkeit der Geometrie, aber auch der einwirkenden Schnittgrößen bestimmt. Für die in Gleichung 7.2 angegebene Länge  $L$  wird hierbei die gesamte Stützweite eines Feldes angegeben. Bei gleicher Belastung sind die Verformung des Zweifeldträgers sowie das Feldmoment geringer als im Vergleich zum Einfeldträger. Dies bedeutet wiederum, wenn der Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite des Einfeldträgers als Berechnungsgrundlage herangezogen wird, diese einen zu kleinen Wert liefert und der Anpassungsfaktor diese mittragende Breite erhöhen muss, um sich an die Verformung des Zweifeldträgers anzunähern.

Es ist zu beachten, da der Stützbereich der Zweifeldträgern unter Gebrauchslasten nicht nur reißt, sondern auch die Zugbewehrung ins Fließen kommt und damit die Trägerverformung stark zunimmt, so dass der Anpassungsfaktor dieses plastische Verformungsverhalten berücksichtigen muss.

Der Faktor  $\alpha_{bm,V}$  wird wie folgt bestimmt (siehe hierzu auch Abbildung 7.27): Ausgehend von der nichtlinearen Berechnung des Zweifeldträgers auf Basis der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand wird eine umfangreiche Parameterstudie an Zweifeldträgern durchgeführt. Da das Modell anhand der durchgeführten Versuche verifiziert werden kann (siehe Abschnitt 6.3), kann die Trägerdurchbiegung  $f$  als die tatsächliche Verformung des Zweifeldträgers angesehen werden.

Gleichzeitig wird die nichtlineare Berechnung mit der konstanten verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(1)}$  für den Einfeldträger durchgeführt. Dieser Wert der mittragenden Breite wird mit dem Faktor  $\alpha_{bm,V}$  multipliziert und über einen Solver so lange variiert, bis sich die hiermit bestimmte Trägerverformung „ $w$ “ der analytischen Durchbiegung „ $f$ “ entspricht.

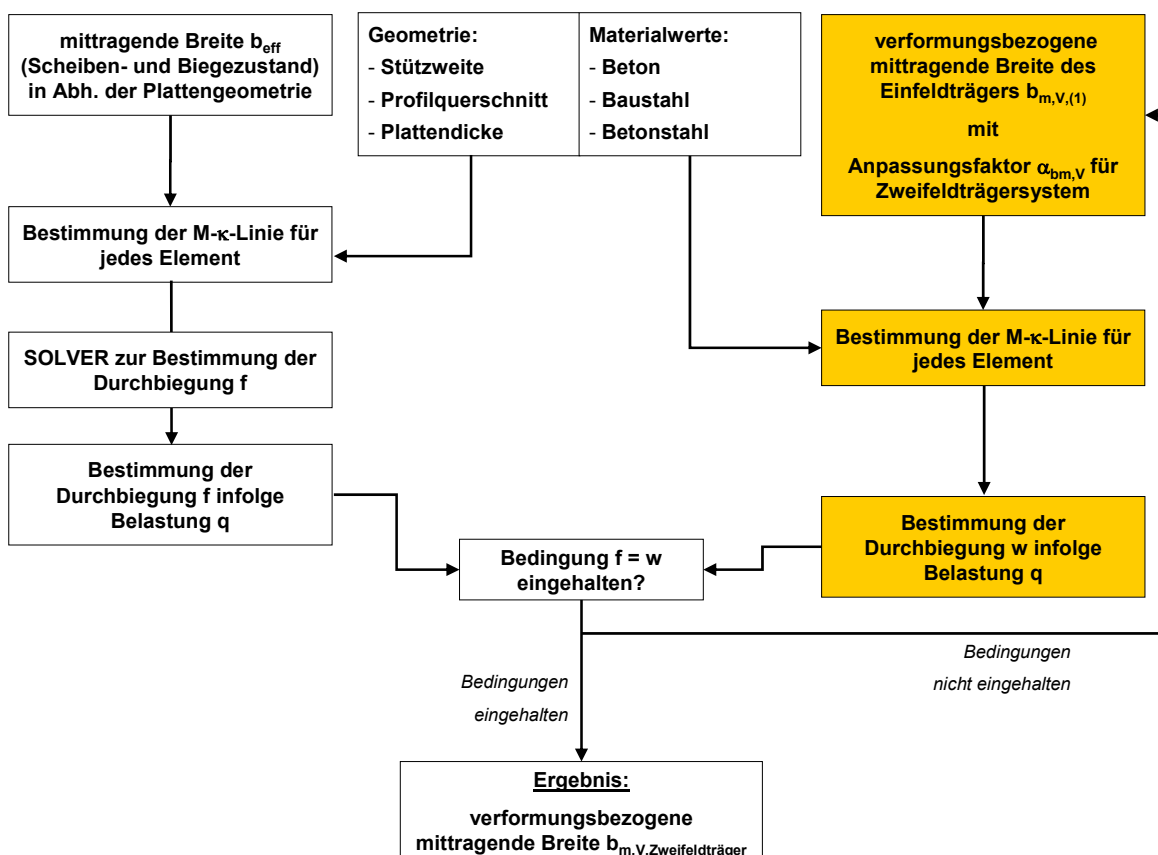


Abbildung 7.27: Berechnungsschema für verformungsbezogene mittragende Breite des Zweifeldträgers

Der Faktor  $\alpha_{bm,V}$  erhöht als globaler Anpassungsfaktor die verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,V,(1)}$  des Einfeldträgers so, dass die Durchbiegung  $w$  mit der Verformungsberechnung  $f$  übereinstimmt. Es zeigt sich bei der Auswertung, dass der Faktor  $\alpha_{bm,V}$  lastabhängig bestimmt werden kann. Die Untersuchung konzentriert sich hierbei auf das Lastniveau der Gebrauchstauglichkeit, also bis ca. 60 % der Traglast.

Um eine qualitative Aussage über den Wert und Verlauf des Faktors  $\alpha_{bm,V}$  zu bekommen, wird anhand der nachfolgenden Abbildung das typische Last-Verformungsverhalten des gleichen Slim-Floor Trägers als 1- und 2-Feldträger betrachtet. Durch das nichtlineare Tragverhalten der Slim-

Floor Träger ergeben sich für zwei beliebig gewählte Belastungen  $q_1$  und  $q_2$  jeweils unterschiedliche Differenzbeträge  $\Delta$  der Verformungen. So liegt die Verformung des 1- und 2-Feldträgers bei höheren Lasten weiter voneinander entfernt als bei geringeren Lasten.

Das bedeutet, dass über die nicht-lineare Rückrechnung unter Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(1)}$  für den Einfeldträger der Anpassungsfaktor  $\alpha_{bm,V}$  mit zunehmender Belastung größere Werte annehmen muss, um die Verformungsbedingung einzuhalten. Rechnerisch kann somit auch eine mittragende Breite ermittelt werden, die größer ist als die geometrisch vorhandene Breite des Betongurtes.

#### Belastung q

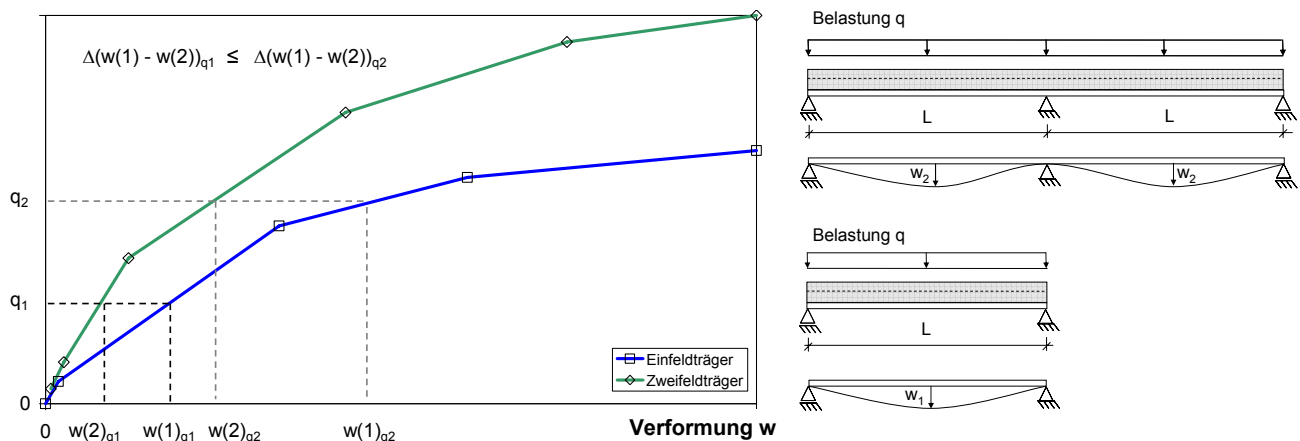


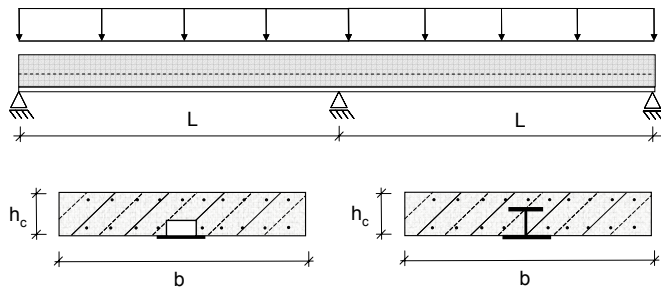
Abbildung 7.28: Schematische Last-Verformungskurve eines 1- und 2-Feldträgers

### 7.4.3 Anpassungsfaktor $\alpha_{bm,V}$ für die verformungsbezogene mittragende Breite des Zweifeldträgers

Zur Bestimmung des Anpassungsfaktors  $\alpha_{bm,V}$  wird eine umfangreiche Parameteranalyse an Zweifeldträgern durchgeführt. Die Verformungswerte des Zweifeldträgers basierend auf den Werten der mittragenden Breite für den Scheiben- und Biegezustand werden mit den Durchbiegungsberechnungen auf Grundlage der konstanten verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,(1)}$  für den Einfeldträger verglichen. Für die Länge  $L$  wird nach Gleichung 7.2 die gesamte Stützweite des Einfeldträgers angesetzt.

Über die statistische Auswertung und Anwendung der Fehlerquadratmethode wird nun der Anpassungsfaktor  $\alpha_{bm,V}$  so bestimmt, dass die Durchbiegung bestmöglich übereinstimmen.

Die im Rahmen dieser Untersuchung gewählten Parameter sind in Abbildung 7.29 angegeben.



Gewählter Parameterbereich:

Stützweite:	$L = 4,0 - 9,0 \text{ m}$
Plattendicke:	$h_c = 16 - 34 \text{ cm}$
Plattenbreite:	$b = 2,0 - 8,0 \text{ m}$
Stahlprofil:	UPE-, SFB-, IFB-Profile
Betondruckfestigkeit:	$f_c = 20 - 50 \text{ N/mm}^2$
Betonzugfestigkeit:	$f_{ct} = 1,0 - 5,5 \text{ N/mm}^2$
Stahlzugfestigkeit:	$f_y = 235 - 460 \text{ N/mm}^2$
Bewehrung oben:	$a_{s,o} = 0 - 18 \text{ cm}^2/\text{m}$
Bewehrung unten:	$a_{s,u} = 0 - 18 \text{ cm}^2/\text{m}$

Abbildung 7.29: Parameteruntersuchung zur Bestimmung des Abminderungsfaktors  $\alpha_{bm,V}$ 

Die Bestimmungsgleichung für den Abminderungsfaktor zeigt, dass der Faktor  $\alpha_{bm,V}$  maßgebend von der Höhe der Belastung  $q$  im Verhältnis zur maximalen Belastung  $q_u$  abhängig ist und sich somit der Faktor  $\alpha_{bm,V}$  wie folgt bestimmen lässt:

$$\alpha_{bm,V} = 2,0 \cdot \left( \frac{q}{q_u} \right)^{0,15} \quad (\text{Gleichung 7.6})$$

Hierbei ist  $q$  die einwirkende Belastung und  $q_u$  die rechnerische Traglast des Einfeldträgers. Dieser gewählte Ansatz ermöglicht es, auf Basis der für den Einfeldträger ermittelten Faktoren für die verformungsbezogene mittragende Breite eine sehr schnelle rechnerische Erweiterung auf ein Zweifeldträgersystem durchzuführen.

Ferner ist zu beachten, dass für die Auswertung der Parameterstudie über der Stütze immer eine Mindeststeifigkeit durch das Baustahlprofil vorhanden ist. In Abhängigkeit der Stützweite, aus der sich die mittragende Breite über der Stütze berechnet, der Plattendicke  $h_c$  sowie des gewählten Baustahlprofils und Bewehrungsgrades ergibt sich ein Verhältnis der Gesamtstahlsteifigkeit  $I_{st}$  zum gesamten Verbundquerschnittswert  $I_{i,0}$  von mindestens 20%. Unter Annahme eines voll gerissenen Betongurts berechnet sich die restliche Steifigkeit aus dem Anteil des Baustahlprofils sowie der eingelegten Bewehrung. Die nachfolgende Abbildung 7.30 zeigt hierzu exemplarisch für sechs gewählte Querschnitte die Steifigkeitsanteile in Abhängigkeit der mittragenden Breite über der Stütze (Bewehrungsgehalt  $a_{s,o+u} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ ). Als Basis für diesen Vergleich gelten die Anwendungsgrenzen nach Abbildung 7.29.

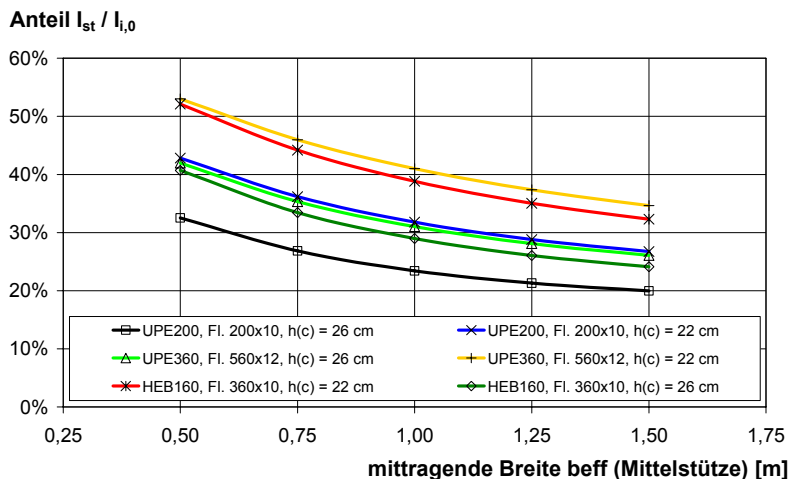


Abbildung 7.30: Verhältnis Gesamtstahlsteifigkeit  $I_{st}$  zu Verbundsteifigkeit  $I_{i,0}$  in Abhängigkeit der mittragenden Breite  $b_{eff}$  im Stützbereich

Die Auswertung des Berechnungsansatzes erfolgt im Rahmen der Parameteruntersuchung für Gebrauchslasten und wird daher bis ca. 60 % der Traglast durchgeführt. Auf Grundlage des ermittelten Faktors  $\alpha_{bm,V}$  wird für die hieraus berechneten Durchbiegungen eine statistische Auswertung durchgeführt, um eine Abschätzung über die Genauigkeit des Faktors zu bekommen. Der Mittelwert (aus dem Verhältnis der mit dem Faktor berechneten verformungsbezogenen mittragenden Breite und der ermittelten verformungsbezogenen mittragenden Breite über Rückrechnung aus der analytischen Durchbiegungsberechnung des Zweifeldträgers) liegt bei 1,01, die zugehörige Standardabweichung bei 0,20, so dass die Auswertung und damit der Anpassungsfaktor  $\alpha_{bm,V}$  für das vereinfachte Berechnungsverfahren eine gute Übereinstimmung liefern, siehe nachfolgende Abbildung 7.31.

Auch die vereinfachte Annahme, die Durchbiegung des Zweifeldträgers über eine Verformungsberechnung am Einfeldträgersystem durchzuführen, kann somit als sinnvoll und vor allem auch zweckmäßig angesehen werden.

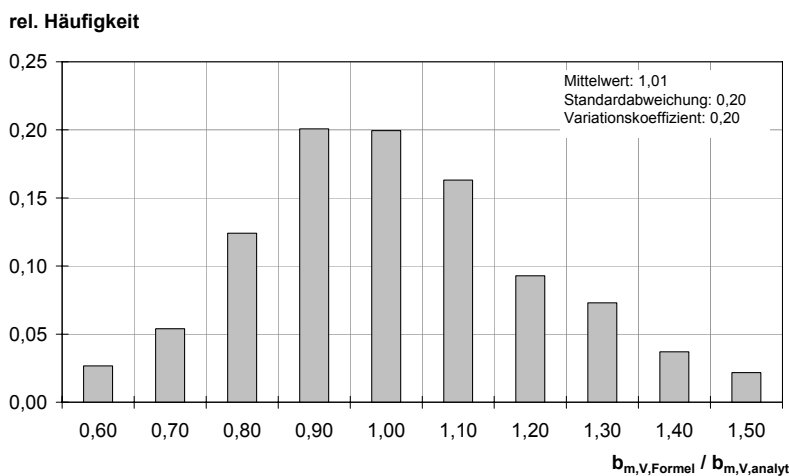


Abbildung 7.31: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,analyt}$  für zweifeldträger mit vereinfachtem Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V,Formel}$

Dies bedeutet für die praktische Berechnung, dass die nichtlineare Berechnung für einen Zweifeldträger auf Basis der Werte des Einfeldträgers durchgeführt werden kann und direkt ein Vergleich der Trägerdurchbiegung für das Einfeld- und Zweifeldträgersystem möglich ist.

## 7.5 Zusammenfassung

Die Bestimmung der Trägerverformung mittels des nichtlinearen Ansatzes (M- $\kappa$ -Methode), wie in Abschnitt 6 dargestellt, ist eine sehr umfangreiche und aufwändige Berechnung, da die Werte der mittragenden Breite für den Feld- und Stützbereich variabel über die Trägerlänge verlaufen. Aus diesem Grund wurde die sogenannte verformungsbezogene mittragende Breite  $b_{m,v}$  eingeführt, die vereinfacht auf Basis der nichtlinearen Berechnung einen konstanten Wert für die mittragende Breite über die gesamte Trägerlänge hinweg annimmt.

Da sich Slim-Floor durch ihre Rissbildung im Stütze- und Feldbereich von normal hohen Verbundträgern unterscheiden, muss das veränderte Tragverhalten bei der Bestimmung der mittragenden verformungsbezogenen Breite berücksichtigt werden. Durch die zunehmende Rissbildung und dem damit verbundenen Steifigkeitsverlust des Biegetraganteils des Betons, nehmen die Trägerverformungen bei steigenden Lasten überproportional zu, so dass die Werte für die verformungsbezogene mittragende Breite mit Beginn der Rissbildung kleiner werden müssen. Im Rahmen einer umfangreichen Parameteranalyse wurden die wichtigsten Einflussfaktoren identifiziert und darauf aufbauend eine Berechnungsansatz für Einfeldträgersysteme abgeleitet.

Untersuchungen zum Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich auf das Verformungsverhalten (Abschnitt 6.2.8) zeigten, dass diese nur eine untergeordnete Rolle spielt. Für den Ansatz der verformungsbezogenen mittragende Breite  $b_{m,v}$  wurde daher kein eigenständiger Ansatz entwickelt, sondern der bestehende Ansatz des Einfeldträgers durch einen globalen Anpassungsfaktor  $\alpha_{bm,v}$  erweitert. Die verformungsbezogene mittragende Breite des Einfeldträgers wurde entsprechend durch den Faktor  $\alpha_{bm,v}$  erhöht, um damit die Verformung des Zweifeldsystems zu berechnen. Der Faktor  $\alpha_{bm,v}$  bestimmt sich hierbei in Abhängigkeit der Belastung.

Die Berechnungsansätze wurden jeweils auf Grundlage von umfangreichen Parameterstudien erstellt und zeigen im Vergleich zur analytischen Berechnung eine gute Übereinstimmung.

## 8 Linear-elastischer Ansatz für die Verformungsberechnung

### 8.1 Grundsätzliches

Durch das Aufreißen des Betongurts bei Slim-Floor Trägern bereits unter Gebrauchslasten kann ein linear-elastischer Ansatz nicht ohne Weiteres angewendet werden, da die Steifigkeit überschätzt und damit die Verformung unterschätzt werden. Aus diesem Grund wurde in den vorangegangenen Abschnitten ein materiell nichtlinearer Ansatz für die Durchbiegungsberechnung entwickelt und vorgestellt, um die wirkliche Trägerverformung berechnen zu können.

Die beschriebenen Modelle zur Berechnung der Trägerverformung mittels der Momenten-Krümmungs-Beziehung, sowie die Erweiterung und Einführung der verformungsbezogenen mittragenden Breite liefern hierfür sehr gute Ergebnisse. Jedoch zeigt sich, dass die Berechnungsmodelle aufwändig und daher für die Praxis nur begrenzt einsetzbar sind. Daher ist es wünschenswert, einen Ansatz auf Grundlage des linear-elastischen Berechnungsverfahrens zu entwickeln, der implizit die Rissbildung und damit den Steifigkeitsverlust im Träger berücksichtigen kann.

Die Berechnung von Verbundquerschnitten unter Berücksichtigung eines linear-elastischen Ansatzes ist mit dem Gesamtquerschnittsverfahren möglich, siehe nachfolgender Abschnitt.

Im ersten Abschnitt wird ein Modell für Einfeldträger vorgestellt. Die Entwicklung basiert auf erste Untersuchungen von [Rieg 2006], der ein Berechnungsmodell für niedrige Verbundträger entwickelt hat. Im zweiten Abschnitt wird dieser Ansatz entsprechend für Zweifeldträgersysteme erweitert. Die Bezeichnung der Faktoren wird vereinfacht aus dem Ansatz von [Kuhlmann, Rieg 2004a] übernommen.

### 8.2 Linear-elastischer Ansatz für Einfeldträger

#### 8.2.1 Grundsätzliches

Für ungerissene Verbundträgersysteme wird oftmals das Gesamtquerschnittsverfahren angewandt, das von einem linear-elastischen Werkstoffverhalten ausgeht und damit den Verbundquerschnitt in einen ideellen Querschnitt (Index „i“) umrechnet. Dies bedeutet, dass auch bei Verbundkonstruktionen, sofern diese noch nicht gerissen sind, der ideelle Verbundquerschnittswert  $I_{i,0}$  für die Verformungsberechnung angewandt werden kann [Sattler 1959].

Das Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts  $I_{i,0}$  wird hierbei mit den Werten für die mittragende Breite des Scheiben- und Biegezustands berücksichtigt, siehe hierzu auch Abschnitt 4.5.

Das Trägheitsmoment  $I_{i,0}$  des Gesamtquerschnitts setzt sich somit wie folgt zusammen:

$$I_{i,0} = I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{st} \quad (\text{Gleichung 8.1})$$

#### 8.2.2 Definition des effektiven Trägheitsmoment $I_{i,eff}$

Die Steifigkeit des Baustahlquerschnitts ist durch die Rissbildung nicht zu reduzieren, sondern im Betonquerschnitt vorhandene Risse wirken sich alleinig auf den Betonquerschnitt aus, so dass der hier nun eingeführte Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  auf die Traganteile des Betons angewandt wird. Das



ideelle Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts  $I_{i,0}$  wird daher in ein sog. effektives Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$  überführt:

$$I_{i,eff} = I_a + \alpha_c \cdot (I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}) \quad (\text{Gleichung 8.2})$$

Am Ersatzsystem mit einer über den Träger hinweg konstanten effektiven Trägersteifigkeit  $I_{i,eff}$  kann nun mit Mitteln der linear-elastischen Stabstatik die Durchbiegung direkt bestimmt werden, siehe hierzu nachfolgende Abbildung.

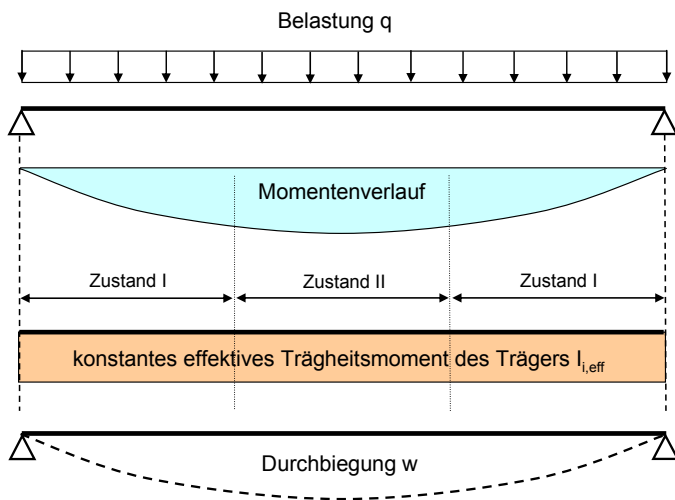


Abbildung 8.1: Ersatzträgersystem mit konstantem effektivem Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$

Betrachtet man in Hinblick auf den nichtlinearen Berechnungsansatz die Last-Verformungskurve eines Slim-Floor Trägers (Abbildung 8.2), so kann die Verformungskurve in drei Bereiche unterteilt werden. Die rote Kurve zeigt hierbei die Last-Verformungskurve unter Berücksichtigung der effektiven Steifigkeit  $I_{i,eff}$ , die schwarze Linie beschreibt das tatsächliche Verformungsverhalten, das nach dem ersten Riss und mit Beginn des Fließens jeweils flacher verläuft.

Im Bereich I ist der Betongurt noch ungerissen (elastischer Bereich). Das einwirkende Moment ist somit also noch kleiner als das Rissmoment des Verbundträgers. Die Verformungsberechnung kann daher mit linear-elastischen Ansätzen berechnet werden. Für den hier beschriebenen Ansatz muss entsprechend  $\alpha_c$  mit 1,0 eingesetzt werden.

Mit dem ersten Riss im Betonquerschnitt verlässt man den linear-elastischen Bereich, die Verformungen nehmen infolge des Steifigkeitsverlustes überproportional zu. In diesem Bereich kann somit der ideelle Verbundquerschnittswert  $I_{i,0}$  nicht mehr angewandt werden, eine Abminderung infolge der Rissbildung ist erforderlich, so dass der effektive Querschnitt  $I_{i,eff}$  eingesetzt werden muss ( $\alpha_c < 1,0$ , gerissener Beton).

Die Bedingung  $\alpha_c = 0$  stellt den Grenzfall dar, dass der Beton völlig gerissen vorliegt und nur noch der Baustahlquerschnitt für den Lastabtrag und die Verformungsberechnung herangezogen werden kann.

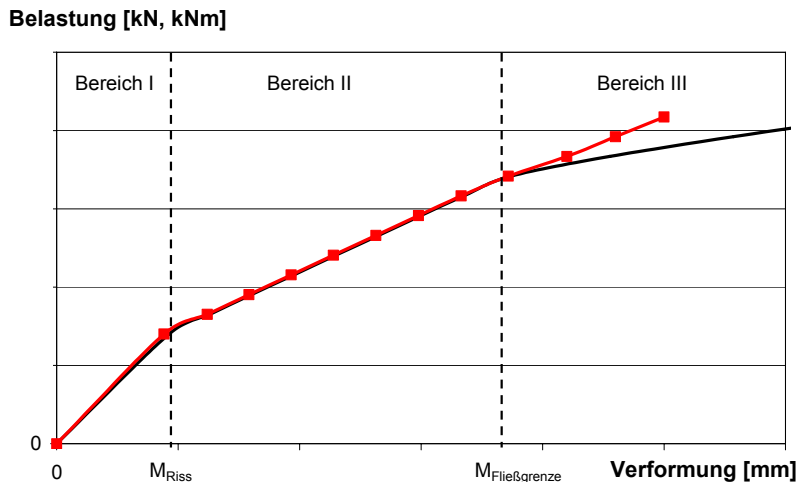


Abbildung 8.2: Last-Verformungskurve eines Slim-Floor Einfeldträgers (schematisch)

Die Berechnung auf Grundlage des  $I_{i,eff}$  kann nur so lange angewandt werden, bis der Baustahlquerschnitt zu fließen beginnt. Dies kann durch den effektiven Querschnitt nicht berücksichtigt werden, die tatsächlichen Verformungen würden durch den elastischen Ansatz nach Gleichung 8.2 unterschätzt (Bereich III, Fließen des Baustahlträgers). Da die Fließgrenze bei Slim-Floor Trägern meist außerhalb des Gebrauchstauglichkeitsbereichs liegt, kann das linear-elastische Modell jedoch unter Berücksichtigung der Abminderung durch die Rissbildung im Beton für die Verformungsberechnung meist ohne Einschränkungen angewandt werden.

### 8.2.3 Bestimmung des Abminderungsfaktors $\alpha_c$ und Parameteruntersuchung

#### 8.2.3.1 Grundsätzliches

Die Bestimmung eines Abminderungsfaktors  $\alpha_c$  ist für die Verformungsberechnung nötig, da durch den linear-elastischen Berechnungsansatz die Trägerdurchbiegung überschätzt werden würde. Der Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  ist somit ein Maß für die Rissbildung und dem damit verbundenen Steifigkeitsabbau des Betongurts.

Grundsätzlich wird die Rissbildung durch drei Faktoren beeinflusst, die im nachfolgenden Abschnitt zu einer praxisgerechten Anwendungsformel weiterentwickelt werden:

- Belastung: mit zunehmender Belastung  $q$  reißt der Betonquerschnitt weiter auf, so dass der Betonquerschnitt an Steifigkeit verliert und daher nicht voll berücksichtigt werden kann.
- Die Materialkennwerte (insbesondere die Betonzugfestigkeit) haben einen direkten Einfluss auf das Rissverhalten des Betongurts, so dass diese ebenso bei der Ermittlung des Abminderungsfaktors berücksichtigt werden müssen.
- Die Trägersteifigkeit und damit das Trägheitsmoment werden durch die geometrischen Faktoren, wie Abmessungen des Betongurts und Größe des Baustahlprofils beeinflusst. Das ideale Trägheitsmoment des Slim-Floor Trägers setzt sich aus dem Baustahlprofil und dem Betongurt zusammen. Das Verhältnis der Steifigkeiten zwischen Baustahl und Betongurt spielt hierbei eine zentrale Rolle.

### 8.2.3.2 Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor $\alpha_c$

Die Bestimmung der Faktoren geschieht über einen Vergleich der Ergebnisse aus der Verformung mit dem elastischen Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$  und der Verformung durch das analytische Berechnungsmodells nach Abschnitt 6.2. Die dort auf Grundlage der materiell nichtlinearen Berechnung ermittelten Trägerdurchbiegungen  $f_0$  dienen als Referenzwert.

Die Durchbiegung  $f_0$  kann somit als bekannt vorausgesetzt werden und entspricht der tatsächlichen Verformung bei einer bestimmten Belastung  $q$ . Der Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  kann nun direkt über die Beziehung (Gleichung 8.4) rückgerechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die elastisch ermittelte Verformung  $f_{el}$  an einem Ersatzbalken mit der Steifigkeit  $I_{i,eff}$  berechnet wird.

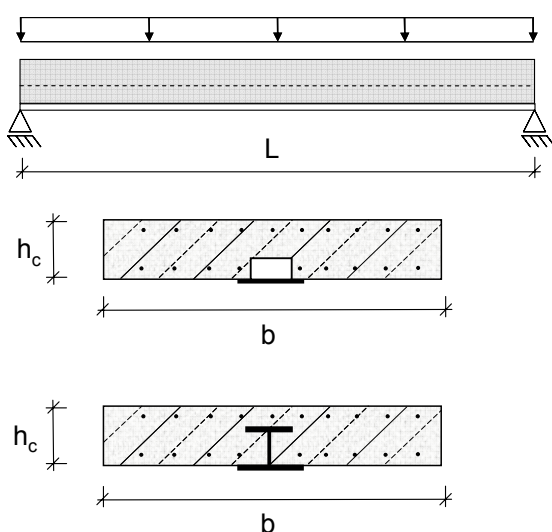
$$\frac{f_0}{f_{el}} = \frac{I_{i,0}}{I_{i,eff}} \quad (\text{Gleichung 8.3})$$

Werden nun die Gleichungen 8.2 und 8.3 ineinander eingesetzt, so lässt sich der Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  direkt über den Vergleich der Verformungen  $f_0$  und  $f_{el}$  wie folgt bestimmen:

$$\alpha_c = \frac{I_{i,0} \cdot \frac{f_{el}}{f_0} - I_a}{I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}} \quad (\text{Gleichung 8.4})$$

Im Rahmen der unten beschriebenen Parameterstudie wird nun der Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  systematisch untersucht und an einer Vielzahl von Trägern bei verschiedenen Laststufen abgeleitet. Das Ziel ist nun, diese umfangreiche Untersuchung in einen einfachen Berechnungsansatz zu überführen, um den Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  direkt mittels verschiedener und einfach definierbarer Größen bestimmen zu können.

Der hierbei untersuchte Parameterbereich (Abbildung 8.3) umfasst dabei folgende geometrischen und materiellen Grenzen.



Gewählter Parameterbereich:

Stützweite:	$L = 4,0 - 9,0 \text{ m}$
Plattendicke:	$h_c = 16 - 34 \text{ cm}$
Plattenbreite:	$b = 2,0 - 8,0 \text{ m}$
Stahlprofil:	UPE-, IFB-, SFB-Profile
Betondruckfestigkeit:	$f_c = 20 - 50 \text{ N/mm}^2$
Betonzugfestigkeit:	$f_{ct} = 1,0 - 5,5 \text{ N/mm}^2$
Stahlzugfestigkeit:	$f_y = 235 - 460 \text{ N/mm}^2$
Bewehrung oben:	$a_{s,o} = 0 - 18 \text{ cm}^2/\text{m}$
Bewehrung unten:	$a_{s,u} = 0 - 18 \text{ cm}^2/\text{m}$

Abbildung 8.3: Parameteruntersuchung zur Bestimmung des Abminderungsfaktors  $\alpha_c$

Bei der Auswertung berücksichtigt werden Belastungen bis ca. 60 % der Traglast, was ungefähr dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit entspricht und bei der der Baustahl seine Fließgrenze im Allgemeinen noch nicht erreicht hat. Insgesamt werden somit ca. zehntausend Berechnungspunkte für die Entwicklung des Ansatzes herangezogen.

Die Auswertung der untersuchten Parameter zeigt, dass sich die Steifigkeitsverteilungen und somit das Verformungs- und Rissverhalten zwischen den klassischen I-Profilen und den doch sehr niedrigen Hutprofilen merklich unterscheiden, was durch das Verhältnis der Baustahlträgerhöhe  $h_a$  und dem zugehörigen Trägheitsmoment  $I_a$  des jeweiligen Baustahlprofile zu begründen ist. Bei einem einzigen Ansatz für alle Baustahlquerschnitte würde dies zu größeren Streuungen (Standardabweichung) und damit zu einer größeren Ungenauigkeit des Ansatzes führen.

Daher wird die Entwicklung des Berechnungsansatzes für beide Querschnittsformen getrennt voneinander durchgeführt. Die Abminderungsfaktoren (s.u.) für das Material ( $\alpha_{Mat}$ ) und die Belastung ( $\alpha_M$ ) werden hierbei konstant gehalten, entsprechend nur die Faktoren ( $\alpha_V$ ) und ( $\alpha_{QS}$ ) angepasst. Da in der Praxis die Belastung von Decken hauptsächlich als Linienlasten auftreten, wird der Berechnungsansatz für eine einwirkende Streckenlast entwickelt.

Die anhand der materiell nichtlinearen Untersuchung ermittelten Referenzwerte werden für  $\alpha_c$  herangezogen und über einen Vergleich der vereinfachte Berechnungsansatz entwickelt. Die Faktoren (als Koeffizient oder Exponent) werden durch eine Regression über die Minimierung der Fehlerquadrate unter Zuhilfenahme des in Microsoft Excel implementierten Solvers bestimmt. Eine Abhängigkeit der einzelnen Faktoren ist durch den Multiplikator-Ansatz gegeben.

Die nachfolgende Gleichung stellt den Berechnungsansatz für den Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  dar:

$$\alpha_c = \alpha_V \cdot \alpha_{Mat} \cdot \alpha_{QS} \cdot \alpha_M \quad (\text{Gleichung 8.5})$$

Mit  
Vorfaktor

$$\alpha_V = 3,7 \quad \text{für Hutprofile} \quad (\text{Gleichung 8.6a})$$

$$\alpha_V = 0,4 \quad \text{für I-Profile} \quad (\text{Gleichung 8.6b})$$

Faktor für Einfluss der gewählten Materialkennwerte

$$\alpha_{Mat} = \left( \frac{f_{ct}}{f_{ct,0}} \right)^{-0,26} \cdot \left( \frac{f_c}{f_{c,0}} \right)^{0,48} \cdot \left( \frac{f_y}{f_{y,0}} \right)^{0,29} \quad (\text{Gleichung 8.7})$$

Faktor für Einfluss des gewählten Querschnitts

$$\alpha_{QS} = \left( \frac{A_{s,u} + A_a}{A_{i,0}} \right)^{0,92} \cdot \left( \frac{I_{c,0}}{I_{i,0}} \right)^{3,59} \cdot \left( \frac{a_{st}}{h_c} \right)^{-1,56} \cdot \left( \frac{b}{L} \right)^{-0,92} \quad \text{für Hutprofile} \quad (\text{Gleichung 8.8a})$$

$$\alpha_{QS} = \left( \frac{A_{s,u} + A_a}{A_{i,0}} \right)^{0,17} \cdot \left( \frac{I_{c,0}}{I_{i,0}} \right)^{3,18} \cdot \left( \frac{a_{st}}{h_c} \right)^{-1,27} \cdot \left( \frac{b}{L} \right)^{-0,56} \quad \text{für I-Profile} \quad (\text{Gleichung 8.8b})$$

Faktor für Einfluss der auf den Träger wirkenden Belastung

$$\alpha_M = \left( \frac{M_{Riss}}{M_{Ed}} \right)^{1,22} \quad (\text{Gleichung 8.9})$$

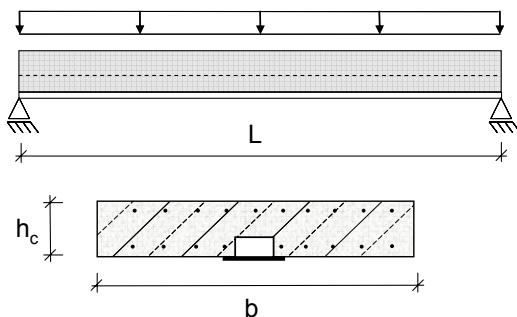
Die einzelnen verwendeten Faktoren sind hierbei wie folgt definiert:

$f_{ct}$	Zugfestigkeit des Betons in N/mm <sup>2</sup>
$f_{ct,0}$	Bezugswert für die Zugfestigkeit des Betons; $f_{ct,0} = 1,0 \text{ N/mm}^2$
$f_c$	Druckfestigkeit des Betons in N/mm <sup>2</sup>
$f_{c,0}$	Bezugswert für die Druckfestigkeit des Betons; $f_{c,0} = 30 \text{ N/mm}^2$
$f_y$	Streckgrenze des Baustahls in N/mm <sup>2</sup>
$f_{y,0}$	Bezugswert für die Streckgrenze des Baustahls; $f_{y,0} = 355 \text{ N/mm}^2$
$A_{s,u}$	Bewehrungsgehalt in der Zugzone des Betongurts in cm <sup>2</sup>
$A_a$	Querschnittsfläche des Baustahlprofils in cm <sup>2</sup>
$I_{c,0}$	Ideelle Trägheitsmoment des Betonquerschnitts in cm <sup>4</sup>
$I_{i,0}$	Ideelle Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts in cm <sup>4</sup>
$a_{st}$	Schwerpunkt Abstand zwischen Beton- und Stahlquerschnitt in cm
$h_c$	Plattendicke des Betongurts in cm
$b$	Breite des Betongurts in m
$L$	Stützweite des Trägers in m
$M_{Riss}$	Rissmoment des Verbundquerschnitts in kNm
$M_{Ed}$	Einwirkendes Moment in kNm
Anmerkung:	Die Einheiten der einzelnen Faktoren sind innerhalb der Quotienten einheitengetreu einzusetzen.

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors  $\alpha_c$  beruht auf eine Reihe von Annahmen und Anwendungsgrenzen, da die Untersuchung auf eine Verformungsberechnung am Einfeldträgersystem basiert. Wie auch schon beim analytischen Modell (Abschnitt 6.2.3) wird von einem starren Verbund ausgegangen, eine Nachgiebigkeit in der Verbundfuge und der damit verbundenen erhöhten Trägerverformung kann hiermit nicht berücksichtigt werden. Die Anwendung ist auf den Bereich der Gebrauchstauglichkeit begrenzt, so dass ein Fließen des Baustahls nicht abgedeckt ist. Die Herleitung des Abminderungsfaktors  $\alpha_c$  wurde anhand der oben beschriebenen Parameterstudie durchgeführt und liegt damit innerhalb der dort festgelegten Anwendungsgrenzen, vergleiche Abbildung 8.3.

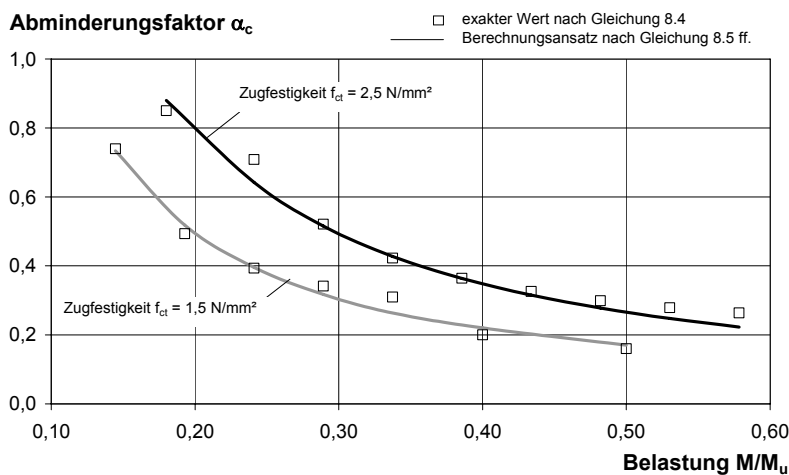
Die Exponenten und Koeffizienten der Gleichung 8.5 ff. wurden durch eine Regression über die Minimierung der Fehlerquadrate mit Hilfe des in Excel implementierten Solvers bestimmt. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch für die Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  einen Vergleich des Be-

rechnungsansatzes für  $\alpha_c$  nach Gleichung 8.5 ff. mit den genauen Ergebnissen für den Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  nach Gleichung 8.4.



Stützweite:  $L = 4,0 \text{ m}$   
 Plattenbreite:  $b = 4,0 \text{ m}$   
 Plattendicke:  $h_c = 22 \text{ cm}$   
 Betondruckfestigkeit:  $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$   
 Stahlzugfestigkeit:  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$   
 Stahlprofil: UPE 240; Fl. 440 x 10  
 Bewehrungsgehalt:  $a_{s,o+u} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$

#### a) Beispielrechnung – Einfeldträger – gewählte Parameter



#### b) Variation der Betonzugfestigkeit - $f_{ct} = 1,5 / 2,5 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8.4: Vergleich des elastischen Berechnungsansatzes nach Gleichung 8.5 ff. mit dem genauen Ansatz nach Gleichung 8.4

Der bereits entwickelte Ansatz nach [Kuhlmann et al 2006b] wird in diesem Zusammenhang nicht aufgegriffen bzw. verwendet. Dieser Ansatz wurde ausschließlich für die Hutprofile abgeleitet, so dass der Ansatz begrenzt ist, da die Faktoren speziell für die niedrige Hutform angepasst sind. Da der neue Berechnungsansatz auch für I-Profile gültig sein soll, ist der Ansatz nun so erweitert, dass die Geometrie des Baustahlprofils eine ausreichende und allgemein gültige Berücksichtigung findet. Die für beide Baustahlquerschnitte (I-Profil und Hutprofil) durchgeführte statistische Auswertung (siehe Abschnitt 8.2.6) weist eine gute Übereinstimmung auf, siehe hierzu auch Abschnitt 8.2.6.

### 8.2.4 Verifizierung des elastischen Modells an Versuchsträgern

In der nachfolgenden Abbildung sind die Vergleiche der experimentellen Last-Verformungs-Kurven der eigenen Einfeldträgerversuche VT1 und VT2 mit den rechnerischen Verläufen des linear-elastischen Ansatzes nach Gleichung 8.2 dargestellt. Da die Träger mit 4,0 m nur eine sehr geringe

ge Spannweite aufweisen, sind die Durchbiegungen unter Gebrauchslasten insgesamt nur sehr gering. In der Abbildung 8.5 ist über das einwirkende Moment die Verformung  $w_{\text{Versuch}}$  des Versuchsträgers VT1 (schwarze Kurve) und die berechnete Verformung  $w_{\text{elastisch}}$  (diskreten Punkte) abgetragen. Entsprechend hierzu sind die Werte in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

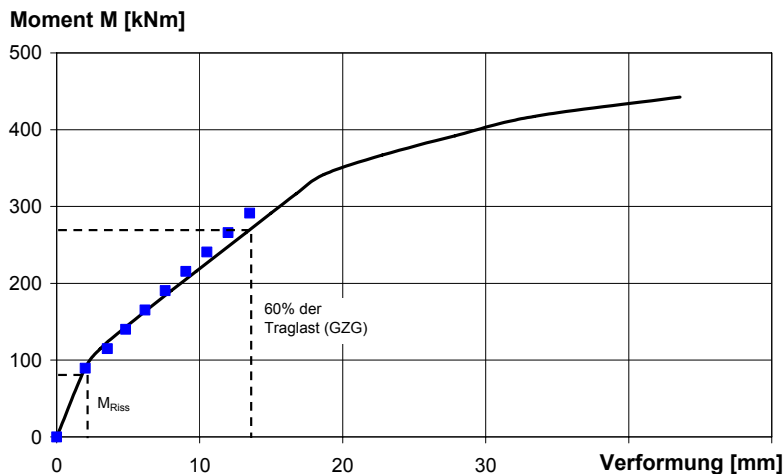


Abbildung 8.5: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT1

Die Zusammenstellung zeigt eine gute Annäherung des linear-elastischen Ansatzes an die tatsächlich gemessenen Trägerdurchbiegungen. Der Berechnungsansatz ist für Lasten bis ca. 60 % der Traglast abgeleitet, so dass höhere theoretisch ermittelte Werte im Diagramm nicht dargestellt sind.

Tabelle 8.1: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT1

$M_{Ed}$	[kNm]	88,9	116,9	140,3	163,7	191,8	215,2	243,2	266,6
$M_{Ed}/M_u$	[-]	0,19	0,25	0,30	0,35	0,41	0,46	0,52	0,57
$w_{\text{Versuch}}$	[mm]	1,99	3,1	4,6	6,3	8,0	9,7	11,5	13,4
$w_{\text{elastisch}}$	[mm]	2,0	3,5	4,8	6,2	7,6	9,0	10,5	13,5
Abweichung	[%]	-1 %	-16 %	4 %	2 %	5 %	7 %	9 %	9 %

Für den Versuchsträger VT2 ist der Vergleich in der nachfolgenden Abbildung 8.6 und Tabelle 8.2 zusammengestellt. Hierbei ist anzumerken, dass der erste theoretisch ermittelte Lastpunkt unterhalb des Rissmoments des Trägers liegt. Somit ist für die Berechnung des ungerissenen Querschnitts der Wert 1,0 für  $\alpha_c$  anzusetzen.

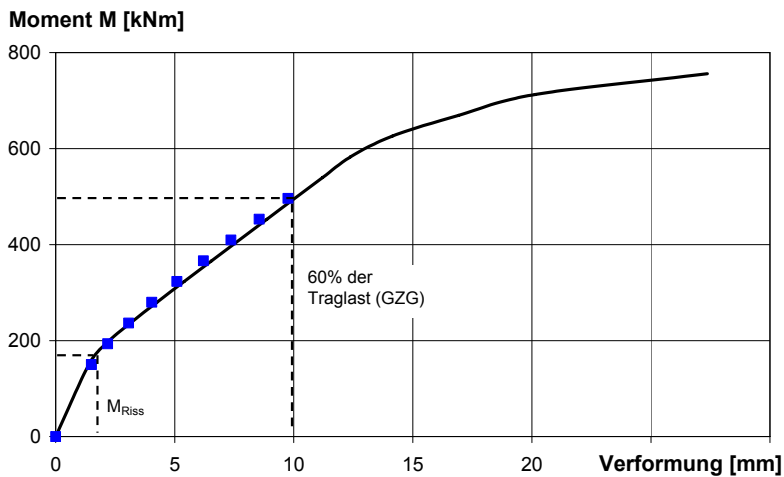


Abbildung 8.6: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT2

Tabelle 8.2: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT2

$M_{Ed}$	[kNm]	151,8	191,8	239,7	279,7	319,6	367,6	407,6	455,5
$M_{Ed}/M_u$	[-]	0,19	0,24	0,30	0,35	0,40	0,46	0,51	0,57
$w_{Versuch}$	[mm]	1,4	2,1	3,1	4,2	5,4	6,6	7,7	8,9
$w_{elastisch}$	[mm]	1,5	2,2	3,1	4,0	5,1	6,2	7,4	8,5
Abweichung	[%]	-8 %	-4 %	0 %	5 %	6 %	5 %	5 %	4 %

Die geringen Abweichungen für den Träger zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung des linear-elastischen Berechnungsmodells mit den experimentell durchgeführten Versuchen. Eine statistische Auswertung des Berechnungsansatzes mit dem nichtlinearen analytischen Modell ist im nachfolgenden Abschnitt 8.2.6 zu finden.

## 8.2.5 Einflussfaktoren des Abminderungsfaktors $\alpha_c$

### 8.2.5.1 Grundsätzliches

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  hauptsächlich von der Betonsteifigkeit bestimmt wird, da die Rissbildung maßgebend für den Steifigkeitsverlust im Verbundquerschnitt verantwortlich ist. Die Berechnungsformel für  $\alpha_c$  ist in Gleichung 8.6 bis 8.9 angegeben. Im Folgenden werden nun die wichtigsten Faktoren und deren Einfluss auf den Abminderungsfaktor betrachtet.

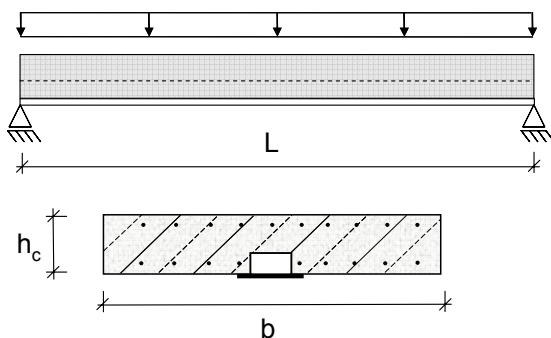
Zu beachten ist hierbei, dass die Variation eines Parameters sich auf mehrere Faktoren niederschlägt, so wirkt sich z.B. die Betonplattendicke  $h_c$  auf die Trägheitsmomente  $I_{c,0}$  und  $I_{i,0}$ , auf das statische Moment  $S_{i,0}$ , auf die Schwerpunktslage, dargestellt durch  $z_{i,0}$ , aber auch auf das Rissmoment  $M_{Riss}$  aus. Es kann daher durch die Variation eines Parameters der Einfluss nicht isoliert dargestellt werden.



Der Parameter Baustahlprofil und Bewehrungsgrad der Zugbewehrung werden nur an einem Beispiel exemplarisch dargestellt, da beide Faktoren qualitativ einen ähnlichen Einfluss auf das Rissmoment  $M_{\text{Riss}}$  wie auch auf das maximale Bruchmoment  $M_u$  besitzen.

Da die Betondruckfestigkeit, sowie die Fließgrenze des Baustahlprofils wiederum nur einen Einfluss auf das absolute Bruchmoment  $M_u$  des Slim-Floor Trägers besitzen, auf das Rissmoment  $M_{\text{Riss}}$  jedoch nicht, werden diese Parameter hier nicht gesondert aufgeführt.

Die im Folgenden gezeigten Einflussgrößen beruhen auf der Auswertung einzeln untersuchter und variiertes Parameter des Berechnungsansatzes nach Gleichung 8.5 ff. Die Diagramme zeigen den Einfluss des variierten Parameters auf das effektive Trägheitsmoment  $I_{i,\text{eff}}$  in Abhängigkeit der Belastung, die als bezogenes Moment ( $M_{\text{Ed}} / M_u$ ) angegeben ist. Der für die Berechnung gewählte Basisträger ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Gewählter Parameterbereich:

Stützweite:	$L = 6,0 \text{ m}$
Plattendicke:	$h_c = 26 \text{ cm}$
Plattenbreite:	$b = 6,0 \text{ m}$
Stahlprofil:	UPE 240, Fl. 440x10
Betondruckfestigkeit:	$f_c = 30 \text{ N/mm}^2$
Betonzugfestigkeit:	$f_{ct} = 2,0 \text{ N/mm}^2$
Stahlzugfestigkeit:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
Bewehrung oben:	$a_{s,o} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$
Bewehrung unten:	$a_{s,u} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$

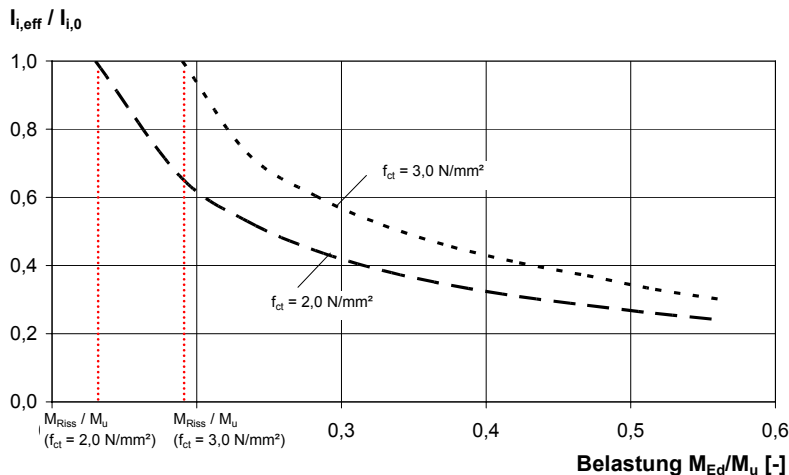
Abbildung 8.7: Basisträger für Parameteruntersuchung - Einflussgrößen auf die effektive Trägheitssteifigkeit  $I_{i,\text{eff}}$

### 8.2.5.2 Einfluss der Betonzugfestigkeit $f_{ct}$

Die Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  besitzt einen großen Einfluss auf das Rissmoment  $M_{\text{Riss}}$  des Slim-Floor Trägers. Das bedeutet, dass damit auch der Wert für das effektive Trägheitsmoment  $I_{i,\text{eff}}$  stark davon abhängt. Mit größerer Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  steigt der Wert für das Rissmoment  $M_{\text{Riss}}$  des Querschnitts entsprechend an, weshalb die Kurven von verschiedenen Startwerten ausgehen. Mit Beginn der Rissbildung verliert der Träger aber an Biegesteifigkeit, da der Biegetraganteil des Betongurts  $I_{c,0}$  stetig abnimmt.

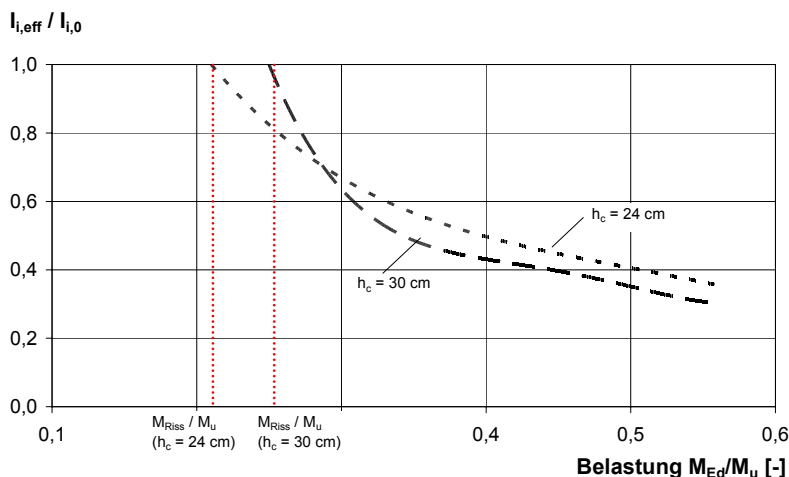
Da die Zugfestigkeit jedoch einen vernachlässigbaren Einfluss auf das maximale Bruchmoment  $M_u$  des Trägers besitzt, nähern sich die in Abbildung 8.11 gezeigten Kurven mit zunehmender Belastung wieder an.

Der Träger mit der höheren Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  besitzt hierbei insgesamt eine steilere Kurve, da der Abstand zwischen dem Rissmoment und dem Bruchmoment des Trägers geringer ist als beim Beispielträger mit der geringeren Betonzugfestigkeit.


 Abbildung 8.8: Effektives Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$  in Abhängigkeit der Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$ 

### 8.2.5.3 Einfluss der Betonplattendicke $h_c$

Die Dicke des Betongurtes  $h_c$  wirkt sich ebenfalls sehr stark auf das Rissmoment  $M_{Riss}$  aus, da die Plattendicke  $h_c$  mit der dritten Potenz in die Berechnung des Betonträgheitsmoments  $I_{c,0}$  eingeht. Dies bedeutet für den Verlauf des effektiven Trägheitsmoments  $I_{i,eff}$ , hier abgetragen über das bezogene Moment  $M/M_u$ , dass mit höherem Betongurt die Kurve bei einem größeren Wert beginnt. Der Träger beginnt somit später zu reißen, so dass auch die Reduzierung der Biegesteifigkeit erst später einsetzt, siehe Abbildung 8.9.


 Abbildung 8.9: Effektives Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$  in Abhängigkeit der Betonplattendicke  $h_c$ 

Durch die Rissbildung verliert der Betongurt an Steifigkeit. Aus diesem Grund verläuft die Kurve des Gurtes mit größerer Plattendicke steiler, da der Biegetraganteil im Vergleich zum niedrigeren Betongurt größer ist. In Abhängigkeit des maximalen Bruchmoments können sich die Kurven entsprechend auch schneiden, wie im hier gezeigten Beispiel.

Die Plattendicke besitzt auf das Bruchmoment  $M_u$  des Querschnitts einen großen Einfluss, da sich das Bruchmoment  $M_u$  neben dem Anteil des Baustahlprofils aus dem Kräftepaar (Zugkraft im

Baustahlprofil und Druckkraft des Betongurtes) zusammensetzt, das wiederum stark durch den Hebelarm im Querschnitt beeinflusst wird.

#### 8.2.5.4 Einfluss der Baustahlprofile $A_a$

Mit Variation des Baustahlprofils (analog gilt dies für die eingelegte Zugbewehrung  $A_{s,u}$ ) kann das Bruchmoment  $M_u$  des Querschnitts beeinflusst werden, so dass sich die Startwerte der Kurven in Abbildung 8.10 jeweils bei den bezogenen Momenten unterscheiden. Ebenso wird das Rissmoment  $M_{Riss}$  vom Querschnitt des Baustahlprofils beeinflusst, da sich der Querschnitt auf das gesamte Verbundträgheitsmoment  $I_{i,0}$  auswirkt, jedoch ist hierbei der Einfluss geringer anzusehen.

Für das effektive Trägheitsmoment des Trägers bedeutet dies, dass der Wert  $I_{i,eff}$  mit der Wahl eines größeren Profils kleiner ist. Der Wert für das bezogene Moment  $M/M_u$  wird kleiner, da die Differenz zwischen dem Rissmoment und dem Bruchmoment größer wird.

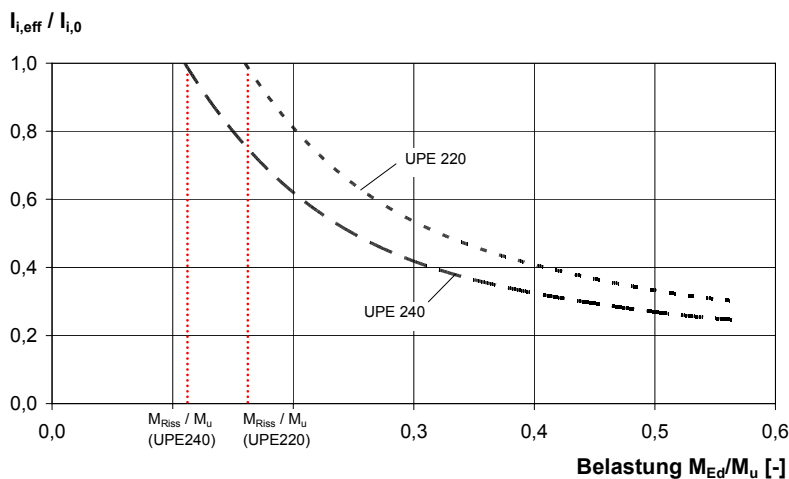


Abbildung 8.10: Effektives Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$  in Abhängigkeit der Baustahlprofile  $A_a$

#### 8.2.6 Statistische Auswertung des linear-elastischen Ansatzes

Die Anwendbarkeit des linear-elastischen Ansatzes kann durch den Vergleich mit dem analytischen nichtlinearen Berechnungsansatz gezeigt werden. Die nach Gleichung 8.4 bestimmten Abminderungsfaktoren auf Basis der analytischen Verformungsberechnung unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands werden den nach Gleichung 8.5ff. bestimmten Abminderungsfaktoren  $\alpha_c$  auf Basis des entwickelten linear-elastischen Berechnungsansatzes gegenübergestellt.

Da die Faktorenbestimmung über die Minimierung der Fehlerquadrate durchgeführt wird und auf die Optimierung der Streubreite der Berechnungsergebnisse Wert hin ausgerichtet wird, liegt der Mittelwert aller Ergebnisse nach Umrechnung auf die Trägerverformung für  $f_{i,eff}/f_{analyt}$  bei 1,04. Hierbei werden alle Werte, wie bereits oben beschrieben, innerhalb des Bereichs bis ca. 60 % der maximalen Belastung, als für den Bereich der Gebrauchstauglichkeit, herangezogen. Die Standardabweichung liegt hier bei 0,13. Die Verteilung der Ergebniswerte ist in der nachfolgenden Abbildung für die Hutprofile dargestellt.

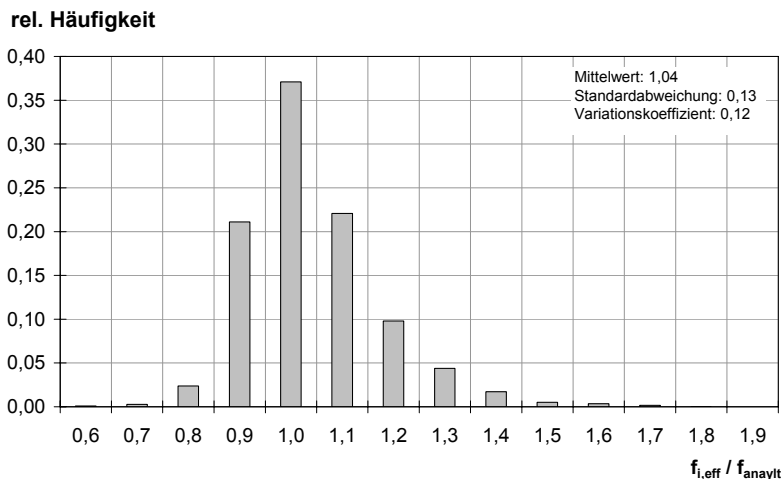


Abbildung 8.11: Vergleich der Durchbiegung  $f_{i,eff}$  mit Durchbiegung  $f_{analyt}$  (Hutprofile)

Durch den Mittelwert von 1,04 liegen die Werte ein wenig darüber, so dass die rechnerisch bestimmte Durchbiegung mittels des linear-elastischen Ansatzes die Verformung ganz leicht überschätzt. Insgesamt kann der Berechnungsansatz aber für die Praxisanwendung als geeignet angesehen werden.

## 8.3 Linear-elastischer Ansatz für Zweifeldträger

### 8.3.1 Grundsätzliches

Für die nichtlineare Berechnung wurde auf Grundlage des Ansatzes für den Einfeldträgers eine Erweiterung für zweifeldrige Systeme in Abschnitt 7.4 vorgestellt. Nachfolgend soll dies nun ebenfalls auf Basis des linearen Ansatzes gemäß Gleichung 8.1 für Zweifeldträger entwickelt werden. Hierbei kommen zwei Möglichkeiten in Frage:

- Anwendung einer reduzierten Trägersteifigkeit  $I_{i,2,eff}$  zur Berechnung der Verformung am Zweifeldträger (siehe Abschnitt 8.3.2)
- Einfeldträger mit Drehmomentenfeder als Ersatzsystem (siehe Abschnitt 8.3.4)

### 8.3.2 Berechnungsansatz mit reduzierter Trägersteifigkeit $I_{i,2,eff}$

#### 8.3.2.1 Grundsätzliches

Für die praktische Anwendung würde es auf den ersten Blick am Sinnvollsten zu erscheinen, den bestehenden Ansatz des Einfeldträgers (Abschnitt 8.2) auch für die Zweifeldträgersysteme zu übernehmen und entsprechend weiter zu entwickeln. Da sich das Trag- und Verformungsverhalten des Zweifeldträgers jedoch vor allem im Gebrauchslastzustand vom Einfeldträgersystem unterscheidet, werden die für den Einfeldträger ermittelten Werte des effektiven Trägheitsmoments  $I_{i,eff}$  nicht unmittelbar übernommen und durch die Einspannwirkung über der Mittelstütze erweitert.

Die nachfolgende Abbildung 8.12 zeigt das typische Last-Verformungsverhalten eines Querschnitts, ausgeführt als Einfeldträger (blaue Kurve) und als Zweifeldträger (grüne Kurve).

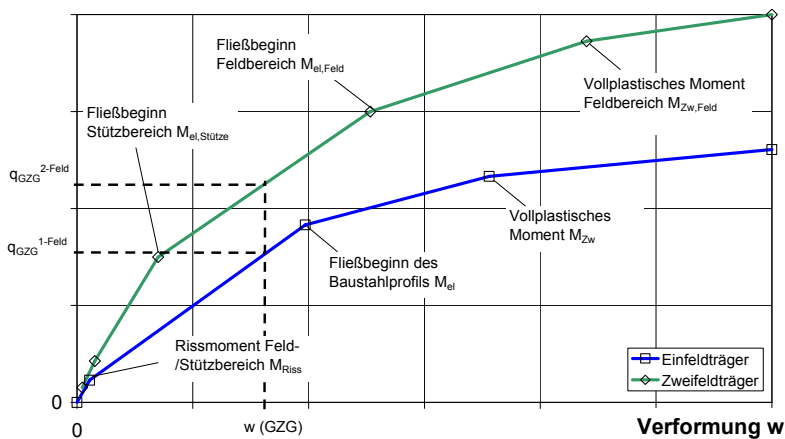
Belastung  $q$ 


Abbildung 8.12: Lastverformungskurve eines Ein- und Zweifeldträgers mit diskreten Belastungspunkten

Unter Gebrauchslasten erreicht der Baustahl im Feldbereich nicht den Fließbereich, so dass für die Verformungsberechnung nur der Steifigkeitsverlust des Betongurts infolge Rissbildung berücksichtigt werden muss.

Im Gegensatz dazu aber kann die Zugbewehrung über dem Mittelaufleger des Zweifeldträgers die Streckgrenze überschreiten, so dass neben der Rissbildung im Feld- und Stützbereich die Verformung entscheidend durch das Fließverhalten beeinflusst wird. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum Einfeldträger ein nichtlineares Verformungsverhalten des Betons im Feld- und Stützbereich sowie der Zugbewehrung über dem Mittelaufleger vorliegen kann.

Betrachtet man die Berechnungsgleichung für den linear-elastischen Ansatz zu Bestimmung der Trägerverformung des Einfeldträgers, so wird das Rissmoment im Feldbereich als Bezugsgröße für das einwirkende Moment herangezogen. Dies kann nicht ohne weiteres für den Zweifeldträger übernommen werden, da einerseits durch die Durchlaufträgerwirkung die Rissbildung im Feldbereich später einsetzt und sich andererseits mit Überschreiten des Rissmoments über dem Mittelaufleger die Verformung bereits im nicht-linearen Bereich befindet.

Aus diesen genannten Gründen heraus wird ein neuer Ansatz entwickelt, der diese genannten Effekte berücksichtigt.

### 8.3.2.2 Herleitung eines linearen Ansatzes zur Verformungsberechnung von Zweifeldträgern

Analog dem vereinfachten Bemessungsverfahren nach [DIN 18800-5] mit der reduzierten Steifigkeit im Bereich der Mittelstütze (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.4) wird für die Mittelstütze der gerissene Querschnitt als konstant angenommen und der Feldbereich durch Reduktion des Gesamtverbundträgheitsmoments angepasst.

Erste Voruntersuchungen zeigten hierbei folgende Ergebnisse:

- da die Rissbildung über der Stütze bereits unter sehr geringen Lasten eintritt, verliert der Verbundquerschnitt in diesem Bereich sehr schnell an Steifigkeit.
- die Rissbildung schreitet über dem Mittelaufleger sehr schnell voran, so dass der Biegetraganteil des Betongurtes rasch abnimmt und vernachlässigt werden kann (im Bereich der Mittelstütze wird daher vereinfacht nur das Baustahlprofil angesetzt).

- dieser Effekt wird durch die Rissbildung im Feldbereich weiter verstärkt, so dass auch dort die Betonträgersteifigkeit abnimmt (der Verbundquerschnitt wird daher als obere Grenze angenommen, der entsprechend mit zunehmender Belastung reduziert wird).
- mit Überschreiten der Streckgrenze der Zugbewehrung über dem Mittelaufleger nimmt die Verformung weiter überproportional zu, so dass dies rechnerisch über die Reduktion des Verbundquerschnitts aufgefangen werden muss.

Da die über den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit hinausgehenden Lastbereiche keine Rolle für die Verformungsberechnung spielen, wird diese daher auch für den Berechnungsansatz nicht weiter berücksichtigt.

Die Verformung des Zweifeldträgers soll mittels eines linear-elastischen Ansatzes bestimmt werden, bei dem das nichtlineare Tragverhalten durch die Abminderung  $\alpha_{c,2}$  der Trägersteifigkeit berücksichtigt wird. Die Trägersteifigkeit im Feldbereich wird hierbei wie folgt berechnet:

$$I_{i,2,eff} = \alpha_{c,2} \cdot (I_a + I_{c,0} + S_{i,0} \cdot a_{St}) \quad (\text{Gleichung 8.10})$$

Da, wie bereits erwähnt, die Trägersteifigkeit des Stützbereiches durch die Rissbildung und durch das Fließen der Zugbewehrung sehr stark nachlässt, wird für diesen Bereich die Steifigkeit konstant gehalten, während nur der Feldbereich angepasst wird, wie in Abbildung 8.13 dargestellt wird.

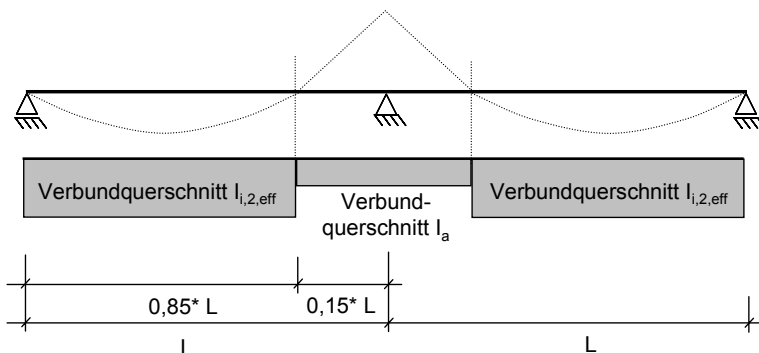


Abbildung 8.13: Trägersteifigkeit des Stütz- und Feldbereichs für linear-elastischen Verformungsansatz

Entsprechend der normativen Regelung wird der Sprung in der Steifigkeit ebenfalls für einen Bereich links und rechts des Mittelauflegers mit  $0,15 \cdot L$  angenommen, siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.4.2. In Anlehnung an die effektive Trägersteifigkeit  $I_{i,eff}$  des Einfeldträgers wird diese für den Zweifeldträger mit  $I_{i,2,eff}$  und der Abminderungsfaktor mit  $\alpha_{c,2}$  bezeichnet.

Der Faktor  $\alpha_{c,2}$  wird wie folgt bestimmt (Abbildung 8.14): Ausgehend von der nichtlinearen Berechnung des Zweifeldträgers auf Basis der mittragende Breite für den Scheiben- und Biegezustand wird eine umfangreiche Parameterstudie an Zweifeldträgern durchgeführt. Da das Modell anhand der durchgeführten Versuche verifiziert werden konnte (siehe Abschnitt 6.3), kann die Trägerdurchbiegung  $f$  als die wirkliche Verformung des Zweifeldträgers angesehen werden. Gleichzeitig wird nun eine linear-elastische Verformungsberechnung auf Basis der Stabstatik durchgeführt. Für den Bereich um das Mittelaufleger wird die konstante Trägersteifigkeit des Baustahlquerschnitts  $I_a$  und für den Feldbereich der Verbundquerschnittswert  $I_{i,0}$  angesetzt, der mit dem von der Last und

dem durch die Rissbildung entstehendem Steifigkeitsverlust abhängigen Abminderungsfaktor  $\alpha_{c,2}$  multipliziert wird.

Der Abminderungsfaktor  $\alpha_{c,2}$  für den Feldbereich wird nun so lange variiert, bis die linear-elastische Verformungsberechnung mit der analytischen Trägerdurchbiegung übereinstimmt. Im Gegensatz zum Einfeldträger kann hier der Abminderungsfaktor nicht allein auf die Betonanteile bezogen werden. Dies liegt daran, dass infolge des Fließens des Querschnitts im Stützbereich und der ausgeprägten Rissbildung im Feldbereich die Durchbiegungen so groß werden, dass durch die alleinige Reduktion der Betonanteile die berechneten Trägersteifigkeiten noch zu hoch sind und damit eine zu kleine Verformung bestimmt werden würde. Die Steifigkeit im Feldbereich kann damit unter entsprechend hohen Lasten auch innerhalb des Gebrauchslastniveaus rechnerisch kleiner als die reine Stahlträgersteifigkeit werden.

In diesem Zusammenhang ist aber anzumerken, dass durch Unterschreiten dieser Steifigkeit nicht von einem tatsächlichen Fließen des Slim-Floor Trägers im Feldbereich ausgegangen werden kann, da es sich hier um einen ideellen Querschnittswert handelt.

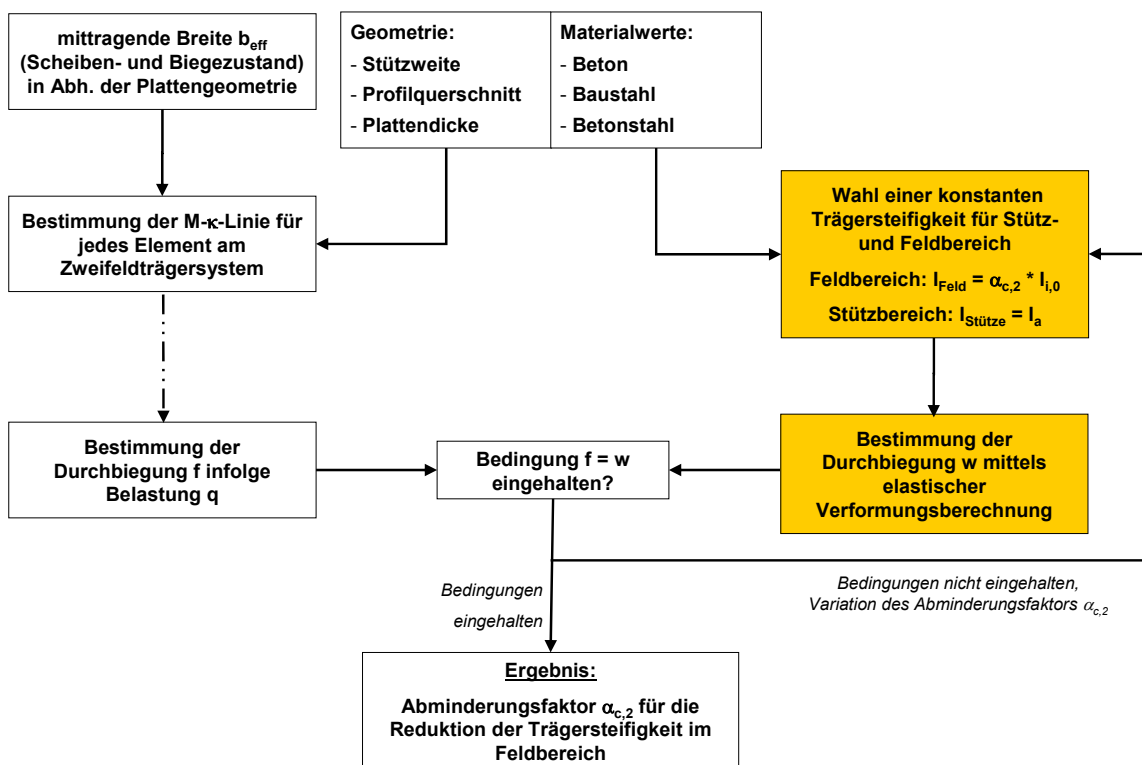


Abbildung 8.14: Schematische Darstellung zur Bestimmung der reduzierten Trägersteifigkeit  $I_{i,2,eff}$

Analog zum linear-elastischen Berechnungsansatz wird für den Zweifeldträger die Berechnungsformel für den hutförmigen und I-förmigen Querschnitt getrennt bestimmt. Der Abminderungsfaktor  $\alpha_{c,2}$  setzt sich hierbei wieder aus den vier Einzelfaktoren zusammen, die den Querschnitt, die Belastung und die Materialkennwerte berücksichtigen. Der Faktor  $\alpha_{c,2}$  ist ein globaler Berechnungsfaktor, der durch die Anpassung des Berechnungsansatzes nach der Methode des Fehlerquadrats bestimmt worden ist.

$$\alpha_{c,2} = \alpha_{V,2} \cdot \alpha_{Mat} \cdot \alpha_{QS,2} \cdot \alpha_{M,2} \quad (\text{Gleichung 8.11})$$

Mit

Vorfaktor

$$\alpha_{V,2} = 0,1 \quad \text{für Hutprofile} \quad (\text{Gleichung 8.12a})$$

$$\alpha_{V,2} = 1,0 \quad \text{für I-Profile} \quad (\text{Gleichung 8.12b})$$

Faktor für Einfluss der gewählten Materialkennwerte

$$\alpha_{\text{Mat}} = \left( \frac{f_{ct}}{f_{ct,0}} \right)^{0,79} \cdot \left( \frac{f_c}{f_{c,0}} \right)^{-0,1} \cdot \left( \frac{f_y}{f_{y,0}} \right)^{0,18} \quad (\text{Gleichung 8.13})$$

Faktor für Einfluss des gewählten Querschnitts

$$\alpha_{QS,2} = \left( \frac{A_{s,o}}{h_c^2} \right)^{-0,12} \cdot \left( \frac{A_{s,u} + A_a}{A_{i,0}} \right)^{-0,06} \cdot \left( \frac{l_{c,0}}{l_{i,0}} \right)^{-58,1} \cdot \left( \frac{a_{st}}{h_c} \right)^{7,7} \cdot \left( \frac{b}{L} \right)^{4,7} \quad (\text{Gleichung 8.14a})$$

für Hutprofile und

$$\alpha_{QS,2} = \left( \frac{A_{s,o}}{h_c^2} \right)^{-0,10} \cdot \left( \frac{A_{s,u} + A_a}{A_{i,0}} \right)^{1,6} \cdot \left( \frac{l_{c,0}}{l_{i,0}} \right)^{-21,3} \cdot \left( \frac{a_{st}}{h_c} \right)^{3,15} \cdot \left( \frac{b}{L} \right)^{3,1} \quad (\text{Gleichung 8.14b})$$

für I-Profile

Faktor für Einfluss der auf den Träger wirkenden Belastung

$$\alpha_{M,2} = \left( \frac{q_{Ed}}{q_u} \right)^{-0,74} \quad \text{für Hutprofile} \quad (\text{Gleichung 8.15a})$$

$$\alpha_{M,2} = \left( \frac{q_{Ed}}{q_u} \right)^{-0,68} \quad \text{für I-Profile} \quad (\text{Gleichung 8.15b})$$

Die im Vergleich zum Ansatz des Einfeldträgers neu hinzugekommenen Faktoren sind wie folgt definiert (siehe hierzu auch Abschnitt 8.2.3.2):

$A_{s,o}$	Bewehrungsgehalt in der Zugzone des Betongurts über der Mittelstütze in cm <sup>2</sup>
$q_{Ed}$	einwirkende Belastung in kN/m
$q_u$	Belastung bei Erreichen der Traglast des Einfeldträgers in kN/m



### 8.3.3 Statistische Auswertung des linear-elastischen Ansatzes für Zweifeldträger

Die Anwendbarkeit des linear-elastischen Ansatzes kann durch den Vergleich mit dem analytischen nichtlinearen Berechnungsansatz gezeigt werden. Hierzu werden alle in der Parameterstudie durchgeführten Rechnungen mit den Verformungsergebnissen aus dem analytischen Ansatz gegenübergestellt.

Da die Faktorenbestimmung über die Minimierung der Fehlerquadrate durchgeführt und auf die Optimierung der Streubreite der Berechnungsergebnisse Wert gelegt wird, liegt der Mittelwert aller Ergebnisse für  $f_{i,2,eff}/f_{analyt}$  bei 1,06. Hierbei wurden alle Werte, wie bereits oben beschrieben, innerhalb des Bereichs bis ca. 60 % der Traglast des Zweifeldträgers, also für den Bereich der Gebrauchstauglichkeit, herangezogen. Die Standardabweichung liegt hier bei 0,26 und der Variationskoeffizient bei 0,25. Die Verteilung der Ergebniswerte ist in der nachfolgenden Abbildung für die Hutprofile dargestellt. Dabei bezeichnet  $f_{i,2,eff}$  die Verformungen auf Basis des Berechnungsansatzes nach Gleichung 8.11 und  $f_{analyt}$  die Verformungsergebnisse auf Basis der analytischen Verformungsberechnung unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands.

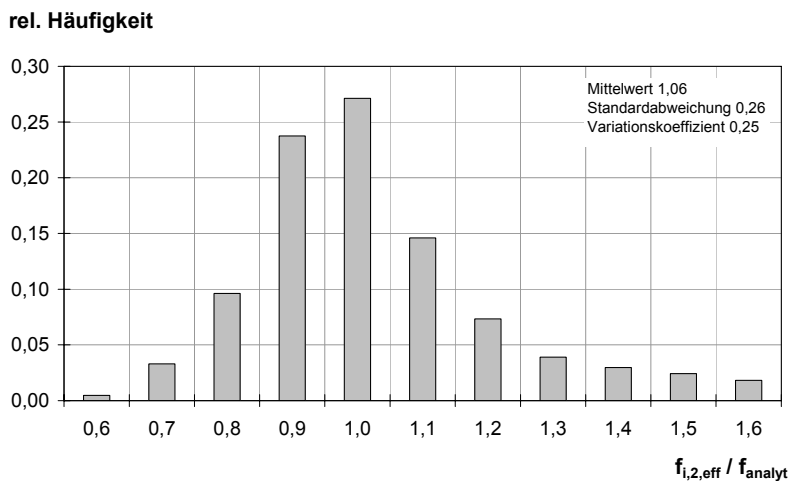


Abbildung 8.15: Vergleich der Durchbiegung  $f_{i,eff}$  mit Durchbiegung  $f_{analyt}$

Anhand der statistischen Auswertung ist zu erkennen, dass für den Zweifeldträger die Streubreite im Vergleich zur Auswertung der Einfeldträger größer ist. Dies hängt damit zusammen, dass die Durchbiegung von der Steifigkeitsverteilung zwischen Feld- und Stützbereich abhängig ist. Während sich beim Einfeldträger nur der Feldbereich durch das Reißen des Betonquerschnitts nicht-linear verhält, sind dies beim Zweifeldträger der Feld- und der Stützbereich. Der hier entwickelte Ansatz versucht diese Effekte auf Basis linear-elastischer Werte zu berücksichtigen, so dass zwangsläufig eine größere Streuung auftritt.

### 8.3.4 Berechnungsansatz mit Federsteifigkeit als Ersatzsystem

Um die Durchbiegung eines Zweifeldsystems, bei dem im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit der Stütz- und Feldbereich durch die Rissbildung an Steifigkeit verliert, zu berechnen, würde sich als zweite Möglichkeit anbieten, einen Einfeldträger mit einer Drehmomentenfeder als Ersatzsystem auszubilden. Hierbei soll die Rissbildung und der damit verbundene Verlust der Biege-

steifigkeit des Betongurts durch die Variation der Drehfeder bestimmt und dabei die Trägersteifigkeit konstant gehalten werden, siehe Abbildung 8.16.

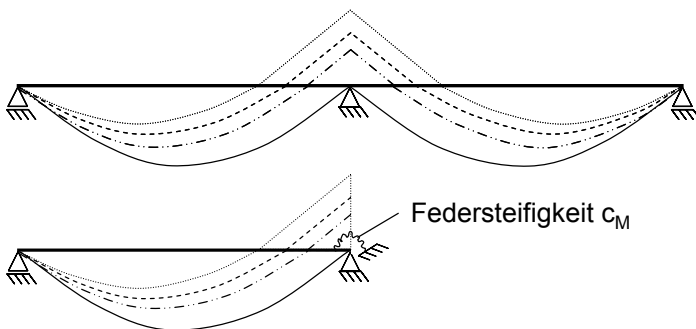


Abbildung 8.16: Durchbiegungsberechnung am Ersatzsystem – Einfeldträger mit Drehfeder

Dieser Berechnungsansatz ist jedoch leider nicht über den gesamten Bereich der Gebrauchstauglichkeit mit einem konstanten Trägheitsmoment des Ersatzträgers anwendbar, wie nachfolgend erläutert wird.

Grundsätzlich macht dieser Berechnungsansatz für die praktische Anwendung nur dann Sinn, wenn mit einer auch bei veränderlicher Streckenlast konstanten Trägersteifigkeit und einer von der Rissbildung und Steifigkeitsverteilung abhängigen Federsteifigkeit gearbeitet werden kann. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Federsteifigkeit am Mittelaufleger bestimmen zu können. Mit Hilfe eines in VBA-Excel programmierten Tools, das auf Grundlage des Kraftgrößenverfahrens die Durchbiegung eines Einfeldträgers unter Berücksichtigung einer Drehfeder an einem Auflager ermittelt, sollte nun auf den Wert der Ersatzfedersteifigkeit rückgeschlossen werden. Hierbei wurde über die Solver-Funktion der Wert für die Drehfedersteifigkeit so bestimmt, dass die tatsächliche mit dem analytischen Ansatz berechnete Durchbiegung  $f$  mit der Trägerdurchbiegung  $w$  des Ersatzsystems übereinstimmt.

Die Steifigkeit der Feder bewegte sich hierbei zwischen zwei möglichen Grenzwerten. Erreicht die Drehfeder ihren maximalen Wert, so bildet sich statisch gesehen eine Volleinspannung aus und das Stützmoment kann bei konstanter Trägersteifigkeit entsprechend der elastischen Stabstatik zu  $M_{\text{Stütze}} = -ql^2/8$  berechnet werden. Für den zweiten Grenzwert läuft die Federsteifigkeit gegen Null, so dass die Feder faktisch nicht wirkt und letztendlich ein Einfeldträgersystem vorliegt. Die Feder idealisiert somit den Steifigkeitsverlust, der durch die Rissbildung im Bereich der Mittelstütze eintritt.

In einer umfangreicheren Voruntersuchung wurde dieser gedachte Berechnungsansatz angewandt und überprüft, ob anhand der Berechnungsformel auf eine Drehfedersteifigkeit rückgeschlossen werden kann.

Mit Beginn der Berechnung stellte sich die Frage nach der Trägersteifigkeit, die konstant über das Ersatzträgersystem angenommen werden soll. Auch hier sind zwei Grenzwerte möglich, der ungerissene Zustand, also  $I_{i,0}$  und das Trägheitsmoment des Gesamtstahls  $I_{st}$  als unterer Grenzwert, da infolge höherer Lasten die Rissbildung im Betongurt zunimmt und damit die Biegesteifigkeit des Betons verloren geht. Es zeigte sich hierbei jedoch folgendes:

Wird das über den Träger hinweg konstante Trägheitsmoment des ungerissenen Querschnitts angesetzt, so kann für kleine Lasten (im Bereich bis ca. 20% der Traglast, bezogen auf die Bruchlast des Einfeldträgers) eine Federsteifigkeit ermittelt werden, die mit zunehmender Belastung kleiner wird. Bei weiterer Belastung reißt der Querschnitt über der Stütze und im Feldbereich wei-

ter auf, so dass durch den Steifigkeitsverlust die Durchbiegung stark zunimmt. Demzufolge muss die Federsteifigkeit weiter reduziert werden, bis die Verformungsbedingung erreicht wird. Aber selbst die Berechnung am Ersatzträger mit einer Federsteifigkeit von Null (entspricht einem Einfeldträgersystem) und dem ideellen Verbundquerschnittswert  $I_{i,0}$  gibt eine kleinere Verformung wieder. Das Ersatzsystem ist somit bei höheren Lasten und selbst für den Grenzwert, dass die Federsteifigkeit gegen Null läuft und ein Einfeldträger vorliegt, immer noch steifer als das tatsächliche System und die Verformung daher unterschätzen würde.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der Federsteifigkeit in Abhängigkeit der Belastung auf den Träger. Die Parameter des gewählten Beispiels sind ebenfalls in der Abbildung angegeben. Die verwertbaren Ergebnisse sind nur sehr eingeschränkt anwendbar, da sie nur einen kleinen Teil im Bereich der Gebrauchstauglichkeit, bei diesem Beispiel von 0 bis ca. 15% der Belastung, abdecken.

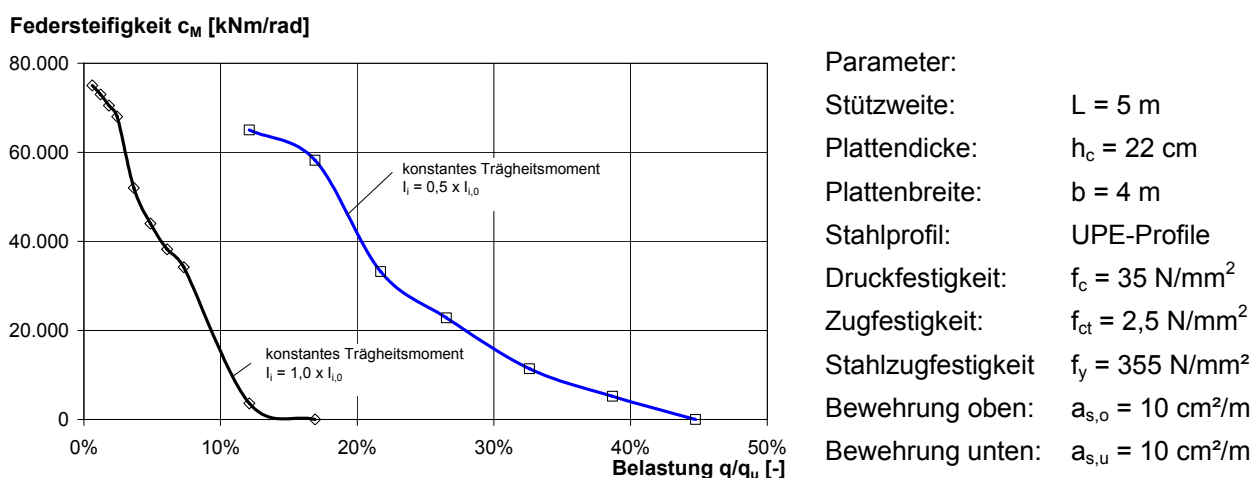


Abbildung 8.17: Verlauf der Federsteifigkeiten  $c_M$  in Abhängigkeit der Belastung  $q$  und der gewählten konstanten Trägersteifigkeit  $I_{i,0}$

Wird im Gegensatz dazu das Trägheitsmoment des Gesamtstahls  $I_{st}$  als unterer Grenzwert konstant über das Ersatzsystem angesetzt, wird das System nun so weich, dass auch mit einer Vollspannung die tatsächliche Verformung nicht erreicht werden kann. Es liegt daher nahe, einen Mittelwert für das Trägheitsmoment zu wählen (siehe Abbildung 8.17 mit  $I_i = 0,5 \times I_{i,0}$ ). Doch die Untersuchung zeigt auch hier, dass jeweils nur ein sehr kleiner Bereich (ca. 15 - 40 %) der Belastung abgedeckt werden kann.

Dies begründet sich damit, dass das Zweifeldträgersystem durch die Rissbildung einem größeren Steifigkeitsverlust unterliegt, als dass dies durch die Federsteifigkeit an der Stütze abgebildet werden kann. Der Steifigkeitsverlust des Stütz- und Feldbereichs ist somit zusammen größer als durch die Variation der Federsteifigkeit zwischen Vollspannung und Gelenk über die Abnahme des Einspanngrades der Feder kompensiert werden kann. Um dies zu untermauern, wurden für verschiedene Querschnitte (UPE, SFB und IFB-Profile) und Parameter Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die untersuchten Träger zeigten hierbei immer ein sehr ähnliches Verhalten.

Eine Aufteilung in mehrere Laststufen mit jeweils einem veränderten Trägheitsmoment erscheint für die praktische Anwendung aber nicht als sinnvoll, so dass auf eine weitere Verfolgung dieses Berechnungsansatzes verzichtet wird.

## 9 Weitere noch offene Fragestellungen zu Slim-Floor Trägern

### 9.1 Grundsätzliches

Die in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsansätze konzentrieren sich auf das Verformungsverhalten der Träger unter Gebrauchslasten. Für Slim-Floor Träger zeigt sich, dass der Nachweise der Trägerdurchbiegung oftmals bemessungsbestimmend wird und hieraus der maßgebende Querschnitt definiert wird.

In diesem Zusammenhang gibt es noch weitere Themen, die zukünftig untersucht werden sollten, so dass die Verbundflachdeckenbauweise wirtschaftlich bemessen und angewandt werden kann. Hierzu zählen Fragen nach dem Einfluss aus Schwinden und Kriechen auf das Verformungsverhalten. Aber auch für den Nachweise der Tragfähigkeit gibt es noch einzelne Punkte, wie die Frage nach der Querkrafttragfähigkeit des Slim-Floor Trägers unter rechnerischer Berücksichtigung der Querkraft im Betonquerschnitt, die nicht abschließend geklärt sind und Berechnungsansätze entscheidend dazu beitragen könnten, die Bemessung wie auch die Anwendung weiter zu optimieren. Als weitere kleinere Erweiterung zählt ebenso das Verformungsverhalten von mehrfeldrigen durchlaufenden Trägersystemen. Im nachfolgenden Abschnitt werden noch offene Fragestellungen kurz angesprochen und erläutert.

### 9.2 Einfluss aus Schwinden und Kriechen

Der Beton besitzt ein zeitabhängiges Materialverhalten, so dass beim Verbundträger durch das Zusammenwirken des Baustahlprofils mit dem Betonquerschnitt Umlagerungen und dadurch Spannungsänderungen im System stattfinden [Hanswille, Schäfer 2005]. In diesem Zusammenhang sind drei Phänomene des nichtlinearen Materialverhaltens zu nennen:

*Kriechen:* Zeitabhängiges Verformungsverhalten unter Dauerlasten. Die rechnerische Umsetzung des Kriechens erfolgt mittels der Kriechzahl  $\varphi = \varphi(t, t_0)$ . Da dieser Wert stark von Faktoren wie dem Betonalter beim Belastungsbeginn, dem w/z-Wert, der Betonkörpergeometrie und der Luftfeuchte abhängt, ist eine präzise Voraussage über das Kriechverhalten nur sehr schwer möglich.

*Schwinden:* Verkürzung des Betons durch Austrocknen ohne notwendige äußere Belastung. Die Schwindverkürzung wird maßgebend durch die Zementart, der Betonkörperoberfläche und der Luftfeuchte in der Umgebung bestimmt. Auch hier lässt sich nur sehr schwer eine Aussage über das Schwindverhalten treffen, da die äußeren Randbedingungen oftmals zu komplex oder auch unbekannt sind.

*Relaxation:* Spannungsänderung durch aufgezwungene Verformung

Für die Berücksichtigung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens des Betons findet man in der Literatur eine Vielzahl von Berechnungsansätzen. Diese sind jedoch alles Näherungslösungen und weichen teilweise stark voneinander ab, insbesondere was die wirklichkeitsnahe Ermittlung der Kriechbeiwerte und Schwinddehnungen betrifft. Es stellt sich daher nun die Frage, in wie fern sich das Kriechen und Schwinden auf Verbundkonstruktionen auswirkt und welche Berechnungsansätze hierfür vorhanden sind.

In der Arbeit von [Haensel 1975] werden im Rahmen des Gesamtquerschnittsverfahrens das zeitabhängige Verformungsverhalten durch Idealisierung eines Stahlträgers vorgestellt. Dies bildet noch heute für den Verbundbau die Basis für die Abbildung des nichtlinearen Verhaltens. Fortführende Ansätze sind in den Arbeiten von [Iliopoulos, 2005], [Xia 1999] zu finden. Auf Basis der ermittelten Kriechzahl wird hierbei der Faktor  $n_i = E_s/E_c$  (für die Umrechnung des Betonquerschnitts

in einen idealisierten Baustahlquerschnitt) angepasst und entsprechend die Betonfläche reduziert. Hierdurch erhält man ein geringeres ideelles Verbundträgheitsmoment, so dass die rechnerische Verformung zunimmt. Ein rechnerisches Beispiel hierzu ist in der Arbeit von [Rieg 2006] zu finden. In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das zeitabhängige Materialverhalten nicht berücksichtigt. Vielmehr können die hier entwickelten Ansätze als Grundlage und Motivation für zukünftige Implementierungen des Kriechen und Schwindens in das bestehende Berechnungstool angesehen werden.

## **9.3 Querkrafttragfähigkeit**

### **9.3.1 Grundsätzliches**

Der nachfolgende Abschnitt beschäftigt sich mit ersten Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit von Slim-Floor Profilen, die im Rahmen von Ein- und Zweifeldträgertests durchgeführt wurden. Insbesondere geht es hierbei um die Querkraftverteilung zwischen dem Baustahlprofil und dem Betongurt und einer ersten Auswertung der experimentellen Ergebnisse.

Für eine vertiefte Untersuchung zur Schubtragfähigkeit von Slim-Floor Trägern wird in diesem Zusammenhang auf [Seitz 2005], [Baur 2009], [Rentschler 2009], [Kuhlmann, Hauf 2010b]. Das Ziel im Rahmen der Querkraftuntersuchung ist es, einen Bemessungsansatz für Slim-Floor Träger auf Querkraft zu entwickeln.

### **9.3.2 Tragverhalten von normal hohen Verbundträgern**

Für die Bemessung von Verbundträgern auf Querkraft wird im Allgemeinen nur das Baustahlprofil nachgewiesen [DIN 18800-5], der Betongurt wird vernachlässigt. Die Mitwirkung des Betongurtes kann nur dann berücksichtigt werden, wenn dies gesondert nachgewiesen wird. Weitere Hinweise sind in [DIN 18800-5] nicht gegeben.

Vereinzelte sind in der Literatur Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit zu finden, vornehmlich jedoch für normal hohe Verbundträger, Verbunddecken [Däuvel 2001], Verbundflachdeckenträgern [Seitz 2005] oder Verbundkonstruktionen mit Stegöffnungen [Zhou 1998], [Bode 1994a] und [Bode 1994b] oder allgemein zur Querkrafttragfähigkeit [Reineck 1990], [Reineck 1991], [Reineck 2006], [Specht 1986] und [Specht 1989].

### **9.3.3 Tragverhalten von Slim-Floor Träger**

Gezielte Untersuchungen zum Tragverhalten der Betongurte sind erstmals bei [Däuvel 2001] und [Fries 2001] zu finden. Aus diesem Grund wurden 2005 erste Versuche mit Slim-Floor Träger unter Verwendung eines T-Profiles [Kuhlmann et al 2007a] am Institut für Konstruktion und Entwurf durchgeführt. Es zeigte sich hierbei, dass der Anteil der Querkraft im Betongurt weitaus größer ist als im Baustahlprofil und daher die rechnerischen Annahmen für die mitttragende Breite auf Querkraft zu überprüfen sind.

### 9.3.3.1 Experimentelle Untersuchungen an Einfeldträgern

Im Rahmen der Versuche zur mittragenden Breite auf Biegung wurden an den Testträgern ebenfalls Messungen zur Querkraftverteilung durchgeführt. Hierfür wurden an den Stahlprofilen Dehnmess-Rosetten angebracht, mittels derer die Querkraft im Baustahlprofil und damit auf die Querkraft im Betongurt geschlossen werden kann. Die Abbildung 9.1 zeigt den Versuchsaufbau. Ebenso sind zwei Messstellen (Messpunkt 1 ca. 35 vom Endauflager und Messpunkt 2 ca. 20 cm von der Lasteinleitung entfernt, jeweils rot markiert) gekennzeichnet, an denen beispielhaft die Querkraftverteilung ausgewertet wurde.

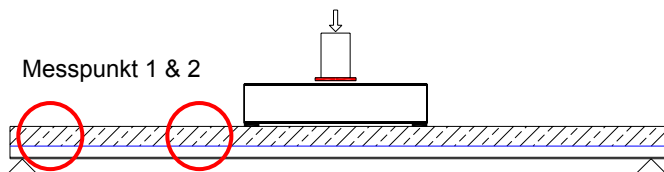


Abbildung 9.1: Messstellen für Ermittlung der Querkraft – Einfeldträgerversuche

Es zeigte sich (Abbildung 9.2), dass unter positivem Moment der Querkraftanteil im Betongurt zwischen 65 - 95 % liegt und somit der Beton den größten Anteil der Querkraft abträgt. Dieses Ergebnis konnte für alle Einfeldträgerversuche sowie an allen gemessenen Stellen über den Einfeldträger verteilt festgestellt werden.

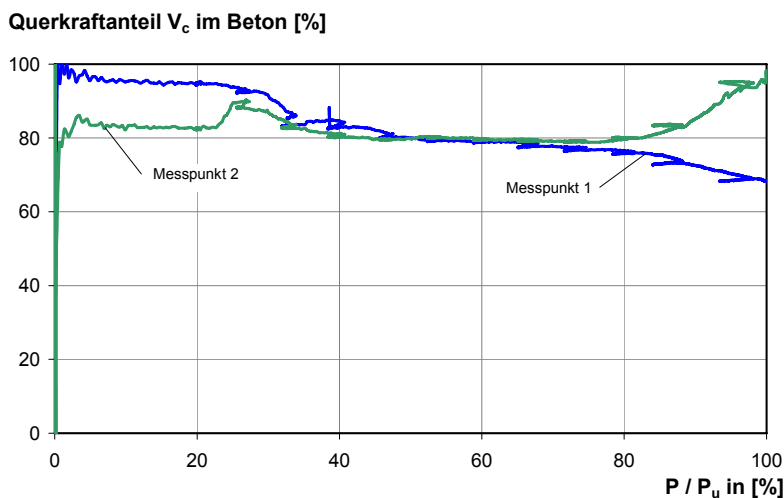
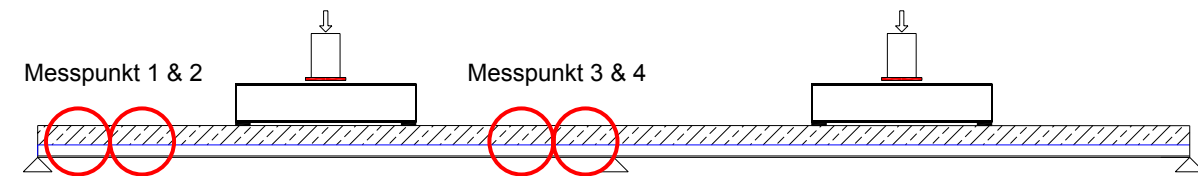


Abbildung 9.2: Querkraftanteil im Betongurt in Abhängigkeit der Belastung - Einfeldträger

### 9.3.3.2 Experimentelle Untersuchungen an Zweifeldträgern

Im Rahmen der Zweifeldträgerversuche wurden die Baustahlträger neben den Dehnmess-Streifen am Ober- und Untergurt mit Dehnmess-Rosetten versehen, um auch hier die Querkraftverteilung zwischen Betongurt und Baustahlprofil auszuwerten. Die Abbildung 9.3 zeigt den Versuchsaufbau und vier beispielhaft ausgewählte Messpunkte.



Messpunkt 1: 35 cm vom Endauflager entfernt

Messpunkt 3: 75 cm vom Mittelaflager entfernt

Messpunkt 2: 65 cm vom Endauflager entfernt

Messpunkt 4: 45 cm vom Mittelaflager entfernt

Abbildung 9.3: Messstellen für Ermittlung der Querkraft – Zweifeldträgerversuche

Die Querkraftanteile im Betongurt waren bei allen Messpunkten sehr ähnlich und besaßen einen Anteil zwischen 50 – 95 % und erreichten damit im Vergleich zum Einfeldträger etwas kleinere Anteile, siehe Abbildung 9.4. Auffallend ist, dass bei ca. 30 % der Traglast der Anteil abgefallen ist. Dies hängt mit der Rissbildung im Träger zusammen, da dadurch der Betongurt an Steifigkeit verliert und sich entsprechend die Querkraft in das Baustahlprofil umlagert.

Querkraftanteil  $V_c$  im Beton [%]

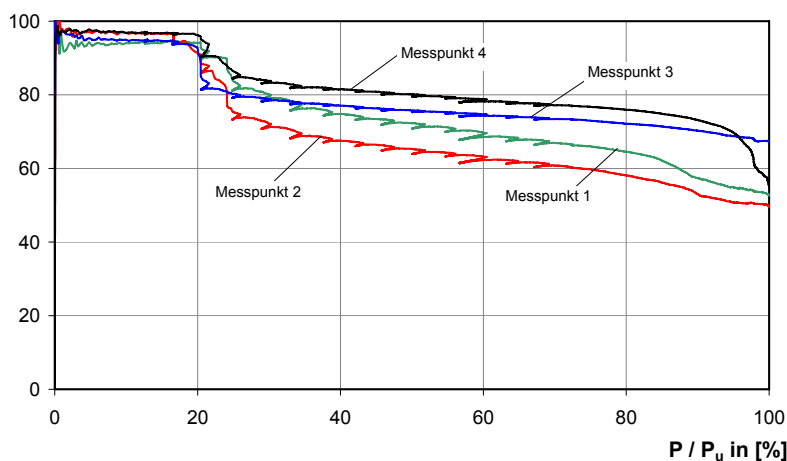


Abbildung 9.4: Querkraftanteil im Betongurt in Abhängigkeit der Belastung - Einfeldträger

Eine vollständige und detaillierte Auswertung aller DMS für die Versuchsträger VT1 und VT2 ist in der Diplomarbeit von [Rentschler 2009] zu finden. Ebenfalls wurden in einer ersten numerischen Untersuchung die beiden Versuchsträger VT1 und VT2 nachgebildet und die Querkraftverteilung ausgewertet. Die Rechenergebnisse konnten hierbei überwiegend die experimentellen Ergebnisse bestätigen [Baur 2009].

### 9.3.4 Zusammenfassung

Die Versuche im Rahmen der Testreihe zur mittragenden Breite an Ein- und Zweifeldträger zeigten, dass der Betongurt den größten Teil der im System vorhandenen Querkraft abträgt. Für die Zweifeldträger versagten sogar alle Versuchsträger aufgrund eines Querkraft-/Durchstanzversagens. Dies zeigt die Besonderheit von Slim-Floor Trägern im Hinblick auf das Tragverhalten, so dass die Querkraft und ebenso die Kraftableitung an den Auflagerpunkten gezielt zu untersuchen ist. Für weitere Ergebnisse und Untersuchungen wird auf das Forschungsvorhaben [Kuhlmann, Hauf 2010b] verwiesen.

## 9.4 Untersuchung am durchlaufenden Mehrfeldträgersystem

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass durch die Ausbildung eines Zweifeldträgersystems die Durchbiegung unter Gebrauchslasten reduziert werden können, so dass sich die Stützwirkung positiv auf das Verformungsverhalten auswirkt. Die Trägerdurchbiegung könnte noch weiter durch die Ausbildung eines mehrfeldrigen Trägers verbessert werden. Die stellt zu den hier bisher entwickelten Berechnungsansätzen eine Erweiterung dar.

Da es sich bei mehrfeldrigen Durchlaufträgern wie schon bei den Zweifeldträgersystemen um ein statisch unbestimmtes System handelt, verändert sich die Steifigkeitsverteilung im System durch die Rissbildung im Feld- und Stützbereich in Abhängigkeit der Belastung. Für Mehrfeldträgersysteme ist dieses Steifigkeitsverhalten ebenfalls zu berücksichtigen, so dass dort bei einem Innenfeld der Feldbereich auf der Unterseite aufreißt und entsprechend die beiden angrenzenden Stützen auf der Betongurtoberseite.

Für Zweifeldträger wurden in Abschnitt 6.2.7.2 Randbedingungen definiert, die nun für Mehrfeldträgersysteme entsprechend erweitert werden müssten, siehe nachfolgende Abbildung.

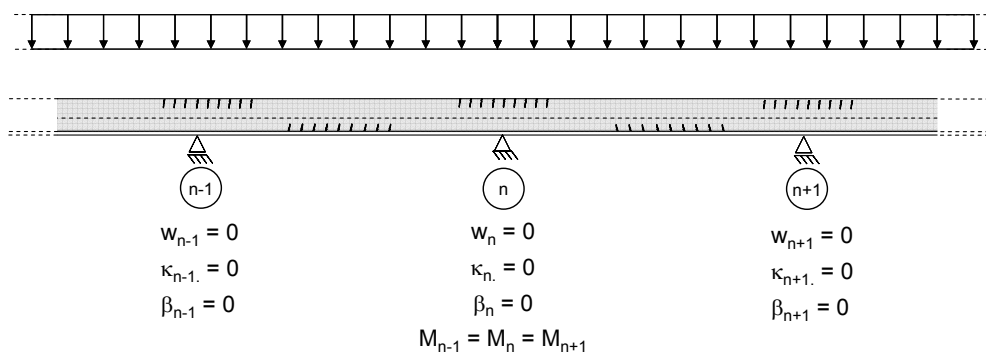


Abbildung 9.5: Randbedingungen für Mehrfeldsysteme

So gilt für ein Innenfeld eines mehrfeldrigen Trägers, dass die Werte der Stützmomente  $M$  gleich groß sind und bei konstanter Belastung die Krümmung  $\kappa$  ebenso wie die Verdrehung  $\beta$  gleich Null sind. Das bestehende und im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Berechnungsmodul könnte hierfür bei entsprechender Umarbeitung als Grundlage genutzt werden.

Eine Vergleichsrechnung auf Basis des nichtlinearen Berechnungsmodells unter Berücksichtigung der mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands liefert, wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, folgende Last-Verformungswerte für einen Ein-, Zwei- und Mehrfeldträger. Das Beispiel zeigt sehr deutlich, dass durch ein durchlaufendes Mehrfeldsystem die Verformung in Feldmitte weiter reduziert werden kann.



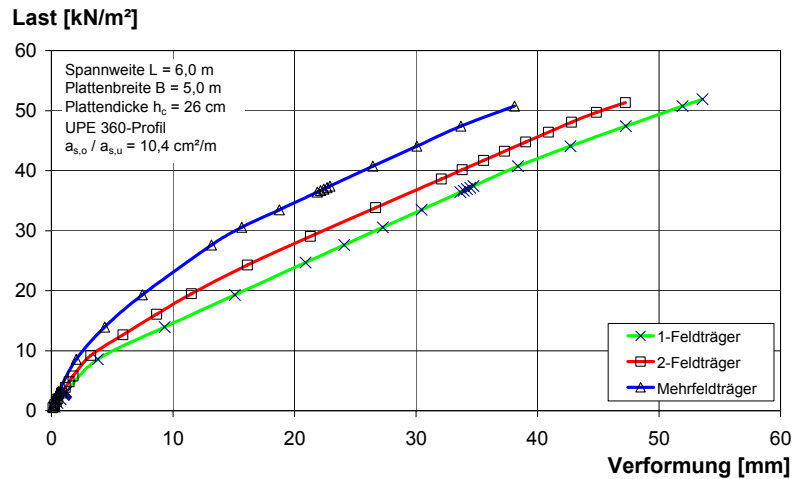


Abbildung 9.6: Vergleichsrechnung – Verformung eines 1- / 2- und Mehrfeldträgers

Eine Weiterentwicklung ist ebenso für den Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite wie auch der linear-elastischen Verformungsberechnung denkbar. Hierfür müssten die hier entwickelten Berechnungsansätze des Zweifeldträgers entsprechend erweitert werden.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### 10.1 Zusammenfassung

Slim-Floor Träger weisen durch ihren Querschnitt ein verändertes Tragverhalten (Abschnitt 2) im Vergleich zu normal hohen Verbundträgern auf. Da das Baustahlprofil in die Betonplatte integriert wird, reißt der Betonquerschnitt unter Biegebeanspruchung in der Zugzone sehr schnell auf. Während bei einem Einfeldträgersystem Risse bereits unter Gebrauchslasten auf der Betonunterseite entstehen, ist beim Zweifeldträger ebenso der Betonobergurt über der Stütze gerissen.

Betrachtet man in diesem Zuge die Dehnungsverteilung des Betongurtes, so kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten der Biegetraganteil des Betongurtes nicht ohne Weiteres unberücksichtigt bleiben, da dieser bei Slim-Floor Trägern unter Gebrauchslasten einen Anteil von ca. 30% des Gesamtbiegemoments besitzt. Die Steifigkeit des Slim-Floor Trägers würde stark unterschätzt und damit die Verformung überschätzt werden. Mit zunehmender Belastung jedoch reduziert sich dieser Anteil infolge der Rissbildung.

Im Gegensatz dazu ist ein normal hoher Verbundträger als Einfeldträger unter Gebrauchslasten ungerissen, da der Betongurt völlig überdrückt vorliegt. Dies bedeutet bei einer sehr geringen Dehnungsverteilung über den Querschnitt, dass der Anteil des Biegemoments des Betongurtes vernachlässigt werden kann und daher in diversen Normen, wie z. B. die [DIN 18800-5], auch vereinfacht vernachlässigt wird.

Derzeit liegt die Slim-Floor Bauweise nicht im Anwendungsbereich der [DIN 18800-5] und die bisherigen auf dem Markt angewandten Verbunddeckensysteme werden ausschließlich über Zulassungen geregelt. Ferner zeigt sich, dass die mittragende Breite für Slim-Floor Träger nach [DIN 18800-5] die Wirkung des Scheiben- und Biegezustands sehr stark unterschätzt und daher die Durchbiegung überschätzt wird, was beim rechnerischen Nachweis zwangsläufig zu einer Überdimensionierung des Querschnitts führt.

So gibt es weder in [DIN 18800-5] noch in sonstigen Arbeiten Berechnungsansätze, die das Verformungsverhalten von Slim-Floor Träger wirklichkeitsnah nachbilden und eine Ansatz anbieten, um mittels allgemein gültiger Regeln die Verformung bestimmen zu können. An diesem Punkt setzt die hier vorliegende Arbeit an und leitet einen neuen Berechnungsansatz für die Verformung anhand eines mechanisch-analytischen Modells ab, das auf durchgeführte Versuche basiert.

Um die analytischen Voruntersuchungen zu untermauern, wurden an Ein- und Zweifeldträgern experimentelle Versuche durchgeführt und die Slim-Floor Träger auf das Trag- und Verformungsverhalten hin untersucht (Abschnitt 5). Dabei wurde für jeden Träger jeweils nur ein Parameter variiert, um Einflüsse auf das Trag- und Verformungsverhalten auch schon durch wenige Versuche identifizieren zu können. Die Versuchskonzeption wurde dabei so ausgelegt, dass die Abmessungen dem normalen Hoch- und Geschossbau entsprechen und insbesondere die Versuchsträger so breit gewählt, dass die Schubweichheit des Betongurtes zu erkennen war. Bei den Einfeldträgern wurden die Parameter Plattendicke, Lastexzentrizität, Verdübelungsgrad variiert, bei den Zweifeldträgern, das verwendete Baustahlprofil, die Plattendicke, die Mittelstütze als durchlaufendes Profil und Ausbildung eines Stirnplattenanschlusses sowie der Stützbewehrungsgrad.

Die Einfeldträgerversuche zeigten, dass die mittragende Breite des Betongurtes weitaus größer ist als die normative Regelung nach [DIN 18800-5] vorgibt, so dass der Biegetraganteil für den Gebrauchslastzustand eine entscheidende Rolle für eine wirtschaftliche und reale Verformungsrechnung spielt. Die Betonplatte wirkte hierbei fast vollständig mit. Der teilverdübelt Träger zeigte

bei Gebrauchslasten keinerlei Unterschiede im Last-Schlupfverhalten zu den vollverdübeltten Versuchsträgern. Die Versuchsträger zeigten bereits unter geringen Lasten Risse im Feldbereich auf der Trägerunterseite.

Bei den Zweifeldsystemen wies der Betonquerschnitt ebenso im Feldbereich aber auch im Stützbereich Risse auf. Die Auswertung der Betondehnungen zeigte, dass die experimentelle mittragende Breite insbesondere auch im Stützbereich größer als nach [DIN 18800-5] vorgegeben angenommen werden kann. Während die Einfeldträgerversuche unter Gebrauchslasten die Streckgrenze des Baustahls nicht überschritten haben, kam bei den Zweifeldträgerversuchen die Zugbewehrung im Stützquerschnitt ins Fließen.

Um das Verformungsverhalten von Slim-Floor Trägern nachbilden zu können, ist es notwendig die Rissbildung und den damit verbundenen Steifigkeitsverlust zu berücksichtigen. Dies ist mit der Methode der Momenten-Krümmungs-Beziehung möglich. Bestehende Modellbildungen oder Ansätze sind nicht bekannt, so dass für die Nachrechnung der Versuchsträger wie auch zur Durchführung einer umfangreichen Parameteranalyse eigens ein auf Excel-basiertes Tool entwickelt wurde (Abschnitt 6). Dieses Tool berücksichtigt hierbei explizit die Scheiben- und Biegetragwirkung des Betongurts jeweils mit auf [Rieg 2006] basierten Werten für die mittragende Breite von niedrigen Verbundträgern. Mit diesem Programm ist es möglich Last-Verformungskurven von deckengleichen Verbundquerschnitten abzubilden, für Ein- wie auch Zweifeldträger.

Beim statisch bestimmten System des Einfeldträgers können unabhängig von der vorhandenen Steifigkeitsverteilung die Schnittgrößen im Träger direkt bestimmt werden. Für den Zweifeldträger als statisch unbestimmtes System ist dies durch die vorhandenen Risse und damit nicht bekannte Steifigkeitsverteilung nicht möglich. Aus diesem Grund war es nötig über die Differentialgleichungen des Balkens und definierten Randbedingungen eine Solver-Funktion in das Berechnungstool zu implementieren, so dass die Schnittgrößen und durch die Integration der Krümmungen die Trägerdurchbiegung bestimmt werden kann.

Der Vergleich mit den Versuchen zeigt für die Ein- und Zweifeldträger hierbei eine sehr gute Übereinstimmung, so dass nachfolgend mittels einer Parameteruntersuchung die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Verformungsverhalten identifiziert werden konnten.

Dieser hierbei neu entwickelte Berechnungsansatz bildet die Verformung im Vergleich zu den Versuchsträgern sehr genau ab, jedoch ist dieser sehr aufwändig, da die mittragende Breite über die Trägerlängsrichtung nicht konstant verläuft, so dass der Ansatz weiterentwickelt und vereinfacht wurde (Abschnitt 7). In diesem Zusammenhang wurde der Begriff der verformungsbezogenen mittragenden Breite eingeführt.

Es handelt sich hierbei um eine konstante mittragende Breite, die bei nichtlinearer Trägerverformung der Durchbiegung des Trägers mittels des analytischen Modells entspricht. Da der Träger aber durch die Rissbildung einem stetigen Steifigkeitsverlust unterliegt, ist die verformungsbezogene mittragende Breite kein konstanter Wert, sondern muss entsprechend der Belastung reduziert werden. Der Berechnungsansatz für die mittragende Breite wurde auf Basis einer umfangreichen Parameterstudie für den Ein- wie auch Zweifeldträger ermittelt. Dieser ermöglicht nun auf Basis einer nichtlinearen Berechnung eine realitätsnahe Durchbiegung zu bestimmen und zeigt im Vergleich zur Berechnung nach [DIN 18800-5] eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse.

Im Rahmen der Untersuchungen konnten die maßgebenden Einflussfaktoren auf die verformungsbezogene mittragende Breite ermittelt werden. Hierbei wurde festgestellt, dass der Ansatz der mittragenden Breite über der Stütze nur eine untergeordnete Rolle besitzt.

Eine Vereinfachung bei der Anwendung ist die Weiterentwicklung der Verformungsberechnung auf Basis eines linearen Ansatzes (Abschnitt 8). Dies ermöglicht eine direkte Berechnung der Trägerdurchbiegung mittels der linearen Stabstatik. Da der Slim-Floor Träger durch die Rissbildung ein nichtlineares Verhalten besitzt, muss in Abhängigkeit der Belastung ein Wert für die Trägersteifigkeit ermittelt werden. Die realistische Trägersteifigkeit wurde mittels einer Parameteruntersuchung ermittelt und reduziert mittels eines Faktors die elastische Trägersteifigkeit. Ein Vergleich mit dem analytisch nichtlinearen Berechnungsansatz lieferte hierbei eine gute Übereinstimmung.

Für die Einfeldträgersysteme wurde ein Abminderungsfaktor entwickelt, der die Betonsteifigkeitsanteile reduziert, so dass bei Rissbildung der Betonbiegetraganteil reduziert wird. Da beim Zweifeldträger der Querschnitt die Fließgrenze auch innerhalb der Gebrauchslasten überschreiten kann, wird der Abminderungsfaktor hierbei über den gesamten Verbundquerschnitt im Feldbereich angesetzt. Der Stützbereich wird konstant mit der Stahlträgersteifigkeit  $I_s$  angenommen, da dort die Rissbildung zuerst eintritt und der Betontraganteil durch die Stützwirkung am stärksten reduziert werden muss.

Anhand eines Berechnungsbeispiels für einen Ein- und Zweifeldträger (Abschnitt 11) werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Ansätze für die Bestimmung Trägerverformung dargestellt. Es zeigt sich hierbei einerseits eine sehr gute Übereinstimmung der verschiedenen Modelle, andererseits zeigt es ebenso die Überschätzung der Verformungsberechnung nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1].

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass bisher keine allgemein gültigen Berechnungsansätze für die Verformung von Slim-Floor Träger vorhanden sind, die das tatsächliche Trag- und Verformungsverhalten wiedergeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher neue und allgemein gültige Ansätze zur wirklichkeitsnahen Bestimmung der Trägerverformung für ein- und zweifeldrige Slim-Floor Deckenträgersysteme entwickelt. Neben einem nichtlinearen Modell unter Einführung der sog. verformungsbezogenen mittragenden Breite wurde für die praktische Anwendung ebenso ein linearer Ansatz auf Basis umfangreicher Parameterstudien abgeleitet, der im Vergleich zu [DIN 18800-5] zu einer erheblich wirtschaftlicheren Dimensionierung der Verbundflachdeckenträger beiträgt.

## 10.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag, um das Trag- und Verformungsverhalten mit Hilfe von analytischen Ansätzen für die Baupraxis anwenderfreundlich nutzen zu können. Auf Basis der linearen und nichtlinearen Berechnungsmethoden für die Trägerverformung kann der Slim-Floor Querschnitt wirtschaftlich bemessen werden. Die vorhandenen Regelungen beinhalten entweder die Verbundflachdeckenträgerbauweise nicht oder es ergeben sich zu konservative Ergebnisse.

Dennoch bleiben einige Fragen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit waren, für das Tragverhalten aber eine wichtige Rolle spielen können. In diesem Zusammenhang wird das Verformungsverhalten der flachen Träger infolge Kriechen und Schwinden hingewiesen. Durch das Schwinden reißt der Querschnitt zusätzlich auf, so dass die Steifigkeit des Betongurtes weiter reduziert wird und daher einen direkten Einfluss auf die Trägerverformung besitzt. Gleichzeitig muss auch das Kriechverhalten auf den Slim-Floor Querschnitt beim Langzeitverhalten berücksichtigt werden und weitere Untersuchungen hierzu durchgeführt werden.

Ebenso stellt sich bei Slim-Floor Trägern die Frage nach dem Lastabtrag im Auflager- bzw. Stützbereich. Da die Stahlträger die Querkraft in die Stützen abtragen müssen, muss der genaue Kraftfluss berücksichtigt werden. Voruntersuchungen zeigten, siehe Abschnitt 9.3, [Kuhlmann et al 2007a] und [Kuhlmann, Hauf 2010b], dass der Großteil der im System vorhandenen Querkraft über den Beton abgetragen wird. Im Bereich der Auflagerung muss dies unbedingt berücksichtigt werden, auch in Hinblick auf die Frage nach einem möglichen Querkraftversagen des Betonquerschnitts.

Bei den hier untersuchten Slim-Floor Träger wurde die Längsschubtragfähigkeit mittels Kopfbolzen sicher gestellt. Es gibt auch hier eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten, wie zum Beispiel die Verwendung von Stanz- oder Betondübeln, bei denen jeweils die spezifischen Tragmechanismen berücksichtigt werden müssen. So stellt sich zum Beispiel beim Betondübel die Frage nach der Längsschubsicherung bei sehr niedrigen Baustahlquerschnitten, so dass die Betondübel in der gerissenen Zugzone des Querschnitts liegen.

Das Ziel sollte daher sein, diese noch offenen Fragestellungen ebenfalls durch einfache und für die Praxis anwenderfreundliche Berechnungs- und Bemessungsansätze zu ergänzen, so dass für den Einsatz von Slim-Floor Träger und deren Berechnung systematische und allgemein gültige Ansätze vorhanden sind. Die Erfahrung aus dieser Arbeit zeigen zudem, dass Ansätze und Berechnungsmethoden immer durch experimentelle Untersuchungen zu untermauen sind.

Ebenso sollte neben den oben genannten Aspekten der Bemessung die Frage nach der Wirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt der Untersuchung gerückt werden. Wie bereits bestehende Wirtschaftlichkeitsstudien [Kuhlmann et al 2007b] zeigen, ist die Slim-Floor Bauweise bereits heute konkurrenzfähig im Vergleich zu konventionellen Stahlbetondecken. Dieser Gedanke kann zudem in Hinblick auf die Nachhaltigkeit zusätzliche Impulse bringen, wenn z.B. eine Konstruktion aus Holz-Beton-Verbund in Kombination mit Slim-Floor Trägern angewandt wird. Erste Lösungsansätze hierfür sind bereits vorhanden [Kuhlmann et al 2006a].

## 11 Berechnungsbeispiel

### 11.1 Grundsätzliches

Im letzten Abschnitt wird die Berechnung der Trägerverformung beispielhaft an einem Slim-Floor Träger mit Hutprofil als Ein- und Zweifeldträgersystem durchgeführt. Dabei werden alle im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Berechnungsansätze verwendet und miteinander verglichen:

- Analytisches Modell unter Berücksichtigung des Scheiben- und Biegezustands
- Analytisches Modell unter Verwendung der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v}$
- Linear-elastischer Ansatz für die Verformungsberechnung

Die Ergebnisse werden in diesem Zusammenhang zusätzlich mit den berechneten Durchbiegungswerten nach [DIN 18800-5] verglichen.

Der gewählte Querschnitt sieht hierbei wie folgt aus:

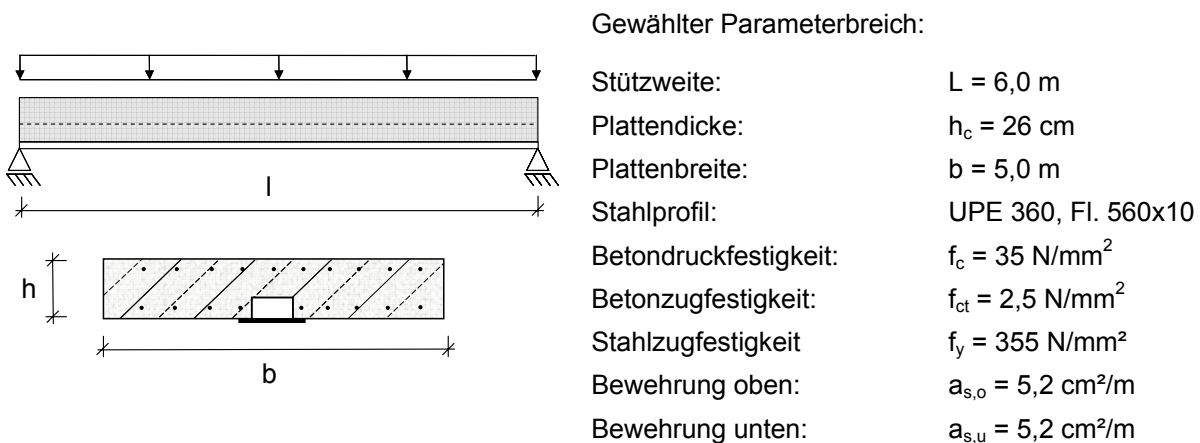


Abbildung 11.1: Abmessungen und Querschnitt des Beispielträgers

Entsprechend Abschnitt 4.5 bestimmt sich die mittragende Breite für den Scheiben- und Biegezustand des Einfeldträgers in Abhängigkeit der Stützweite und Plattenbreite zu

- mittragende Breite des Scheibenzustands (Feldmitte)  $b_{m,S} = 2,46 \text{ m}$
- mittragende Breite des Biegezustands (Feldmitte)  $b_{m,B} = 4,50 \text{ m}$

Für den Zweifeldträger bestimmt sich die mittragende Breite unter der Annahme eines Momenten-Nullldurchgangs bei  $0,85 \cdot L$  (siehe hierzu Abschnitt 6.2.8.3) zu

- mittragende Breite des Scheibenzustands (Feldmitte)  $b_{m,S} = 2,11 \text{ m}$
- mittragende Breite des Biegezustands (Feldmitte)  $b_{m,B} = 4,02 \text{ m}$

Da für den gewählten Querschnitt keine Versuchswerte vorliegen, aber das analytische Modell anhand von Versuchen verifiziert wurde, wird davon ausgegangen, dass die damit berechneten Werte als die tatsächliche Verformung angesehen werden kann, sowohl für den Einfeld- wie auch Zweifeldträger. Die Berechnung der Durchbiegung erfolgt hierbei unter der Annahme des Eigen-gewichtsverbunds und einer steigenden Belastung von  $2,0 / 3,5 / 5,0 / 10,0 \text{ kN/m}^2$ .

## 11.2 Nichtlineares analytisches Modell für Ein- und Zweifeldträger

Die Berechnung der Durchbiegung für den Ein- und Zweifeldträger auf Grundlage der nichtlinearen Methode mittels der mittragenden Breite des Schieben- und Biegezustands lieferte hierbei folgende Ergebnisse:

Tabelle 11.1: Verformungsberechnung – analytisches Modell

Einwirkung	Belastung	Durchbiegung	Durchbiegung	Differenz
		Einfeldträger	Zweifeldträger	
	[kN/m]	[mm]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	2,6	2,1	-19%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	3,8	2,9	-24%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	5,5	4,0	-24%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	7,0	5,1	-27%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	12,3	9,2	-25%

Zum Vergleich wird nun die nichtlineare Berechnung mit den Werten für die mittragenden Breite nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1] durchgeführt. Die mittragende Breite für den Einfeldträger bestimmt sich bei einer Stützweite von  $L = 6,0$  m zu  $b_{\text{eff}} = 1,50$  m und für den Zweifeldträger zu  $b_{\text{eff}} = 1,28$  m im Feldbereich und  $b_{\text{eff}} = 0,75$  m im Stützbereich. Hierbei ergeben sich folgende Verformungswerte:

Tabelle 11.2: Verformungsberechnung – mittragende Breite nach [DIN 18800-5]

Einwirkung	Belastung	Durchbiegung	Durchbiegung	Differenz
		Einfeldträger	Zweifeldträger	
	[kN/m]	[mm]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	8,0	5,4	-32%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	10,8	7,5	-31%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	12,9	9,0	-30%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	15,0	10,6	-29%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	21,9	16,0	-27%

Tabelle 11.3: Verformungsberechnung – Vergleich mittragende Breite nach [DIN 18800-5]

Einwirkung	Belastung	Trägerdurchbiegung Einfeldträger			Trägerdurchbiegung Zweifeldträger		
		DIN 18800-5	$b_{m,S} / b_{m,B}$	Abweichung	DIN 18800-5	$b_{m,S} / b_{m,B}$	Abweichung
	[kN/m]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	8,0	2,6	+209%	5,4	2,1	+156%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	10,8	3,8	+181%	7,5	2,9	+157%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	12,9	5,5	+132%	9,0	4,0	+127%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	15,0	7,0	+113%	10,6	5,1	107%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	21,9	12,3	78%	16,0	9,2	74%

Der Vergleich der Verformungen zwischen dem analytischen Modell auf Basis der mittragenden Breite des Scheiben- und Biegezustands mit der Verformungsberechnung nach [DIN 18800-5] zeigt eine sehr große Abweichung. Dies bedeutet, dass die Berechnung nach [DIN 18800-5] die Trägerverformung stark überschätzt und letztendlich zu einer unwirtschaftlichen Querschnittsbemessung führt. Die Ergebnisse der Verformungsberechnungen sind in der nachfolgenden Abbildung nochmals grafisch dargestellt.

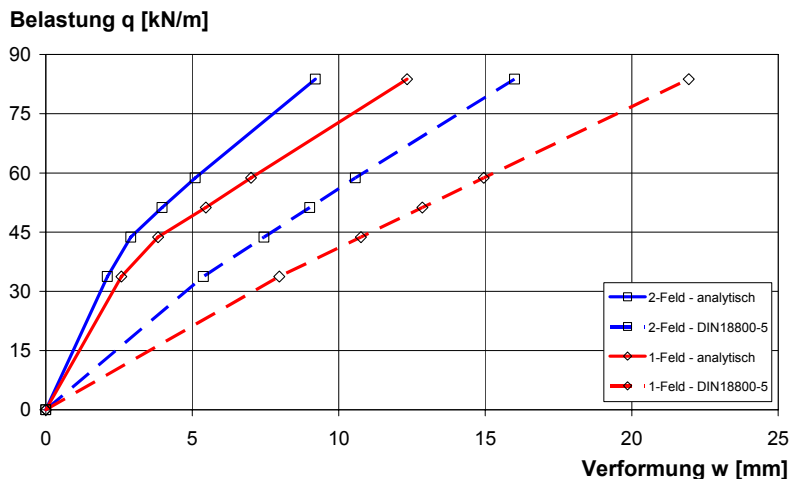


Abbildung 11.2: Vergleich – Last-Verformungskurve für Ein- und Zweifeldträger

### 11.3 Verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,v}$

Die Berechnung der Verformung des Ein- und Zweifeldträgers erfordert die Bestimmung folgender Faktoren, Material- und Querschnittswerte:

Streckgrenze des Baustahlprofils:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit des Betons:	$f_{ct} = 2,5 \text{ N/mm}^2$
Höhe des Baustahlprofils:	$h_a = 12,0 \text{ cm}$
Dicke der Betonplatte:	$h_c = 26,0 \text{ cm}$
Trägheitsmoment des Baustahlprofils:	$I_a = 3.219 \text{ cm}^2$
Querschnittsfläche des Baustahlprofils:	$A_a = 133,9 \text{ cm}^2$
Stützweite des Einfeldträgers:	$L = 6,0 \text{ m}$
Rissmoment:	$M_{Riss} = 161,6 \text{ kNm}$
Bruchmoment:	$M_u = 1739 \text{ kNm}$
Einwirkendes Moment:	$M = 152 / 197 / 230 / 264 / 377 \text{ kNm}$

Der Wert der elastischen verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,v,0}$  erfolgt über die Rückrechnung aus dem ungerissenen Zustand unter Berücksichtigung einer konstanten mittragenden Breite und bestimmt sich zu  $b_{m,v,0} = 4,40 \text{ m}$ .

Die nachfolgende Tabelle stellt die Verformungsberechnung mittels der für den Einfeldträger bestimmten verformungsbezogenen mittragenden Breite dar.



Tabelle 11.4: Verformungsberechnung – verformungsbezogene mittragende Breite des Einfeldträgers (Stufe 1)

Einwirkung	Belastung	verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$	Durchbiegung Einfeldträger	Abweichung zur analytischen Verformung
	[kN/m]	[m]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	4,40	2,56	-1%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	4,40	3,94	3%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	4,37	5,2	-5%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	4,31	6,57	-6%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	4,12	11,36	-8%

Der Verformungsberechnung mit dem vereinfachten Verfahren (Stufe 2) für die verformungsbezogene mittragende Breite (siehe Abschnitt 7.3.6.3) für Einfeldträger liefert folgende Werte:

Tabelle 11.5: Verformungsberechnung – verformungsbezogene mittragende Breite des Einfeldträgers (Stufe 2)

Einwirkung	Belastung	verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$	Durchbiegung Einfeldträger	Abweichung zur analytischen Verformung
	[kN/m]	[m]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	4,40	2,56	-1%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	4,31	4,06	6%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	4,24	5,40	-1%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	4,16	6,84	-2%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	3,91	11,85	-4%

Es zeigt sich, dass für beide Berechnungsstufen des Einfeldträgers eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden kann.

Für die Erweiterung auf das Zweifeldträgersystem muss zu den oben bestimmten Faktoren zusätzlich der Anpassungsfaktor  $\alpha_{m,V}$  bestimmt werden, der die verformungsbezogene mittragende Breite entsprechend anpasst. Die zusätzlichen Parameter bestimmen sich hierbei folgendes über die Belastungswerte:

$$\begin{aligned} \text{Belastung (Plattenbreite } b = 5,0\text{m):} & \quad q = 33,75 / 43,75 / 51,25 / 58,75 / 83,75 \text{ kN/m} \\ \text{Bruchbelastung des Einfeldträgers} & \quad q_u = 386,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Die nun bestimmte mittragende Breite wird konstant über den Träger eingesetzt und die Trägerverformung mittels der nichtlinearen Berechnung bestimmt. Es ergeben sich hierbei folgende Verformungswerte:

Tabelle 11.6: Verformungsberechnung – verformungsbezogene mittragende Breite des Zweifeldträgers

Einwirkung	Belastung	Anpassungs- faktor $\alpha_{m,v}$	Durchbiegung Zweifeldträger	Abweichung zur analytischen Verformung
	[kN/m]	[-]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	1,38	1,96	-7%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	1,44	2,54	-12%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	1,47	3,35	-16%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	1,51	4,37	-14%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	1,59	8,12	-12%

Es zeigt sich, dass für das hier gewählte Beispiel die Verformungen ein wenig unterschätzt werden. Dies hängt damit zusammen, dass der Berechnungsansatz für die Bestimmung der Verformung am Zweifeldträger auf Basis der nichtlinearen Berechnung eines Einfeldträgers eine geringfügig größere Streuung besitzt (siehe hierzu Abschnitt 7.4.3).

#### 11.4 Linear-elastischer Ansatz

Die Berechnung der Verformung des Einfeldträgers erfordert die Bestimmung folgender Material- und Querschnittswerte:

Streckgrenze des Baustahlprofils:	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit des Betons:	$f_{ct} = 2,5 \text{ kN/mm}^2$
Druckfestigkeit des Betons:	$f_c = 35 \text{ N/mm}^2$
Dicke der Betonplatte:	$h_c = 26,0 \text{ cm}$
Plattenbreite:	$b = 5,0 \text{ m}$
Stützweite des Einfeldträgers:	$L = 6,0 \text{ m}$
Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts:	$I_{i,0} = 107.779 \text{ cm}^4$
Trägheitsmoment des Betonquerschnitts:	$I_{c,0} = 94.234 \text{ cm}^4$
Querschnittsfläche des Verbundquerschnitts:	$A_{i,0} = 1070 \text{ cm}^2$
Querschnittsfläche des Baustahlprofils:	$A_a = 133,9 \text{ cm}^2$
Querschnittsfläche der Zugbewehrung:	$a_{s,u} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$
Abstand Beton- und Stahlquerschnitt:	$a_{st} = 7,54 \text{ cm}$
Rissmoment:	$M_{Riss} = 161,6 \text{ kNm}$
Einwirkendes Moment:	$M = 152 / 197 / 230 / 264 / 377 \text{ kNm}$

Anhand der Faktoren kann nun der Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  bestimmt werden, mit dem die Betontraganteile des Verbundträgheitsmoments reduziert werden. Mit den hiermit gewonnenen effektiven Steifigkeiten kann mittels der linear-elastischen Verformungsberechnung eines Einfeldträgers die Durchbiegung bestimmt werden:

Tabelle 11.7: Verformungsberechnung – effektive Trägersteifigkeit des Einfeldträgers

Einwirkung	Belastung	Verbund-Trägheitsmoment $I_{i,eff}$	Durchbiegung Einfeldträger	Abweichung zur analytischen Verformung
	[kN/m]	[m]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	107.779	2,73	+6%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	94.226	4,05	+6%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	78.713	5,68	+4%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	67.338	7,61	+9%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	44.586	16,3	+33%

Unter Eigengewicht reißt der Verbundquerschnitt nicht auf, so dass das Verbundträgheitsmoment  $I_{i,0}$  für die Verformungsberechnung angesetzt wird.

Die große Abweichung der Verformungsberechnung bei der größten Belastung beruht darauf, dass der Träger zu fließen beginnt und dieser Bereich nicht mehr durch den elastischen Ansatz abgedeckt ist. Die Verformungsberechnung der übrigen Werte stimmt sehr gut mit der analytischen Lösung überein.

Für die Verformungsberechnung am Zweifeldträger muss im Vergleich zum Einfeldträger ein zusätzlicher Faktor bestimmt werden:

$$\text{Querschnittsfläche der Stützbewehrung:} \quad a_{s,u} = 5,2 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Anhand der Faktoren kann nun der Abminderungsfaktor  $\alpha_{c,2}$  bestimmt werden, um das effektive Trägheitsmoment  $I_{i,eff}$  des Feldbereiches zu berechnen. Für den Stützquerschnitt wird das Trägheitsmoment des Baustahlträgers eingesetzt. Für die Verformung des Zweifeldträgers ergeben sich auf Basis der linear-elastischen Berechnung folgende Werte:

Tabelle 11.8: Verformungsberechnung – effektive Trägersteifigkeit des Zweifeldträgers

Einwirkung	Belastung	Verbund-Trägheitsmoment Feld: $I_{i,eff}$	Durchbiegung Zweifeldträger	Abweichung zur analytischen Verformung
	[kN/m]	[m]	[mm]	[%]
Eigengewicht	33,75	16.772	2,02	-4%
2,0 kN/m <sup>2</sup>	43,75	13.842	3,05	5%
3,5 kN/m <sup>2</sup>	51,25	12.312	3,91	-1%
5,0 kN/m <sup>2</sup>	58,75	11.129	4,85	-5%
10,0 kN/m <sup>2</sup>	83,75	8.560	8,41	-9%

Auch für den Zweifeldträger zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der nichtlinearen Berechnung.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen sind nochmals die Last-Verformungskurven für den Ein- und Zweifeldträger aufgeführt. Dargestellt werden jeweils die nichtlineare analytische Berechnung auf Basis des Scheiben- und Biegezustands, die Verformungsberechnung auf Basis der verformungsbezogenen mittragenden Breite  $b_{m,V}$  und die elastische Verformungsberechnung auf Basis des effektiven Trägheitsmoments  $I_{i,eff}$ . Zum Vergleich hierzu ist jeweils noch die Last-Verformungskurve der Berechnung nach [DIN 18800-5] angegeben.

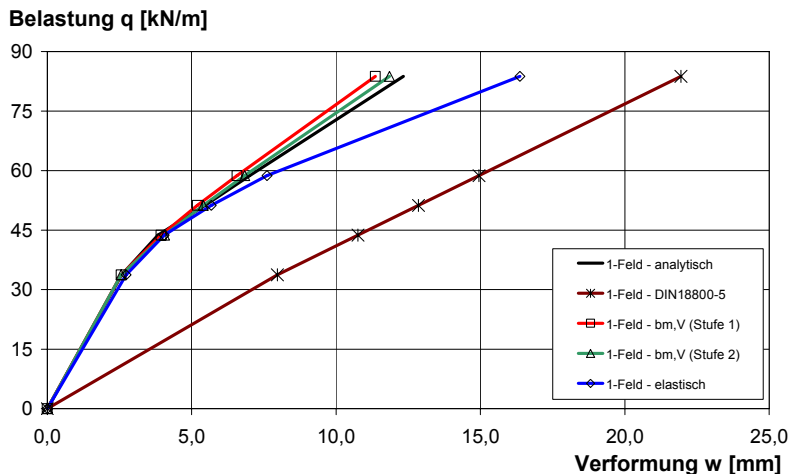


Abbildung 11.3: Vergleich der Berechnungsmethoden für den Einfeldträger

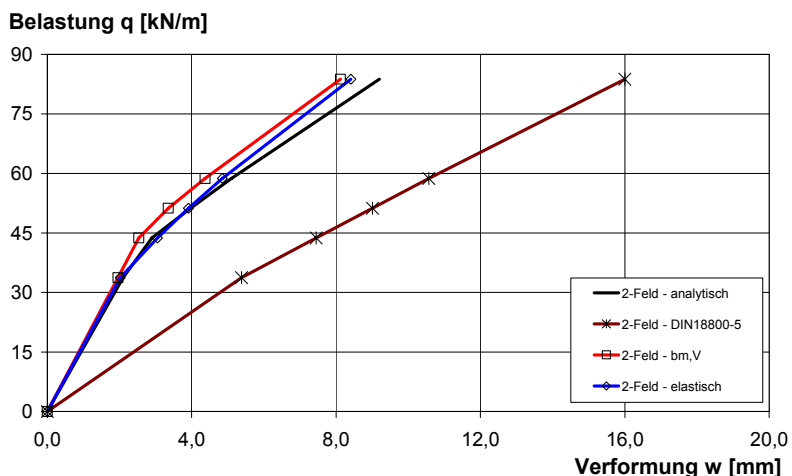


Abbildung 11.4: Vergleich der Berechnungsmethoden für den Zweifeldträger

Die beiden Last-Verformungskurven zeigen sehr schön, dass die im Rahmen der Arbeit entwickelten Berechnungsansätze für die Verformung sehr gute Ergebnisse liefern und das wirkliche Verformungsverhalten nachbilden können. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Annahme nach [DIN 18800-5] zu einer weiten Überschätzung der Verformungen führt und daher eine nur unzureichende Anwendung ermöglicht. Die Berechnungsansätze stellen daher eine wirkliche Verbesserung für die Verformungsberechnung dar, was letztendlich einer wirtschaftlicheren Bemessung der Slim-Floor Querschnitte führt.

## 12 Bezeichnungen

Die in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen sind in der Regel in Übereinstimmung mit den allgemeinen Formelzeichen nach [DIN 18800-5] und [DIN 1045-1] gewählt. Da aber durch die Einführung der verformungsbezogenen mittragenden Breite einige Bezeichnungen nicht normativ niedergelegt sind, gibt die nachfolgende Zusammenstellung alle verwendeten Formelzeichen wieder. Teils werden diese auch in den einzelnen Kapiteln nochmals erklärt bzw. verwendet.

<u>Kürzel</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
$q$	[kN/m]	Einwirkende Streckenlast
$P$	[kN]	Einwirkende Last (Pressenkraft)
$P_u$	[kN]	Einwirkende Last (Pressenkraft) bei Erreichen des maximalen Traglast
$M, M_L$	[kNm]	Einwirkendes Moment
$M_{Riss}$	[kNm]	Rissmoment
$M_{el}$	[kNm]	Fließmoment
$M_{Zw}$	[kNm]	Zwischenmoment (Betondehnung bei 2‰)
$M_u$	[kNm]	Einwirkendes Moment bei Erreichen des Bruchmoments im GZT
$M_{pl,Rd}$	[kNm]	Plastische Widerstandsmoment des Verbundträgers
$M_a$	[kNm]	Biegemoment des Baustahlträgers
$M_c$	[kNm]	Biegemoment des Betongurtes
$N_c$	[kN]	Normalkraft des Betongurtes
$N_{ct}$	[kN]	Betonzugkraft
$N_{c,1}$	[kN]	Betondruckkraft – Glgw mit Zugkraft Baustahlträger
$N_{c,2}$	[kN]	Betondruckkraft – Glgw mit Betonzugkraft
$N_a$	[kN]	Zugkraft im Baustahl
$N_s$	[kN]	Zugkraft in Bewehrung
$N_c$	[kN]	Druckkraft in Bewehrung
$f_{cm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons
$f_c$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zylinderdruckfestigkeit des Betons
$f_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Fließspannung des Baustahls
$\sigma_{ct}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung – Betonzugfestigkeit
$\sigma_c$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung – Betondruckfestigkeit
$\varepsilon_y$	[-]	Dehnung des Baustahls
$\varepsilon_c$	[-]	Dehnung des Betons
$\varepsilon_a$	[-]	Stahldehnung
$\varepsilon_{c1}$	[-]	Betondehnung bei Erreichen des Höchstwerts der Druckspannung [DIN 1045-1]
$\varepsilon_{c1u}$	[-]	Betondehnung bei Erreichen des Festigkeitsgrenze [DIN 1045-1]

$\varepsilon_c$	[-]	Betondehnung (gemessene Wert)
$\varepsilon_{ct}$	[1/m]	Dehnung des Betons bei Erreichen der Zugfestigkeit
$\kappa_{Riss}$	[1/m]	Krümmung bei Erreichen des Rissmoments
$\kappa_{el}$	[1/m]	Krümmung bei Erreichen des Fließmoments
$\kappa_{Zw}$	[1/m]	Krümmung bei Erreichen des Zwischenmoments
$\kappa_u$	[1/m]	Krümmung bei Erreichen des Bruchmoments
$b_{eff}$	[m]	Effektive mittragende Breite
$b_m$	[m]	Effektive mittragende Breite
$b_{m,S}$	[m]	Mittragende Breite des Scheibenzustands
$b_{m,B}$	[m]	Mittragende Breite des Biegezustands
$b_{m,V}$	[m]	Verformungsbezogene mittragende Breite
$b_{m,V,0}$	[m]	Elastische Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite
$L$	[m]	Spannweite des Trägers / Stützweite eines Feldes
$A_a$	[cm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Baustahlträgers
$A_{s,u}$	[cm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Bewehrung in der unteren Lage
$A_{s,o}$	[cm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Bewehrung in der oberen Lage
$a_{s,u}$	[cm <sup>2</sup> /m]	Bewehrungsgehalt in der unteren Lage
$a_{s,o}$	[cm <sup>2</sup> /m]	Bewehrungsgehalt in der oberen Lage
$I_{i,o}$	[cm <sup>4</sup> ]	Ideelles Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Verbundquerschnitts ( $t = 0$ )
$A_{i,o}$	[cm <sup>2</sup> ]	Ideelle Querschnittsfläche des Verbundquerschnittswerts ( $t = 0$ )
$I_a$	[cm <sup>4</sup> ]	Flächenträgheitsmoment 2. Grades Baustahlprofil
$I_{st}$	[cm <sup>4</sup> ]	Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Gesamtstahlquerschnitts
$n_0$	[-]	Reduktionszahl ( $E_a / E_{cm}$ )
$a_{st}$	[cm]	Schwerpunktastand zwischen Beton- und Stahlquerschnitt
$S_{i,o}$	[cm <sup>3</sup> ]	Statische Moment des Verbundquerschnitts in der Verbundfuge
$I_{c,o}$	[cm <sup>4</sup> ]	Ideelles Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Betons ( $t = 0$ )
$A_{c,o}$	[cm <sup>2</sup> ]	Ideelle Querschnittsfläche des Betons ( $t = 0$ )
$h_c$	[cm]	Höhe der Betonplatte
$b$	[cm, m]	Breite des Betongurtes
$I_{st}$	[cm <sup>4</sup> ]	Verbundquerschnittswert des Gesamtstahls (Baustahl + Bewehrung)
$\eta$	[-]	Verdübelungsgrad des Verbundträgers
$e$	[m]	Exzentrizität der Last (Querrichtung) auf Versuchsträger
$E_a$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul des Baustahls
$E_c$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul des Betons

$w, f$	[mm]	Durchbiegung
$f_{\text{exp}}$	[mm]	Durchbiegung des Trägers im Versuch
$f_{\text{analyt}}$	[mm]	Durchbiegung des Trägers aus analytischer Berechnung
$\beta$	[1/m]	Verdrehwinkel des Querschnitts (1. Ableitung der Durchbiegung)
$x$	[m]	Laufvariable in Trägerlängsrichtung
$b_{\text{eff}}$	[m]	Mittragende Breite des Betongurts
$b_{m,v,0}$	[m]	elastischer Wert der verformungsbezogenen mittragenden Breite
$b_{m,v,(1)}$	[m]	verformungsbezogene mittragende Breite – „Berechnungsansatz - Stufe 1“
$b_{m,v,(2)}$	[m]	verformungsbezogene mittragende Breite – „Berechnungsansatz - Stufe 2“
$\beta_{m,v,(1)}$	[-]	Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite „Stufe 1“
$\beta_{m,v,(2)}$	[-]	Abminderungsfaktor für die verformungsbezogene mittragende Breite „Stufe 2“
$k_m$	[-]	Abminderungsfaktor für Momenteneinwirkung
$\alpha_{bm,v}$	[-]	Anpassungsfaktor für verformungsbezogene mittragende Breite (Zweifeldträgers)
$l_0$	[m]	Abstand Momenten-Nulldurchgang nach Heft240 [Grasser 1991]
$l_E$	[m]	Abstand Momenten-Nulldurchgang nach [DIN 18800-5]
$d$	[m]	Dicke des Betongurts nach Heft240 [Grasser 1991]
$d_0$	[m]	Gesamthöhe des Plattenbalkens nach Heft240 [Grasser 1991]
$\beta_1$	[-]	Faktor zu Bestimmung der mittragenden Breite nach Heft240 [Grasser 1991]
$I_{i,\text{eff}}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Effektives Trägheitsmoment für linear-elastischen Ansatz (Einfeldträger)
$\alpha_c$	[-]	Abminderungsfaktor des Trägheitsmoment – Betonanteile im gerissenen Zustand
$\alpha_{\text{Mat}}$	[-]	Abminderungsfaktor für Einfluss der Materialkennwerte
$\alpha_{\text{QS}}$	[-]	Abminderungsfaktor für Einfluss des Querschnitts
$\alpha_M$	[-]	Abminderungsfaktor für Einfluss der auf den Träger einwirkenden Belastung
$I_{i,2,\text{eff}}$	[kN/cm <sup>2</sup> ]	Effektives Trägheitsmoment für linear-elastischen Ansatz (Zweifeldträger)
$\alpha_{c,2}$	[-]	Abminderungsfaktor des Trägheitsmoment (Zweifeldträger)
$\alpha_{\text{QS},2}$	[-]	Abminderungsfaktor für Einfluss des Querschnitts (Zweifeldträger)
$\alpha_{M,2}$	[-]	Abminderungsfaktor für Einfluss der einwirkenden Belastung (Zweifeldträger)

## 13 Literaturverzeichnis

### Verwendete Normen und Richtlinien:

[DIN 1045-1]	DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Berlin: Beuth Verlag, August 2008.
[DIN 1075]	DIN 1075: Betonbrücken; Bemessung und Ausführung, April 1981.
[DIN 12390-1]	DIN EN 12390-1: Prüfung von Festbeton. Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen, Berlin: Beuth Verlag, Februar 2001.
[DIN 12390-2]	DIN EN 12390-2: Prüfung von Festbeton. Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen, Berlin: Beuth Verlag, August 2009.
[DIN 12390-3]	DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton. Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Berlin: Beuth Verlag, Juli 2009.
[DIN 12390-5]	DIN EN 12390-5: Prüfung von Festbeton. Teil 3: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, Berlin: Beuth Verlag, Juli 2009.
[DIN 18800-5]	DIN 18800-5: Stahlbauten – Teil 5: Verbundtragwerke aus Stahl und Beton – Bemessung und Konstruktion, Berlin: Beuth Verlag, März 2007.
[DIN 50125]	DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, Berlin, Beuth Verlag, Januar 2004.
[DIN EN 10002-1]	DIN EN 10002-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Berlin, Beuth Verlag, Dezember 2001.
[DIN EN 1994-1-1]	DIN EN 1994-1-1: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton; Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau, Juli 2006.
[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.

### Veröffentlichungen:

[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, Seite 199-220, 2004.
[Amadio, Fragiaco 2002]	Amadio, C., Fragiaco, M.: Effective Width Evaluation for Steel-Concrete Composite Beams, Journal of Constructional Steel Research 58, Seite 373-388, 2002.
[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, 1997.
[Baur 2009]	Baur, V.: Numerische Untersuchung an Ein- und Zweifeld-Slim-Floor Trägern mit dem FE-Programm ABAQUS, Diplomarbeit, Nr. 2009-



- 24X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2009.
- [Bode 1994a] Bode, H.; Stengel, J.; Künzel, R.: Stahlverbundträger mit großen Stegausschnitten. Stahlbau 63, Heft 1, Seite 6-14, 1994.
- [Bode 1994b] Bode, H.; Stengel, J.; Künzel, R.: Stahlverbundträger mit großen Stegausschnitten (Teil 2 und Schluss), Stahlbau 63, Heft 2, Seite 41-48, 1994.
- [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.
- [Bott 2007] Bott, M.: Nichtlineare Verformungsberechnung niedriger Verbundträger unter Berücksichtigung der mittragenden Breite im negativen Momentenbereich, Diplomarbeit, Nr. 2007-43X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2007.
- [Braun et al 2009] M. Braun, O. Hechler, V. Birarda: 140 m<sup>2</sup> Column Free Space due to Innovative Composite Slim Floor Design. Proceedings of the 9th International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures (ASCCS2009), Seite 363 - 368, Leeds, UK, Juli 2009.
- [Brendel 1960] Brendel, G.: Die mitwirkende Plattenbreite nach Theorie und Versuch, Beton- und Stahlbetonbau 55 (1960), Seite 177-185, 1960.
- [Chawalla 1936] Chawalla, E.: Die Formeln zur Berechnung der „voll mittragenden Breite“ dünner Gurt- und Rippenplatten, Stahlbau 9 (1936), Heft 10, Seite 73-78, 1936.
- [Curbach et al 2003] Curbach, M.; Hartz, U.; Iványi, G.; König, G.; Zilch, K.: Erläuterungen zu DIN 1045-1. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 525, Berlin / Wien / Zürich, Beuth Verlag, September 2003.
- [Däuwel 2001] Däuwel, T.: Beitrag zum Tragverhalten von Slim-Floors unter Verwendung hoher Trapezprofilbleche, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2001.
- [DIBt 2005] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassungsbescheid Z-26.2-48; Slim-Floor Träger mit UPE-Profilen, Peiner Träger GmbH, 27. Juli 2005.
- [Eisele 2009] Eisele, T.: Experimentelle und analytische Untersuchungen zur mittragenden Breite an Slim-Floor Trägern, Diplomarbeit, Nr. 2009-42X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2009.
- [Elz 1998] Elz, S.: Untersuchungen zum Riss- und Tragverhalten des betongurtes von Verbundträgern im negativen Momentenbereich, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998.
- [Eschenauer 1986] Eschenauer, H.; Schnell, W.: Elastizitätstheorie I – Grundlagen, Scheiben und Platten, 2. Auflage, Zürich, Bibliographisches Institut, 1986.
- [Feldmann 1998] Feldmann, M., Müller, C., Stengel, J.: Zum Tragverhalten von Stahl-flachdecken, Bauingenieur Band 73 (1998), Seite 427-434, 1998.
- [Feldmann 2000] Feldmann, M.: Geschossbau in Stahl, Flachdecken-Systeme, Dokumentation 605, Bauen mit Stahl e.V., 4. Auflage, 2000.
- [Fontana 2000] Fontana, M.: Brandsicherheit von Stahlverbundtragwerken, In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2000, Ernst & Sohn, Seite 565-

- 608, 2000.
- [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 2007] Grages, H.: Beitrag zur Verformungsanalyse von Verbundträgern. Dissertation, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt, 2007.
- [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, Kruger National Park, South Africa, 2004.
- [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 näherungsweisen Bestimmung der mitwirkenden Breite von Plattenbalken im Stahlbetonbau, Beton- und Stahlbetonbau, Band 77 (1982), Heft 6, Seite 164-167, 1982.
- [Grimm 2009] Grimm, T.: Analytische Lösung zur Berechnung der mittragenden Breite von zweifeldrigen Slim-Floor Trägern, Diplomarbeit, Nr. 2009-23X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2009.
- [Gross et al 1998] Gross, D.; Schnell, W.; Ehlers, W.; Wriggers, P.: Formeln und Aufgaben zur Technischen Mechanik – 2 Elastostatik, Hydrostatik, 5. Auflage, Berlin / Heidelberg / New-York: Springer-Verlag, 1998.
- [Grünberg 1978] Grünberg, J.: Spannungszustände und mitwirkende Plattenbreite eines Stahl-Beton-Plattentragwerks im gerissenen Zustand. Beton- und Stahlbetonbau 53 (1978), Seite 177-181, 1978.
- [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, 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.
- [Hauf 2008] Hauf, G.: Slim-Floor Profiles as Innovative Slab Systems – Effective Width and Calculation of Deflections, 7th International PhD Symposium in Civil Engineering, Stuttgart, September 11th - 13th, 2008.
- [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 Millennium Tower, Stahlbau 68 (1999), Heft 8, Seite 623-630, 1999.
- [Iliopoulos, 2005] Iliopoulos, A.: Zur rechnerischen Berücksichtigung des Kriechens und Schwindens des Betons bei Verbundträgern, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Shaker Verlag, 2005.
- [Karmann von 1924] Karman von, Th.: Die mittragende Breite, August-Föppel-Festschrift, Springer Verlag, Berlin, Seite 114-127, 1924.
- [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 et al 2001] 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., Seite 1371-1381, 2001.
- [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 Japanese-German Joint Symposium on Steel and Composite Bridges, 9-12 September 2003, Osaka University, Japan, 2003.
- [Kuhlmann et al 2006b] Kuhlmann, U., Hauf, G., Rieg, A.: Effiziente Dimensionierung niedriger Verbundträger. Forschungsvorhaben gefördert durch die Stiftung Industrieforschung, Forschungsvorhaben Nr. S 668, Köln, Oktober 2006.
- [Kuhlmann et al 2006a] Kuhlmann, U., Schänzlin, J., Merkle, R., Bux, H.: Brettstapel-Beton-Verbunddecken mit integrierten Slim-Floor-Profilen. Forschungsbericht AZ 21168, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, April 2006.
- [Kuhlmann et al 2007a] Kuhlmann, U., Konrad, M., Hauf, G., Raichle, J.: Schubtragfähigkeit von Verbundflachdecken, Forschungsvorhaben DIBt Nr. ZP 52-5-17.12-1109/04, interner Versuchsbericht, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2007.
- [Kuhlmann et al 2007b] Kuhlmann, U., Sauerborn, N., Hauf, G.: Studie zum technisch-wirtschaftlichen Vergleich von Slim-Floor Decken und konventionellen Bauweisen von Flachdeckenkonstruktionen, FOSTA Studie P747, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, 2007.
- [Kuhlmann et al 2010] Kuhlmann, U., Konrad, M., Hauf, G.: Slim Floor girder with COFRADAL200 deck elements, Versuchsbericht für die Fa. ARCELORMITTAL Belval&Differdange S.A., Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2010.
- [Kuhlmann, Fries 1998] 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 2001] 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 2004] Kuhlmann, Ulrike ; Fries, Jürgen: Optimierung der Bemessung von deckengleichen Verbundträgern in Hutform, Forschungsvorhaben P 389, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, Verlag- und Vertriebsgesellschaft, ISBN 3-937567-09-7, 2004.
- [Kuhlmann, Hauf 2006] Kuhlmann, U., Hauf, G.: Effective width of composite girders with reduced height, A forecast of the future for steel and composite steel-concrete structures - Professor Jean-Marie Aribert Retirement Symposium, Editors HJIAJ & UY, Seite 21-30, 3.-5. Juli 2006, INSA, RENNES, ISBN 978-2-912095-01-5, 2006.
- [Kuhlmann, Hauf 2007] Kuhlmann, U., Hauf, G.: Innovative slab systems with slim-floor girders, In: Eligehausen et al.: Proceedings, 2nd Symposium on Connections between Steel and Concrete, Stuttgart, ibidem-Verlag, p. 1245-1254, 2007.
- [Kuhlmann, Hauf 2008] Kuhlmann, U., Hauf, G.: Efficient design for the calculation of the deflection and the shear capacity, Composite Construction in Steel and Concrete VI, Engineering Conferences International, July 20-24, 2008, Devil's Thumb Ranch, Colorado (USA), 2008.
- [Kuhlmann, Hauf 2010a] Kuhlmann, U., Hauf, G.: Effiziente Verbundflachdeckenträgersysteme im Hochbau – Ganzheitliche Optimierung für Montage und Nutzung, Forschungsvorhaben der FOSTA/AiF Nr. 15675N/1, Stuttgart, in Vorbereitung, voraussichtlich August 2010.
- [Kuhlmann, Hauf 2010b] Kuhlmann, U., Hauf, G.: Querkrafttragfähigkeit von Slim-Floor Trägern, Forschungsvorhaben der DAST/AiF Nr. 15639N, Stuttgart, in Vorbereitung, voraussichtlich August 2010.
- [Kuhlmann, Rieg 2005] Kuhlmann, U., Rieg, A.: Konstruktionsatlas für Slim-Floor Träger mit UPE-Profilen, im Auftrag der Salzgitter AG – Peiner Träger, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, unveröffentlicht, 2005.
- [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, 2003.
- [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.
- [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, 2000.
- [Marguerre 1952] Marguerre, K.: Über die Beanspruchung von Plattenträgern, Stahlbau 61 (1952), Seite 129-132, 1952.
- [Metzer 1929] Metzer, W.: Die mittragende Breite, Luftfahrtforschung, Heft 4, Seite 1-20, 1929.
- [Muess 1996] Muess, H.: Interessante Tragwerkslösung im Verbund, Stahlbau 65 (1996), Heft 10, Seite 349-355, 1996.
- [Nádai 1925] Nádai, A.: Die elastischen Platten – Die Grundlagen und Verfahren

- zur Berechnung ihrer Formänderungen und Spannungen, sowie die Anwendungen der Theorie der ebenen zweidimensionalen elastischen Systeme auf praktische Aufgaben. Nachdruck 1968. Berlin, Springer-Verlag, 1925.
- [Nie 2004] Nie, J.; Xiao, Y.; Chen, L.: Experimental Studies on Shear Strength of Steel-Concrete Composite Beams. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, Heft 8. Seite 1206-1213, 2004.
- [Olsen 1950] Olsen, H.; Reinitzhuber F.: Die zweiseitig gelagerte Platte – Die statische Berechnung von zweiseitig gelagerten Platten mit beliebigem Seitenverhältnis und beliebigen Belastungen mittels Einfluß- und Zustandsflächen. Bd. 1: Biegemomente und Durchbiegungen. 2. Auflage. Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 1950.
- [Räcke 2006] Räcke, I.: Vorlesungsmanuskript Flächentragwerke I/II - Elastische Platten, Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik, 2006.
- [Reineck 1990] Reineck, K.-H.: Ein mechanisches Modell für den Querkraftbereich von Stahlbetonbauteilen. Dissertation. Institut für Tragwerksentwurf und -konstruktion, Universität Stuttgart, 1990.
- [Reineck 1991] Reineck, K.-H.: Ein mechanisches Modell für Stahlbetonbauteile ohne Stegbewehrung. *Bauingenieur* 66 (1991). Berlin: Springer-Verlag. Seite 157-165 und Seite 323-332, 1991.
- [Reineck 2006] Reineck K.-H.: Datenbanken für Querkraftversuche als Grundlage der Querkraftbemessung, Beitrag zum 46. DAfStb-Forschungskolloquium Stuttgart 2006, 30. und 31. März 2006.
- [Rentschler 2009] Rentschler, J.: Experimentelle Untersuchung zur Querkrafttragfähigkeit von Slim-Floor Trägern, Diplomarbeit, Nr. 2009-36X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2009.
- [Rieg 1998] Rieg, A.: Kriechen und Schwinden bei Verbundträgern mit niedriger Bauhöhe, Diplomarbeit, Institut für Konstruktion und Entwurf I, Universität Stuttgart, 1998.
- [Rieg 2004] Rieg, A.: Effective Width of Composite Girders with Reduced Height, In: Walraven, J., Blaauwendraad, J., Scarpas, T., Snijder, B. (Eds.), *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International PhD Symposium in Civil Engineering*, 16-19 Juni 2004, Delft, Niederlande, 2004.
- [Rieg 2006] Rieg, A.: Verformungsbezogene mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger, *Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf*, Nr. 2006-2, Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 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*, S. 197-208, 2006.
- [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, 1965.
- [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, Band I und II, 1959.
- [Sauerborn 2000] Praxisgerechte Anschlüsse im Stahlverbundbau. Theorie und Praxis im Konstruktiven Ingenieurbau, Festschrift zu Ehren von Professor Dr.-Ing. Helmut Bode, ibidem-Verlag, Stuttgart, Seite 489 – 497, 2000.
- [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.
- [Schäfer 2007] Schäfer, M.: Tragverhalten von Flachdecken mit integrierten hohlkastenförmigen Stahlprofilen. Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bergische Universität Wuppertal, 2007.
- [Schaumann 2001] Schaumann, P.: Nationale brandschutztechnische Bemessung, In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbaukalender 2001, Ernst & Sohn, S. 369-402, 2001.
- [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.
- [Schnell 1998] Schnell, W.; Gross, D.; Hauger, W.: Technische Mechanik – Band 2: Elastostatik. 6. Auflage. Berlin / Heidelberg / New-York, Springer-Verlag, 1998.
- [Schröder, Stritzke 1978] Schröder, S., Stritzke, J.: Neue Untersuchungen zur mittragenden Breite von Plattenbalken, Bauplanung - Bautechnik, Band 32 (1978), Heft 4, Seite 176-180, 1978.
- [Sedlacek, Bild 1990] Sedlacek, G., Bild, S.: Vorgehensweise bei der Ermittlung der mittragenden Breite, Bauingenieur 65 (1990), Seite 551-562, 1990.
- [Seitz 2005] Seitz, M.: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit des Betongurts von Verbundträgern, Diplomarbeit Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2005.
- [Severn 1964] Severn, R. T.: The effective width of T-beams, Magazine of Concrete Research (GB), Band 16 (1964), Heft 47, Seite 99-102, 1964.
- [Specht 1986] Specht, M.: Modellstudie zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbiegegliedern ohne Schubbewehrung im Bruchzustand, Bautechnik 10 (1986), Ernst & Sohn Verlag, Berlin, Seite 339-350, 1986.
- [Specht 1989] Specht, M.: Zur Querkrafttragfähigkeit im Stahlbetonbau, Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), Ernst & Sohn Verlag, Berlin, Seite 193-198 und 228-231, 1989.
- [Tontchev 2008] Tontchev, I.: Numerische Simulation von Slim-Floor Trägern mit Hutprofilen mit dem Programm ANSYS®, Diplomarbeit, Nr. 2008-24X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2008.
- [Trost 1968] Trost, H.: Zur Berechnung von Stahlverbundträgern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastischen Verhaltens des Betons, Stahlbau 37 (1968), Heft 11, 1968.
- [Zhou 1998] Zhou, D.: Beitrag zum Tragverhalten und zur Entwicklung der Rechenmodelle von Verbundträgern mit Stegöffnungen, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998.
- [Xia 1999] Xia, G.: Zur wirklichkeitsnahen Berechnung von Verbundkonstruktionen unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Betonverhaltens. Dissertation, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1999.

## 14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Normal hoher Verbundträger, niedriger Verbundträger, Slim-Floor Träger .....	4
Abbildung 2.2: Dehnungsverteilung eines Verbundträgers.....	5
Abbildung 2.3: Dehnungsverteilung eines niedrigen Verbundträgers.....	7
Abbildung 2.4: Dehnungsverteilung eines Slim-Floor Trägers.....	8
Abbildung 2.5: Aufreißen des Querschnitts im Stütz- und Feldbereich eines normal hohen Verbundträgers und eines Slim-Floor Trägers .....	9
Abbildung 2.6: Vereinfachtes Berechnungsverfahren für den gerissenen Stützbereich .....	9
Abbildung 2.7: Momenten-Nulldurchgang bei einem Zweifeldträger in Abhängigkeit der Steifigkeitsverteilung.....	10
Abbildung 3.1: Slim-Floor Profil mit ausbetonierten, hohlkastenförmigen Stahlprofil [Schäfer 2007].....	12
Abbildung 3.2: Flachdecke mit Hutprofil .....	13
Abbildung 3.3: Mittragende Breite $b_{m,B}$ und $b_{m,S}$ des einsteigigen Plattenbalkens in Feldmitte unter Gleichlast nach [Rieg 2006] .....	17
Abbildung 3.4: Mittragende Breite $b_{m,B}$ und $b_{m,S}$ des einsteigigen Plattenbalkens in Feldmitte unter Gleichlast nach [Rieg 2006] .....	17
Abbildung 4.1: Mittragende Breite eines Plattenbalkens und eines Verbundträgers [Kuhlmann, Rieg 2004a].....	19
Abbildung 4.2: Scheiben- und Biegetragwirkung des Betongurts [Kuhlmann, Rieg 2004a] .....	20
Abbildung 4.3: Einfluss der mittragenden Breite $b_{eff}$ auf die Momententragfähigkeit.....	21
Abbildung 4.4: Einfluss der mittragenden Breite $b_{eff}$ auf Trägersteifigkeit.....	22
Abbildung 4.5: Definition der mittragende Breite $b_{eff}$ .....	23
Abbildung 4.6: Mittragende Breite verschiedener Normenregelungen .....	24
Abbildung 4.7: Mittragende Breite für Verbundträger [DIN 18800-5] .....	24
Abbildung 4.8: Mittragende Breite für Plattenbalken aus Beton [Grasser 1991].....	25
Abbildung 4.9: Mittragende Breite für Plattenbalken aus Beton [DIN 1045-1] .....	25
Abbildung 4.10: Verlauf der Mittragende Breite des Scheibenzustands $b_{m,S}$ eines einsteigigen Plattenbalkens [Rieg 2006].....	27
Abbildung 4.11: Verlauf der Mittragende Breite des Biegezustands $b_{m,B}$ eines einsteigigen Plattenbalkens [Rieg 2006].....	28
Abbildung 4.12: Mittragende Breite: Vergleich des Scheiben-/Biegezustands mit normativer Regelung .....	29
Abbildung 4.13: Mittragende Breite für Scheiben- und Biegezustand [Rieg 2006] .....	29
Abbildung 4.14: Verlauf der mittragende Breite $b_{m,B}$ und $b_{m,S}$ bei Gleichlast .....	30
Abbildung 4.15: Numerische Nachrechnung Last-Verformungskurve VT2 [Baur 2009] .....	32
Abbildung 4.16: Numerische Nachrechnung Last-Schlupfkurve VT2 [Baur 2009].....	32
Abbildung 5.1: Versuchsaufbau Einfeldträgerversuch mit zentrischer Belastung.....	35
Abbildung 5.2: Mittige Belastung Einfeldträgerversuche VT1, VT2, VT5.....	36
Abbildung 5.3: Exzentrische Belastung Einfeldträgerversuche VT3, VT4 .....	36
Abbildung 5.4: Verschiebliche Lagerung der Versuchsträger .....	37
Abbildung 5.5: Setzdehnungsmesser und Dehnmesser.....	38
Abbildung 5.6: Versuchsstand Einfeldträger – Aufbau und Belastungsanordnung .....	38

Abbildung 5.7: Betondehnmesser auf dem Betongurt (hier dargestellt: Draufsicht) .....	39
Abbildung 5.8: Last-Verformungskurve Einfeldträgerversuche .....	41
Abbildung 5.9: Biegedruckversagen der Einfeldträgerversuche .....	42
Abbildung 5.10: Last-Schlupfverhalten Einfeldträgerversuche .....	42
Abbildung 5.11: Schematische Skizze und Foto des Rissbilds auf der Betonunterseite bei Erreichen der Traglast des Versuchsträgers VT1 .....	43
Abbildung 5.12: Last-Rissbreitenkurven der Einfeldträgerversuche .....	44
Abbildung 5.13: Verteilung der Betonstauchung im Querrichtung (Feldmitte) – VT 2 .....	44
Abbildung 5.14: Verteilung der Betonstauchungen im Querrichtung (Feldmitte) – VT 3 .....	45
Abbildung 5.15: Nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung für Beton [DIN 1045-1] .....	46
Abbildung 5.16: Mittragende Breite in Feldmitte (Einfeldträger), rückgerechnet aus Betondehnung an Oberkante des Betons .....	46
Abbildung 5.17: Vergleich analytisches Modell mit Versuchsträger VT6 .....	48
Abbildung 5.18: Dehnungs- und Spannungsverteilung eines Slim-Floor Querschnitts .....	49
Abbildung 5.19: Mittelstütze mit gelösten Schrauben (hier: Versuchsträger V1) .....	52
Abbildung 5.20: Versuchsstand Zweifeldträger – Aufbau und Belastungsanordnung .....	53
Abbildung 5.21: Messung der Durchbiegung, des Schlupfs und der Auflagerkräfte .....	54
Abbildung 5.22: Setzdehnmesser auf dem Betongurt (hier nur Oberseite dargestellt) .....	54
Abbildung 5.23: Versuchsstand Zweifeldträger V1 .....	55
Abbildung 5.24: Last-Verformungskurve Zweifeldträgerversuche .....	56
Abbildung 5.25: Vergleich Ein- und Zweifeldträgerversuche mit Hutprofil .....	57
Abbildung 5.26: Last-Schlupfkurve Zweifeldträgerversuche .....	58
Abbildung 5.27: Vertikalschlupf im Bereich des Mittelaufagers (Versuchsträger V4) .....	58
Abbildung 5.28: Last-Schlupfkurve Zweifeldträgerversuche – Vertikalschlupf Mittelauflager .....	59
Abbildung 5.29: Last-Rissbreitenkurven der Zweifeldträgerversuche (Betonuntergurt) .....	59
Abbildung 5.30: Last-Rissbreitenkurve Zweifeldträgerversuche (Riss unten) .....	60
Abbildung 5.31: Rissentwicklung Betonplattenoberseite Zweifeldträgerversuche .....	60
Abbildung 5.32: Rechnerische mittragende Breite in Feldmitte (Druckbereich) .....	61
Abbildung 5.33: Rechnerische mittragende Breite am Mittelauflager (Druckbereich) .....	62
Abbildung 5.34: Dehnungsverteilung bei 50 und 100% der Traglast – Stützbewehrung Versuchsträger V1, V3, V4 .....	63
Abbildung 5.35: Rückrechnung einer mittragenden Breite der Zugbewehrung auf Basis der Dehnungsverteilung .....	64
Abbildung 5.36: Dehnungsverteilung über die Höhe des Querschnitts (Versuchsträger V2) .....	64
Abbildung 5.37: Trägerdurchbiegung Ein- und Zweifeldträgerversuche im Vergleich .....	66
Abbildung 6.1: Elementierung Ein- und Zweifeldträger .....	69
Abbildung 6.2: M- $\kappa$ -Linie für positive und negative Momentenbelastung .....	69
Abbildung 6.3: Spannungs-Dehnungsbeziehung - Rissmoment .....	70
Abbildung 6.4: Spannungs-Dehnungsbeziehung - Fließmoment .....	71
Abbildung 6.5: Spannungs-Dehnungsbeziehung – Zwischenwert (plastisches Moment) .....	72
Abbildung 6.6: Spannungs-Dehnungsbeziehung – Bruchmoment .....	73
Abbildung 6.7: Materialmodelle für den Beton nach [Hilsdorf, Reinhardt 1998] .....	73
Abbildung 6.8: Materialmodelle für den Baustahl und Betonstahl .....	74
Abbildung 6.9: Abstand Bewehrungslage zur Spannungsnull-Linie .....	76



Abbildung 6.10: Ungerissener und gerissener Bereich des Einfeldträgers.....	76
Abbildung 6.11: Schematische Darstellung – Durchbiegungsberechnung für Einfeldträger.....	77
Abbildung 6.12: Ungerissene und gerissene Bereiche eines Zweifeldträgers.....	77
Abbildung 6.13: Randbedingungen für Solver-Anwendung.....	79
Abbildung 6.14: Schematische Darstellung – Durchbiegungsberechnung für Zweifeldträger.....	79
Abbildung 6.15: Beispielrechnung für Zweifeldträger - Eingabeparameter.....	80
Abbildung 6.16: Last-Verformungskurve Beispielrechnung eines Zweifeldträgers.....	80
Abbildung 6.17: Berechnung der mittragenden Breite $b_{eff}$ nach [DIN 18800-5] bzw. [DIN EN 1994-1-1].....	81
Abbildung 6.18: Vereinfachter Ansatz für Schnittgrößenermittlung im gerissenen Bereich.....	81
Abbildung 6.19: Veränderung des Momenten-Nulldurchgangs bei veränderlicher Last.....	82
Abbildung 6.20: Einfluss eines veränderten rechnerischen Momenten-Nulldurchgangs auf die Last-Verformungskurve.....	84
Abbildung 6.21: Einfluss der mittragenden Breite im Stützbereich.....	84
Abbildung 6.22: Vergleich Versuch/analytisches Modell – Träger VT1.....	86
Abbildung 6.23: Vergleich Versuch/analytisches Modell – Träger VT2.....	86
Abbildung 6.24: Vergleich Versuch/analytisches Modell – Träger VT3.....	87
Abbildung 6.25: Vergleich analytisches Modell mit Versuchsträgern V1, V3, V4.....	88
Abbildung 6.26: Vergleich analytisches Modell mit Versuchsträgern V2, V5, V6.....	88
Abbildung 6.27: Versuchsträger und Versuchskonfiguration - SFT6 [Fries 2001].....	89
Abbildung 6.28: Vergleich Versuch/analytisches Modell - SFT6 [Fries 2001].....	89
Abbildung 6.29: Versuchsquerschnitt Slim-Floor Träger mit Cofradal200®-Elementen.....	90
Abbildung 6.30: Vergleich Versuch/analytisches Modell – B1.....	90
Abbildung 6.31: Mittragende Breite des elastischen Scheiben-/Biegezustands und nach [DIN 18800-5].....	91
Abbildung 6.32: Analytische Vergleichsrechnung [DIN 18800-5] mit Scheiben-/Biegezustand – VT1.....	92
Abbildung 6.33: Analytische Vergleichsrechnung DIN18800-5 mit Scheiben-/Biegezustand – V1.....	92
Abbildung 6.34: Basis-Einfeldträger für Parameteruntersuchung.....	93
Abbildung 6.35: Einfluss Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ – Einfeldträger.....	94
Abbildung 6.36: Einfluss Betondruckfestigkeit $f_c$ - Einfeldträger.....	95
Abbildung 6.37: Einfluss E-Modul des Betons $E_c$ - Einfeldträger.....	95
Abbildung 6.38: Einfluss Betonplattendicke $h_c$ - Einfeldträger.....	96
Abbildung 6.39: Einfluss Fließgrenze des Baustahls $f_y$ - Einfeldträger.....	96
Abbildung 6.40: Einfluss E-Modul des Baustahls $E_a$ - Einfeldträger.....	97
Abbildung 6.41: Einfluss der Baustahlquerschnitts $A_a$ - Einfeldträger.....	97
Abbildung 6.42: Einfluss untere Bewehrung $a_{su}$ - Einfeldträger.....	98
Abbildung 6.43: Einfluss obere Bewehrung $a_{so}$ - Einfeldträger.....	98
Abbildung 6.44: Einfluss des geometrischen Verhältnis $b/L$ - Einfeldträger.....	99
Abbildung 6.45: Basis-Zweifeldträger für Parameteruntersuchung.....	100
Abbildung 6.46: Einfluss Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ - Zweifeldträger.....	100
Abbildung 6.47: Einfluss Betondruckfestigkeit $f_c$ - Zweifeldträger.....	101
Abbildung 6.48: Einfluss der Baustahlquerschnitts $A_a$ - Zweifeldträger.....	101

Abbildung 6.49: Einfluss Betonplattendicke $h_c$ - Zweifeldträger .....	102
Abbildung 6.50: Einfluss der Fließgrenze des Baustahlprofils $f_y$ in Abhängigkeit der Plattendicke $h_c$ - Zweifeldträger .....	103
Abbildung 6.51: Einfluss der oberen Bewehrung $a_{so}$ - Zweifeldträger .....	103
Abbildung 7.1: Verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ .....	106
Abbildung 7.2: Systemskizze zur Berechnung der verformungsbezogenen mittragenden Breite .....	107
Abbildung 7.3: Verlauf der verformungsbezogenen mittragenden Breite [Rieg 2006] .....	108
Abbildung 7.4: Slim-Floor Querschnitt mit Hutprofil (UPE-Profil) .....	109
Abbildung 7.5: Parameteruntersuchung zur verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ ....	110
Abbildung 7.6: Einfluss des Ausnutzungsgrades $M/M_u$ auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V}$ für Basisträger nach Abbildung 7.5 .....	112
Abbildung 7.7: Last-Verformungskurve des Basisträgers nach Abbildung 7.5 .....	112
Abbildung 7.8: Einfluss der Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ auf $b_{m,V}$ für den Basisträger .....	113
Abbildung 7.9: Einfluss der Betondruckfestigkeit $f_c$ auf $b_{m,V}$ für den Basisträger .....	114
Abbildung 7.10: Einfluss der Betonplattendicke $h_c$ auf $b_{m,V}$ für den Basisträger .....	114
Abbildung 7.11: Einfluss der Fließgrenze des Baustahls $f_y$ auf $b_{m,V}$ für den Basisträger .....	115
Abbildung 7.12: Einfluss der Baustahlquerschnitts $A_a$ auf $b_{m,V}$ für den Basisträger .....	116
Abbildung 7.13: Einfluss der unteren Bewehrung $a_{su}$ auf $b_{m,V}$ für den Basisträger .....	116
Abbildung 7.14: Einfluss der oberen Bewehrung $a_{s,o}$ auf $b_{m,V}$ .....	117
Abbildung 7.15: Einfluss des geometrischen Verhältnis $b/L$ auf $b_{m,V}$ .....	117
Abbildung 7.16: Zusammenstellung der maßgebenden Einflussfaktoren auf $b_{m,V}$ .....	120
Abbildung 7.17: Ablaufschema zur Bestimmung der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ für Einfeldträger .....	121
Abbildung 7.18: Vergleich des Berechnungsansatzes für die verformungsbezogene mittragende Breite nach Gleichung 7.2 mit dem genauen Ansatz nach Abschnitt 7.2.2 .....	124
Abbildung 7.19: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ mit vereinfachtem Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V,(1)}$ nach Gleichung 7.2 .....	125
Abbildung 7.20: Vergleich der Durchbiegung $f_{m,V}$ mit Durchbiegung nach vereinfachtem Ansatz $f_{m,V,(1)}$ .....	125
Abbildung 7.21: Einfluss der in Formel angegebenen Faktoren auf die verformungsbezogene mittragende Breite $b_{m,V,(1)}$ .....	127
Abbildung 7.22: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ mit vereinfachtem Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V,(2)}$ ...	128
Abbildung 7.23: Vergleich der Durchbiegung $f_{m,V}$ mit Durchbiegung nach vereinfachtem Ansatz $f_{m,V,(2)}$ .....	128
Abbildung 7.24: Vergleich der Durchbiegung $f_{m,V}$ mit Durchbiegung $f_{m,V,18800-5}$ .....	130
Abbildung 7.25: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V}$ mit der spannungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V,18800-5}$ .....	130
Abbildung 7.26: Verformungsbezogene mittragende Breite für den Zweifeldträger .....	132
Abbildung 7.27: Berechnungsschema für verformungsbezogene mittragende Breite des Zweifeldträgers .....	133
Abbildung 7.28: Schematische Last-Verformungskurve eines 1- und 2-Feldträgers .....	134
Abbildung 7.29: Parameteruntersuchung zur Bestimmung des Abminderungsfaktors $\alpha_{bm,V}$ .....	135

Abbildung 7.30: Verhältnis Gesamtstahlsteifigkeit $I_{st}$ zu Verbundsteifigkeit $I_{i,0}$ in Abhängigkeit der mittragenden Breite $b_{eff}$ im Stützbereich.....	136
Abbildung 7.31: Vergleich der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V,analyt}$ für zweifeldträger mit vereinfachtem Ansatz der verformungsbezogenen mittragenden Breite $b_{m,V,Formel}$ .....	136
Abbildung 8.1: Ersatzträgersystem mit konstantem effektiven Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ .....	139
Abbildung 8.2: Last-Verformungskurve eines Slim-Floor Einfeldträgers (schematisch) .....	140
Abbildung 8.3: Parameteruntersuchung zur Bestimmung des Abminderungsfaktors $\alpha_c$ .....	141
Abbildung 8.4: Vergleich des elastischen Berechnungsansatzes nach Gleichung 8.5 ff. mit dem genauen Ansatz nach Gleichung 8.4.....	144
Abbildung 8.5: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT1 ...	145
Abbildung 8.6: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT2 ...	146
Abbildung 8.7: Basisträger für Parameteruntersuchung - Einflussgrößen auf die effektive Trägersteifigkeit $I_{i,eff}$ .....	147
Abbildung 8.8: Effektives Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ in Abhängigkeit der Betonzugfestigkeit $f_{ct}$ .....	148
Abbildung 8.9: Effektives Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ in Abhängigkeit der Betonplattendicke $h_c$ .....	148
Abbildung 8.10: Effektives Trägheitsmoment $I_{i,eff}$ in Abhängigkeit der Baustahlprofils $A_a$ .....	149
Abbildung 8.11: Vergleich der Durchbiegung $f_{i,eff}$ mit Durchbiegung $f_{analyt}$ (Hutprofile).....	150
Abbildung 8.12: Lastverformungskurve eines Ein- und Zweifeldträgers mit diskreten Belastungspunkten .....	151
Abbildung 8.13: Trägersteifigkeit des Stütz- und Feldbereichs für linear-elastischen Verformungsansatz .....	152
Abbildung 8.14: Schematische Darstellung zur Bestimmung der reduzierten Trägersteifigkeit $I_{i,2,eff}$ .....	153
Abbildung 8.15: Vergleich der Durchbiegung $f_{i,eff}$ mit Durchbiegung $f_{analyt}$ .....	155
Abbildung 8.16: Durchbiegungsberechnung am Ersatzsystem – Einfeldträger mit Drehfeder .....	156
Abbildung 8.17: Verlauf der Federsteifigkeiten $c_M$ in Abhängigkeit der Belastung $q$ und der gewählten konstanten Trägersteifigkeit $I_{i,0}$ .....	157
Abbildung 9.1: Messstellen für Ermittlung der Querkraft – Einfeldträgerversuche.....	160
Abbildung 9.2: Querkraftanteil im Betongurt in Abhängigkeit der Belastung - Einfeldträger.....	160
Abbildung 9.3: Messstellen für Ermittlung der Querkraft – Zweifeldträgerversuche .....	161
Abbildung 9.4: Querkraftanteil im Betongurt in Abhängigkeit der Belastung - Einfeldträger.....	161
Abbildung 9.5: Randbedingungen für Mehrfeldsysteme .....	162
Abbildung 9.6: Vergleichsrechnung – Verformung eines 1- / 2- und Mehrfeldträgers .....	163
Abbildung 11.1: Abmessungen und Querschnitt des Beispielträgers .....	168
Abbildung 11.2: Vergleich – Last-Verformungskurve für Ein- und Zweifeldträger .....	170
Abbildung 11.3: Vergleich der Berechnungsmethoden für den Einfeldträger .....	174
Abbildung 11.4: Vergleich der Berechnungsmethoden für den Zweifeldträger.....	174

## 15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Mittragende Breite in [m] verschiedener Normenregelungen.....	26
Tabelle 5.1: Versuchsprogramm – Plattengeometrie / Verdübelungsgrad / Lastexzentrizität .....	36
Tabelle 5.2: Versuchsprogramm – Plattengeometrie / Verdübelungsgrad / Lastexzentrizität .....	36
Tabelle 5.3: Ermittelte Materialkennwerte Beton .....	40
Tabelle 5.4: Ermittelte Materialkennwerte Baustahl und Betonstahl.....	40
Tabelle 5.5: Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite – Einfeldträgerversuche .....	47
Tabelle 5.6: Vergleich der experimentellen mit normativ mittragender Breite .....	47
Tabelle 5.7: Vergleich analytische Berechnung mit experimentellen Ergebnissen VT 6 .....	48
Tabelle 5.8: Experimentell gemessene Dehnungswerte am Einfeldträger – Rückrechnung des Biegemoments.....	49
Tabelle 5.9: Versuchsprogramm - Werkstoffe und Profilgrößen der Stahlquerschnitte .....	51
Tabelle 5.10: Versuchsprogramm – Plattengeometrie.....	52
Tabelle 5.11: Versuchsprogramm – Parametervariation .....	52
Tabelle 5.12: Betondruckfestigkeit - Zweifeldträgerversuche .....	55
Tabelle 5.13: Materialkennwerte Baustahlprofile - Zweifeldträgerversuche .....	55
Tabelle 5.14: Materialkennwerte Betonstahl - Zweifeldträgerversuche .....	56
Tabelle 5.15: Experimentelle Bestimmung der mittragenden Breite in Feldmitte - Zweifeldträger.....	61
Tabelle 5.16: Bestimmung der mittragenden Breite am Mittelaufleger (Betondruckkräfte).....	62
Tabelle 5.17: Experimentell gemessene Dehnungswerte am Zweifeldträger – Rückrechnung des Biegemoments.....	65
Tabelle 6.1: Einzelkraftkomponenten – Zuweisung des Scheiben- und Biegezustands.....	75
Tabelle 6.2: Ermittlung der mittragenden Breite für Scheiben- und Biegezustand in Abhängigkeit des Momenten-Nulldurchgangs.....	83
Tabelle 7.1: Statistische Auswertung Verformungsberechnung – Stufe 1 .....	126
Tabelle 7.2: Statistische Auswertung Verformungsberechnung – Stufe 2 .....	129
Tabelle 8.1: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT1 .....	145
Tabelle 8.2: Vergleich der rechnerischen und experimentellen Last-Verformungskurve VT2 .....	146
Tabelle 11.1: Verformungsberechnung – analytisches Modell .....	169
Tabelle 11.2: Verformungsberechnung – mittragende Breite nach [DIN 18800-5] .....	169
Tabelle 11.3: Verformungsberechnung – Vergleich mittragende Breite nach [DIN 18800-5] .....	169
Tabelle 11.4: Verformungsberechnung – verformungsbezogene mittragende Breite des Einfeldträgers (Stufe 1).....	171
Tabelle 11.5: Verformungsberechnung – verformungsbezogene mittragende Breite des Einfeldträgers (Stufe 2).....	171
Tabelle 11.6: Verformungsberechnung – verformungsbezogene mittragende Breite des Zweifeldträgers .....	172
Tabelle 11.7: Verformungsberechnung – effektive Trägersteifigkeit des Einfeldträgers.....	173
Tabelle 11.8: Verformungsberechnung – effektive Trägersteifigkeit des Zweifeldträgers .....	173



## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart entstanden.

Besonders danken möchte ich Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, für die Unterstützung und Betreuung während meiner Zeit am Institut, sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr. sc.techn. Mario Fontana, Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich für die kritische Durchsicht der Arbeit und Übernahme des Mitberichts.

Ein weiterer besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern und Kollegen am Institut für Konstruktion und Entwurf, den wissenschaftlichen Hilfskräften sowie den Verfassern der von mir betreuten Diplomarbeiten für die Anregungen, fachlichen Diskussionen und gute Zusammenarbeit. Hierbei möchte ich meinen persönlichen Dank Herrn Dr. Andreas Rieg, Herrn Dr. habil. Jörg Schänzlin, Herrn Matthias Konrad, Herrn Jochen Raichle, Herrn Lars Rölle und Herrn Markus Rybinski aussprechen. Ein besonderer Dank gilt auch unserem Versuchstechniker Herrn Oliver Schneider.

Für gute Zusammenarbeit und die Durchführung der Versuche möchte ich mich bei Herrn Dr. Dieter Lotze und den Mitarbeitern der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart bedanken.

Gleichzeitig gilt mein Dank auch allen Projektpartnern, Projektförderern, Industriepartnern und Spendern, die es ermöglicht haben, die Forschungsprojekte erfolgreich zu bearbeiten und zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, meinem Bruder mit Frau, meiner Freundin und meinem Freundeskreis für die immerwährende Unterstützung, Geduld und Toleranz während der letzten Jahre.

## Lebenslauf

Name: Gunter Benjamin Hauf  
geboren: 21.11.1977, Günzburg a. d. Donau  
Familienstand: ledig

1997 Abitur am Johann-Michael-Sailer Gymnasium, Dillingen a. d. Donau  
1997 – 1998 Wehrdienst in Dillingen a. d. Donau  
1998 – 2003 Studium des Bauingenieurwesens, Universität Stuttgart  
2003 – 2004 Tragwerksplaner bei der Fa. Walter Bau AG vereinigt mit Dywidag  
2004 – 2010 Wiss. Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und Entwurf,  
Universität Stuttgart







