

Untersuchungen zur Rotationsanforderung
bei Anwendung des Fließgelenkverfahrens
bei Verbundträgern

T 2807

T 2807

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1998, ISBN 3-8167-5493-7

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

**Untersuchungen zur Rotationsanforderung bei
Anwendung des Fließgelenkverfahrens
bei Verbundträgern**

im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

AZ Nr.: IV 1 - 5 - 539/88

Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek und Dipl.-Ing. B. Hoffmeister

Aachen, den 07.07.1994

Untersuchungen zur Rotationsanforderung bei Anwendung des Fließgelenkverfahrens bei Verbundträgern

Inhaltsverzeichnis

0.	Vorwort	1
1	Einführung	6
1.1	Derzeitige Anwendung des Fließgelenkverfahrens	6
1.2	Zielsetzung der Untersuchung	8
1.3	Zur Definition der Rotation	8
1.4	Vorgehensweise	11
2	Bestimmung der Rotationsanforderungen	13
2.1	Grundsätzliches	13
2.2	Rotationsanforderungen am Einfeldträger	15
2.2.1	Allgemeines	15
2.2.2	Träger mit Betonplatte im Druckbereich	16
2.2.3	Träger mit Betonplatte im Zugbereich	18
2.2.4	Schlußfolgerungen und Vergleiche mit Stahlträgern	20
2.3	Träger mit elastischem Verbund	21
2.4	Rotationsanforderungen bei statisch unbestimmten Systemen (Durchlaufträgern)	23
2.4.1	Allgemeines	23

2.4.2	Ermittlung von Rotationsanforderungen über der Stütze von zweifeldrigen Durchlaufträgern	24
3	Rotationskapazitäten	27
3.1	Grundsätzliches	27
3.2	Rotationskapazität bei Trägern mit Betonplatte im Druckbereich	29
3.3	Rotationskapazität bei Trägern mit Betonplatte im Zugbereich	30
4	Rotationsnachweise	32
5	Überprüfung des Verfahrens mit Versuchen	33
5.1	Versuche zur Rotationskapazität	33
5.2	Nachrechnungen	33
6	Schlußfolgerung	35
6.1	Allgemeines	35
6.2	Durchführung des Rotationsnachweises	35
6.3	Weitere Aufgaben	36
7	Literaturübersicht	38

Anlage A: Programm für die Berechnung der Momentenverteilungen und Verformungen bei einfeldrigen und durchlaufenden Verbundträgern unter Berücksichtigung geometrischer und werkstofflicher Nichtlinearitäten und Ergebnisse von Parameterstudien.

Anlage B: Ableitung der Formeln für die Rotationskapazität für Verbundträger mit Betonplatte im Zugbereich. Ermittlung der Rotationskapazität von Verbundträgern mit Betonplatte im Druckbereich

Anhang C: Nachrechnung von Versuchen

0. Vorwort

- (1) Die nachfolgende Untersuchung der "Rotationsanforderungen bei Anwendung des Fließgelenkverfahrens bei Verbundträgern" hat das Ziel, die Anwendbarkeit des im Stahlbau üblichen Fließgelenkverfahrens auf den Verbundbau zu überprüfen und dabei die Unterschiede festzustellen, die zwischen dem Stahlbau und dem Verbundbau bestehen.

- (2) Bei der Vertiefung in dieses Thema zeigte sich, daß die grundlegenden Unterschiede der Eigenschaften von Stahl und Stahlbeton bei Druck und Zug, die Auswirkungen dieser Eigenschaften im Biegeverhalten und die Streuung dieser Eigenschaften in potentiellen plastischen Zonen eine direkte Übertragbarkeit der im Stahlbau gebräuchlichen Fließgelenkregeln auf Verbundträger unmöglich macht und auch der Begriff der Rotation anders zu definieren ist. Auch ist die Frage, ob die Tragfähigkeitsuntersuchung und die Rotationsuntersuchung an einem System in einem Schritt mit gleichen Festigkeits- und Steifigkeitsannahmen durchgeführt werden dürfen, unklar.

- (3) Wesentliche Hindernisse für die Übertragbarkeit der Regeln des Stahlbaus sind im Einzelnen:
 1. Im Stahlbau werden plastische Gelenkrotationen als Knickwinkel in gedachten Fließgelenken zwischen vollständig elastisch wirkenden Stabteilen angesehen, mit denen das wirkliche Stabverhalten mit mehr oder weniger ausgeprägten plastischen Zonen mit seiner Wirkung auf Momentenumlagerungen ausreichend genau beschrieben werden kann.

Im Verbundbau wirkt sich bereits vor dem Plastizieren des Stahlträgers das nichtlineare Verhalten des Stahlbetonteils in Bereichen unter Druck- und vor allem unter Zugbelastung stark auf Schnittkraftumlagerungen aus, so daß die Definition von Gelenkrotation davon abhängt, ob und inwieweit diese Nicht-linearitäten zwischen den "Gelenken" berücksichtigt werden. **Bild 1** gibt einen Überblick über die Auswirkung verschiedener Modellansätze auf die Berechnung der Verdrehung eines Dreipunktbiegeträgers mit Stahlbetonplatte im

Zugbereich vor Erreichen plastischer Zonen im Stahlträger. Es ist also erforderlich, im Verbundbau ein klares Bezugssystem in Form einer Anweisung für die Berechnung der Verformung zwischen Gelenken anzugeben, wenn man Rotationen definieren will.

2. Im Stahlbau wird üblicherweise in plastischen Gelenken ein sprunghafter Übergang zwischen starrem Verhalten (d.h. elastische Kontinuität der Biegelinie) und plastischem Verhalten (d.h. Knickverformungen unter M_{pl}) vorausgesetzt, und die wirklichen Momentenrotationskurven lassen diese Näherung im Allgemeinen zu.

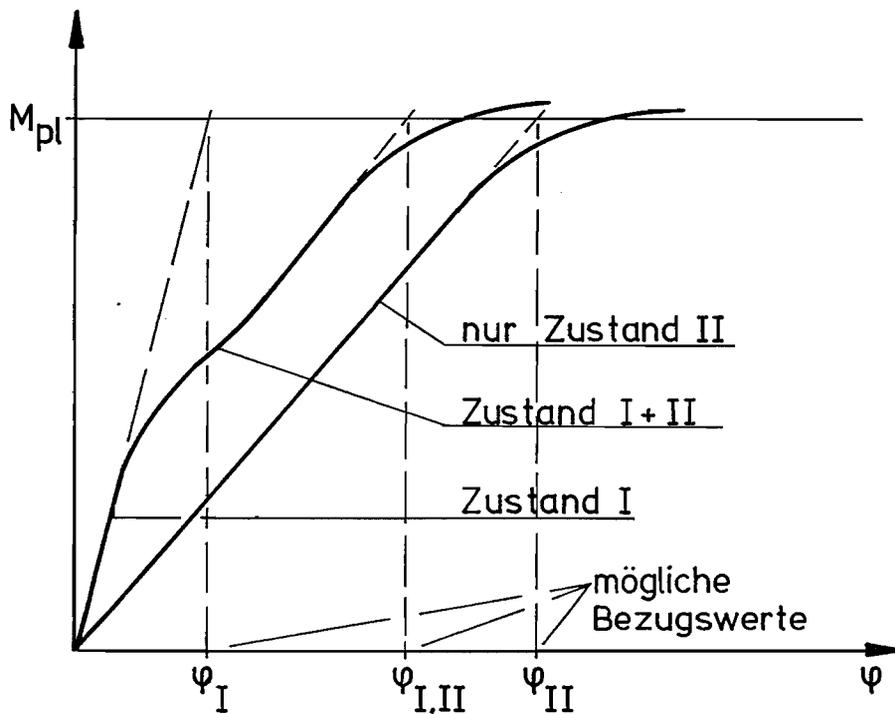


Abb. 1: Mögliche Ansätze für die Ermittlung von Rotationen bei Verbundträger im negativen Momentenbereich

Im Verbundbau wird vor allem bei Druckbelastung der Stahlbetonplatte eine relativ große plastische Anfangsrotation erforderlich, um den Querschnittswiderstand von der elastischen Grenze des Stahlträgers auf den Querschnittswiderstand

für volle plastische Ausnutzung des Stahlträgers anzuheben; diese Anfangsrotation bewirkt bereits nicht vernachlässigbare Umlagerungen, bevor sich das volle plastische Gelenk gebildet hat.

3. Im Stahlbau wird üblicherweise die Tragsicherheit in der Weise festgestellt, daß an allen Fließgelenken untere Bemessungswerte der plastischen Momente für die gewählte Stahlgüte angenommen werden. Diese Vorgehensweise ist hinsichtlich der Traglast konservativ, wenn die Wirkung einer möglichen Überfestigkeit in den plastischen Gelenken auf rotationsarme Anschlüsse oder sonstige Bauteile ohne Rotationsvermögen berücksichtigt wird.

Die mit dem gleichen Modell ermittelten Rotationsanforderungen, d.h. die bei Erreichen der Traglasten berechneten Knickwinkel in den plastischen Gelenken, bilden Größtwerte, da eine höhere Festigkeit des Werkstoffes eine spätere Entwicklung der plastischen Gelenke und damit geringere Rotationsanforderungen zur Folge hätte. Eine ungleichmäßige Verteilung von Überfestigkeiten über das Tragwerk, die zu anderen als den berechneten Fließgelenkbildungen führen könnte, muß dadurch berücksichtigt werden, daß an allen Stäben mit potentiellen Fließgelenken Rotationsanforderungen bestimmt werden.

Betrachtet man jedoch den Rotationsnachweis, so muß außer auf die Rotationsanforderungen auch auf die verfügbare Rotationskapazität gesehen werden, die mit größer werdender Streckgrenze abnimmt. Da die Abnahme der Rotationsfähigkeit mit größer werdender Fließgrenze im allgemeinen kleiner ist als die Abnahme der Rotationsanforderungen, kann die Tragsicherheit und Rotationsicherheit mit den gleichen unteren Bemessungswerten für die Streckgrenze durchgeführt werden. Streuungen werden durch einen Sicherheitsbeiwert an der Rotationskapazität berücksichtigt.

Im Verbundbau sind die Verhältnisse weniger eindeutig; die Auswirkung der Streuung der Steifigkeits- und Festigkeitsverhältnisse über den Verbundquerschnitt (Stahlbeton und Stahl) wirken sich in unterschiedlichem nichtlinearen Verhalten vor und bei der Bildung plastischer Zonen aus, so daß die Frage, wo

die Bemessungswerte für die Bestimmung der Tragsicherheit und für die Bestimmung der Rotationsanforderungen liegen, nicht von vornherein einfach beantwortet werden kann.

4. Die Rotationskapazität kann im Stahlbau in einfachen Funktionen der Stabbelastung, der Querschnittsgeometrie und der Werkstoffparameter angegeben werden, wobei nur die genormten Werte f_y von Bedeutung sind.

Im Verbundbau hängt die Rotationsanforderung und die Rotationskapazität von Werkstoffgrößen ab, die nicht genormt sind. Hierzu sind neue Klassifizierungen zu entwickeln.

5. Im Stahlbau sind die Modellbildungen für die Rotationsanforderungen und die Rotationskapazität durch viele Versuche gestützt.

Im Verbundbau sind nur wenige Versuche vorhanden, so daß eine volle Überprüfung der theoretischen Vorgehensweise z.Zt. noch nicht in dem Umfang wie im Stahlbau möglich ist.

- (4) In dem nachfolgenden Bericht werden Rotationsanforderungen und Rotationskapazitäten für den Verbundbau in analoger Form wie im Stahlbau behandelt. Dies liegt daran, daß im Stahlbau bereits eine solide wissenschaftliche und Normungsgrundlage für diese Frage besteht, während im Verbundbau die Behandlung des Themas noch am Anfang steht. Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen im Verbundbau beziehen sich mehr auf das Nachrechnen von speziellen Versuchen mit in den Versuchen ermittelten Werkstoffkennwerten und daran geknüpfte Schlußfolgerungen für Rotationskapazität als auf die Entwicklung allgemeingültiger Regeln für die Anwendung der Fließgelenktheorie mit einem Rotationsnachweis.
- (5) Der vorliegende Bericht stellt deshalb nur einen ersten Schritt zur Behandlung der offenen Fragen dar; weitere Untersuchungen, die schließlich zu einer Begründung

gleicher und unterschiedlicher Vorgehensweisen im Stahlbau, Massivbau und Verbundbau führen sollten, sind notwendig.

1 Einführung

1.1 Derzeitige Anwendung des Fließgelenkverfahrens

(1) Der EC 4 gestattet die Anwendung des Fließgelenkverfahrens für Durchlaufträger oder ähnlich wirkende, nicht seitenverschiebliche Systeme unter folgenden Bedingungen:

1. Zwei benachbarte Spannweiten dürfen sich in ihrer Länge nicht mehr als 50 %, bezogen auf die kürzere Spannweite, unterscheiden, (Bild 2).

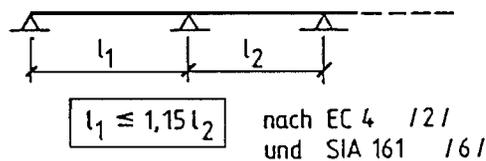
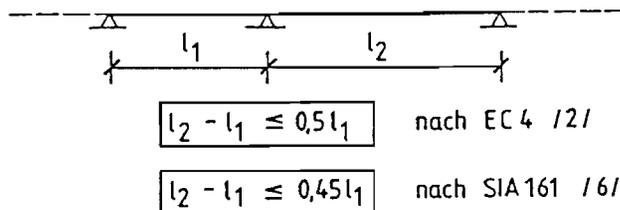


Abb. 2 Anforderungen an das statische System

2. Das Endfeld darf 115 % der Länge der anschließenden Stützweite nicht überschreiten.
3. Wirkt in einem Feld eines Durchlaufträgers mehr als die Hälfte der Bemessungslast konzentriert auf einer Länge von 1/5 dieser Spannweite, dann soll im Bereich der positiven Fließgelenke in dieser Spannweite der Abstand der neutralen Achse von der Randfaser des Betongurtes nicht größer als 15 % der Gesamthöhe des Trägers sein.

4. Bei Querschnitten, bei denen der Betongurt auf Druck beansprucht wird, muß die plastische Nulllinie im Betongurt oder dem mit ihm verbundenen Stahlflansch liegen.
5. Bei Querschnitten, bei denen der Stahlträger auf Druck beansprucht wird, müssen die Stege und Unterflansche hinsichtlich der b/t -Verhältnisse in Klasse 1 eingestuft sein (Bild 3). Die Bewehrung im Betongurt muß duktil sein.

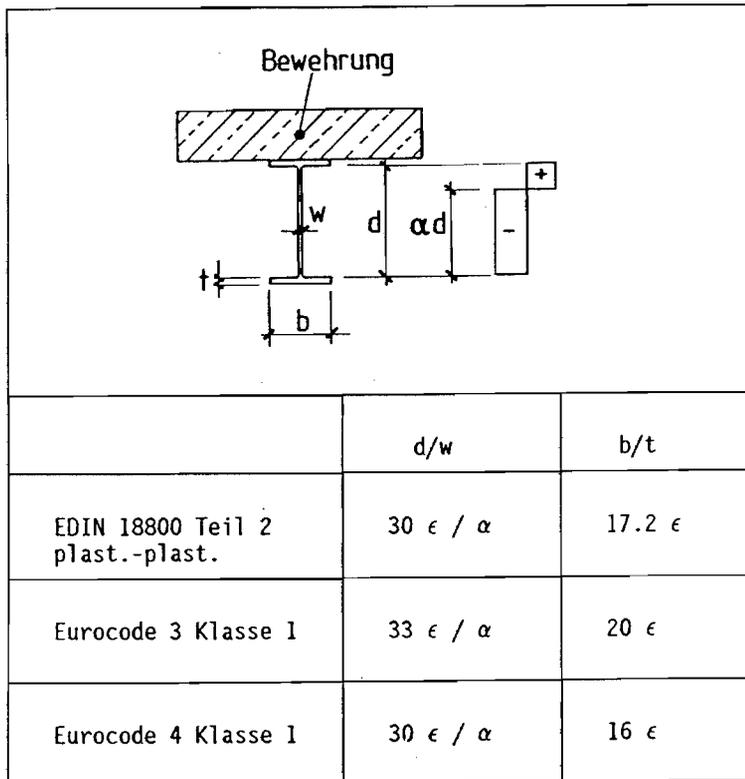


Abb. 3 Schlankheitsbegrenzung für Stahlprofile

- (2) Die Bedingungen 1 und 2 zielen auf eine Begrenzung der Rotationsanforderungen hin, die durch die Momentenumlagerung bedingt sind. Die Bedingungen 3, 4 und 5 betreffen die Sicherung ausreichender Rotationskapazitäten, die durch vorzeitiges Erreichen der Druckbeanspruchung der Betonplatte im Feldbereich oder vorzeitiges Beulen des Stahlträgers oder Bruch des Betonstahls in der gerissenen Betonplatte begrenzt sein kann.

1.2 Zielsetzung der Untersuchung

- (1) Die Untersuchung zielt darauf ab, die o. a. Begrenzungen der Anwendbarkeit des Fließgelenkverfahrens zu überprüfen und gegebenenfalls zu erweitern.
- (2) Dazu soll zunächst die Rotationsanforderung anhand des Fließgelenkverfahrens definiert werden. Da das Fließgelenkverfahren mit verschiedenen Annahmen angewendet werden kann, ist festzustellen, wie zutreffende Ergebnisse für die Tragsicherheit und die dafür geltenden Rotationsanforderungen zu gewinnen sind.
- (3) Danach soll die Rotationsfähigkeit bestimmt werden und zwar in einer Weise, die mit den Definitionen und Annahmen, die bei der Bestimmung der Rotationsanforderungen getroffen wurden, kompatibel sind.
- (4) Schließlich soll aus den Rotationsnachweisen, in denen Rotationsanforderungen und Rotationskapazität miteinander verglichen werden, die Anwendungsgrenzen bestimmt werden und zwar derart, daß in diesen Anwendungsgrenzen kein besonderer Rotationsnachweis geführt werden muß.

1.3 Zur Definition der Rotation

- (1) Die klassische Fließgelenktheorie, wie sie im Stahlbau angewendet wird, arbeitet mit folgenden Voraussetzungen:
 1. Ein Fließgelenk ist punktförmig und hat eine bilineare Rotationscharakteristik nach Bild 4
 2. Die Bereiche zwischen den Fließgelenken verhalten sich ideal elastisch.

3. Die plastischen Momente werden durch die Querschnittsinteraktionskurven bestimmt. Sie sind im allgemeinen bei positiven und negativen Momenten gleich groß.

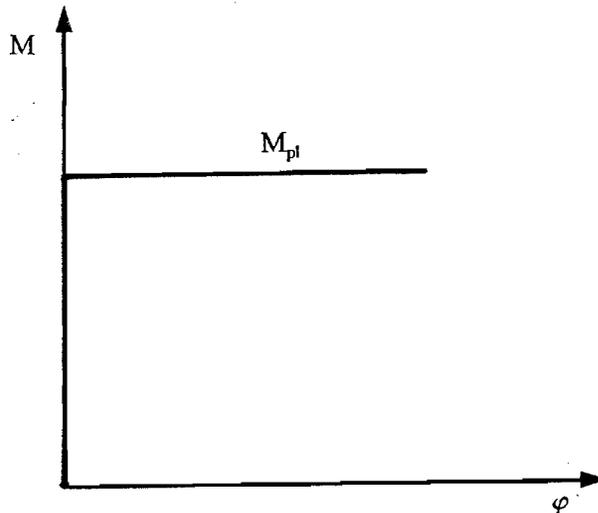


Abb. 4 Bilineare Momenten-Rotationscharakteristik

- (2) Mit Rotationsanforderungen bezeichnet man in der klassischen Fließgelenktheorie den Rotationswinkel, der an den verschiedenen Fließgelenken auftreten muß, um die maximale Tragfähigkeit des Systems zu erreichen, Bild 5.
- (3) Mit Rotationsfähigkeit bezeichnet man analog den Rotationswinkel, der an den entsprechenden Fließgelenken auftreten darf, ohne daß das Widerstandsmoment im Fließgelenk unter seinen Wert abfällt.
- (4) Wenn der Rotationsnachweis erfüllt ist, d. h. wenn die Rotationsanforderung kleiner oder gleich der Rotationskapazität ist, darf angenommen werden, daß die mit dem Fließgelenkverfahren berechnete Tragsicherheit erreicht wird, d. h. die Anwendung des Verfahrens gestattet ist.

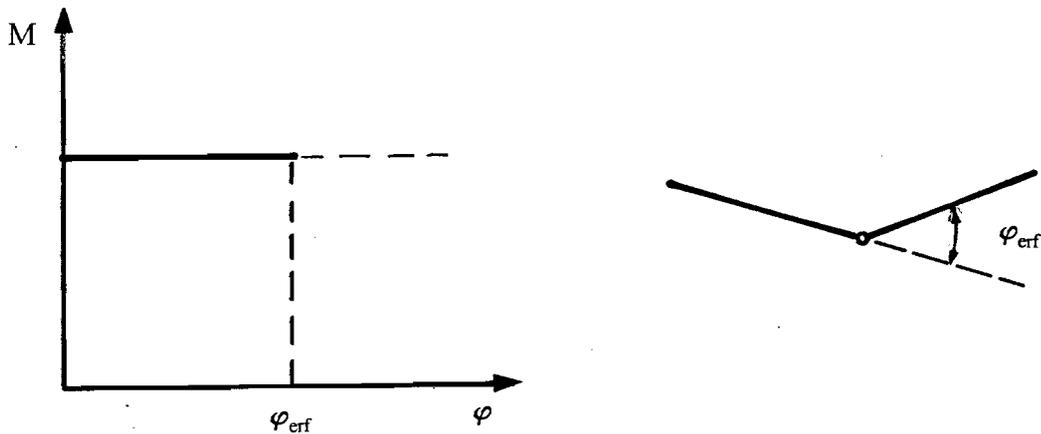


Abb. 5 Zur Definition der Rotationsanforderung

- (5) Für den Verbundbau besteht die Möglichkeit, das gleiche Fließgelenkverfahren wie im Stahlbau anzuwenden. Dabei treten Unterschiede auf, da
1. die Fließzonen wegen der größeren Entwicklungslängen der plastischen Momente aus den elastischen Momenten ausgedehnter sind,
 2. nicht elastische Effekte ohne Beteiligung von Fließzonen auftreten, z. B. durch Reißen der Betonplatte oder Schlupf in der Verbundfuge,
 3. die plastischen Momente für positive Momente (Beton in der Druckzone) und negative Momente (Beton in der Zugzone) verschieden groß sind.
- (6) Diese Unterschiede sind bei der Definition und Bestimmung der Rotationswerte zu berücksichtigen.

1.4 Vorgehensweise

- (1) Die beste rechnerische Annäherung an das Verhalten von Verbundträgern im Versuch wäre eine Modellierung, bei der die erfaßten geometrischen und werkstofflichen Nichtlinearitäten auch die Effekte mitbeinhalten, die für die begrenzte Rotation mitverantwortlich sind. Dadurch ist das Momenten-Rotationsverhalten der Gelenkregion implizit im Verfahren enthalten, Bild 6.

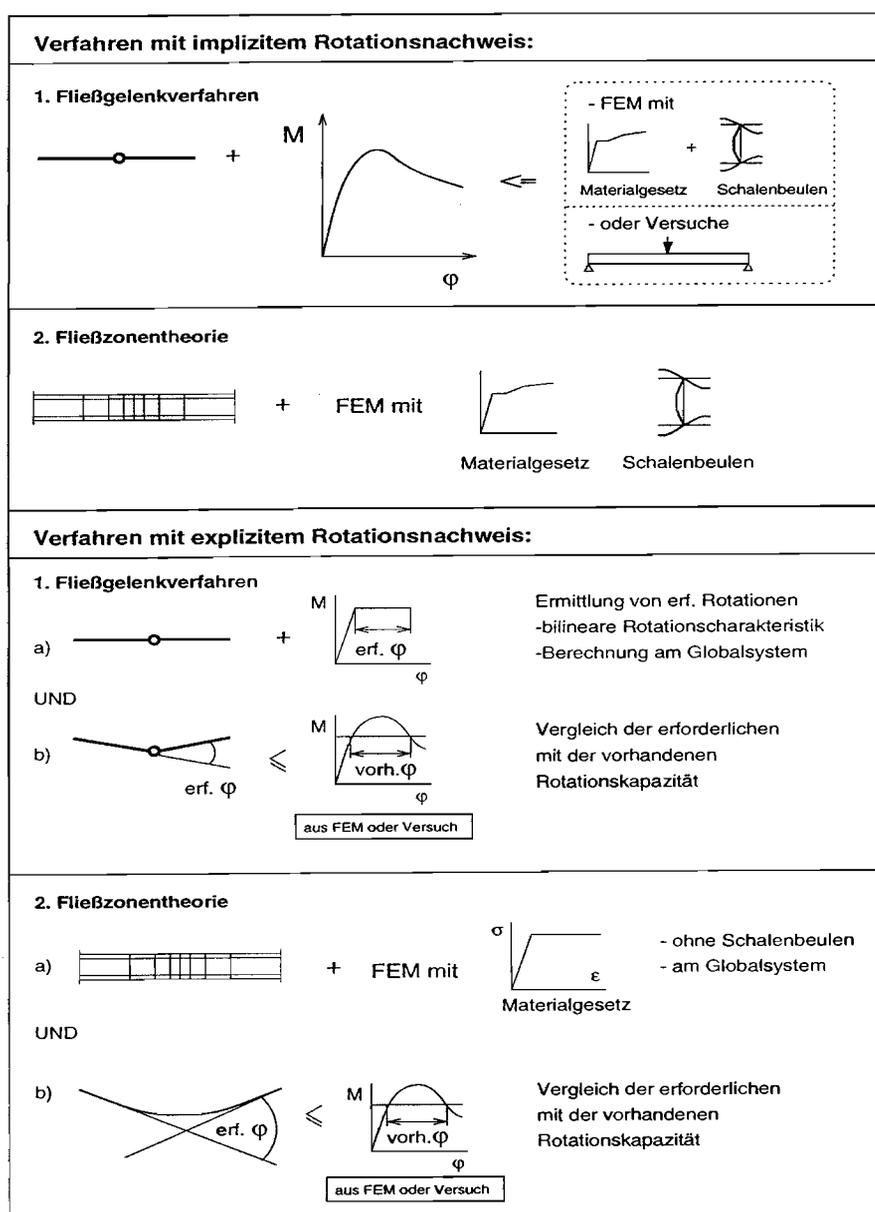


Abb. 6 Übersicht über Verfahren zum Rotationsnachweis

- (2) Solche impliziten Verfahren eignen sich zum Vergleich mit den vereinfachten Fließgelenkverfahren, sind aber für die praktische Anwendung zu aufwendig.
- (3) Die Fließgelenkverfahren benötigen aufgrund ihrer vereinfachten Momenten-Rotationscharakteristik einen zusätzlichen expliziten Rotationsnachweis. Die Aufgabe ist, die erforderlichen Rotationswinkel genau genug zu bestimmen. Daher wird mit verschiedenen Annäherungsstufen an das wirkliche Verfahren gerechnet, um so die erforderlichen Modellkorrekturen durchführen zu können.

Die vorgesehenen Annäherungen sind:

1. Das Fließzonenverfahren mit allen nichtlinearen geometrischen und werkstofflichen Effekten außer dem Beulen des Stahlträgers.
 2. Das Fließzonenverfahren mit bilinearer Spannungs-Dehnungsbeziehung ohne Wiederverfestigung und Beulen des Stahlträgers.
 3. Das Fließgelenkverfahren mit Berücksichtigung der Risse in der Betonplatte (Stadium I und II).
 4. Das Fließgelenkverfahren mit Berücksichtigung des Stadiums I der Betonplatte.
- (4) Um Vergleiche zwischen den Ergebnissen dieser Annäherungen und den Ergebnissen genauerer Berechnungen durchführen zu können, ist ein entsprechendes Programm entwickelt worden, und es wurden Parameterstudien durchgeführt, Anlage A.
 - (5) Die Rotationsfähigkeit wurde mit Hilfe von Fließlinienannahmen bei der Beulung bestimmt. Leider existieren nur wenige Rotationsversuche, so daß die Bestätigung der Formeln nur punktuell erfolgen kann.

- (6) Der Nachweis, daß das Fließgelenkverfahren mit explizitem Rotationsnachweis sicherheitsmäßig ein genaueres Verfahren mit implizitem Rotationsnachweis ersetzen kann, erfolgt durch Vergleich der Ergebnisse.

2 Bestimmung der Rotationsanforderungen

2.1 Grundsätzliches

- (1) Rotationsanforderungen gehen auf zwei Ursachen zurück:

1. Rotationsanforderungen für das Erreichen der plastischen Grenzmomente, Bild 7.

Diese Rotationsanforderungen entstehen durch die plastischen Zonen rechts und links plastischer Gelenke, die sich im Übergang zwischen dem elastischen Trägerverhalten und dem plastischen Grenzmoment ausbilden.

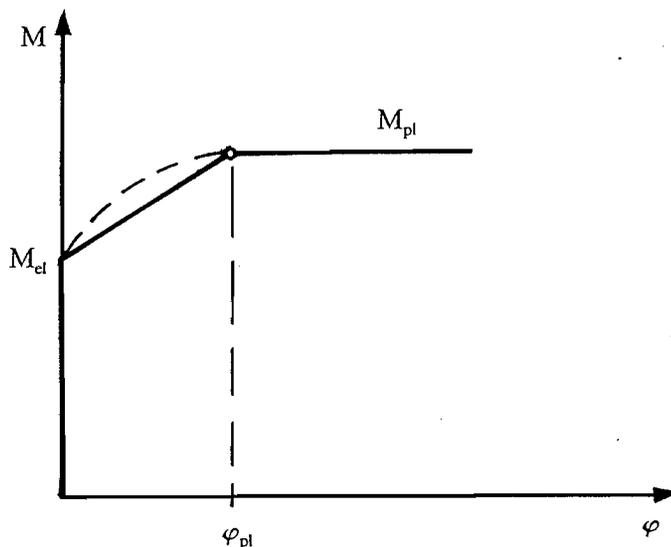


Abb. 7 Erforderliche Rotation zum Erreichen des plastischen Grenzmomentes

Diese Rotationsanforderungen gelten für alle Tragsysteme, die mit plastischen Schnittgrößen bemessen werden, auch dann, wenn keine Momentenumlagerung

in Anspruch genommen wird, z. B. bei statisch bestimmten Systemen (Einfeldträgern). Die Rotation ist kraftgeführt.

2. Rotationsanforderungen aus der Umlagerung von Biegemomenten in Folge Gelenkrotation, Bild 8.

Die Gelenkrotation wird an statisch unbestimmten Tragwerken (Durchlaufträgern) aktiviert und ist verformungsgeführt.

- (2) Zunächst werden die Rotationsanforderungen für das Erreichen plastischer Schnittgrößen behandelt. Dazu eignet sich am besten der Einfeldträger.

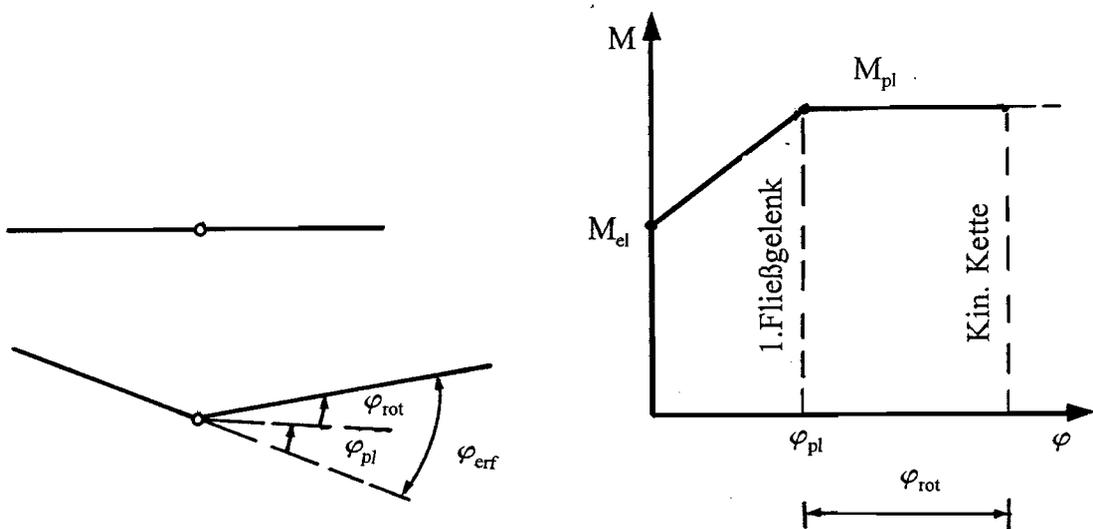


Abb. 8 Zusammensetzung der erforderlichen Rotationen zum Erreichen des Traglastzustandes

- (3) Danach werden die Rotationsanforderungen unter Berücksichtigung der Gelenkrotationen unter den plastischen Schnittgrößen behandelt. Dazu eignen sich besonders Durchlaufträger.

2.2 Rotationsanforderungen am Einfeldträger

2.2.1 Allgemeines

(1) Die Rotationsanforderungen zur Erreichung des plastischen Widerstandsmomentes hängen ab von

1. Querschnittsausbildung des Verbundträgers und Spannweite
2. Richtung der Biegemomente (Beton mit Druck- oder Zugbeanspruchung)
3. Verlauf der Biegemomente, Bild 9.
4. Festigkeit der Beton- und Stahlteile
5. Steifigkeit der Verbundfuge.

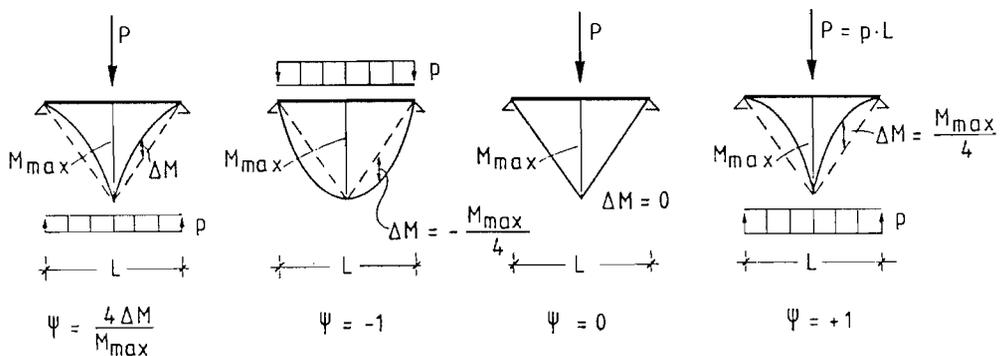


Abb. 9 Definition des Momentenformparameters ψ

(2) Im folgenden werden Einfeldträger mit Betonplatte unter Druckbeanspruchung und Betonplatte unter Zugbeanspruchung getrennt behandelt.

2.2.2 Träger mit Betonplatte im Druckbereich

- (1) Träger mit Betonplatte im Druckbereich, die das vollplastische Moment erreichen sollen, müssen so ausgebildet sein, daß die maximale Druckstauchung an der Oberfläche der Betonplatte nicht vor Erreichen des plastischen Moments auftritt.
- (2) Die rechnerische Modellierung zur Erfassung der erforderlichen Rotation kann nur mit Hilfe der Fließzonenmethode erfolgen, wobei die nicht lineare Betondruckstauchung und die Wiederverfestigung des unter Zugbeanspruchung stehenden Stahlträgers in die Untersuchung mit einbezogen werden muß.
- (3) Bild 10 zeigt, daß mit einem bilinearen Spannungs-Dehnungsgesetz für den Stahlträger rechnerisch das plastische Grenzmoment nicht erreichbar wäre und die Rotationen deshalb gegen Unendlich gingen. Die Begrenzung der Rotation durch Bruch der Betonplatte wäre die Folge.

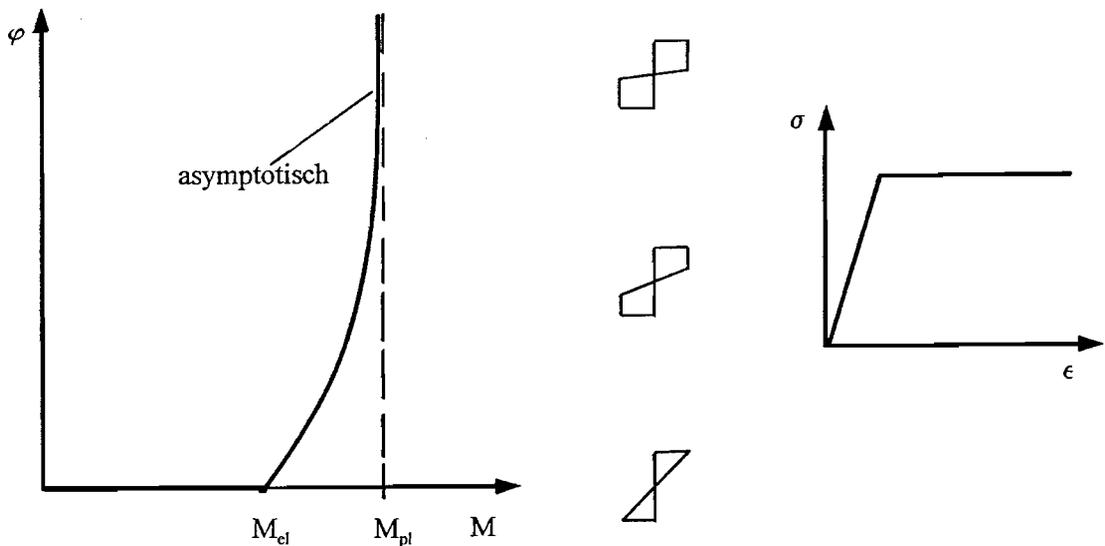


Abb. 10 Asymptotischer Verlauf der M-φ Beziehung beim bilinearen Werkstoffgesetz

- (4) Bei Berücksichtigung der Wiederverfestigung ergeben sich typische Momenten-Rotationskurven nach Bild 11 wobei die Zahlenwerte in Abhängigkeit von den wichtigsten Parametern in Bild 12. angegeben sind.

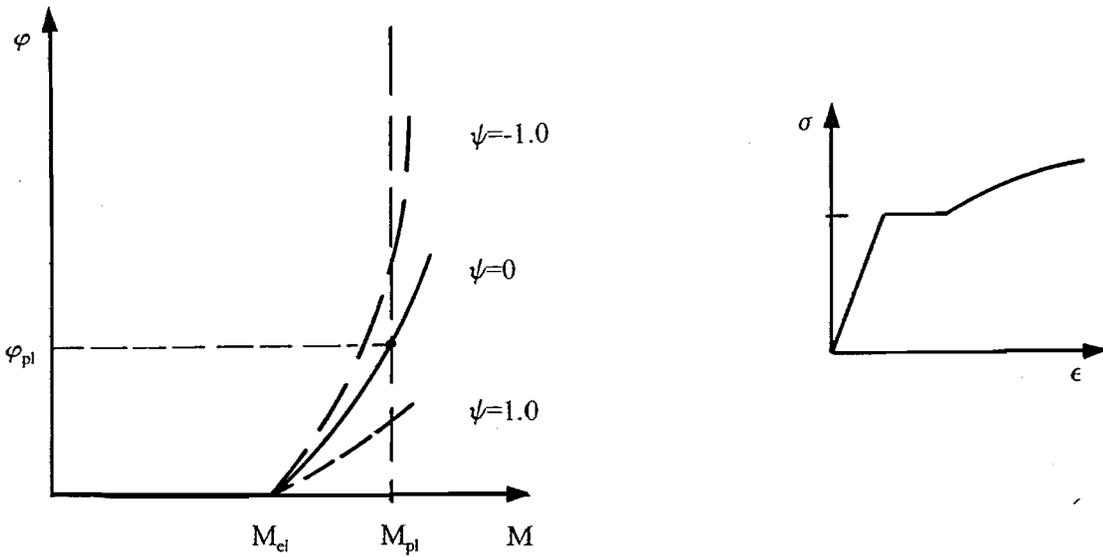


Abb. 11 Der Einfluß von ψ auf die Größe ϕ_{pl} bei Berücksichtigung der Stahlverfestigung

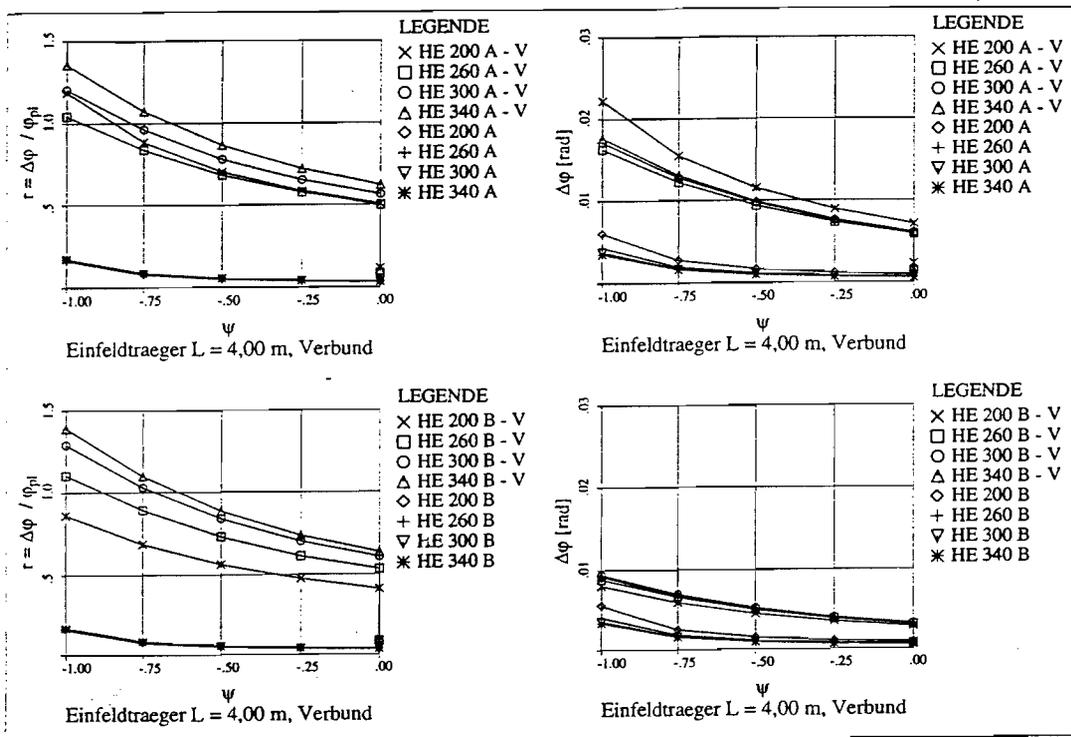


Abb. 12 Erforderliche Rotationswinkel in Abhängigkeit von ψ und den gewählten Stahlprofilen (weitere Angaben sind in Anlage A enthalten)

- (5) In Abschnitt 3 wird auf die erforderliche Maßnahme zur Erreichung dieser Rotationskapazität eingegangen.

2.2.3 Träger mit Betonplatte im Zugbereich

- (1) Träger mit der Betonplatte im Zugbereich erreichen ein vollplastisches Moment, das sich aus den Festigkeitsanteilen der Bewehrung in der gerissenen Betonplatte und des Stahlträgers zusammensetzt.
- (2) Die Abbildung erfolgt mit Hilfe der Fließzonenmethode wobei nach Bereichen im Zustand I, nach Bereichen der Erstrißbildung und nach Bereichen mit abgeschlossenem Ribßbild mit Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen unterschieden wird. Beim Baustahl wird ein bilineares Spannungs-Dehnungsdiagramm unter Berücksichtigung der Verfestigung angenommen, um die in Abschnitt 2.2.1 erwähnten Asymptoteneffekte auszuschließen. Beuleffekte im Stahlträger werden nicht betrachtet.
- (3) Bild 13 zeigt zwei typische Momenten-Rotationskurven, eine für den Bezug auf die Steifigkeit im Zustand I (a), die andere für den Bezug auf die Steifigkeit im Zustand II (b), die dritte für die Steifigkeit, die sich unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen ergibt (c).

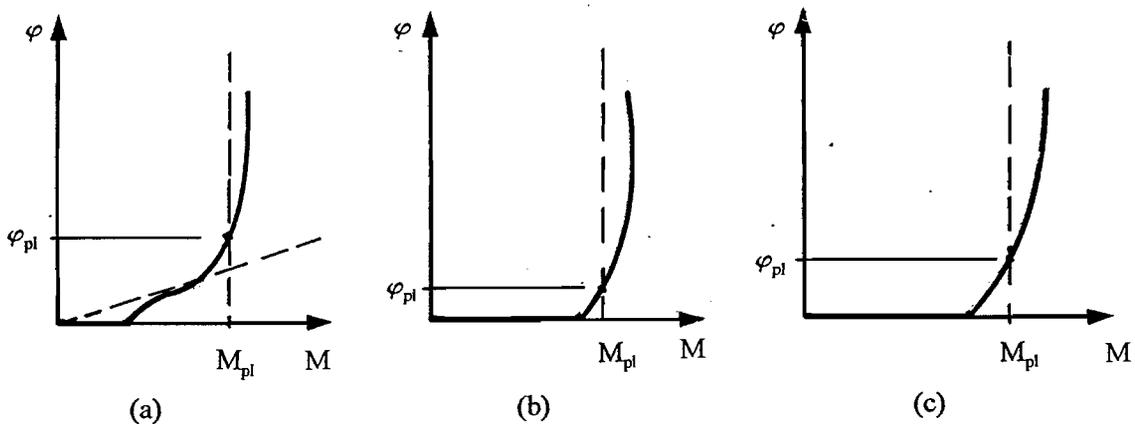


Abb. 13 Momenten-Rotationskurven von Verbundträgern im negativen Momentenbereich bezogen auf verschiedene Anfangssteifigkeiten

- (4) Es hat sich herausgestellt, daß die der Fließzonenbildung zugeschriebene Rotation am besten vereinfacht beschrieben werden kann, wenn auf 1/2 der Trägerlänge des Einfeldträgers eine gerissene Betonplatte mit abgeschlossenem Ribbild unterstellt wird.
- (5) Die Zahlenwerte für die erforderliche Rotation in Abhängigkeit von den wichtigsten Parametern sind unter der vereinfachten Annahme der Steifigkeitsverteilung nach (4) in Bild 14 angegeben.
- (6) Da plastische Momente mit Zug in der Betonplatte im wesentlichen über Stützen (z. B. bei Kragträgern) auftreten, interessieren hauptsächlich die Rotationen für $\psi \sim 0.0 \div 1.0$.
- (7) Die erforderlichen Maßnahmen zur Erreichung der geforderten Rotationskapazität sind in Abschnitt 3 angegeben.

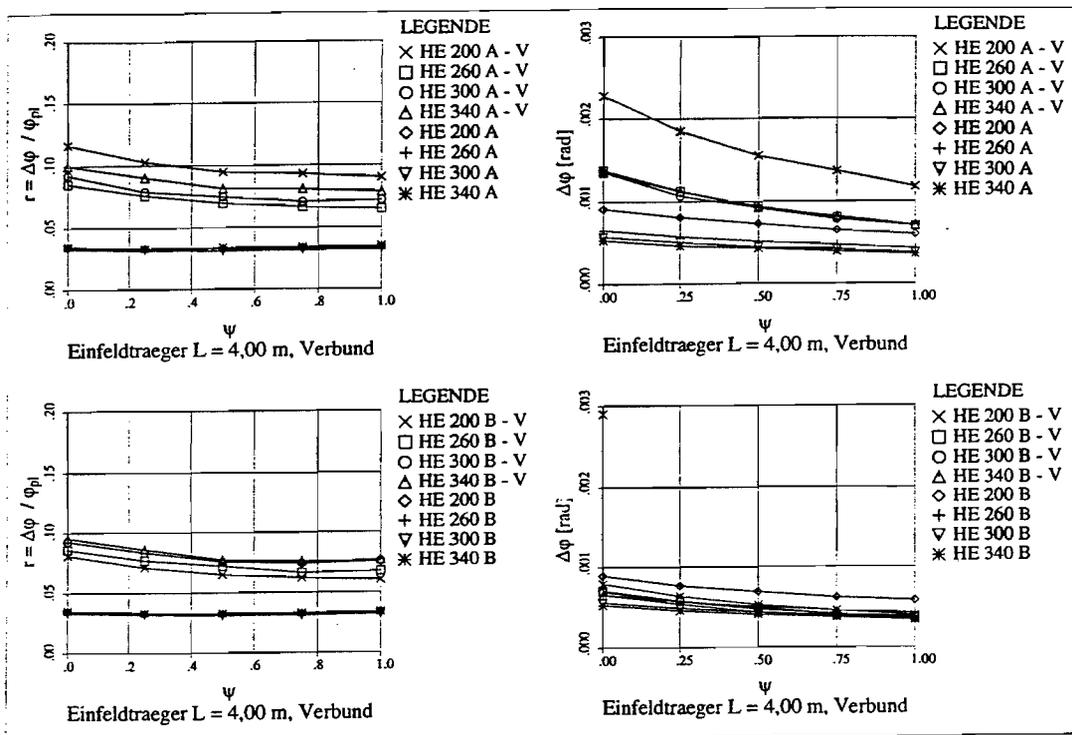


Abb. 14 Erforderliche Rotationswinkel für Verbundträger mit unterschiedlichen Stahlprofilen für verschiedene Momentenformfaktoren ψ (weitere Angaben siehe Anlage A)

2.2.4 Schlußfolgerungen und Vergleiche mit Stahlträgern

(1) Die Ergebnisse der Untersuchungen im Abschnitt 2.2 zeigen, daß

1. für die Entwicklung vollplastischer Momente aus den elastischen Momenten bei Querschnitten mit der Betonplatte in der Druckzone erhebliche Rotationen erforderlich sind, die zwar vom Querschnitt bei entsprechender Bemessung leicht aufgebracht werden können, siehe Abschnitt 3, die aber bei statisch unbestimmten Tragwerken, z. B. Durchlaufträgern, eine erhebliche Anforderung an Rotation anderer Gelenke darstellen. Die Wirkungsweise der plastischen Gelenke darf deshalb nicht durch die bei Stahlkonstruktionen übliche bilineare Form, Bild 4, modelliert werden, sondern es muß die erforderliche plastische Rotation bis zur Ausbildung der vollplastischen Momente berücksichtigt werden, Bild 7.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen für Stahlträger zeigt, daß die erforderliche "lokale" Rotation von Verbundträgern ein Vielfaches der "lokalen" Rotationsanforderungen von Stahlträgern betragen kann. Die Rotationsanforderungen hängen außerdem sehr stark von dem Momentenformbeiwert ψ ab.

Näherungsansätze zur Umgehung der trilinearen Modellierung in Bild 15 sind natürlich möglich durch Beschränkung auf das elastische Moment M_{el} (1), die Berücksichtigung einer elastischen Federsteifigkeit im Gelenk (2), oder die Einprägung einer Zusatzrotation in ein Gelenk mit der Festigkeit M_{pl} (3).

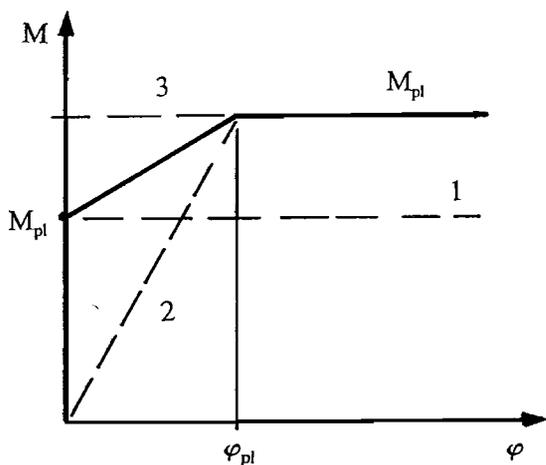


Abb. 15 Näherungen zur Berücksichtigung der zusätzlichen Rotationsanforderungen aus dem Verhalten der Verbundträger im positiven Momentenbereich

2. für die Entwicklung vollplastischer Momente aus den elastischen Momenten bei Querschnitten mit der Betonplatte in der Zugzone relativ kleine, vernachlässigbare Rotationen erforderlich sind, wenn die gerissenen Betonplattenbereiche bei den Verformungen berücksichtigt werden und die ψ -Werte zwischen 0.0 und 1.0 liegen.

Die Größenordnungen der "lokalen" Rotationsanforderungen liegen zwischen den Rotationsanforderungen von Stahlträgern, die um ihre Starke Achse belastet werden und den Anforderungen von Stahlträgern mit Biegebelastung um die schwache Achse.

Demnach dürfen die Gelenkmechanismen mit einer bilinearen Gelenkcharakteristik abgebildet werden, Bild 16, und die Rotation ϕ_{pl} für die Entwicklung von M_{pl} aus M_{el} dürfte vernachlässigt werden.

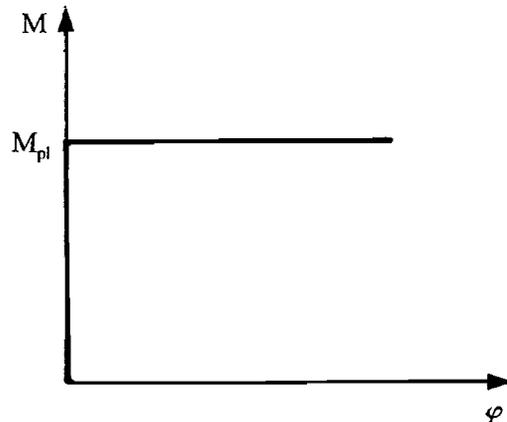


Abb. 16 Bilineare Momenten-Rotationscharakteristik für Verbundträger im Stützenbereich

2.3 Träger mit elastischem Verbund

- (1) Besonders interessiert die Rotation von Trägern mit Verformungen in der Verbundfuge. Dazu werden Situationen erfaßt, wie sie bei Teilverbund vorkommen.

- (2) Die Berechnung erfolgt mit dem Fließzonenverfahren unter Berücksichtigung der elastischen Fugenverformungen zwischen der Betonplatte und dem Stahlträger.
- (3) Grenzfälle sind die lose aufgelegte Betonplatte und die starr verbundene Betonplatte. Der Parameter ist der Verdübelungsgrad η , Bild 17.

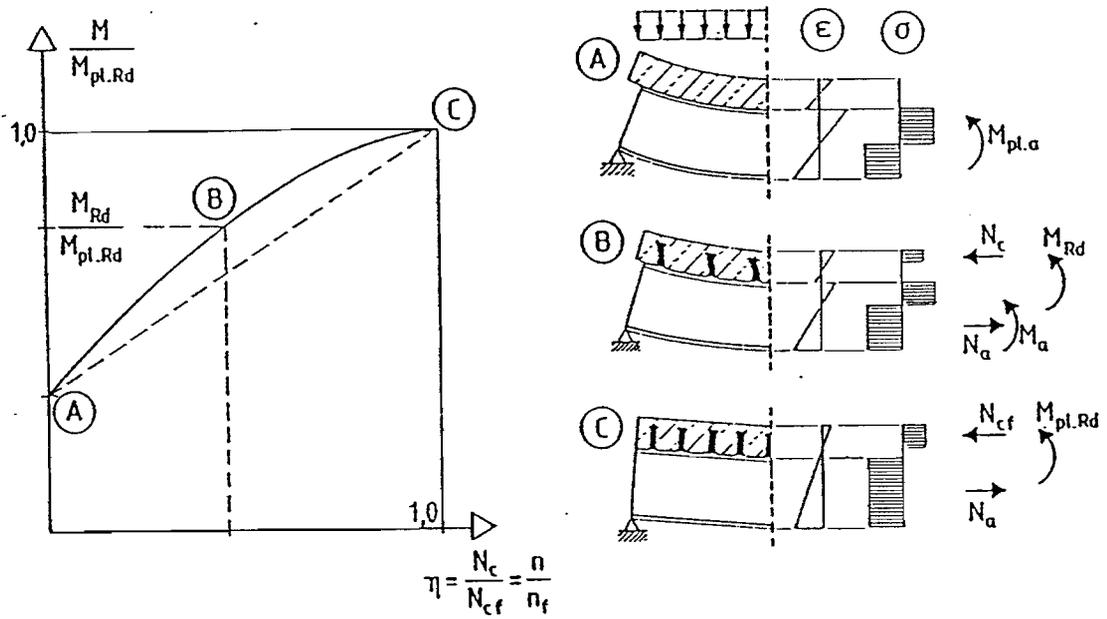


Abb. 17 Zusammenhang zwischen Momententragfähigkeit und Verdübelungsgrad

- (4) Die Last-Verformungslinie der Dübel wird Versuchen entnommen, Bild 18

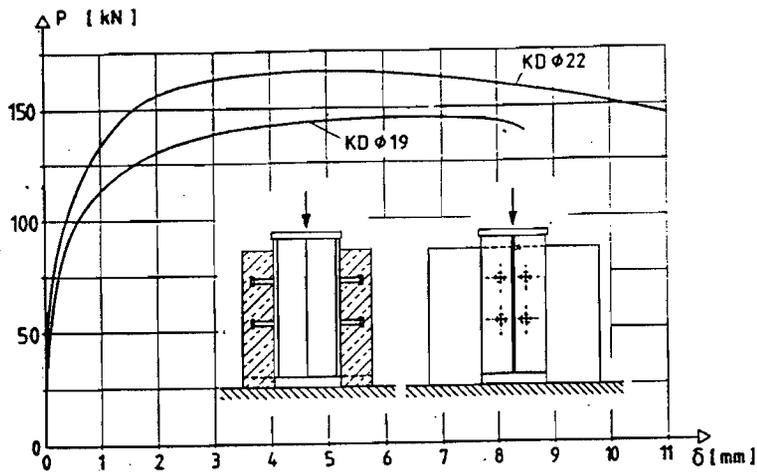


Abb. 18 Last-Verformungsverhalten von Dübeln

- (5) Die Rotationsanforderungen zur Entwicklung der plastischen Widerstände gehen für die Einfeldträger aus den Ergebnissen in Anlage A hervor.
- (6) Es hat sich gezeigt, daß die ermittelten Rotationsanforderungen, die zum Erreichen des plastischen Bemessungswertes benötigt werden, i. A. geringer sind, als die Rotationsanforderungen von Trägern mit starrer Verdübelung.

2.4 Rotationsanforderungen bei statisch unbestimmten Systemen (Durchlaufträgern)

2.4.1 Allgemeines

- (1) Die Rotationsanforderungen bei statisch unbestimmten Systemen (Durchlaufträgern) setzen sich aus den Anforderungen
 1. aus den Momentenumlagerungen infolge der sich zuerst bildenden Fließgelenke
 2. aus der Momentenumlagerung infolge der Entwicklung des sich zuletzt bildenden Fließgelenkeszusammen.
- (2) Die Berechnung der Rotationsanforderungen erfolgt mit der Maßgabe, daß die unter der Annahme vollplastischer Momente ermittelte Gesamttraglast erreicht wird. Die plastischen Momente werden hierbei unter Verwendung von Bemessungswerten für die Werkstoffeigenschaften, jedoch ohne Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte γ_M , ermittelt. Eine ausführliche Beschreibung der getroffenen Annahmen und der Vorgehensweise bei den Berechnungen ist in Anlage A gegeben.

(3) Entstehen die sich zuerst bildenden Fließgelenke in Zonen mit der Betonplatte im Zugbereich (z. B. über den Stützen von Durchlaufträgern), so brauchen die Rotationen infolge der Entwicklung plastischer Momente nur in den Feldbereichen berücksichtigt zu werden, z. B. durch den Lastfall "zusätzlich eingeprägte Verdrehung".

(4) In jedem Fall entstehen die Rotationsanforderungen an den verschiedenen Gelenken aus

$$\varphi_{\text{erf}} = \varphi_{\text{pl}} + \varphi_{\text{rot}}$$

wobei $\varphi_{\text{pl}} =$ Rotationsanforderung aus Entwicklung der Fließgelenke

$\varphi_{\text{rot}} =$ Rotationsanforderung aus Fließgelenkrotation.

(5) Bei der Berechnung muß das Fließgelenkverfahren mit Berücksichtigung des Steifigkeitsverlustes infolge Rißbildung im Beton angewendet werden. Die Momenten-Rotationscharakteristik entspricht dem Idealfall beliebig großer plastischer Rotationen auf dem Niveau M_{pl} .

2.4.2 Ermittlung von Rotationsanforderungen über der Stütze von zweifeldrigen Durchlaufträgern

(1) Für die Berechnung wird ein Eigengewicht-Nutzlastverhältnis $\gamma = \frac{g}{g + p}$ von 0.25 bis 1.0 zugrundegelegt.

(2) Die Berechnung erfolgt für Nutzlasten in nur einem Feld und Nutzlasten in beiden Feldern, wobei das Spannweitenverhältnis variiert wird.

(3) Statt gleichmäßig verteilter Nutzlasten werden auch Einzellasten in den Feldern betrachtet.

- (4) Die Berechnungsergebnisse sind in Anlage A dargestellt.
- (5) Man erkennt, daß ein wesentlicher Teil der Rotationsanforderungen von Entwicklung der plastischen Momente aus den elastischen Momenten im Feld herrührt. Diese Rotationsanforderung würde unterdrückt, wenn im Feld nur M_{el} anstelle von M_{pl} zugrundegelegt würde.

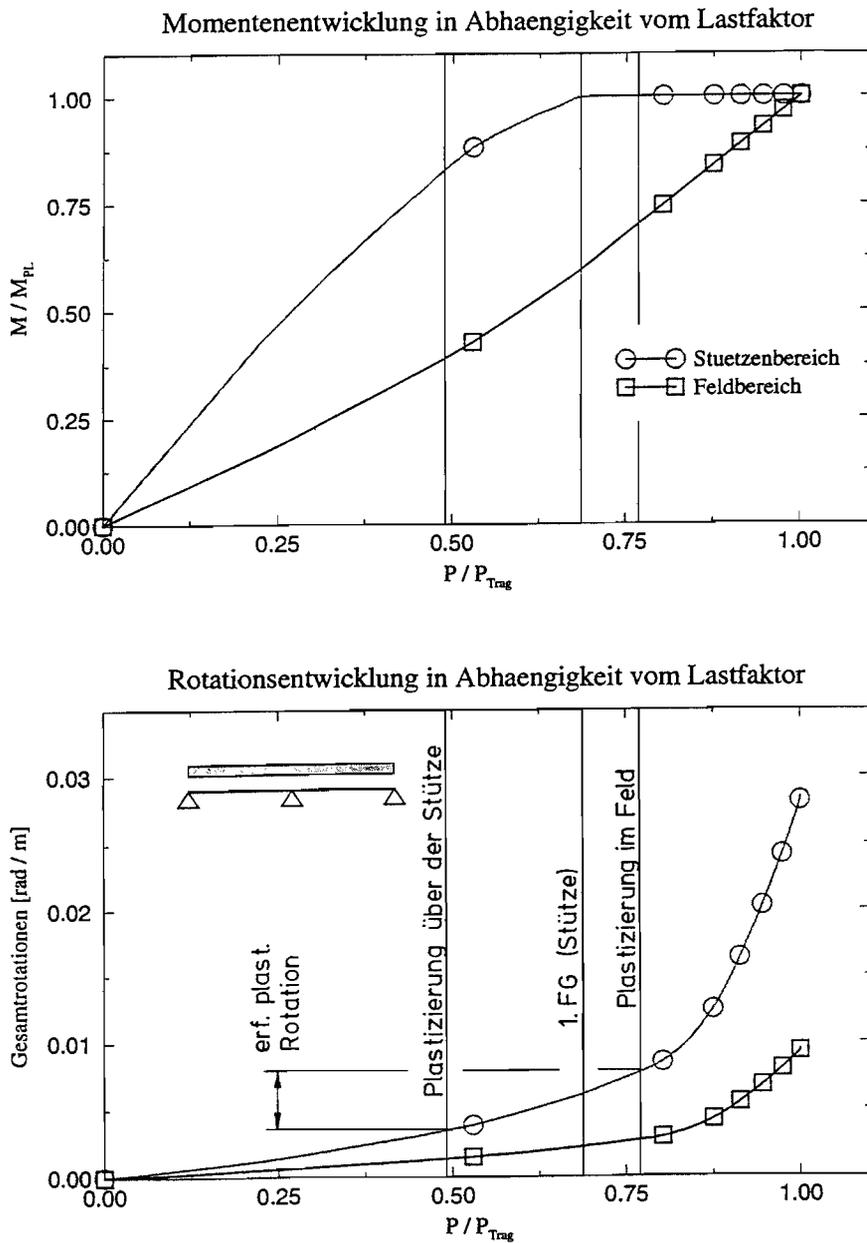


Abb. 19: Entwicklung der Momente und Rotationen in Abhängigkeit vom Lastfaktor

- (6) Hinsichtlich der verschiedenen variierten Systemparameter können für die Rotationsanforderungen über der Stütze von Zweifeldträgern folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:
1. Die erforderliche Rotation wird maßgeblich von dem Momentenformbeiwert ψ beeinflusst. Entscheidend für die Rotationsanforderung and den Querschnitt über der Stütze ist die Belastung, die zum Erreichen des letzten plastischen Momentes im Feld führt.
 2. Die Abhängigkeit der Rotationsanforderungen von der Querschnittsausbildung ist relativ gering im Vergleich zu den Einflüssen aus der Momentenform.
 3. Eine Variation der Belastungsverhältnisse hat, bei Beibehaltung sonstiger Systemparameter, gezeigt, daß die größten Rotationsanforderungen zu erwarten sind, wenn beide Felder gleich belastet werden.
 4. Eine Veränderung der Spannweitenverhältnisse hat gezeigt, daß bei Annahme gleicher Belastung in den Feldern, die höchste Rotationsanforderung über der Stütze bei gleichen Spannweiten der Felder erwartet werden kann.

Zusätzlich lassen die Berechnungsergebnisse erkenne, daß die Annahme, daß der Bemessungswert M_{pl} nicht überschritten werden darf (siehe Anlage A) zu Ergebnissen führt, die auf der sicheren Seite liegen. Vergleichsberechnungen mit Ansatz der Stahlverfestigung (wodurch näherungsweise das wirkliche Material- und Rotationsverhalten simuliert wird) liefern Ergebnisse, bei denen die Rotationsanforderungen zum Teil erheblich unter den erforderliche Rotationen liegen, die unter der Annahme begrenzter Momente ermittelt wurden. (näheres siehe Anlage A)

3 Rotationskapazitäten

3.1 Grundsätzliches

- (1) Die Rotationskapazitäten werden an Einfeldträgern ermittelt, die aus den Momentenverteilungen, die zu dem Grenzzustand der Tragsicherheit passen, z. B. der Momentenverteilung für eine kinematische Kette, heraus getrennt gedacht werden, Bild 20.

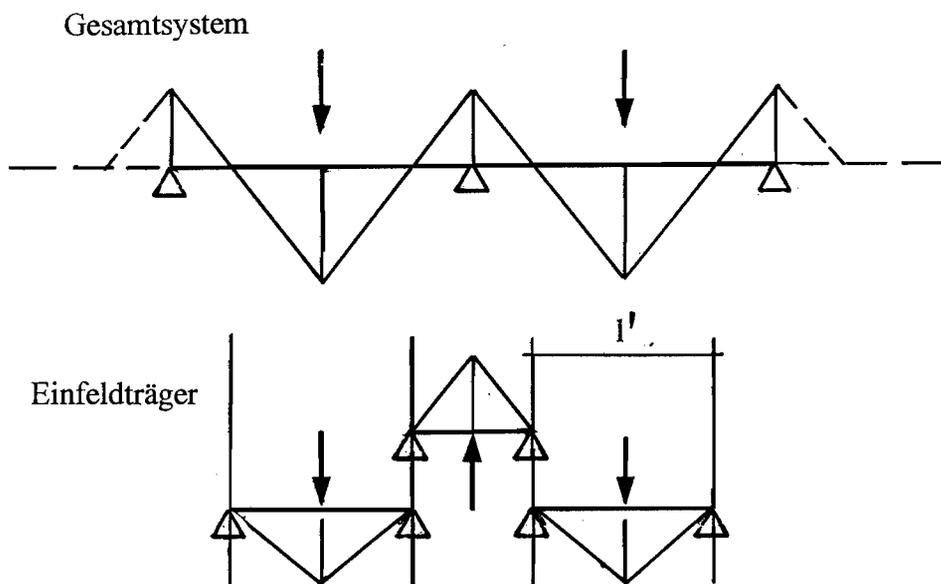


Abb. 20 Ermittlung von Ersatzinfeldträgern zur Gegenüberstellung der Rotationskapazitäten und Rotationsanforderungen

- (2) Die experimentelle Ermittlung der Rotationskapazität erfolgt durch verformungs-gesteuerte Biegeversuche, Bild 21, wobei φ_{cap} den Rotationswinkel darstellt, der nach Bild 21 durch die Schnittpunkte der Momenten-Rotationskurve mit dem Niveau M_{pl} bestimmt ist. Wird die Anfangsrotation zur Entwicklung des plastischen Moments vernachlässigt, dann darf die Rotationskapazität auf den

ideellen Schnittpunkt des linearen Teils der Momenten-Rotationskurve mit dem Niveau M_{pl} bezogen werden.

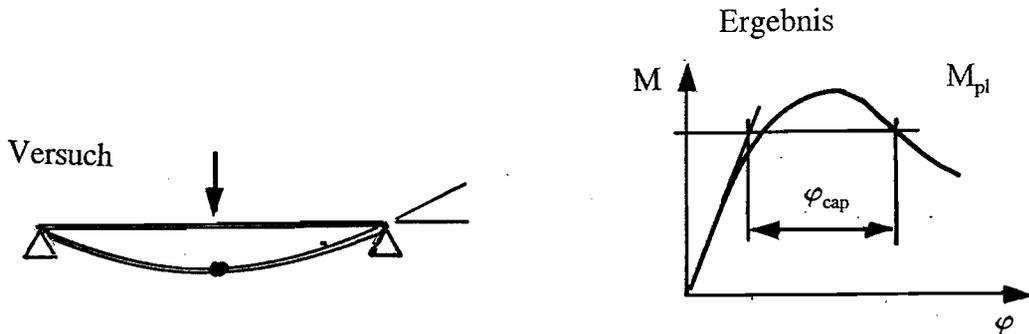


Abb. 21 Versuch zur Ermittlung von Rotationskapazitäten

- (3) Ähnlich wie bei der Ermittlung der Rotationsanforderungen für Einfeldträger im Abs. 2.2 hängt die Rotationskapazität ab von
1. Querschnittsausbildung des Verbundträgers und der Spannweite
 2. Richtung der Biegemomente (Beton mit Druck- oder Zugbeanspruchung)
 3. Verlauf der Biegemomente entsprechend ψ
 4. Festigkeit der Beton- und Stahlteile
 5. Beulsteifigkeit der gedrückten Stahlteile
 6. Steifigkeit der Verbundfuge.
- (4) Die Rotationskapazität wird deshalb ähnlich wie in Abschnitt 2.2 für Träger mit Betonplatte im Druckbereich und Träger mit Betonplatte im Zugbereich getrennt betrachtet.

3.2 Rotationskapazität bei Trägern mit Betonplatte im Druckbereich

- (1) Die Rotationskapazität ist im wesentlichen durch die maximale Dehnfähigkeit der Betonplatte an der Betonplattenoberseite begrenzt.
- (2) Ein wesentlicher Parameter sind die Druckhöhen im plastischen Spannungsdiagramm x/d .
- (3) Die rechnerische Ermittlung der Momenten-Rotationskurve erfolgt mit Hilfe der Fließzonentheorie mit Berücksichtigung der nichtlinearen Betondruckstauchung und der Wiederverfestigung des unter Zugbeanspruchung stehenden Stahlträgers.
- (4) Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Anlage B dargestellt. Ein Beispiel zur Rechnerischen Ermittlung von Rotationskapazität eines Verbundträgers ist in Bild 22 dargestellt.

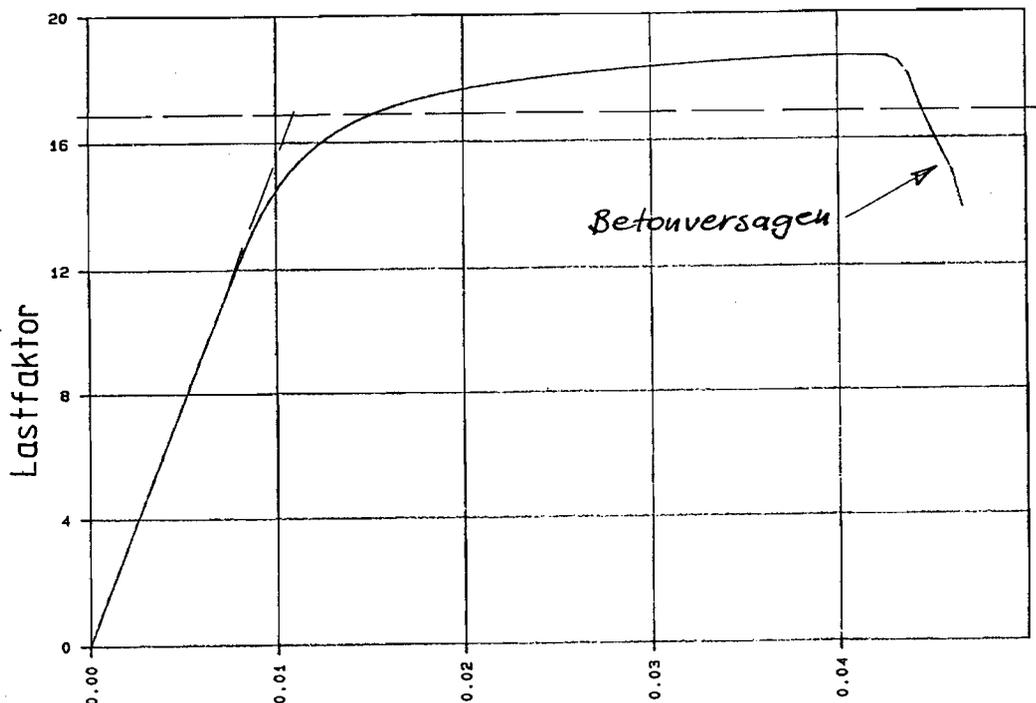


Abb. 22 Rechnerische Ermittlung von Rotationskapazitäten von Verbundträgern mit Betonplatte im Druckbereich

- (5) Bei ausreichend kleiner Druckhöhe $\frac{x}{d}$ sind die Rotationskapazitäten im Feldbereich von Trägern ausreichend.

3.3 Rotationskapazität bei Trägern mit Betonplatte im Zugbereich

- (1) Die Rotationskapazität des Verbundträgers mit gerissener Betonplatte wird im wesentlichen durch die Dehnfähigkeit der Betonstahlbewehrung und die Stauchungsfähigkeit des Stahlträgers unter den Druckbeanspruchungen begrenzt.
- (2) Typische Momenten-Rotationskurven aus Versuchen sind in Bild 23 dargestellt.

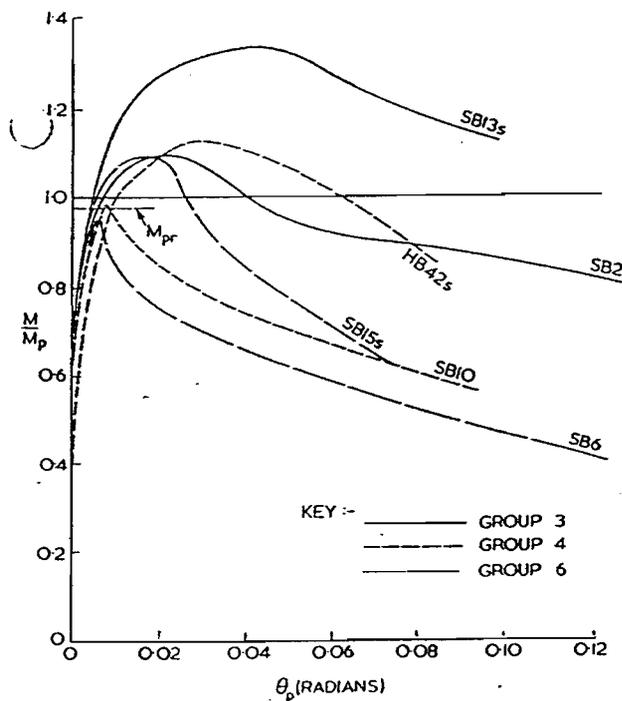


Abb. 23 Aus Versuchen ermittelte $M-\phi$ Kurven von Verbundträgern im negativen Momentenbereich /27/ /28/

- (3) Die rechnerische Ermittlung der Momenten-Rotationskurven erfolgt mit Hilfe von FE-Untersuchungen, mit denen das Beulen der Stege und Gurte im plastischen Bereich simuliert werden. Eine Alternative besteht in der Anwendung der Fließlinienmethode, mit der der abfallende Ast der Momenten-Rotationskurve abgeschätzt werden kann, Bild 24. Mit dieser Abschätzung ist es dann möglich die Rotationsbeziehung in eine Formel zu kleiden, die alle wesentlichen Parameter erfaßt, Anlage B.

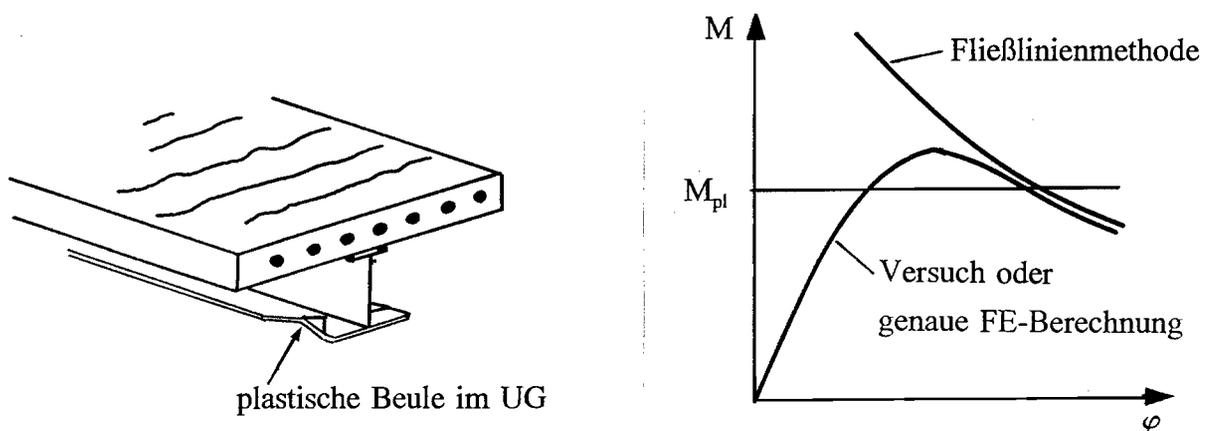


Abb. 24 Näherungsmodell zur Ermittlung von Rotationskapazitäten von Trägern mit Betonplatte im Zugbereich

- (4) Mit Hilfe der Fließliniennäherung ergeben sich die Formelbeziehungen nach Anlage B.
- (5) Mit dieser Beziehung ist die Durchführung von Rotationsnachweisen möglich.

4 Rotationsnachweise

- (1) Die Rotationsnachweise lauten

$$\varphi_{\text{erf}} \leq \varphi_{\text{cap}}$$

wobei für beide Seiten Bemessungswerte anzunehmen sind.

- (2) Aufgrund der Berechnung der erforderlichen Rotationswinkel auf dem extrem niedrigen Niveau der Bemessungswerte der vollplastischen Momente werden diese selbst als Bemessungswerte angesehen.
- (3) Bei den Rotationskapazitäten wird mangels Kalibrierungsmöglichkeit der theoretisch ermittelten Werte mit einer ausreichenden Anzahl von Versuchen eine Anleihe aus dem Stahlbau gemacht und der gleiche Sicherheitsbeiwert angesetzt, der sich dort an Versuchskalibrierungen der Fließlinienformeln ergab

$$\gamma_M = 1.25$$

- (4) Die Anwendung des Rotationsnachweises gestattet für spezielle Fälle, die Begrenzung der b/t- und d/w-Verhältnisse und die sonstigen geometrischen und Belastungseinschränkungen des Eurocode 4 zu umgehen.
- (5) Der Rotationsnachweis gestattet auch, die Anwendungsgrenzen neu zu definieren. Dazu werden die Parameteruntersuchungen, die in Anlage A beschrieben sind, durchgeführt.

5 Überprüfung des Verfahrens mit Versuchen

5.1 Versuche zur Rotationskapazität

- (1) Leider existieren bislang für die Erfassung der Rotationsanforderungen und der Rotationsfähigkeit von Verbundträgern weit weniger Versuche als bei reinen Stahlträgern.
- (2) Die verfügbaren Versuche, die Geometrie, Belastung, Materialkennwerte und die Ergebnisse sind in Bild 25 zusammengefaßt.
- (3) Die Versuche müssen hinsichtlich der Größe γ_M ausgewertet werden.

5.2 Nachrechnungen

- (1) Die Überprüfung der Zuverlässigkeit des verwendeten Programms und der getroffenen Annahmen ist durch Nachrechnen einiger Versuche und den Vergleich der Versuchsergebnisse mit Simulationsergebnissen durchgeführt worden.
- (2) In Anlage C sind solche Nachrechnungen enthalten. Die Ergebnisse zeigen, daß die Berechnungen mit der Fließzonenmethode ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

Beam number (1)	Steel section (2)	Area of longitudinal reinforcement, in square inches (3)	Simple plastic moment, in inch-kips (4)	Ultimate Moment, in inch-kips		Failure mode (7)	Curvature, in 10^{-3} radians per inch		Ratio of test to analytical ultimate moment (10)
				Test (5)	Analysis (6)		Test (8)	Analysis (9)	
4A	W12 x 16.5	1.20	1,637	1,920	1,820	Lateral		4.61	1.052
2		2.48	1,982	2,112	2,175	Lateral		3.73	0.971
5		2.48	1,982	2,116	2,175	Lateral		3.73	0.973
6		2.48	1,982	2,160	2,175	Lateral		3.73	0.993
1	W12 x 36	3.10	2,260	2,260	2,307	Lateral		2.68	0.980
18		—	2,040	2,900	2,891	Local	8.80	6.92	1.003
11		1.18	2,480	3,320	3,284	Local	8.00	5.41	1.011
12		1.96	2,700	3,440	3,449	Local	6.60	4.31	1.003
13		2.48	2,770	3,480	3,557	Local	4.90	4.02	0.978
16		2.48	2,770	3,460	3,557	Local	2.80	4.02	0.973
17		2.48	2,770	3,440	3,557	Local	4.90	4.02	0.967
14		3.72	2,940	3,533	3,742	Local	2.50	3.09	0.943
15		3.72	2,940	3,570	3,742	Local	2.20	3.09	0.954
21		W12 x 31	—	1,837	2,550	2,246	Local	4.54	4.51
22	0.80		2,247	2,860	2,499	Local	3.72	3.82	1.144
23	1.86		2,485	2,990	2,749	Local	2.60	2.89	1.088
24	2.48		2,522	3,010	2,895	Local	2.26	2.38	1.040
25	W12 x 27	3.72	2,610	2,900	3,005	Local	1.95	1.98	0.965
31		—	1,848	2,270	1,965	Local	4.20	4.20	1.153
32		0.80	2,132	2,400	2,182	Local	3.78	3.80	1.100
33		1.60	2,355	2,580	2,425	Local	2.87	3.06	1.064
34		3.10	2,627	2,700	2,652	Local	2.29	2.41	1.019

Note: 1 sq in. = 6.45 cm²; 1 in.-kip = 113 N · m; and 1 rad/in. = 0.039 rad/mm.

Group	Specimen	M_b/M_p		θ_H (radians)		θ_u
		3	4	5	6	
		Calculated	Observed	Calculated	Observed	
1	SB1	1.27	—	0.0181	—	—
	SB7	1.27	—	0.0181	—	—
2	SB3	1.29	1.17	0.0197	0.0323	—
	SB9	1.29	1.13	0.0197	0.0204	—
	HB40	1.29	1.11	0.0197	0.0218	—
3	SB2	1.24	1.08	0.0201	0.0181	0.041
	SB8	1.24	1.03	0.0201	0.0164	0.029
	HB41	1.21	1.02	0.0145	0.0091	0.021

Abb. 25 Versuchsergebnisse von Hamada, Longworth (a) und Climenhaga, Johnson (b) /29/, /28/

6 Schlußfolgerung

6.1 Allgemeines

- (1) Die wesentlichen Schlußfolgerungen aus der vorliegenden Untersuchung sind
1. die Beschränkungen, die im Eurocode 4 für die Anwendung des Fließgelenkverfahrens angegeben werden, können durch einen Rotationsnachweis umgangen werden,
 2. die Anwendungsgrenzen für die Anwendung des Fließgelenkverfahrens ohne besonderen Rotationsnachweis können erweitert werden.

6.2 Durchführung des Rotationsnachweises

- (1) Der Rotationsnachweis in Ergänzung zu einer Berechnung mit der Fließgelenkmethode erfolgt nach folgendem Schema:
1. Das Fließgelenkverfahren wird wie üblich unter Berücksichtigung der vollplastischen Momente auf dem Niveau der Bemessungswerte dieser Momente angewendet, um die Tragsicherheitsberechnung durchzuführen, wenn Theorie 1. Ordnung zutreffend ist.
 2. Gelten die Bedingungen der Theorie 2. Ordnung, so sind
 1. die Verformungen zwischen den Fließgelenken mit den Steifigkeiten der gerissenen Betonplatte zu berechnen, wenn die Betonzugfestigkeiten überschritten sind,

2. die Rotationen, die zur Entwicklung der vollplastischen Momente aus den elastischen Momenten an den Gelenkstellen erforderlich sind, als Zusatzverformungen aufzubringen.
3. Die erforderlichen Gelenkrotationen können als Gelenkwinkel in den Fließgelenken für den Grenzzustand der Tragsicherheit (z. B. für die Momentenverteilung für die Fließgelenkkette) ermittelt werden. Dabei sind die Steifigkeitsbedingungen und die Zusatzverformungen anzusetzen, die unter 2. aufgeführt sind. Die berechneten Gelenkrotationen dürfen als Bemessungswerte angesehen werden.
4. Die Rotationskapazität der Gelenke darf nach Abschnitt 3 bestimmt werden, wobei zur Bestimmung der Bemessungswerte ein Sicherheitsfaktor $\gamma_M = 1.25$ anzusetzen ist.
5. Ist $\varphi_{\text{erf}} \leq \varphi_{\text{cap}}/\gamma_M$ so ist die mit dem Fließgelenkverfahren ermittelte Tragsicherheit ausreichend.

6.3 Weitere Aufgaben

- (1) Es ist festzustellen, ob die mit einem realitätsnahen Werkstoffverhalten (also mit Wiederverfestigung) gerechneten Rotationsanforderungen zusammen mit den mit gleichen Voraussetzungen ermittelten Rotationskapazitäten immer durch einen vereinfachten Nachweis mit bilinearem Werkstoffgesetz ersetzt werden können.
- (2) Es ist festzustellen, ob die Rotationsnachweise immer auf dem unteren Niveau der Festigkeiten durchzuführen sind oder ob, bedingt durch andere Bemessungswerte, Korrekturen für den Rotationsnachweis erfolgen müssen.

- (3) Es ist festzustellen, ob, insbesondere bei Durchlaufträgern, die Anwendbarkeit des plastischen Fließgelenkverfahrens nicht dadurch erweitert werden kann, daß plastische Rotationen nur an den Stützen vorgesehen werden, und die Bemessungswerte M_u im Feld auf das Erreichen der Streckgrenze im Stahlträger begrenzt werden.

7 Literaturübersicht

- /1/ DIN ENV 1992 Teil 1-1 (Eurocode 2), Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Juni 1992
- /2/ ENV 1993 Part 1-1 (Eurocode 3), Design of steel structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings, Februar 1992
- /3/ prENV 1994 Part 1-1 (Eurocode 4), Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings
- /4/ König G., Roik K., Sedlacek G.; Mitarbeit bei der nationalen und internationalen Vereinheitlichung von technischen Baubestimmungen auf dem Gebiet der Verbundbauweise, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des IfBt.
- /5/ Roik K., Bergmann R., Haensel J., Hansville G.; Verbundkonstruktionen, Bemessung auf der Grundlage des Eurocode 4 Teil 1, Betonkalender 1993, Verlag Ernst & Sohn
- /6/ Kemp A. R., Trincherio P., Dekker N.; Ductility Effects of End Details in Composite Beams, Engineering Foundation Conference on "Composite Construction II", Potosi, Missouri, USA, Junr 14-19, 1992.
- /7/ Dabaon M, Tschemmernegg F., Hassan K., Abdel Lateef T.; Zur Tragfähigkeit von Verbundträgern bei teilweiser Verdübelung, Ernst & Sohn. Stahlbau 62 (1993), Heft 1 S.3-9.
- /8/ Roik K. und Ehlert W.; Beitrag zur Grenztragfähigkeit durchlaufender Verbundträger - Elastisch-plastische Berechnungen, Versuche, Bauingenieur 58 (1983) S.381-386.

- /9/ Ansourian P.; Beitrag zur plastischen Bemessung von Verbundträgern, Bauingenieur 59 (1984) S.267-272.

- /10/ Heinemann J.; Plastisches Beulen von Verbundträgern an Zwischenauflagern, (kurze techn. Berichte) Bauingenieur 62 (1987) S.417-418.

- /11/ Bode H., Fichter W.; Zur Fließgelenktheorie bei Stahlverbundträgern mit Schnittgrößenumlagerung vom Feld zur Stütze, Stahlbau 10/1986, S.299-315.

- /12/ Kuhlmann U., Clenin D.; Gleichungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Verbundquerschnitten, Stahlbau 57(1988) S.81-87.

- /13/ Allison R. W., Johnson R. P., May I. M.; Tension-field action in composite plate girders, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1982, 73 June, S.255-276.

- /14/ Ansourian P.; Experiments on continuous composite beams, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1981, 71 Dec, S.25-51.

- /15/ Johnson R. P. und Hope-Gill M. C.; Applicability of simple plastic theory to continuous composite beams, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2 1976, 61 Mar., S.127-143.

- /16/ Rotter J. M. und Ansourian P.; Cross-section behaviour and ductility in composite beams, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1979, 67 June, S.453-474.

- /17/ Hope-Gill M.C., Johnson R.P.; Tests on three three-span continuous composite beams, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1976, 61 June, S.367-381.

- /18/ Roik K. und Kuhlmann U.; Rechnerische Ermittlung der Rotationskapazität biegebeanspruchter I-Profile, Stahlbau 11/1987, S.321-327.

- /19/ Roik K. und Kuhlmann U.: Experimentelle Ermittlung der Rotationskapazität biegebeanspruchter I-Profile, Stahlbau 12/1987, S.353-358.
- /20/ Kemp A. R.; Quantifying limit-states of rotation capacity in flexural members. Proc. Instn. Civil Ingers, Part 2, sep. 1990, s.387-406
- /21/ Kemp A.R., de Clercq H.; Ductility in support regions of continuous composite beams. Proc. IABSE-ECCS symposium on steel in Buildings, Luxemburg, 1985, S.187-194.
- /22/ Johnson R. P.; Continuous Composite Beams for Buildings. Proc. IABSE-ECCS symposium on steel in Building, Luxemburg, 1985, S.195-202.
- /23/ Bode H., Fichter W.; Traglast für durchlaufende Verbundträger im Hochbau. Proc. IABSE-ECCS symposium on steel in Building, Luxemburg, 1985, S.203-210.
- /24/ Bode H., Schanzenbach J.; Das Tragverhalten von Verbundträgern bei Berücksichtigung der Dübelnachgiebigkeit, Der Stahlbau 59, 1989
- /25/ Maurer, R; Grundlagen zur Bemessung des Betongurtes von Stahlverbundträgern, Dissertation TH Darmstadt, 1992
- /26/ Luckey, A. F., Adams P. F.; Rotation Capacity of Beams under Moment Gradient, Journal of the Structural Division, Vol. 95, June 1969
- /27/ Climenhaga, J., Johnson, P.; Moment-Rotation Curves for Locally Buckling Beams, Journal of the Structural Division, Vol. 98, June 1972
- /28/ Climenhaga, J., Johnson, P.; Local Buckling in Continuous Composite Beams, The Structural Engineer, No.9, Vol. 50, September 1972

- /29/ Hamada, S., Longworth, J.; Buckling of Composite Beams in Negative Bending, Journal of the Structural Division, Vol. 100, November 1974

- /30/ Feldmann, M.; Rotationskapazität von I-Profilen statisch und dynamisch belasteter Träger, Dissertation RWTH-Aachen, 1994 (in Vorbereitung)

- /31/ He Saizhong; Beitrag zur plastischen Bemessung durchlaufender Verbundträger, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Mitteilung Nr. 91-1, 1991

- /32/ Lungershausen, H.; Zur Schubtragfähigkeit von Kopfbolzendübeln, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Mitteilung Nr. 88-7, 1988

- /33/ Cunze Oliveira Lanna, A.J.; Zur Gebrauchsfähigkeit von Verbundträgern mit nachgiebiger Verdübelung, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Mitteilung Nr. 92-1, 1992

- /34/ ENV 1992 - Eurocode 2, Design of Concrete Structures, Part 2: Concrete Bridges, Draft 7 - October 1993

- /35/ Jahn, M.; Zum Ansatz der Betonzugfestigkeit bei den Nachweisen zur Trag- und Gebrauchsfähigkeit von unbewehrten und bewehrten Betonbauteilen, DAfStb Heft 341, Berlin 1983

- /36/ Franz G. und Brenker H.; Verformungsversuche an Stahlbetonbalken mit hochfestem Bewehrungsstahl, 188, Berlin 1967

- /37/ Kreller H.; Zum nichtlinearen Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton- Stabtragwerken unter Last und Zwangseinwirkung, DAfStb Heft 409, Berlin 1990

- /38/ Daniels B. J.; Shear bold pull-out tests for cold-formed-steel composite slabs, ICOM - Construction Metallique, Report 194, Lausanne, 1988

- /39/ Couchman G., Lebet J-P.; Design rules for continuous composite beams using class 1 and 2 steel sections - applicability of EC4, ICOM - Construction Metallique, Report 290, Lausanne, 1993

- /40/ Ren P., Crisinel M.; Nonlinear analysis of composite members, ICOM - Construction Metallique, Report 280, Lausanne, 1992

- /41/ König G., Fehling E.; Zur Rißbreitenbeschränkung im Stahlbetonbau, Beton- und Stahlbetonbau 83 (1988), Heft 6 und 7, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

- /42/ König G., Fehling E.; Zur Rißbreitenbeschränkung bei voll oder beschränkt vorgespannten Betonbrücken, Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), Heft 7 und 8, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

- /43/ Spangemacher R.; Zum Rotationsnachweis von Stahlkonstruktionen, die nach dem Traglastverfahren berechnet werden, Dissertation Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH-Aachen, 1992

- /44/ Eurocode 3, Annex J; Joints in Buliding Frames, Draft 1994



**Untersuchungen zur Rotationsanforderung bei
Anwendung des Fließgelenkverfahrens
bei Verbundträgern**

im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

AZ Nr.: IV 1 - 5 - 539/88

Anlage A

Programm für die Berechnung der Momentenverteilungen und
Verformungen bei einfeldrigen und durchlaufenden Verbundträgern
unter Berücksichtigung geometrischer und werkstofflicher
Nichtlinearitäten und Ergebnisse von Parameterstudien

Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek und Dipl.-Ing. B. Hoffmeister

Aachen, den 07.03.1994

Anlage A: Inhaltsverzeichnis

1.	Beschreibung des verwendeten Programms	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Verwendete Werkstoffgesetze	1
1.2.1	Allgemeines	1
1.2.2	Werkstoffgesetze für Baustahl	2
1.2.3	Werkstoffgesetze für Beton	4
1.2.4	Werkstoffgesetze für Bewehrung	5
1.3	Modell zur Berücksichtigung von Schubverformungen in der Verbundfuge	8
1.4	Mögliche Berechnungsmethoden	9
2.	Überblick über die untersuchten Systeme	10
3.	Untersuchungen zum Rotationsverhalten von Einfeldträgern	12
3.1	"Lokale" Rotationsanforderungen r_F (Feld) und r_S (Stütze) für verschiedene Stahl- und Verbundquerschnitte	12
3.2	Untersuchungen des Rotationsverhaltens von Verbundträgern mit teilweiser Verdübelung	18
4.	Untersuchungen zu Rotationsanforderungen von Verbundquerschnitten über der Stütze eines Zweifeldträgers	21
4.1	Durchführung der Berechnungen und getroffenen Annahmen	21
4.2	Untersuchte Systeme und variierte Systemparameter	23
4.3	Auswertung der Ergebnisse für Zweifeldträger	26
4.4	Ermittelte Rotationsanforderungen von Zweifeldträgern für den Stützenquerschnitt	27
4.4.1	Allgemeines	27

4.4.2	Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit vom Momentenformbeiwert ψ und vom gewählten Stahlprofil	29
4.4.3	Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit von Querschnittsparametern und vom Momentenformbeiwert ψ	31
4.4.4	Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis in den Feldern und vom Momentenformbeiwert ψ	35
4.4.5	Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit vom Spannweitenverhältnis der Felder und vom Momentenformbeiwert ψ	36

1. Beschreibung des verwendeten Programms

1.1 Allgemeines

- (1) Das für die Durchführung der Untersuchungen verwendete Programm DYNACS ist eine Weiterentwicklung eines am Lehrstuhl für Stahlbau entwickelten räumlichen Stabwerkprogramms zur nichtlinearen Berechnung von Stahlkonstruktionen. Die zu untersuchenden Strukturen werden durch Stababschnitte abgebildet (Abb. 1), die Querschnitte der Stababschnitte werden mittels Lamellen, denen ein Werkstoffgesetz zugewiesen wird, definiert. Die Berechnung erfolgt nach der Fließzonentheorie, die resultierenden Schnittgrößen ergeben sich aus der Integration der Spannungen über den Querschnitt.
- (2) Die verwendete Verformungssteuerung erlaubt eine Berechnung bis zum Erreichen der Systemtraglast und darüber hinaus, bis zum rechnerischen Versagen des Systems.

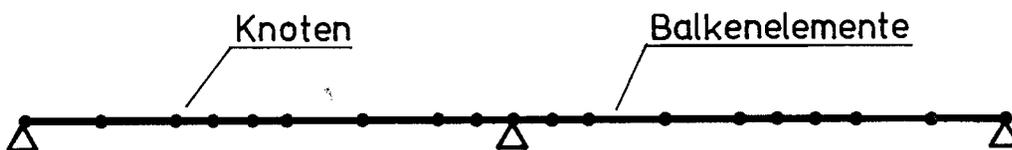


Abb. 1: Beispiel für die Diskretisierung eines Systems

1.2 Verwendete Werkstoffgesetze

1.2.1 Allgemeines

- (1) Die verwendeten Ansätze setzen die Gültigkeit der Bernoulli Hypothese voraus; d.h. es wird ein Ebenbleiben des Querschnitts angenommen. Der Einfluß der Querkraft wird vernachlässigt, der Verlauf der Spannung über eine Lamelle wird durch die Dehnungen

des Anfangs- und Endpunkts definiert, Hierbei wird angenommen, daß die Dehnungen quer zur Lamellenachse (d.h. über die Lamellenbreite) konstant sind (siehe Abb. 2).

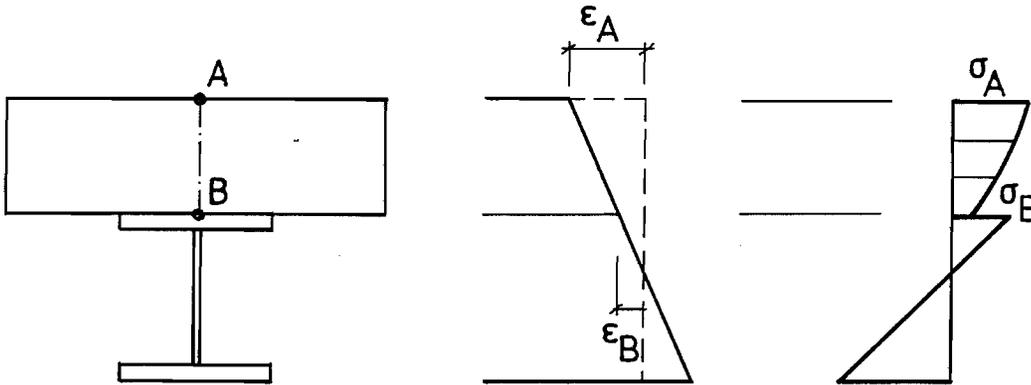


Abb. 2: Diskretisierung eines Querschnitts

1.2.2 Werkstoffgesetze für Baustahl

(1) Für den Baustahl wird ein Werkstoffgesetz verwendet, das sich i.A. aus drei Bereichen zusammensetzt und sowohl für Zug- als auch für Druckspannungen gilt (Abb. 3):

a) linear elastischer Bereich, hier gilt

$$0 < \varepsilon < \varepsilon_y \quad : \quad \sigma_a = E_a \cdot \varepsilon$$

b) Fließplateau; hier gilt

$$\varepsilon_y < \varepsilon < \varepsilon_v \quad : \quad \sigma_a = f_{y,a}$$

c) Verfestigungsbereich, hier gilt

$$\varepsilon_v < \varepsilon \quad : \quad \sigma_a = f_{y,a} + E_v (\varepsilon - \varepsilon_v)^2$$

- (2) Dieser Ansatz erlaubt eine bessere Annäherung des Verfestigungsverhaltens an Versuchsergebnisse, durch eine geeignete Wahl der Parameter lassen sich jedoch die sonst üblichen bilinearen und trilinearen Näherungen erreichen (s. Abb. 3).

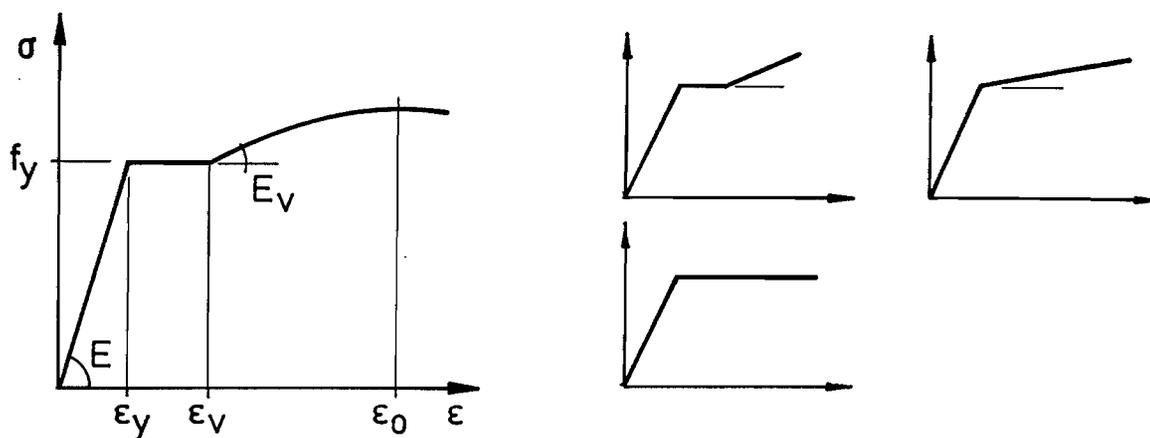


Abb. 3: Spannungs-Dehnungsansatz für Baustahl und mögliche Näherungen

hierbei sind:

- ϵ, σ_a : Dehnung und zugehörige Spannung
- ϵ_y : Dehnung beim Erreichen des Fließgrenze
- ϵ_v : Dehnung beim Erreichen des Verfestigungsbereichs
- ϵ_0 : Dehnung beim Erreichen des Scheitelpunktes der Verfestigungsparabel
- $f_{y,a}$: Fließspannung
- E_a : Elastizitätsmodul des Stahls
- E_v : Verfestigungsmodul

$$E_{v2} = - \frac{E_v}{2 \cdot (\epsilon_0 - \epsilon_v)}$$

1.2.3 Werkstoffgesetze für Beton

- (1) Die verwendeten Spannungs-Dehnungsansätze für Beton sind in Anlehnung an die Vorschläge des EC 2 in das Programm implementiert worden.
- (2) Allgemein gilt für den Beton im Druckbereich (Abb. 4) für $0 \geq \varepsilon \geq \varepsilon_u$

$$\sigma_c = f_c \cdot \frac{k - \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta}$$

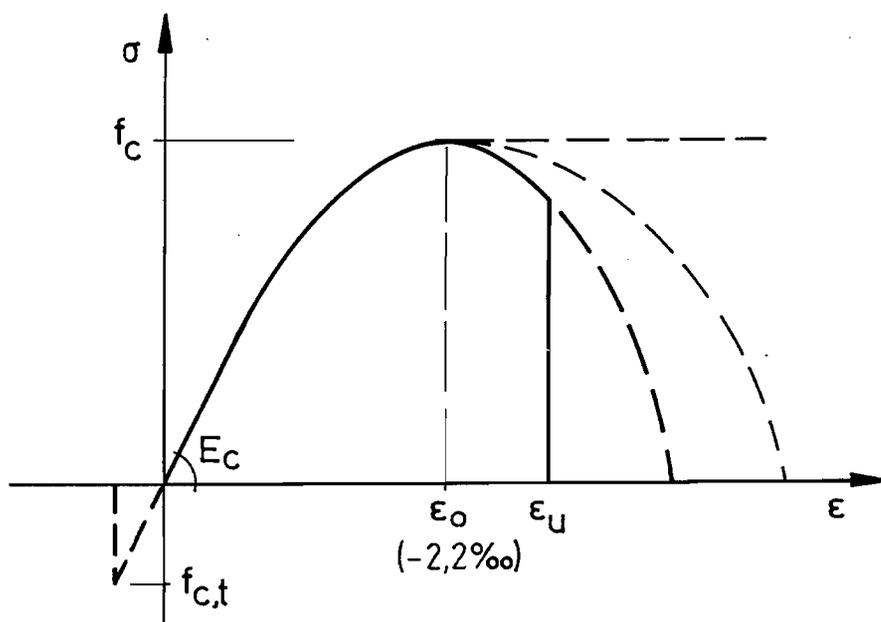


Abb. 4: Spannungs-Dehnungsbeziehung für Beton und mögliche Modifizierungen

Hierbei sind:

- ε, σ_c : Dehnung und zugehörige Spannung
- f_c : maßgebender Wert der Betondruckfestigkeit
- ε_{c1} : Betonstauchung beim Erreichen von f_c
- ε_u : Bruchstauchung des Betons

- (3) Durch eine geeignete Wahl der Bruchstauchung ε_u läßt sich das Verhalten des Betons nach Überschreiten von ε_{c1} (d.h. der abfallende Bereich) noch modifizieren, um z.B. die Einflüsse aus Einschnürung besser zu berücksichtigen.

- (4) Um das Verhalten des Betons im Zugbereich zu beschreiben, wird folgende Unterscheidung gemacht :
- liegt der betrachtete Betonteil des Querschnitts in einem Bereich, wo er zum Effekt des Tension Stiffening beiträgt, so wird die Zugfestigkeit f_{ct} dieses Querschnittsteils der Bewehrung zugeordnet. Der Beton für sich besitzt dann keine Zugfestigkeit.
 - trägt am betrachteten Querschnittsteil der Beton nicht zum Tension Stiffening bei, so kann dem Beton eine Zugfestigkeit zugeordnet werden die bei der Integration der Spannungen zu Schnittgrößen mitberücksichtigt wird.

Das Prinzip ist in der nachfolgenden Abb. 5 am Beispiel eines Stahlbetonbalkens dargestellt.

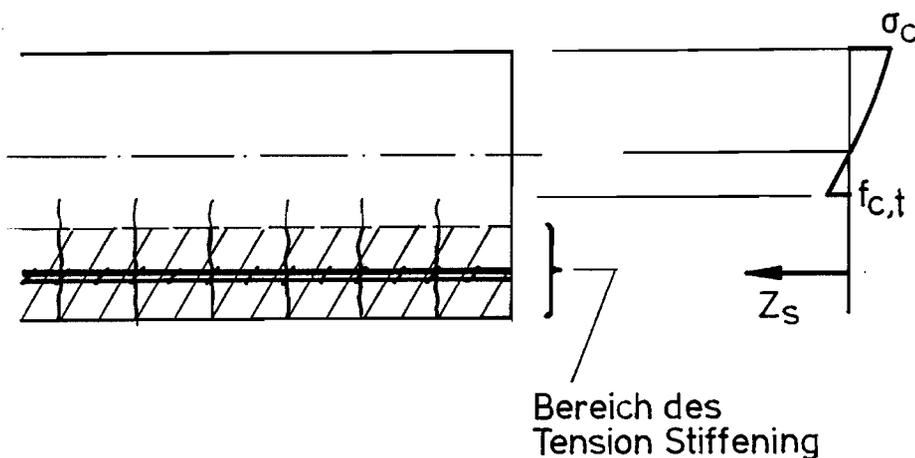


Abb. 5: Zuordnung der Betonzugfestigkeit f_{ct} einzelnen Querschnittsteilen

1.2.4 Werkstoffgesetze für Bewehrung

- Das Spannungs-Dehnungsgesetz wird entsprechend dem Vorschlag in EC 2, Part 2 "Concrete Bridges" verwendet. Hier kann zunächst zwischen a) Druckbewehrung und b) Zugbewehrung unterschieden werden.
 - Bewehrung im Druckbereich
- Hier wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Stauchung ϵ und der daraus resultierenden Spannung σ_s angenommen:

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon$$

Nach Erreichen der Fließgrenze f_s (praktisch nicht relevant) wird eine konstante Spannung σ_s angenommen:

$$\sigma_s = f_s$$

Die Bewehrungsspannung wird als zusätzlicher Anteil zur Betondruckspannung behandelt.

b) Bewehrung im Zugbereich

(3) Der Spannungs-Dehnungsansatz für die Bewehrung im Zugbereich des Querschnitts berücksichtigt vier charakteristische Dehnungszustände der Bewehrung (s. Abb. 6)

- 1) ungerissener Beton
- 2) sukzessive Rißbildung
- 3) abgeschlossenes Rißbild
- 4) Erreichen der Fließspannung und Einsetzen der Verfestigung

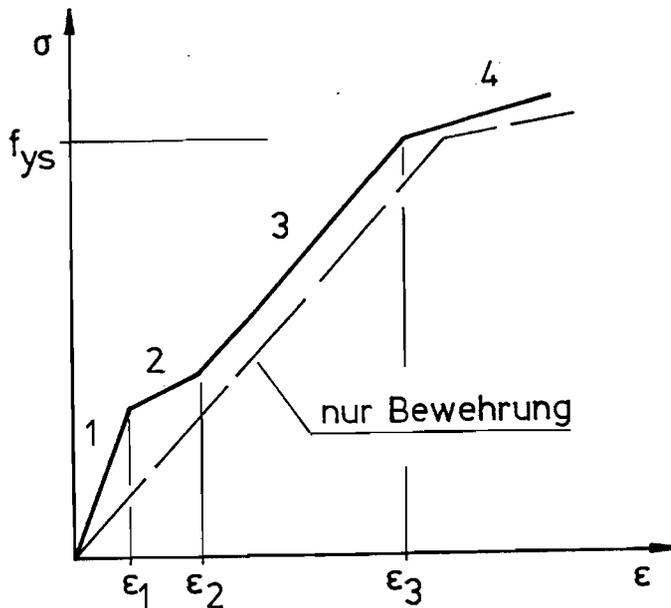


Abb. 6: Spannungs-Dehnungsbeziehung für Bewehrungsstahl einschließlich Tension-Stiffening

Die Spannungs-Dehnungsbeziehung für die einzelnen Dehnungsbereiche lauten wie folgt (vgl. Abb. 6):

- 1) ungerissener Beton: $0 < \varepsilon_m < \varepsilon_1$

$$\sigma_s = \frac{E_c \cdot \varepsilon_m}{\rho} + E_s \cdot \varepsilon_m$$

mit:

ε_m, σ_s - mittlere Dehnung des Bewehrungsstahls und zugehörige Spannung

E_s, E_c - Elastizitätsmodul der Bewehrung und des Betons

$\rho = \frac{A_s}{A_c}$ - wirksamer Bewehrungsgrad; A_c ist die Betonfläche, die zum Tension Stiffening beiträgt

- 2) Sukzessive Ribfbildung: $\varepsilon_1 < \varepsilon_m < \varepsilon_2$

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + 0,3 \cdot \sigma_{s1} \cdot \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

- 3) Abgeschlossenes Ribbild des Betons: $\varepsilon_2 < \varepsilon < \varepsilon_3$

$$\sigma_s = 0,4 \cdot \frac{f_{c,t}}{\delta} + E_s \cdot \varepsilon_m$$

- 4) Erreichen der Streckgrenze und Einsetzen der Verfestigung: $\varepsilon_3 < \varepsilon_m < \varepsilon_u$

$$\sigma_s = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_3}{\beta \cdot \left(1 - \frac{f_{c,t}}{f_{y,s}}\right) \cdot E_v + f_{y,s}}$$

mit: $f_{c,t}$ - Zugfestigkeit des Betons

$f_{y,s}$ - Fließgrenze der Bewehrung

E_v	-	Verfestigungsmodul des Bewehrungsstahls
β	=	0,8
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$		siehe Abb. 6

1.3 Modell zur Berücksichtigung von Schubverformungen in der Verbundfuge

- (1) Für die Untersuchung von Systemen mit teilweiser Verdübelung ist es notwendig, das Verhalten in der Verbundfuge zu beachten. Hierzu wurde ein Modell entwickelt, in dem das experimentell ermittelte Verhalten von Kopfbolzendübeln näherungsweise simuliert werden kann (Abb 7). Die Grundlage hierfür bilden finite Elemente, deren Verhalten durch eine Normalkraft-Verformungskennlinie bestimmt wird. Diese zwischen den Schwereachsen der Betonplatte und des Stahlträgers diagonal angeordneten Feder-elemente können so kalibriert werden, daß das Verformungsverhalten der Dübel näherungsweise erfaßt wird. Die senkrecht angeordneten starren Elemente sorgen für eine Kraftübertragung senkrecht zu den Schwereachsen.

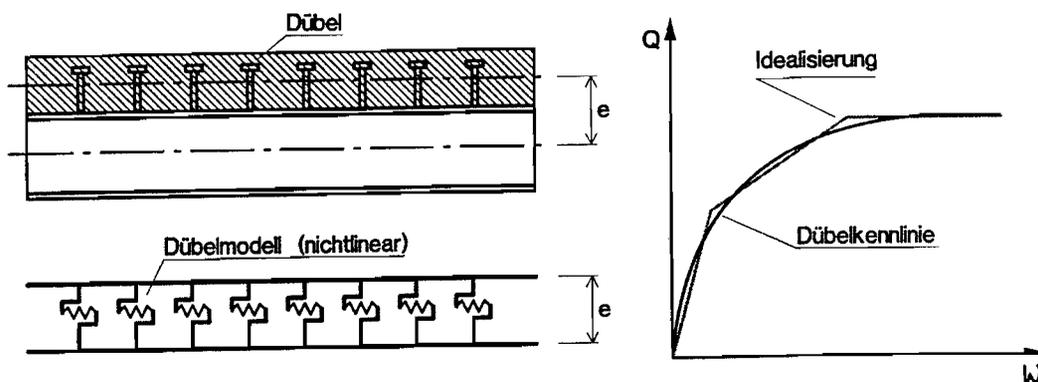


Abb. 7: Modellierung der Verbundfuge mit nichtlinearen Schubfedern

1.4 Mögliche Berechnungsmethoden

Fließzonentheorie

- (1) Die im verwendeten Programm vorgesehenen Berechnungsmethoden ermöglichen sowohl Berechnungen die sich an Versuchsergebnissen orientieren als auch Berechnungen, bei denen vereinfachte Normansätze für die Werkstoffeigenschaften verwendet werden.
- (2)
 - Im ersten Fall wird mit aus den Versuchen gewonnenen Werkstoffgesetzen gearbeitet, die bis zum Erreichen der Systemtraglast und darüber hinaus beibehalten werden. Insbesondere gilt dies für die Verfestigung des Stahls, die ein Erreichen und Überschreiten des Bemessungsmoments M_{pl} erlauben. Die rechnerische Gesamttraglast, die unter Zugrundelegung von M_{pl} ermittelt wird, kann demnach i.A. erreicht und überschritten werden. Die rechnerische Gesamttraglast gilt als erreicht, wenn die angesetzte Belastung das unter Ansatz von M_{pl} maximale Lastniveau erreicht hat. Das Erreichen der rechnerischen Traglast bei dieser Berechnung ist aber nicht gleichbedeutend mit der Ausbildung einer kinematischen Fließgelenkkette, weil aufgrund der Verfestigungseffekte keine vollständige Momentenumlagerung stattgefunden hat (vgl. Abb. 8).

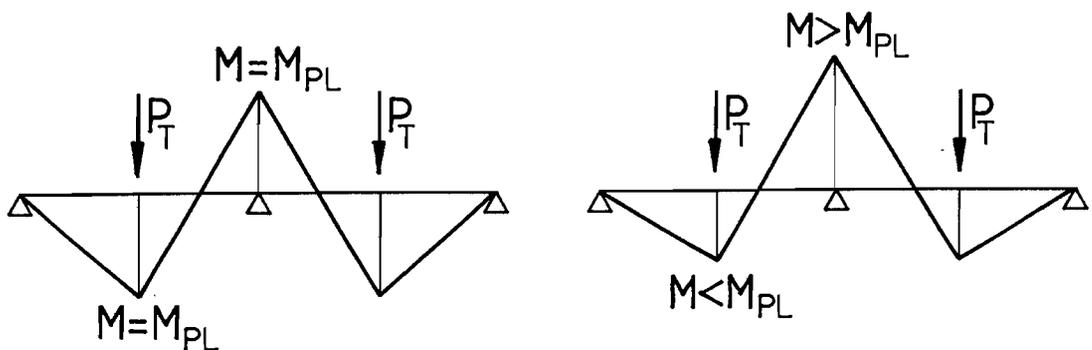


Abb. 8: Verschiedene Momentenverläufe bei gleicher Belastung

- (3)
 - Im zweiten Fall wird zwar auch mit Werkstoffgesetzen gearbeitet, die wirklichkeitsnah sind, das maximal aufnehmbare Moment wird jedoch auf den Bemessungswert M_{pl} begrenzt. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, daß das nichtlineare Rotationsverhalten der Querschnitte berücksichtigt wird und

daß der rechnerische Traglastzustand die Bildung einer kinematischen Kette bedeutet.

- (4) Für die nachfolgend durchgeführten Betrachtungen der Rotationsanforderungen bedeutet der erste Fall, daß die ermittelten Rotationsanforderungen in etwa den Mittelwerten entsprechen. Im zweiten Fall erhält man Ergebnisse, die auf der sicheren Seite liegen, weil sowohl die Einflüsse aus der lokalen Rotationsanforderung (siehe Kap. 3) als auch die maximalen benötigten Anforderungen aus Schnittgrößenumlagerung berücksichtigt werden.

Fließgelenktheorie

- (5) Zusätzlich zu den o.e. Berechnungsmethoden können die Berechnungen nach der Fließgelenktheorie durchgeführt werden. Hier kann wahlweise die Rißbildung des Betons berücksichtigt werden oder mit ungerissenem Beton nach Zustand I gerechnet werden. Diese Berechnungsmethoden können für die Überprüfung der üblichen Ingenieurmethoden verwendet werden.

2. Überblick über die untersuchten Systeme

- (1) Die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen beschränken sich im ersten Schritt auf die Klärung der Frage des Rotationsverhaltens von Einzelträgern ("lokale" Rotation r) im Feld- und Stützenbereich sowie bei unterschiedlichem Verdübelungsgrad. Bei diesen Untersuchungen, unter Zugrundelegung verschiedener Querschnittsausbildungen, variiert der Momentenformbeiwert ψ (vgl. Abb. 9).
- (2) Um einen Vergleich der Werte für die Rotationsanforderungen r_F (im Feld) und r_S (Stütze) mit den Rotationsanforderungen des Stahlbaus zu erhalten, wurden die Untersuchungen auf reine Stahlträger ausgedehnt, bei denen die Berechnungen für Biegebelastungen sowohl um die starke Achse als auch um die schwache Achse angesetzt wurde.

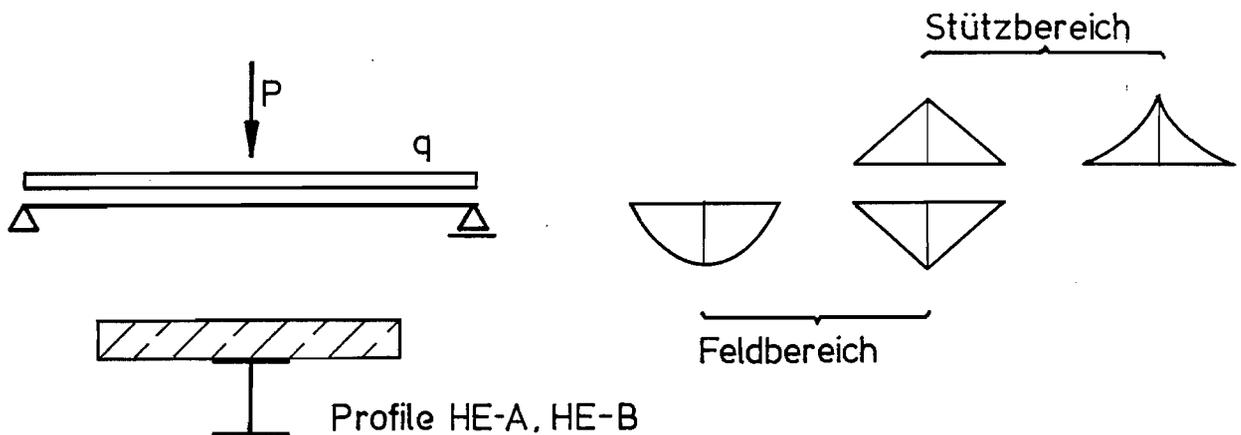


Abb. 9: Überblick über die untersuchten Einfeldträger

- (3) Die Untersuchungen an Durchlaufträgern (zweiter Schritt) hatten vor allem zum Ziel, die Feststellung der Rotationsanforderungen an Verbundquerschnitte im Stützenbereich, die sich aus der Momentenumlagerung und aus dem "lokalen" Rotationsverhalten ergeben. Die Untersuchungen wurden an Zweifeldträgern durchgeführt, bei denen neben der Querschnittsausbildung, die Belastungsart (Streckenlast, Einzellasten), die Belastungsverteilung und die Spannweitenverhältnisse variiert wurden (Abb. 10).

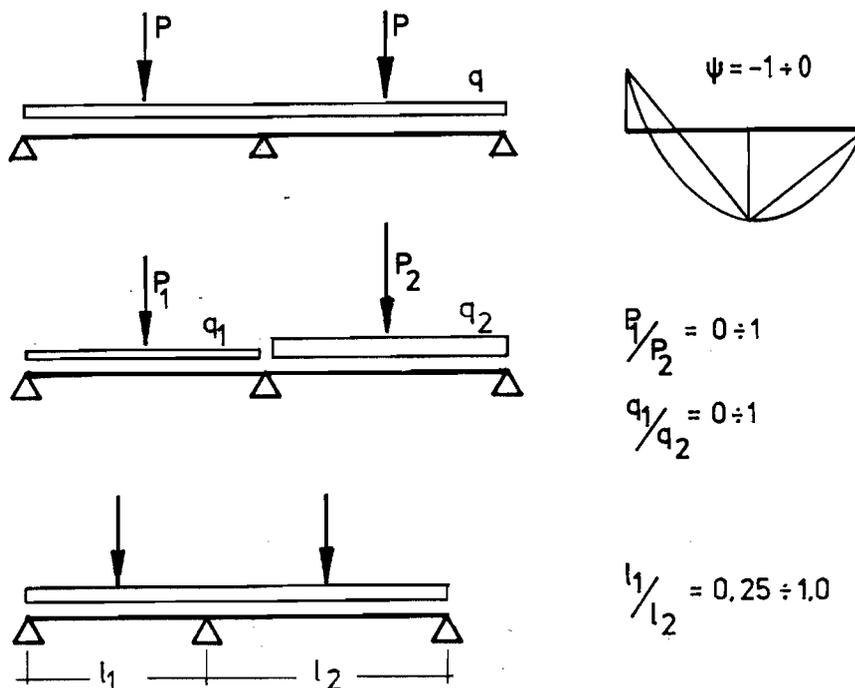


Abb. 10: Überblick über untersuchte Zweifeldträger

3. Untersuchungen zum Rotationsverhalten von Einfeldträgern

3.1 "Lokale" Rotationsanforderungen r_F (Feld) und r_S (Stütze) für verschiedene Stahl- und Verbundquerschnitte

- (1) Beim Fließgelenkverfahren wird das gesamte plastische Rotationsverhalten des untersuchten Bauteils näherungsweise als in einem Punkt konzentriert angenommen. Das Momenten-Rotationsverhalten eines Fließgelenkes wird dann, z. B. im Falle eines Stahlträgers, durch eine bilineare Kurve ausgedrückt (s. Bild 11).

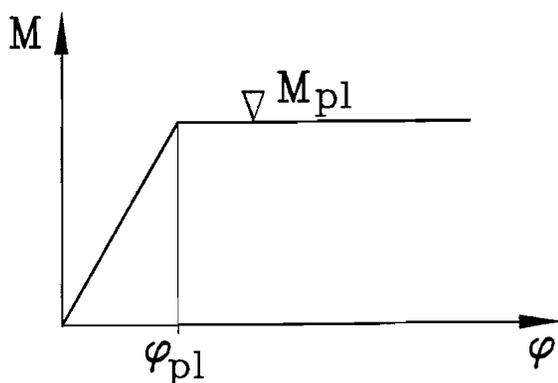


Abb. 11: Vereinfachte Momenten-Rotationsbeziehung für ein Fließgelenk

Eine genauere Betrachtung der Rotationsanforderung unter Verwendung der Fließzonen-theorie zeigt, daß eine lokale Rotationsanforderung, hier mit r bezeichnet, zur Ausbildung des vollen plastischen Moments erforderlich ist (s. Bild 12).

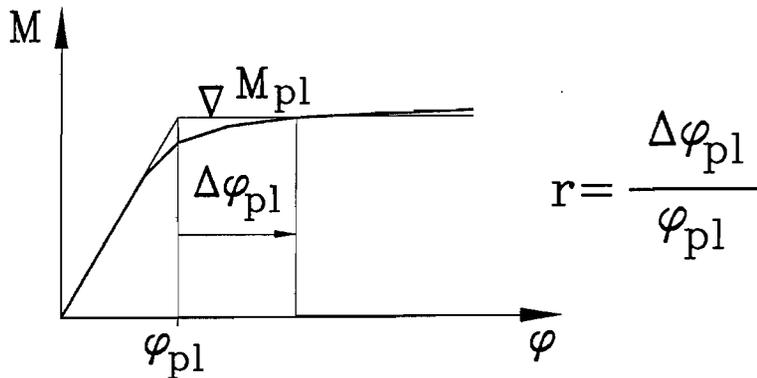


Abb. 12: Lokale Rotationsanforderung r zur Ausbildung des plastischen Moments

- (2) In diesem Abschnitt wird die Größenordnung der lokalen Rotationsanforderung r für verschiedene Stahl- und Verbundquerschnitte untersucht. Als Verfestigungsmodul wird für die Stahlprofile 1% des E-Moduls beginnend beim Erreichen der Fließgrenze angesetzt. Bei den untersuchten Verbundquerschnitten wird eine Betonplatte mit 12 cm Dicke verwendet.

Die Untersuchungen erfolgen an einem Einfeldträger der Länge 4m, wobei die Belastung durch verschiedene Werte von ψ beschrieben wird (s.a. Kap. 2, Abb. 6).

- (3) Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

Hierbei ist zu beachten, daß die Werte der lokalen Rotationsanforderung r im Gegensatz zu den ebenfalls dargestellten plastischen Rotationen $\Delta\varphi$ unabhängig von der Spannweite sind.

- Ergebnisse für Stahlträger, schwache Achse

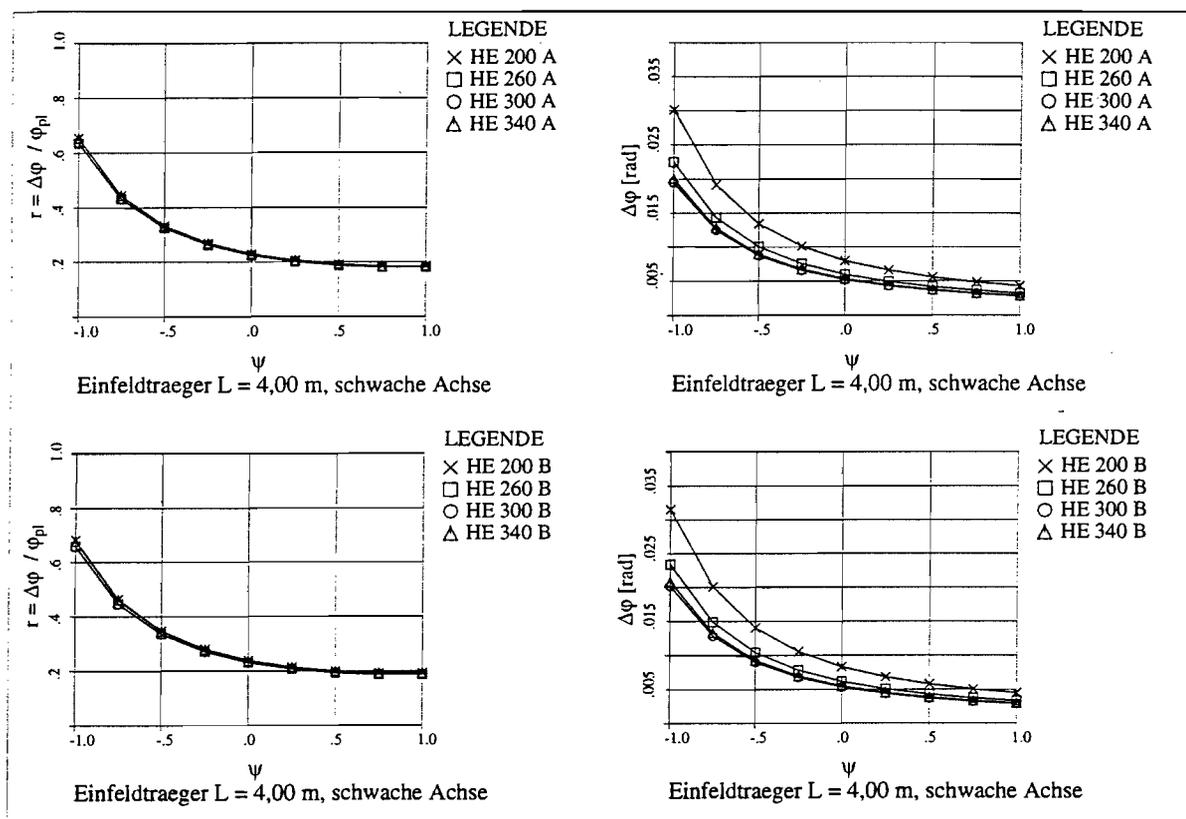


Abb. 13: Lokale Rotationsanforderungen für Stahlprofile, schwache Achse

- (4) Alle Profile weisen hinsichtlich der lokalen Rotationsanforderung nahezu identische Verhalten auf. Die lokale Rotationsanforderung ist weitgehend unabhängig von dem gewählten Profil; sie variiert aber sehr stark in Abhängigkeit von der vorhandenen Momentenbelastung. Die Werte liegen im Bereich $0.2 < r < 0.65$ und sind damit, im Vergleich zu den Ergebnissen für die starke Achse (s.u.), relativ hoch.

- Ergebnisse für Stahlträger, starke Achse

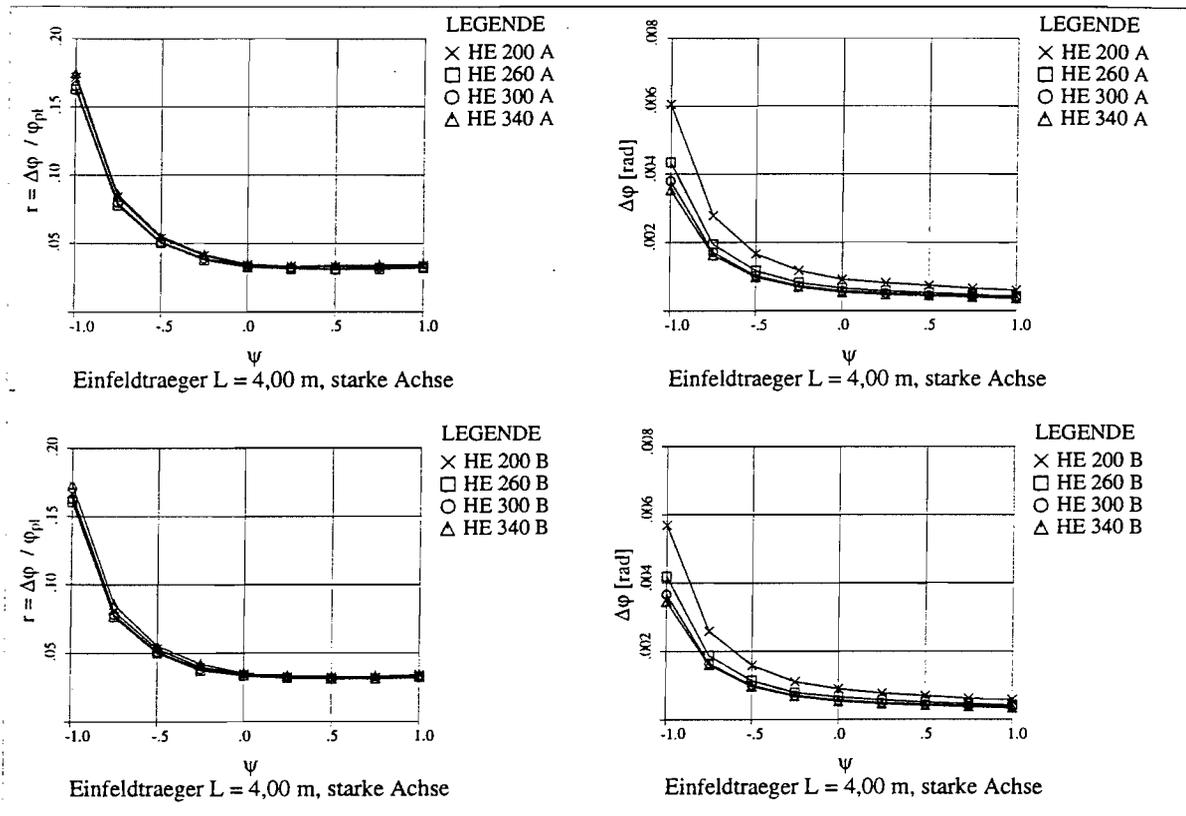


Abb. 14: Lokale Rotationsanforderungen für Stahlprofile, starke Achse

- (5) Die um die starke Achse belasteten Profile zeigen, genau wie bei der schwachen Achse, hinsichtlich der lokalen Rotationsanforderung nahezu identisches Verhalten. Die lokale Rotationsanforderung ist auch hier weitgehend unabhängig von dem gewählten Profil; sie variiert aber stark in Abhängigkeit von der vorhandenen Momentenbelastung. Die Werte liegen im Bereich $0.04 < r < 0.17$ und sind damit vernachlässigbar gering.

- Verbundträger

(6) Die Untersuchungen für Verbundträger wurden getrennt für positive Momente und für negative Momentenbelastungen durchgeführt.

- Der Fall der positiven Momentenbelastung entspricht der Belastung eines Trägers im Feld, die aus einer Streckenlast, einer Einzellast oder der Kombination aus beiden herrühren kann. Entsprechend diesen Belastungsmöglichkeiten bewegen sich die Beiwerte ψ zwischen -1 und 0. Der Betongurt liegt bei diesen Belastungen im Druckbereich.
- Die negative Momentenbelastung entspricht der Belastung eines Verbundträgers im Stützenbereich, die aus der Auflagerkraft und den Feldbelastungen resultiert. Diese Belastung liefert Momentenformbeiwerte ψ , die sich zwischen 0 und 1 bewegen. Hierbei liegt die Betonplatte im Zugbereich

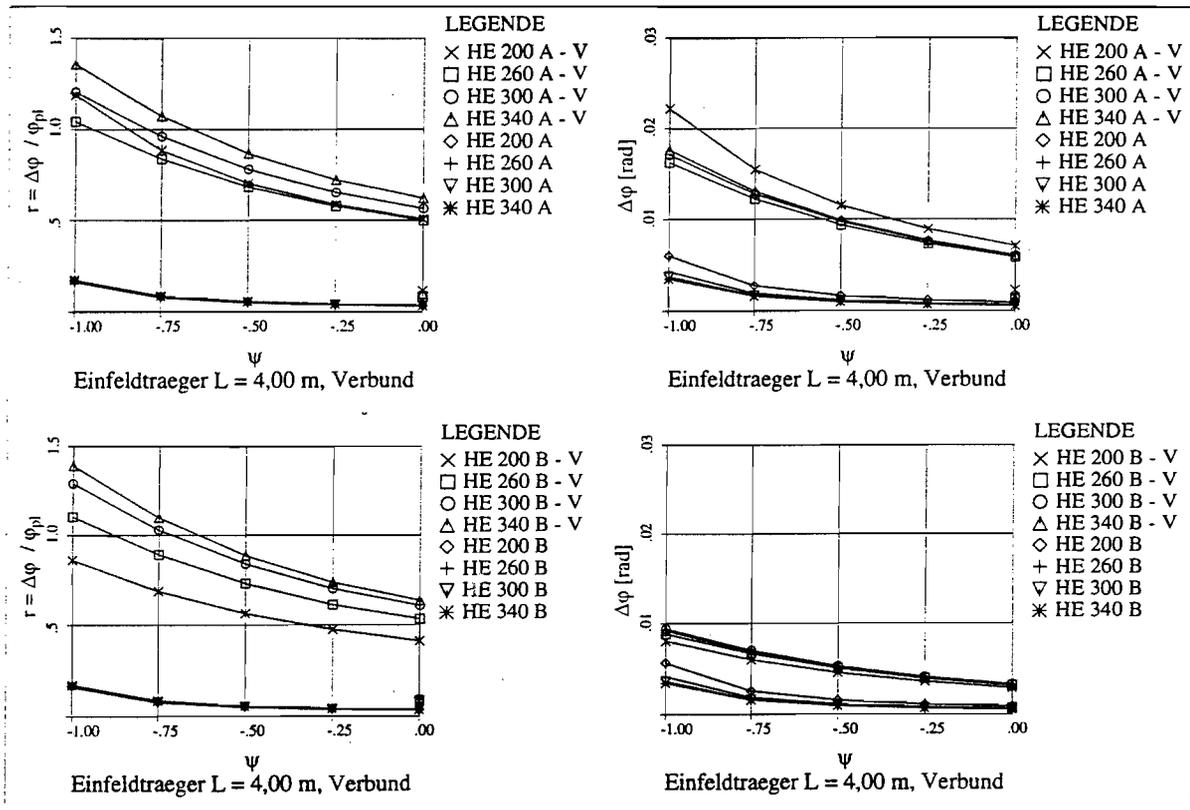


Abb. 15: Lokale Rotationsanforderung für Verbundträger für positive Momente ($\psi < 0$)

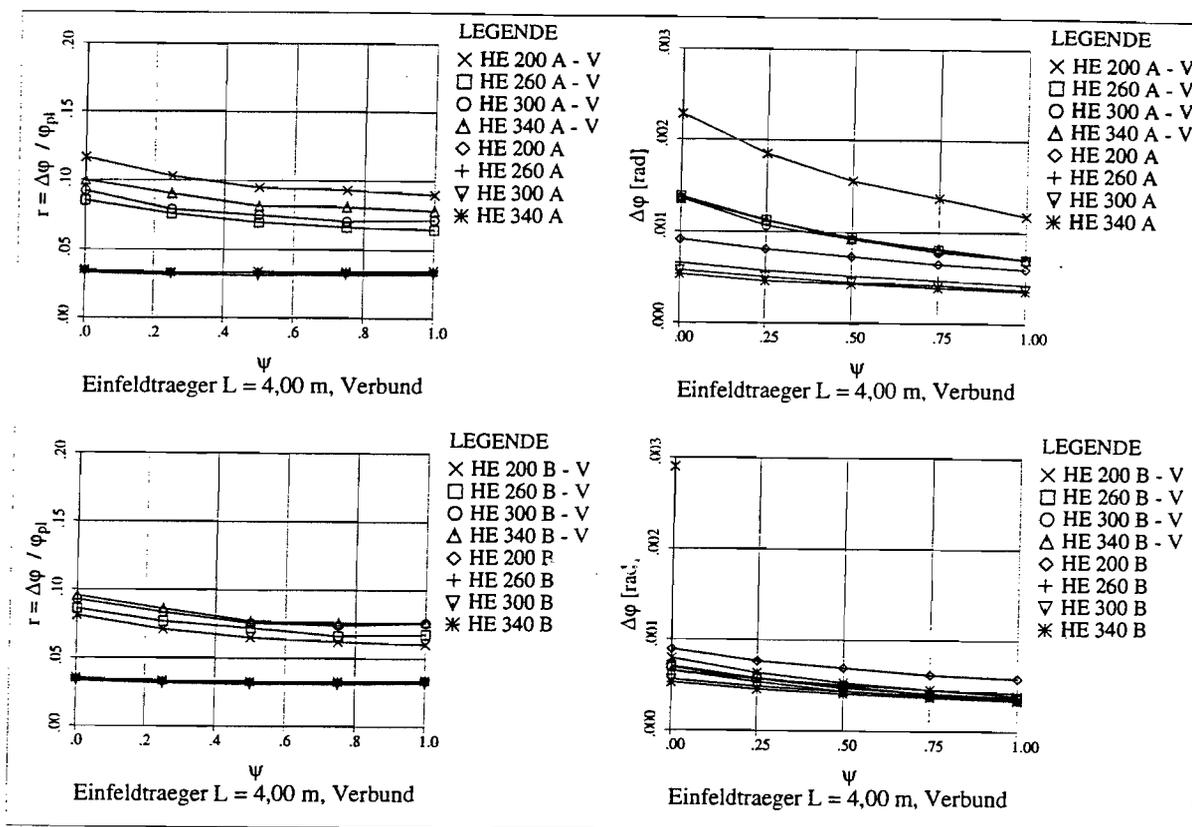


Abb. 16: Lokale Rotationsanforderungen für Verbundträger für negative Momente ($\psi > 0$)

- (7) Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurden zusätzlich zu den Ergebnissen für die Verbundträger die bereits vorher aufgeführten Ergebnisse für die Stahlprofile hinzugefügt. Die Verbundquerschnitte weisen insgesamt eine höhere Streuung hinsichtlich der lokalen Rotationsanforderung auf als reine Stahlprofile. Das hängt mit den verschiedenen Höhen der Betondruckzonen zusammen, die, bei konstant gehaltener Betonplattendicke, entsprechend den variierten Profilen verschiedene Werte annimmt. Ähnlich wie bei den Stahlprofilen zeigt sich eine starke Abhängigkeit der lokalen Rotationsanforderungen von der Momentenform; dieses gilt insbesondere für die durch ein Feldmoment belastete Träger ($-1 < \psi < 0$) während die Unterschiede bei den durch ein Stützmoment belasteten Trägern ($0 < \psi < 1$) wesentlich geringer ausfallen.

Im positiven Momentenbereich ($\psi < 0$, Betonplatte im Druckbereich) sind die Werte für die lokale Rotationsanforderung mit $0.5 < r_F < 1.4$ relativ hoch. Im Bereich negativer Momente (Betonplatte im Zugbereich) sind sie mit $0.12 < r_S < 0.09$ vernachlässigbar.

- (8) Überträgt man die Ergebnisse auf statisch unbestimmte Durchlaufträger, so läßt sich festhalten, daß die Fließgelenktheorie bei Stahlträgern, die um ihre starke Achse belastet werden, ohne Bedenken mit der Annahme $r = 0$ angewendet werden kann. Bei Stahlträgern, die um ihre schwache Achse belastet werden, muß beachtet werden, daß bis zur Ausbildung einer kinematischen Kette noch zusätzliche Rotationsanteile aus der Bildung der Fließgelenke bei der Bestimmung der Rotationsanforderung berücksichtigt werden müssen.
- (9) Bei durchlaufenden Verbundträgern muß zunächst unterschieden werden, ob das erste Fließgelenk im Bereich negativer oder positiver Momente liegt. Für den Fall, daß das 1. Fließgelenk über der Stütze auftritt (i. A. üblich), muß beachtet werden, daß zusätzlich zu den Rotationsanforderungen aus der Momentenumlagerung nach der reinen Fließgelenktheorie, die Anteile r_F hinzugefügt werden müssen, die zum Erreichen des plastischen Moments im Feld aus der M - φ -Charakteristik des Trägers im positiven Momentenbereich benötigt werden.

Hierbei wird der dafür verwendete Wert r_F auf die elastische Verdrehung eines Trägers im positiven Momentenbereich bezogen.

Ist bei einem Durchlaufträger zu erwarten, daß das 1. Fließgelenk im Feldbereich liegt, dann muß zu den Rotationsanforderungen, die sich aus dem Fließgelenkverfahren ergeben, noch der Anteil r_F aus der M - φ -Beziehung des Trägers im positiven Momentenbereich hinzugefügt werden.

- (10) In beiden Fällen kann davon ausgegangen werden, daß die "lokale" Rotationsanforderung r_S aus der Fließgelenkbildung im negativen Momentenbereich vernachlässigt werden kann, wenn die Fließgelenkberechnung an einem System durchgeführt wird, bei dem im Bereich negativer Momente vom Zustand II des Betons ausgegangen wird.

3.2 Untersuchungen des Rotationsverhaltens von Verbundträgern mit teilweiser Verdübelung

- (1) In diesem Abschnitt wird der Einfluß der teilweisen Verdübelung in der Verbundfuge zwischen Stahlträger und Betonplatte auf die Größe der lokalen Rotationsanforderung

r untersucht. Hierzu wurde der in Bild 7 dargestellte Querschnitt verwendet. Das statische System ist ein Einfeldträger der Länge 4 m.

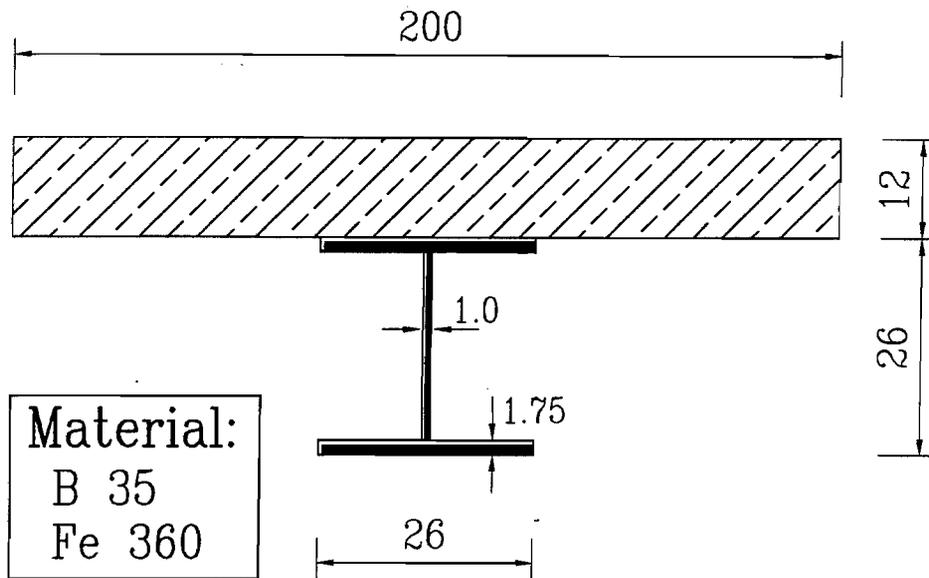


Abb. 17: Verbundquerschnitt für Untersuchungen mit teilweiser Verdübelung

- (2) Die plastischen Bemessungsmomente, die sich abhängig vom Verdübelungsgrad η und damit von der maximal aufnehmbaren Normalkraft in der Verbundfuge ergeben, wurden nach /3/ bestimmt.

Die Untersuchungen erfolgten nur für positive Momente ($\psi < 0$), da der Eurocode 4 keine teilweise Verdübelung im negativen Momentenbereich zulässt.

Bei den Berechnungen nach der Fließzonentheorie wurde die in Bild 8 dargestellte Last-Verformungskurve für KD $\phi 19$ zur Bestimmung des Dübelverhaltens herangezogen.

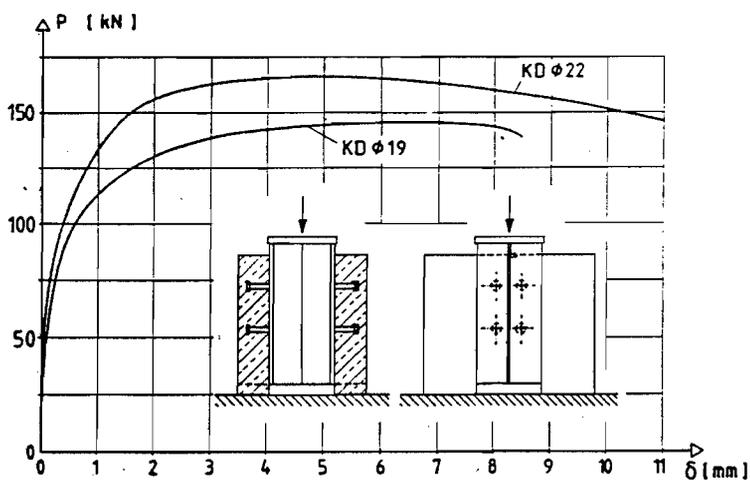


Abb. 18: Verwendete nichtlineare Dübelcharakteristik nach /32/

- (3) Die Ergebnisse sind in Form der lokalen Rotationsanforderung r und des zugehörigen Rotationswinkel $\Delta\varphi_{pl}$ in Bild 19 dargestellt.

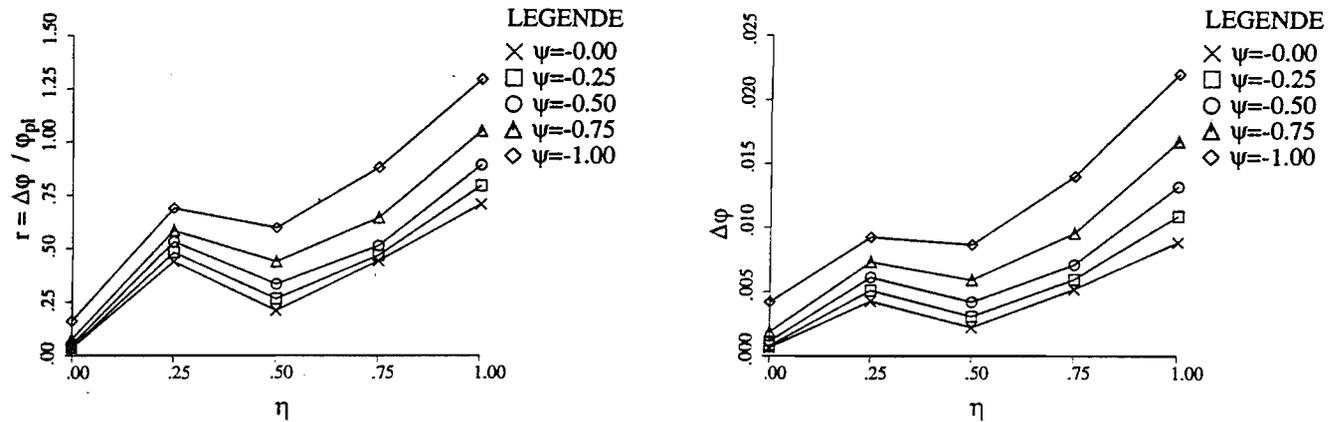


Abb. 19: Lokale Rotationsanforderungen r_F für Verbundträger mit teilweiser Verdübelung

- (4) Das rechnerisch ermittelte Rotationsverhalten der teilweise verdübelten Verbundträger konnte nicht direkt mit Ergebnissen experimenteller Versuche verglichen werden. Die bisher durchgeführten Untersuchungen hatten vorrangig zum Ziel die Ermittlung der Dübelkennlinie und des Einflusses der Dübel auf die Tragfähigkeit, ohne daß Rotationsbetrachtungen bei diesen Trägern vorgenommen wurden.

4. Untersuchungen zu Rotationsanforderungen von Verbundquerschnitten über der Stütze eines Zweifeldträgers

4.1 Durchführung der Berechnungen und getroffenen Annahmen

- (1) Die Untersuchungen zur Ermittlung der Rotationsanforderungen an die Verbundquerschnitte im Stützenbereich wurden an zweifeldrigen Durchlaufträgern durchgeführt.
- (2) Die Berechnungen erfolgten verformungsgesteuert, wobei das maximal aufnehmbare Moment der Querschnitte auf das rechnerische M_{pl} begrenzt wurde. Der Bezugswert M_{pl} wurde unter Verwendung der vorgegebenen Fließspannungen $f_{y,a}$ und $f_{y,s}$ für Baustahl und Bewehrungsstahl und der maximalen Betondruckspannung f_{ck} für Beton berechnet. Eine Abminderung der Werkstofffestigkeiten mit den Sicherheitsbeiwerten γ_M wurde nicht vorgenommen.
- (3) Es gelten außerdem die im nachfolgenden aufgeführten Annahmen für das Werkstoffverhalten
 - a) Beton
- (4) Für den Beton werden die in EC 2 vorgeschlagenen σ - ϵ -Beziehungen angesetzt (Abb. 20). Eine Begrenzung der Betonstauchung, die maßgebend für die Ermittlung von Rotationskapazitäten im Feldbereich ist, wurde bei der Ermittlung der Rotationsanforderungen nicht angesetzt. Die Maximalspannung $f_{c,k}$ wird bei allen Betonklassen bei einer Dehnung $\epsilon_1 = -2,2 \text{ ‰}$ erreicht. Die Zugfestigkeit des Betons wird für den gesamten Querschnitt durch das Tension Stiffening Verhalten der Bewehrung erfaßt.

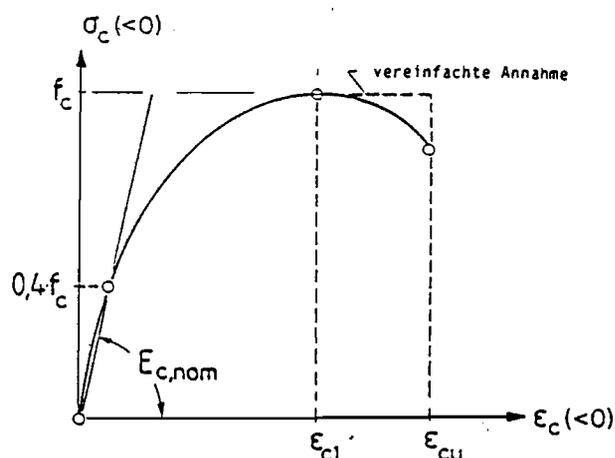


Abb. 20: Für die Rotationsermittlung verwendetes Materialgesetz für Beton (EC 2)

b) Bewehrung

- (5) Der Bewehrungsgrad wurde konstant über die gesamte Trägerlänge angenommen. Eine hierzu durchgeführte Untersuchung zeigte, daß der Einfluß der Bewehrung auf das Rotationsverhalten und das maximale Moment M_{Pl} im Feldbereich vernachlässigt werden kann, so daß eine eventuelle Abminderung der Bewehrung im Feldbereich keinen relevanten Einfluß auf die Berechnungsergebnisse hätte.

Die Bewehrungslage wurde für alle Querschnitte zentrisch in der Betonplatte angenommen; es wurde weiter angenommen, daß die gesamte Betonplatte zum Tension Stiffening beiträgt (siehe Abb. 21).

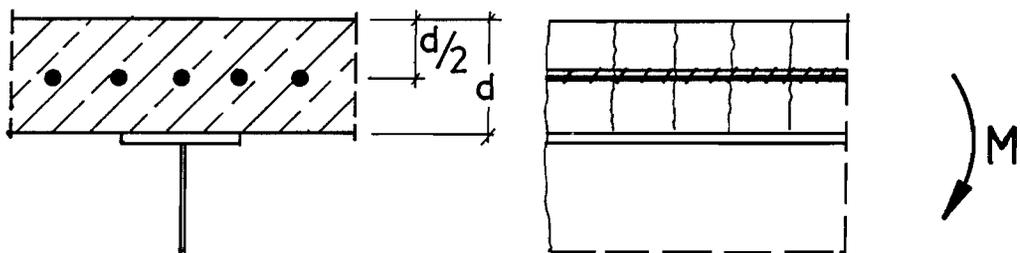


Abb. 21: Lage der Bewehrung und angenommene Rißbildung

Der Elastizitätsmodul des Bewehrungsstahls wurde mit $E_s = 21000 \text{ kN/cm}^2$ angenommen, der Verfestigungsmodul E_{vs} nach Erreichen der Fließspannung wurde mit 2 % des Elastizitätsmoduls angenommen.

c) Baustahl

- (6) Für die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Baustahls wurde ein trilinearer Verlauf angenommen (Abb. 22). Der Elastizitätsmodul beträgt 21000 kN/cm^2 , der Verfestigungsmodul E_{va} wurde mit 2 % des Elastizitätsmoduls E_a angenommen, wobei die Verfestigung unabhängig von der Stahlgüte bei einer Dehnung $\varepsilon = \pm 4 \text{ ‰}$ einsetzt. Eine hierzu durchgeführte Untersuchung hat gezeigt, daß die mit diesem Ansatz erzielten Ergebnisse sehr gut mit einer bilinearen σ - ε -Beziehung für den Baustahl ($E_v = 0,01 \cdot E_a$ und $\varepsilon_v = \varepsilon_{ya}$ - vgl. Kap. 1.3) durchgeführt wurden. Damit wurde sichergestellt, daß die zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführten Untersuchungen an Einfeldträgern, bei denen

der bilineare Ansatz verwendet wurde, mit den Ergebnissen für die Durchlaufträger verglichen werden können.

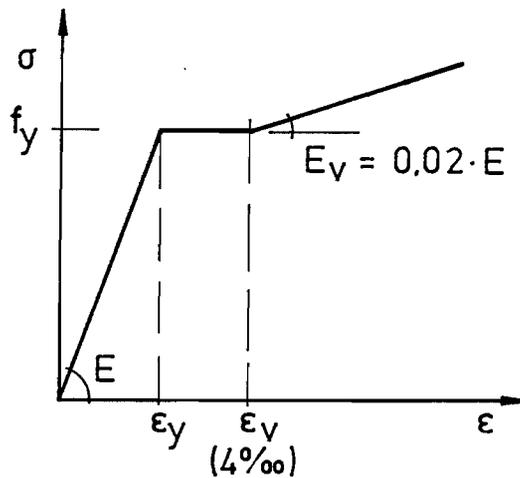


Abb. 22: Für Rotationsermittlungen verwendetes trilineares Spannungs-Dehnungsgesetz für Baustahl

- (7) Die Berechnungen der Zweifeldträger wurden bis zum Erreichen der rechnerischen Traglast auf zwei Arten durchgeführt:
- Durch die Begrenzung der aufnehmbaren Momente auf $M_{pl, Stütze}$ und $M_{pl, Feld}$ wurde sichergestellt, daß sich im Traglastzustand die kinematische Kette voll ausgebildet hat und sowohl im Stützen- als auch im Feldbereich das Bezugsmoment M_{pl} erreicht wurde. Die anschließende Ermittlung der Rotationen erfolgte für den zur Traglast zugehörigen Verformungszustand der Systeme.
 - Berechnungen, die ohne Begrenzung der rechnerischen Momententragfähigkeit auf M_{pl} durchgeführt wurden, wurde das unter a) als Traglast ermittelte Belastungsniveau zugrunde gelegt. Durch das Zulassen eines weiteren Momentenzuwachses infolge Verfestigung über der Stütze, wurde die Rechnerische Grenzlast erreicht, bevor im Feld das volle rechnerische M_{pl} erreicht wurde.

4.2 Untersuchte Systeme und variierte Systemparameter

- (1) Die Durchführung der Untersuchung erfolgte an durchlaufenden Zweifeldträgern, bei denen ausgehend von einem Grundsystem (Abb. 23) die Querschnittsparameter, die

Belastungsart (Momentenformbeiwert ψ), Belastungsverhältnis P_1/P_2 und die Spannweitenverhältnisse l_1/l_2 variiert wurden.

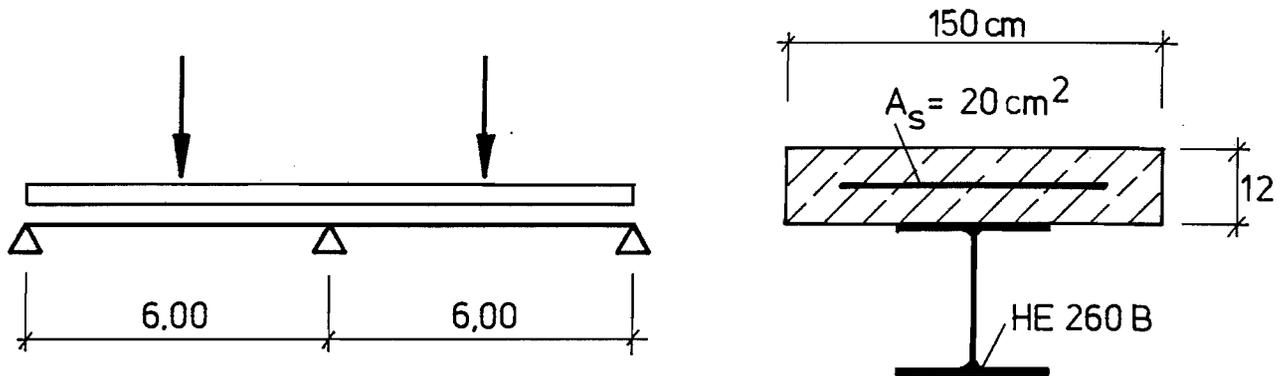


Abb. 23: Ausgangstopologie und Ausgangsquerschnitt der untersuchten Zweifeldträger

- (2) Die Querschnittsparameter wurden im einzelnen wie folgt variiert. Die stark umrandeten Felder markieren hierbei die Werte des Ausgangsquerschnitts.
- a) Fließspannungen des Stahlprofils
- (3) Es wurden die in EC 4, Abs. 3.3 vorgesehenen Baustahlsorten verwendet. Zusätzlich wurde der Einfluß der verhältnismäßig hohen Fließspannung des Stahls StE 460 untersucht.

Werkstoff	Fe 360	Fe 430	Fe 510	StE 660
$f_{y,a}$ [kN/cm ²]	23.5	27.5	35.5	46.0

Tab. 1: Verwendete Baustähle

- b) Stahlprofile
- (4) Es wurden Stahlprofile der HE-A und HE-B - Reihe variiert.

HE-A	200	260	300	340
HE-B	200	260	300	340

Tab. 2: Variierte Stahlprofile

c) Betonplattendicke

- (5) Durch die Variation der Betonplattendicke des Verbundquerschnitts wurde der Einfluß des Verhältnisses der Druckzonenhöhe zur Gesamtplattendicke untersucht.

Plattendicke [cm]	8	10	12	14	16
-------------------	---	----	----	----	----

Tab. 3: Gewählte Betonplattendicken

d) Betonfestigkeit

- (6) Der Einfluß der Betongüte auf die Rotationsanforderungen wurde durch die Wahl der in EC 2 /EC 4 vorgeschlagenen Werkstoffkennwerte für Beton verschiedener Festigkeitsklassen untersucht.

Beton	C25/30	C30/37	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{c,k}$ [kN/cm ²]	2.50	3.00	4.00	4.5	5.0
E_c [kN/cm ²]	2000	3000	3500	3600	3700

Tab. 4: Verwendete Betonfestigkeiten

e) Bewehrungsgrad

- (7) Der Bewehrungsgrad hat vor allem Einfluß auf die Größe von M_{pl} im Stützenbereich. Mit der Variation des Bewehrungsquerschnitts wurde somit gleichzeitig das Verhältnis $M_{pl, Stütze} / M_{pl, Feld}$ variiert.

A_s [cm ²]	12	16	20	24	28
$M_{pl, Stütze} / M_{pl, Feld}$	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72

Tab. 5: Angesetzter Bewehrungsgrad

4.3 Auswertung der Ergebnisse für Zweifeldträger

- (1) Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse und die anschließende Ermittlung der Rotationsanforderung ans den Verbundquerschnitt über der Stütze, wurden zwei charakteristische Last-Verformungszustände der untersuchten Systeme betrachtet:
- Last-Verformungszustand zum Zeitpunkt des ersten Auftretens von Fließspannung im Stahlträger, an der auf Rotationen hin untersuchten Stelle des Systems (hier über der Stütze des Zweifeldträgers)
 - Last-Verformungszustand beim Erreichen des rechnerischen Traglastzustandes (das Traglastniveau wurde unter Ansatz der rechnerischen M_{pl} - Werte ermittelt)

Aus der im Traglastzustand vorhandenen Momentenverteilung wurde durch Feststellung der Lage der Momentennullpunkte die Länge eines Ersatzinfeldträgers bestimmt, an dem die Gesamtrotationen φ_{ges} ermittelt werden (Abb. 24).

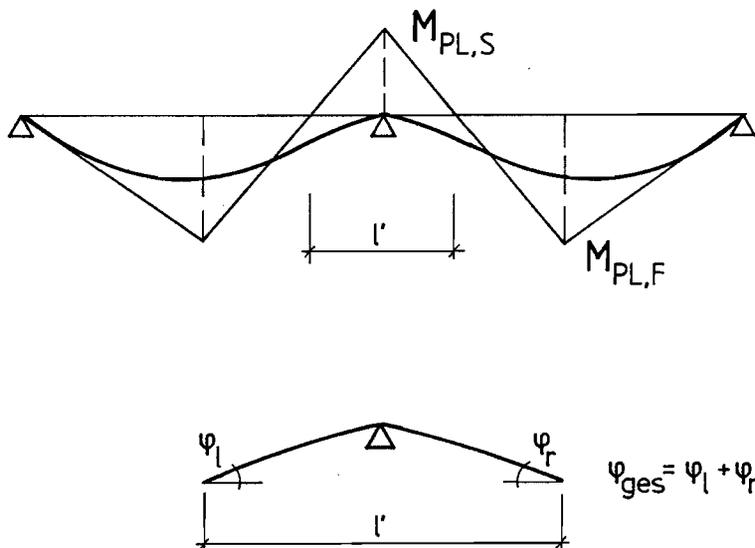


Abb. 24: Ersatzinfeldträger für die Auswertung im Traglastzustand

- (2) Der Last-Verformungszustand beim Auftreten erster Plastizierungen im Stahlträger über der Stütze wird als Grenzzustand beim Übergang vom elastischen zum plastischen Verhaltens des Ersatzinfeldträgers definiert. Die nach Erreichen dieses Zustandes im Stützenbereich zusätzlich auftretenden Rotationswinkel werden damit als plastische Rotationswinkel φ_{pl} festgelegt.

- (3) Die erforderlichen Rotationen werden als spannenweitenbereinigte Winkel (φ / l') für die Gesamt- und die plastischen Rotationswinkel in Abhängigkeit der untersuchten Parameter ausgegeben.

Zusätzlich erfolgt die Zusammenstellung der Rotationsergebnisse in Form des Rotationswertes R , der nach der folgenden Beziehung ermittelt wurde:

$$R_{erf} = \frac{\varphi_{ges}}{\varphi_{pl}} - 1$$

4.4 Ermittelte Rotationsanforderungen von Zweifeldträgern für den Stützenquerschnitt

4.4.1 Allgemeines

- (1) Bei der Bestimmung von Rotationsanforderungen spielt die Belastungsart (Strecken- oder Einzellasten) eine übergeordnete Rolle. Es hat sich sowohl bei den untersuchten Einfeldträgern als auch bei den Zweifeldträgern gezeigt, daß ein parabelförmiger Momentenverlauf, der aus der Streckenbelastung resultiert, wesentlich höhere Rotationsanforderungen zu Folge hat, als eine Momentenbelastung aus Einzellasten.
- (2) Entscheidend für die Rotationsanforderung an das erste Fließgelenk (bei Zweifeldträgern i.A. über der Stütze) ist die Momentenform, die zur Bildung des letzten Fließgelenkes führt (bei Zweifeldträgern i.A. im Feld). Je später sich das letzte Fließgelenk ausbildet, umso größer werden die Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt.
- (3) Der, als einer der untersuchten Parameter, variierte Wert ψ beschreibt daher die Momentenform, die als Belastung auf den Träger im Feldbereich entscheidend für die ermittelten Ergebnisse ist. Der Beiwert ψ wurde wie folgt definiert (siehe Abb. 25):

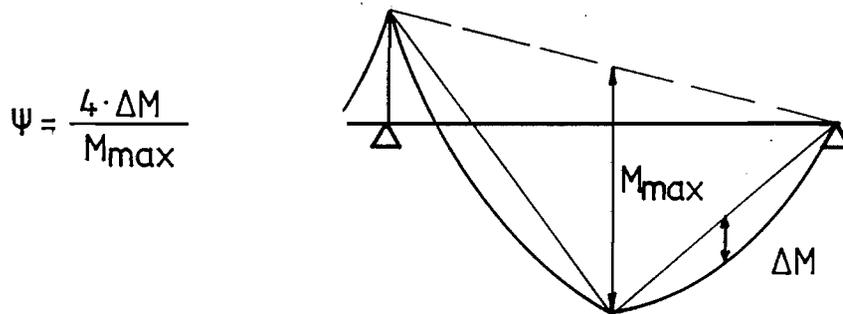
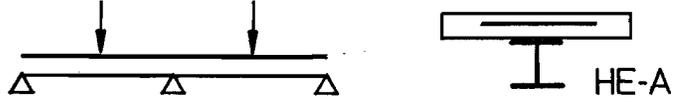


Abb. 25: Definition des Momentenformbeiwerts ψ beim Zweifeldträger

- (4) Die im nachfolgenden dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen sind in Form des Rotationswertes R_{erf} und der auf die Ersatzträgerlänge l' bezogenen Rotationswinkel $\varphi_{ges,erf}$ und $\varphi_{pl,erf}$ dargestellt. Es sind jeweils die Rotationsanforderungen, die aus nichtlinearen Traglastberechnungen mit Begrenzung der maximal aufnehmbaren Momente auf den rechnerischen Wert M_{pl} gewonnen wurden (linke Seite), und Berechnungen, bei denen ein Überschreiten des rechnerischen Wertes M_{pl} infolge der Stahlverfestigung zugelassen wurde (rechte Seite).
- (5) Die ersten beiden Zusammenstellungen (Seite 29 und 30) sind über dem Momentenformbeiwert ψ aufgetragen, der Kurvenparameter ist hier das gewählte Stahlprofil. Die nachfolgenden Zusammenstellungen (Seiten 31 bis 34) sind jeweils über dem untersuchten Querschnittsparameter aufgetragen, hier wurden jeweils nur Untersuchungen für die Momentenformbeiwerte $\psi = -1$ (nur Streckenlast) und $\psi = 0$ (nur Einzellasten) durchgeführt. Dies gilt auch für die Ergebnisse, die in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis (Seite 35) und Spannweitenverhältnis der Felder (Seite 36) aufgetragen wurden.

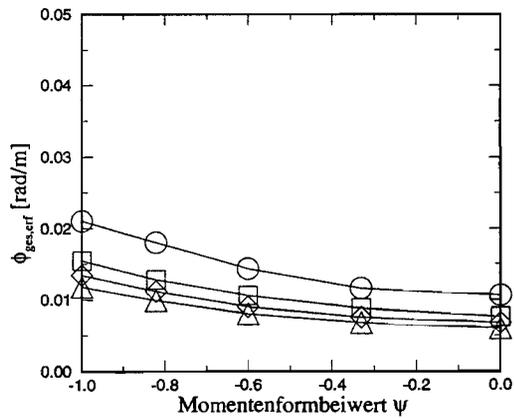
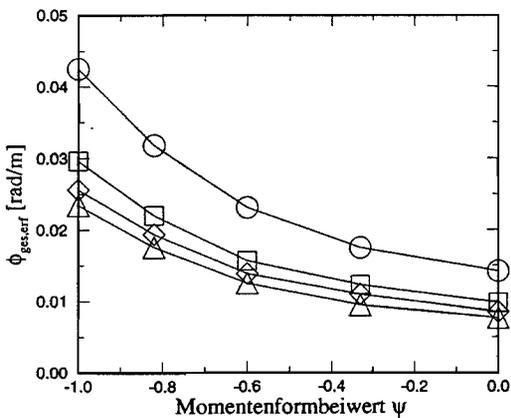
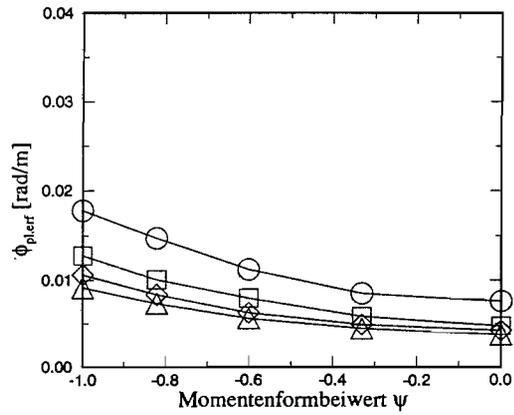
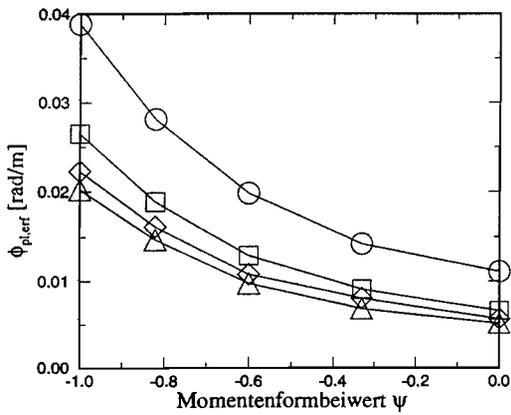
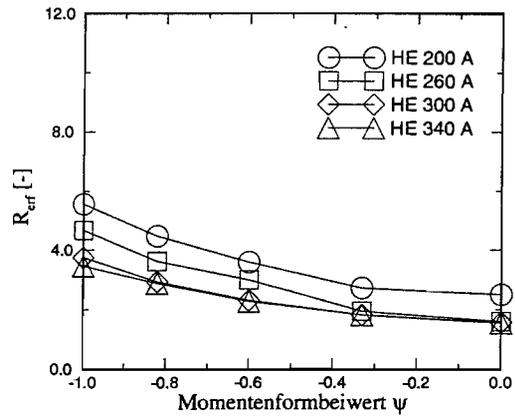
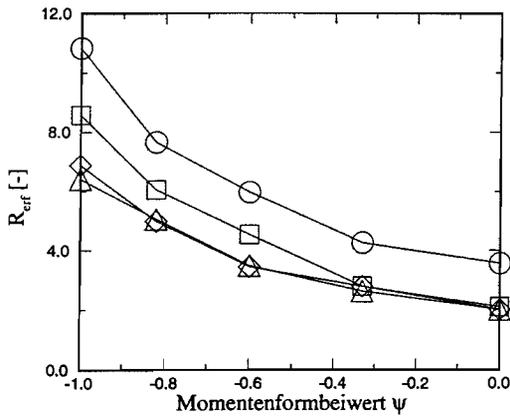
4.4.2 Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit vom Momentenformbeiwert ψ und vom gewählten Stahlprofil

a) Profile der HE-A Reihe

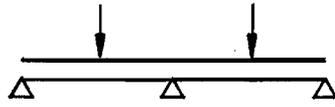


Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente

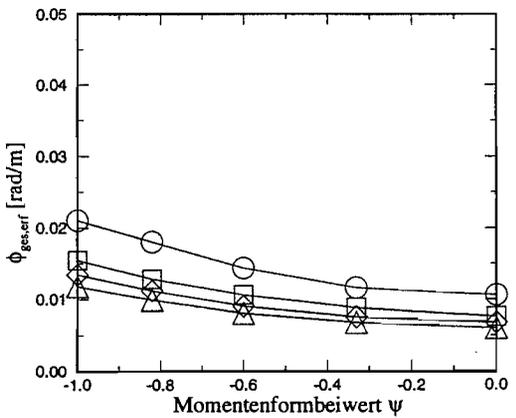
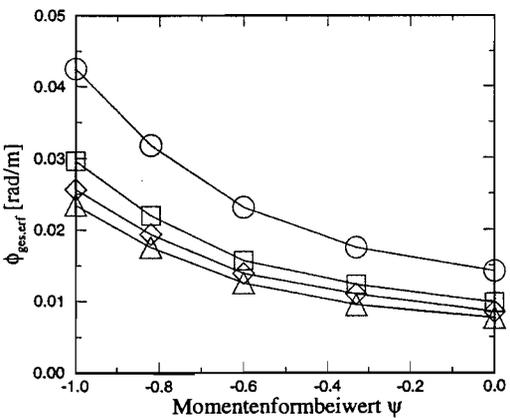
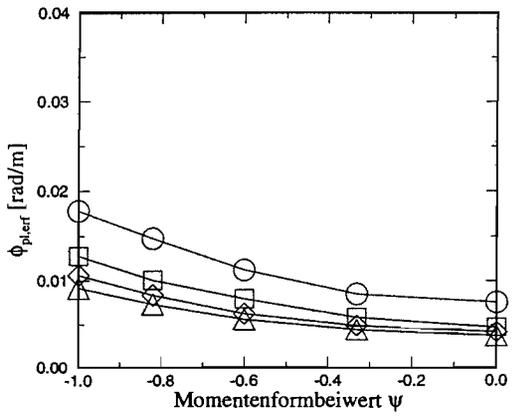
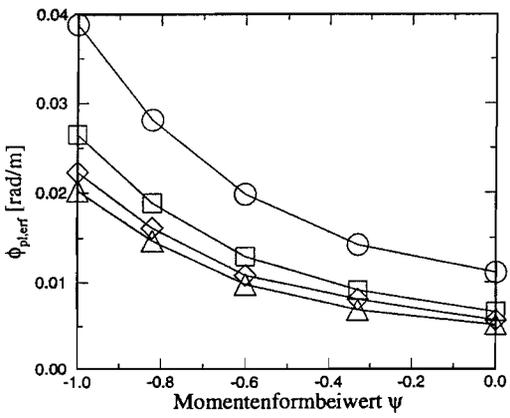
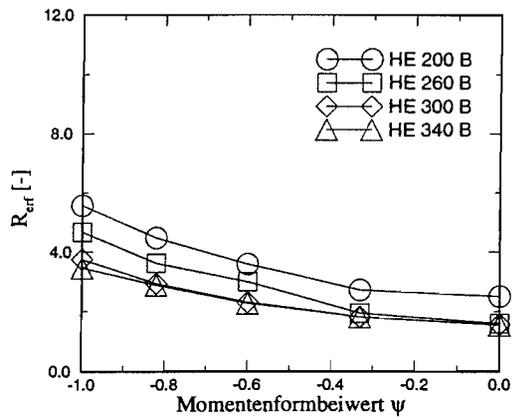
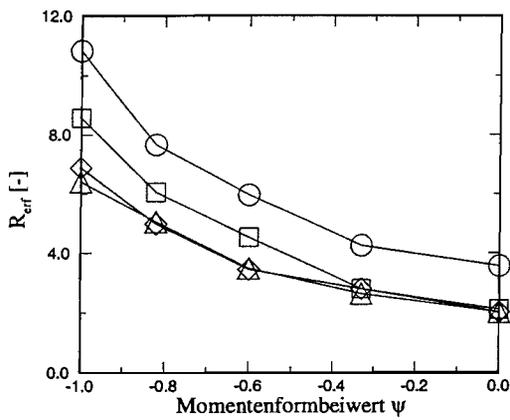


b) Profile der HE-B Reihe



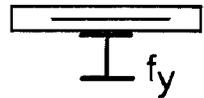
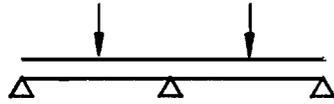
Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente



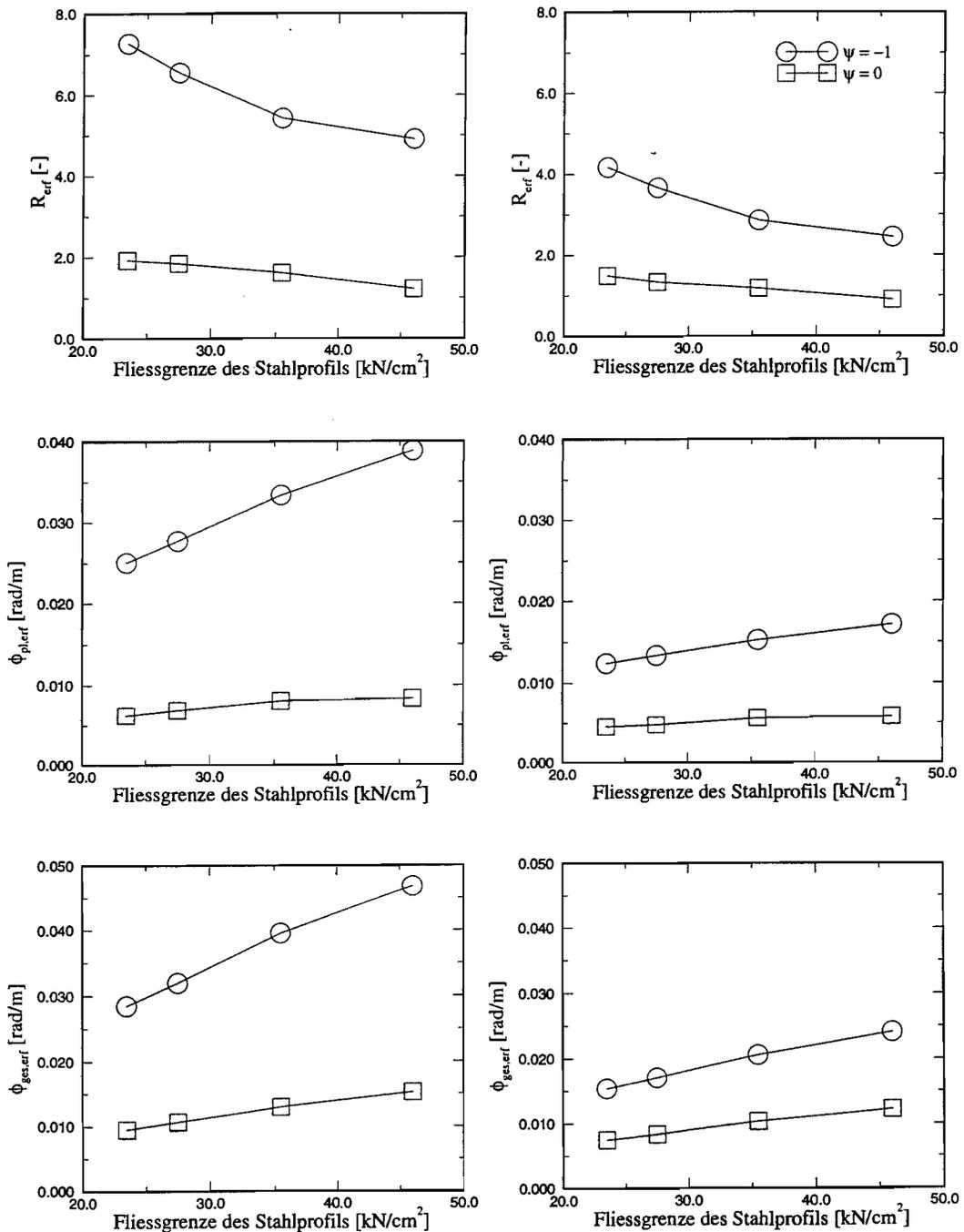
4.4.3 Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit von Querschnittsparametern und vom Momentenformbeiwert ψ

a) Fließgrenze des Stahlprofils



Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente

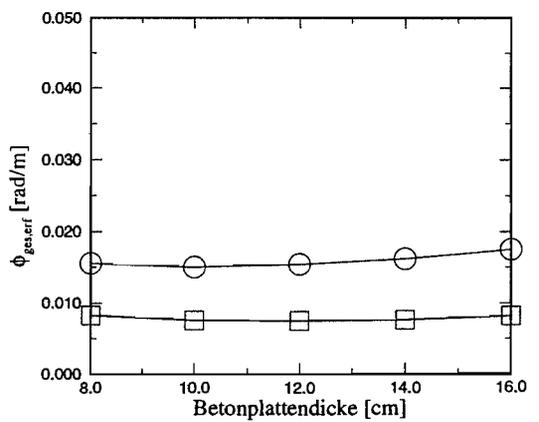
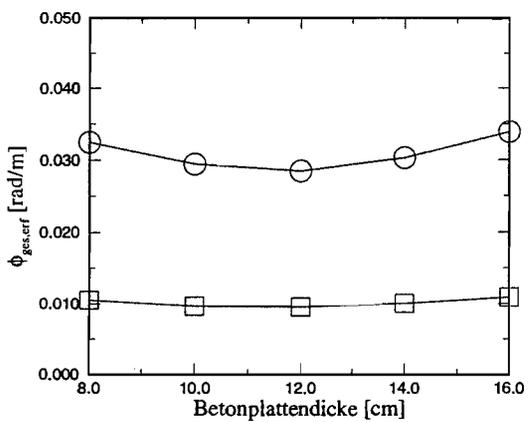
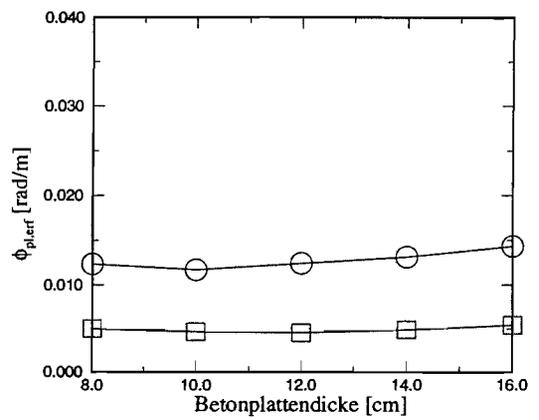
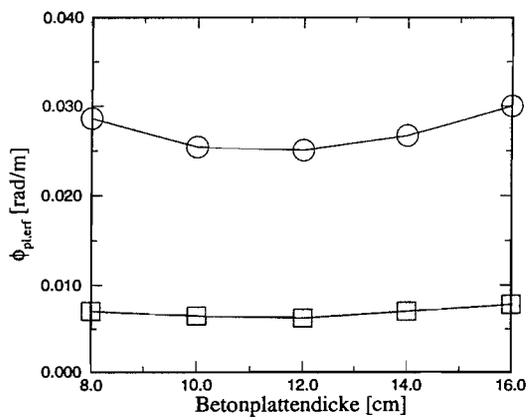
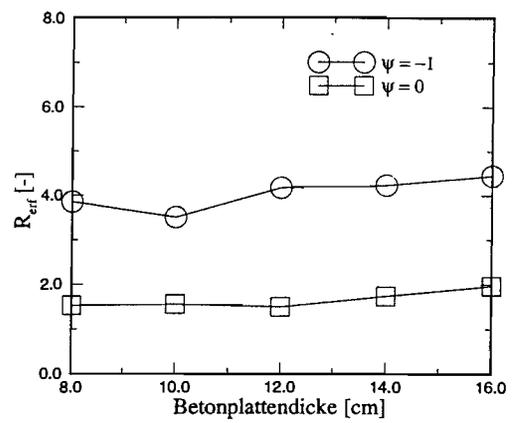
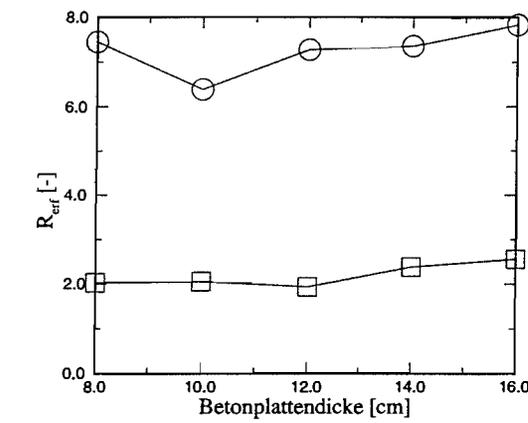


b) Dicke der Betonplatte

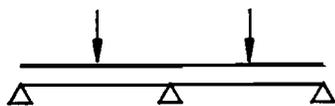


Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente

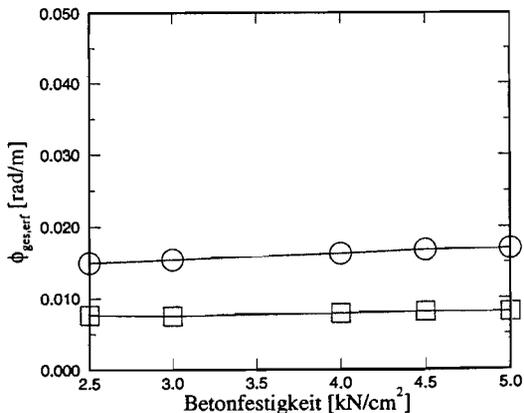
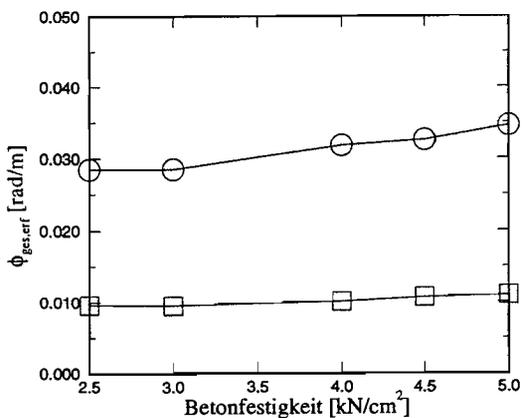
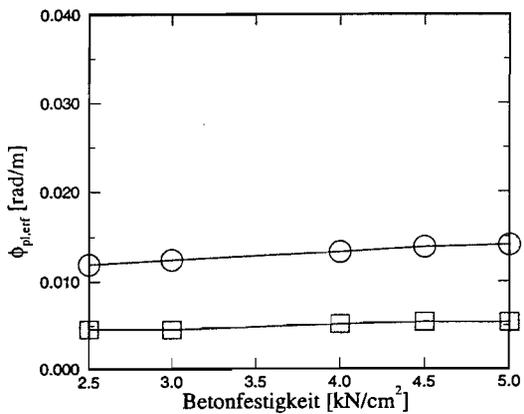
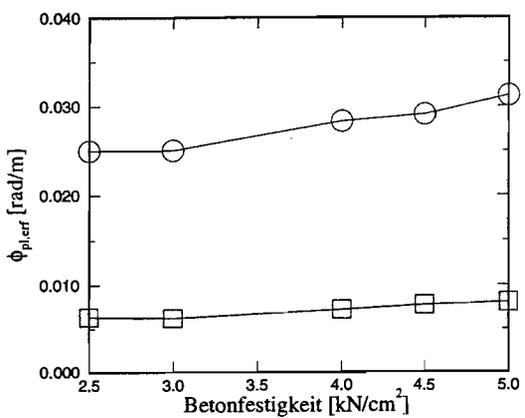
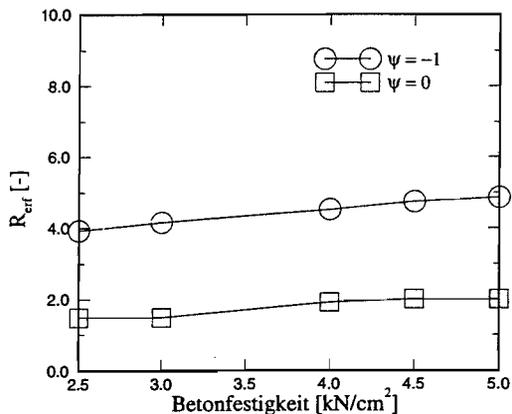
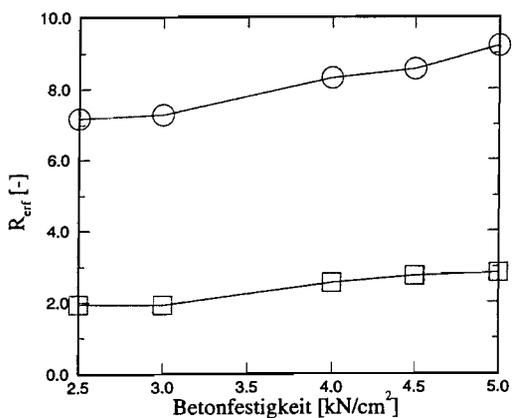


c) **Betonfestigkeit**

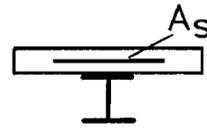
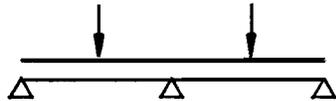


Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente

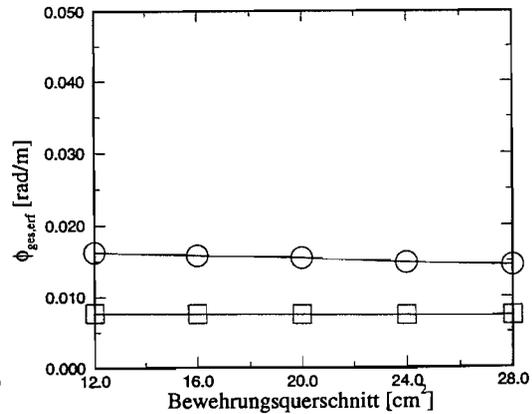
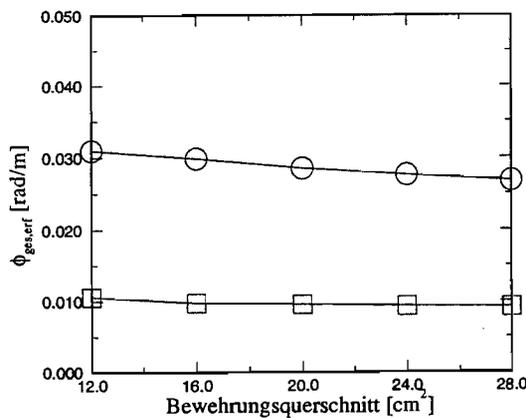
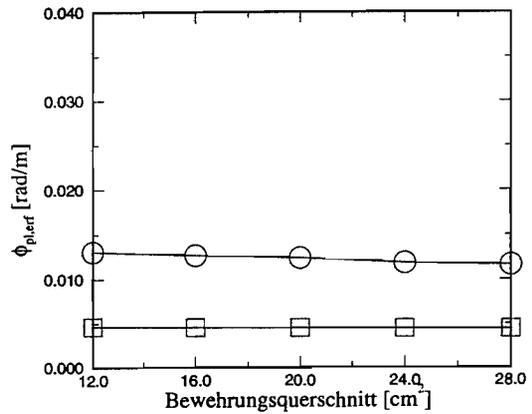
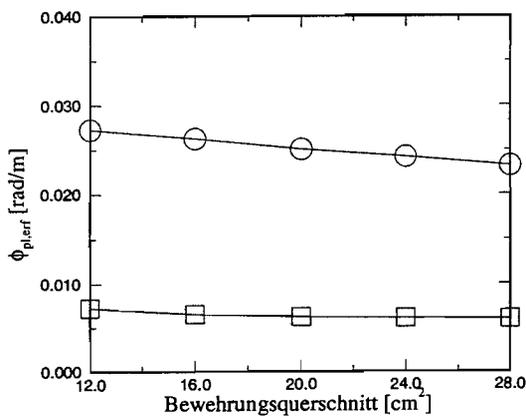
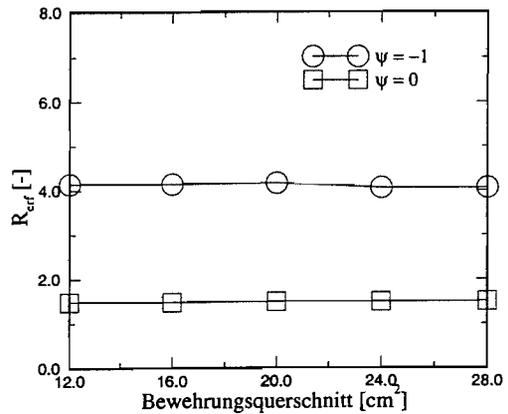
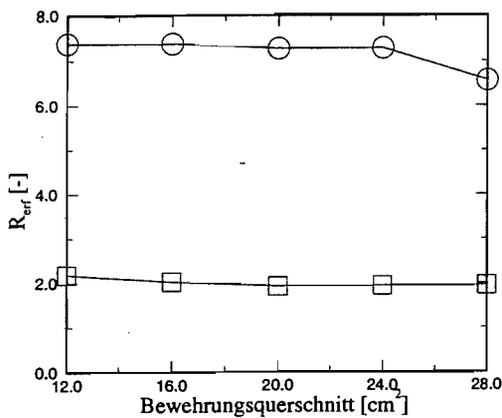


d) Bewehrungsgrad

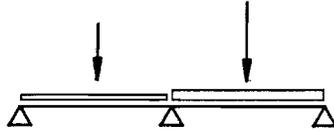


Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente

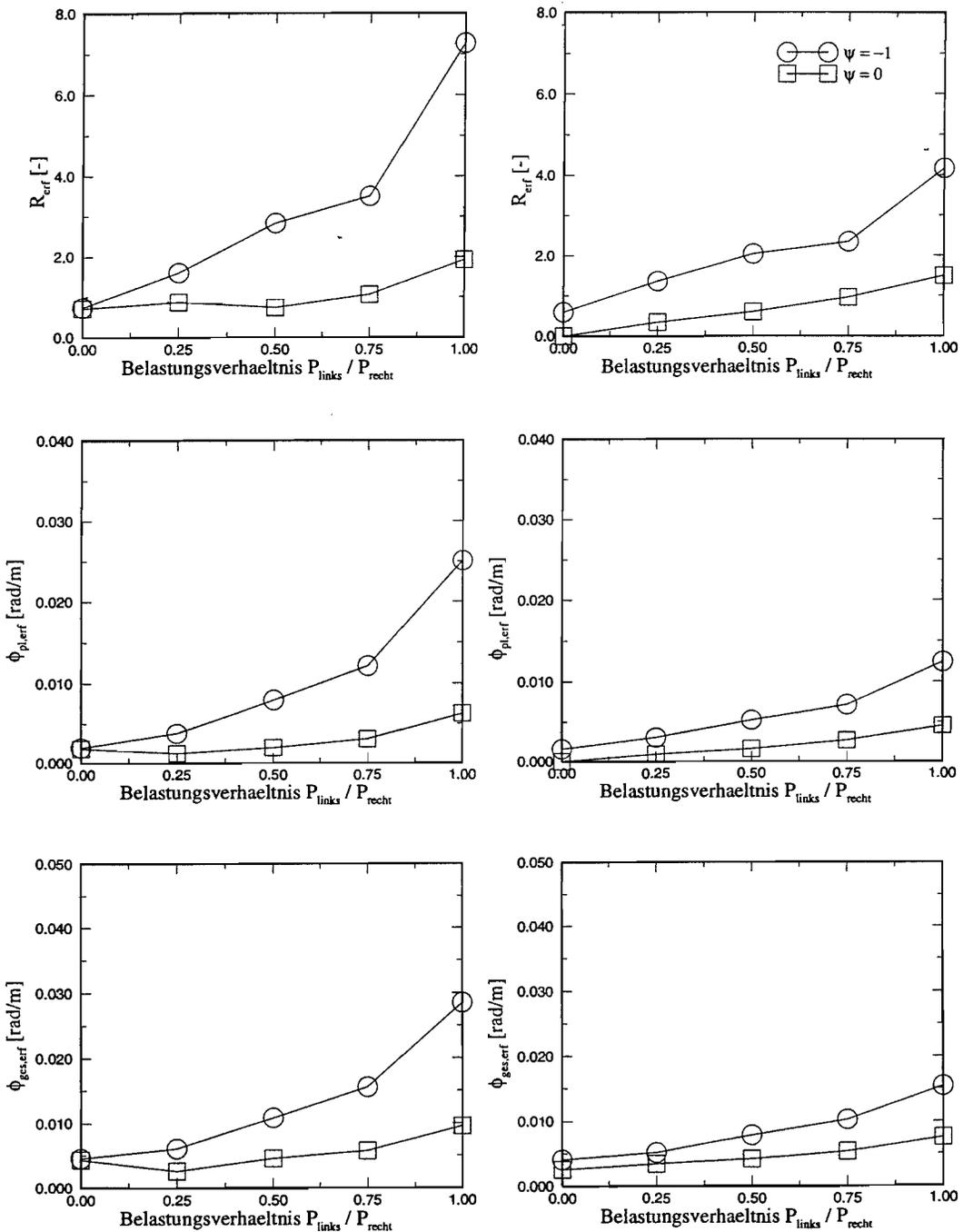


4.4.4 Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis in den Feldern und vom Momentenformbeiwert ψ

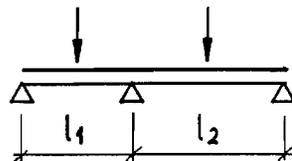


Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente

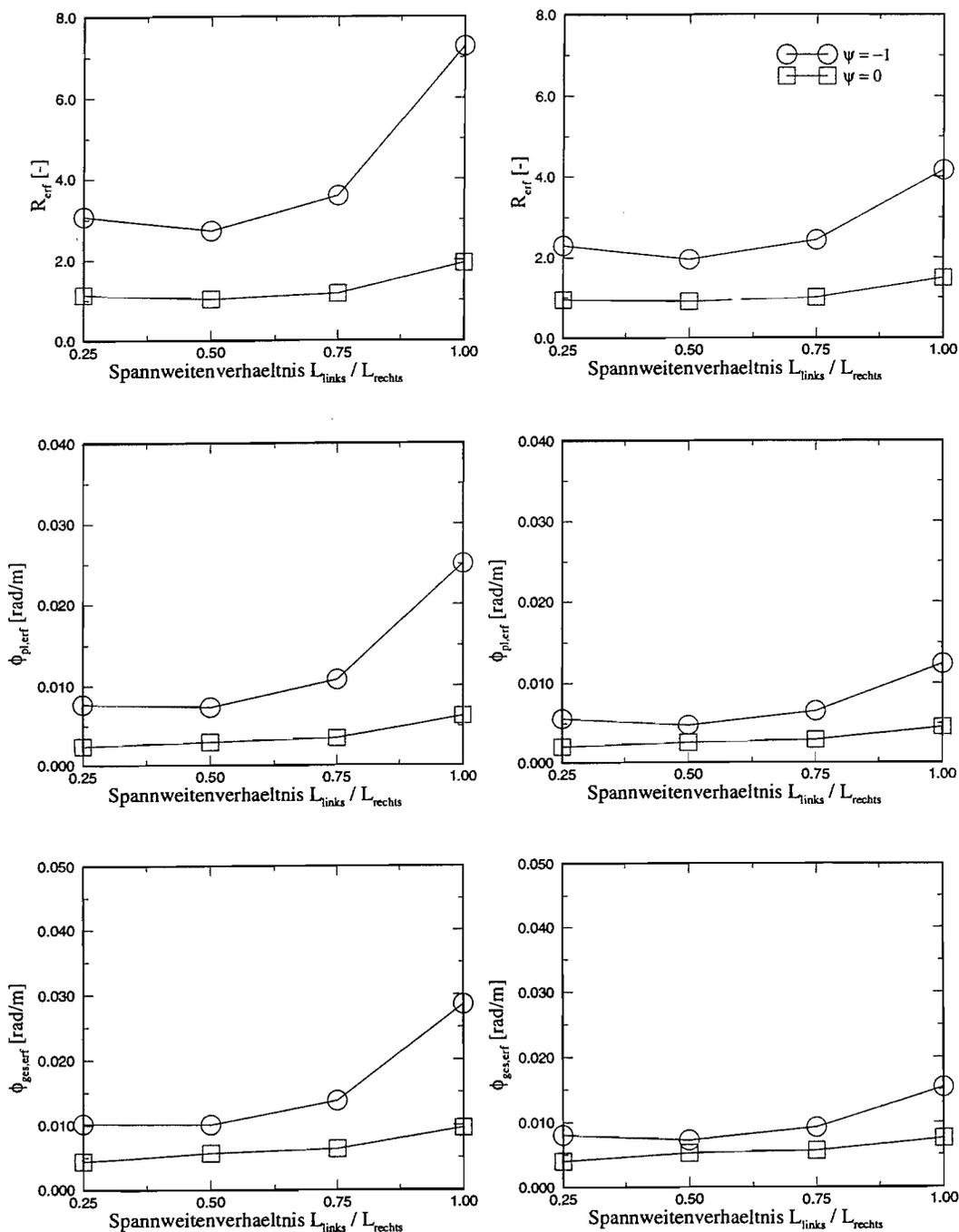


4.4.5 Rotationsanforderungen an den Stützenquerschnitt eines Zweifeldträgers in Abhängigkeit vom Spannweitenverhältnis der Felder und vom Momentenformbeiwert ψ



Begrenzung der aufnehmbaren Momente

keine Begrenzung der Momente



Eine Interpretation und Bewertung der Berechnungsergebnisse Rotationsanforderungen über der Stütze von Durchlaufträger wird im Hauptteil des Berichtes durchgeführt.

**Untersuchungen zur Rotationsanforderung bei
Anwendung des Fließgelenkverfahrens
bei Verbundträgern**

im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

AZ Nr.: IV 1 - 5 - 539/88

Anlage B

Ableitung der Formeln für die Rotationskapazität für
Verbundträger mit Betonplatte im Zugbereich.
Ermittlung der Rotationskapazität von Verbundträgern
mit Betonplatte im Druckbereich.

Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek, Dipl.-Ing. B. Hoffmeister, Dipl.-Ing. M. Feldmann

Aachen, den 07.07.1994

Anlage B: Inhaltsverzeichnis

I.	Rotationsfähigkeit von Verbundträgern im negativen Momentenbereich im Drei-Punktbiegeversuch	1
1	Definition und Voraussetzungen auf der Grundlage des Drei-Punktbiegeversuchs .	1
1.1	Statisches System, Belastung und Querschnitt der untersuchten Träger	1
1.2	Qualitative Momenten-Rotationsbeziehung eines Verbundquerschnittes . . .	1
1.3	Grundlage der hergeleiteten Formel	3
1.4	Voraussetzungen und Annahmen	3
2	Herleitung der Formel zur Ermittlung der Rotation φ_{rot}	5
2.1	Nulllinie im Flansch bei $\varphi = \varphi_{rot}$	5
2.2	Nulllinie im Steg bei $\varphi = \varphi_{rot}$	6
II.	Rotationsfähigkeit von Verbundträgern mit Betonplatte im Druckbereich	8
1	Allgemeines	8
2	Annahmen für die Untersuchungen der Rotationskapazitäten	8
3	Berechnungsergebnisse	9

I. Rotationsfähigkeit von Verbundträgern im negativen Momentenbereich im Drei-Punktbiegeversuch

1 Definition und Voraussetzungen auf der Grundlage des Drei-Punktbiegeversuchs

1.1 Statisches System, Belastung und Querschnitt der untersuchten Träger

Das unten dargestellte System bildet die Grundlage für Drei-Punktbiegeversuche und für die hier durchgeführten Untersuchungen. Die im weiteren verwendeten Bezeichnungen des Trägerquerschnittes sind hier ebenfalls aufgeführt.

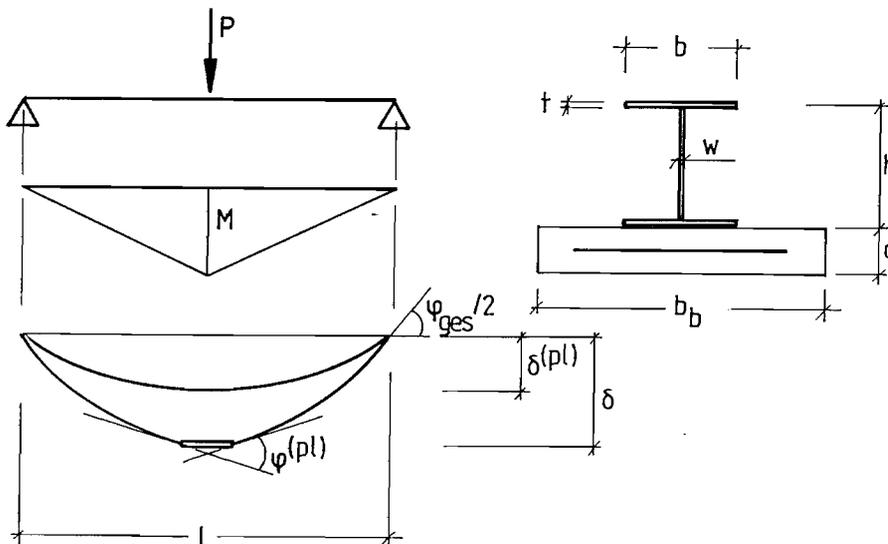


Abb. 1: Statisches System, Belastung und Querschnitts

1.2 Qualitative Momenten-Rotationsbeziehung eines Verbundquerschnittes

Die in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Momenten-Rotationskurve ist repräsentativ für das Verhalten von Verbundträgern im negativen Momentenbereich.

Man erkennt eine Anfangssteifigkeit (Zustand I) vor der Ausbildung der Risse; eine elastische Steifigkeit nach Abschluß der Rißbildung (Zustand II) und einen plastischen Bereich. Die als plastische Rotation bezeichnete Größe φ_{rot} ist der Rotationswinkel zwischen den beiden Schnittpunkten der Momenten-Rotationskurve mit dem plastischen Niveau M_{pl} .

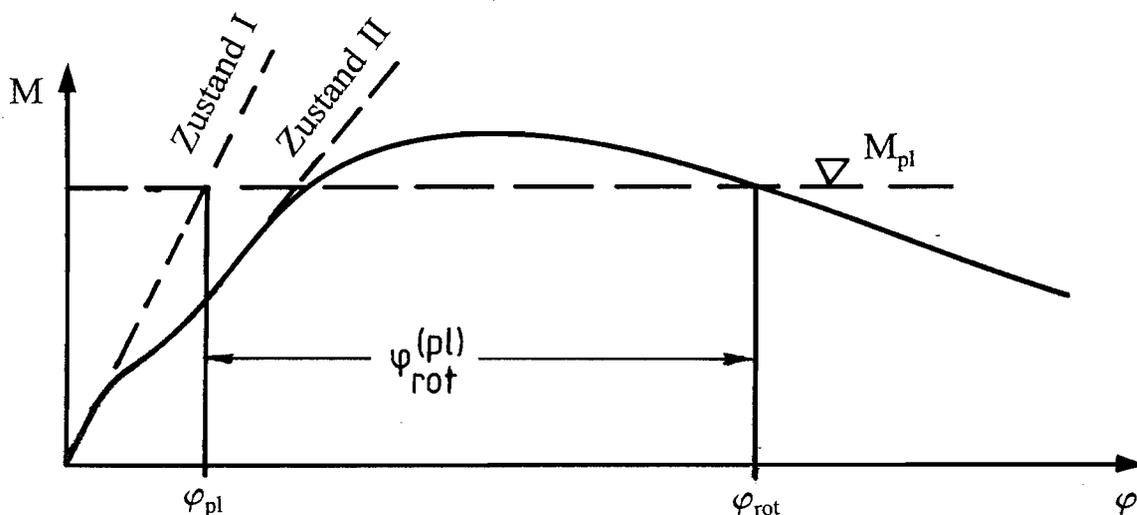


Abb. 2: Qualitativer Momenten-Rotationsverlauf eines Verbundträgers im negativen Momentenbereich

Nachfolgend ist noch die Momenten-Rotationsbeziehung nach Abzug des elastischen Verformungsanteils dargestellt.

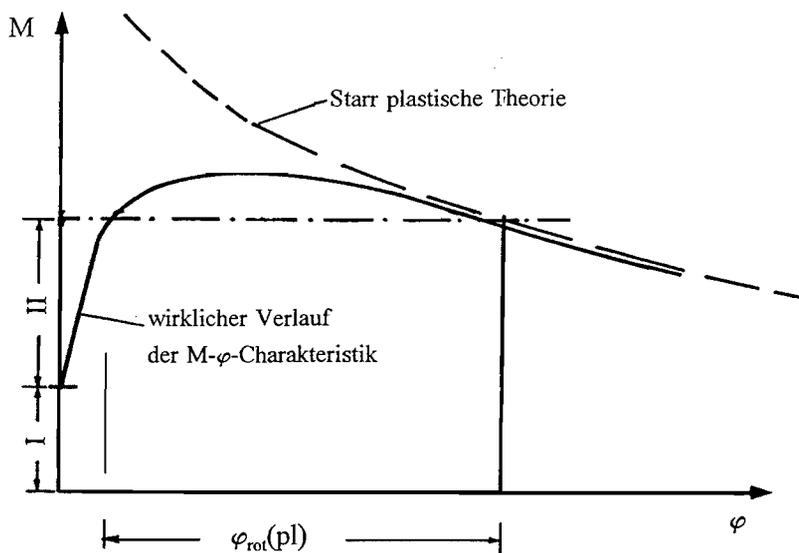


Abb. 3: Verformung nach Abzug des elastischen Verformungsanteils

1.3 Grundlage der hergeleiteten Formel

Im folgenden wird eine Beziehung hergestellt, die eine Vorhersage der Rotationskapazität von Verbundträgern im negativen Momentenbereich (mit Momentengradient) ermöglicht. Dieser Beziehung liegt ein starr-plastisches Fließgelenkmodell zugrunde, welches den auftretenden Beulmechanismus im Druckflansch durch einen Faltmechanismus abbildet. Die elastischen und elastoplastischen Krümmungswerte werden dabei vernachlässigt.

1.4 Voraussetzungen und Annahmen

Das angewandte Konzept wird mit Abb. 3 verdeutlicht. Es gelten die folgenden Annahmen:

- Zum Zeitpunkt $\varphi = \varphi_{\text{rot}}$ wird angenommen, daß die Beule sich stark genug entwickelt hat, so daß die M- φ Kurve einer starr-plastischer Theorie folgt.
- Der Faltmechanismus wird nach Abb. 4 angenommen:

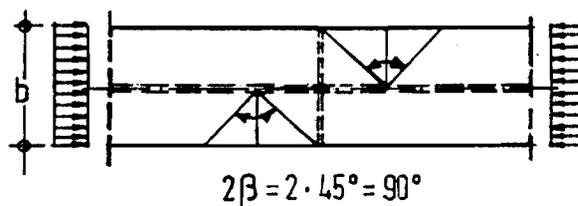


Abb. 4: Prinzipielle Darstellung des Faltmechanismus (Grundriß)

- Die Herleitung der Beulgeometrie und die Herleitung der Last-Verschiebungsgeometrie des starr-plastischen Faltmechanismus ist in /30/ dargestellt.
- Stegbeulen wird vernachlässigt.
- Der Steg hat Einspanneffekte auf Flanschbeulen.

- Das Spannungsniveau in den Flanschen beträgt infolge Verfestigung:

$$f_y^* = f_y + \Delta\sigma$$

mit $\Delta\sigma = \text{const}$ für alle f_y

(siehe Abb. 5)

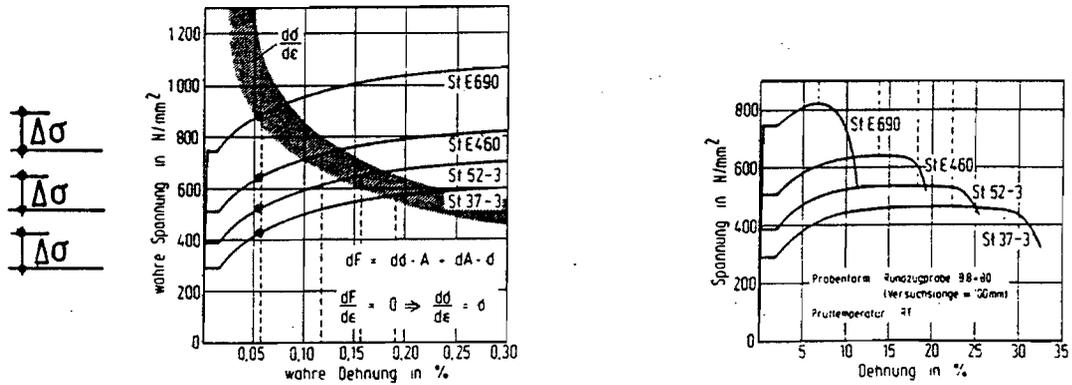


Abb. 5: Angenommene wahre Spannungs-Dehnungslinien für verschiedene Baustähle

- Das Spannungsniveau im kaltverfestigten Bewehrungsstahl wird mit β_s angenommen (siehe Abb. 6).

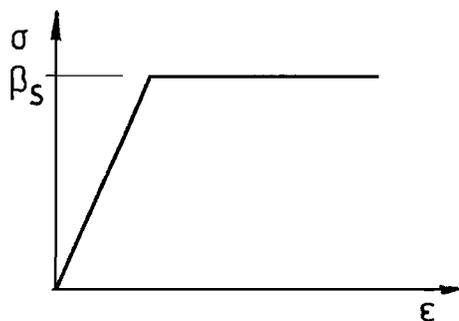


Abb. 6: Annahme für das Spannungs-Dehnungsverhalten von Bewehrungsstahl

2 Herleitung der Formel zur Ermittlung der Rotation φ_{rot}

2.1 Nulllinie im Flansch bei $\varphi = \varphi_{rot}$

Für den sicherlich im Hochbau am häufigsten vorkommenden Fall, nämlich den Fall der Lage der Spannungsnulllinie im Flansch bei $\varphi = \varphi_{rot}$ ist die Formel zur Bestimmung der Rotationskapazität nachfolgend hergeleitet und voll ausgeschrieben worden. Die Lage der Spannungsnulllinie wird mit $z_0 = h$ angenommen und wird innerhalb des Flansches angesichts der zu erwartenden Streuung der Rotationskapazität nicht näher bestimmt.

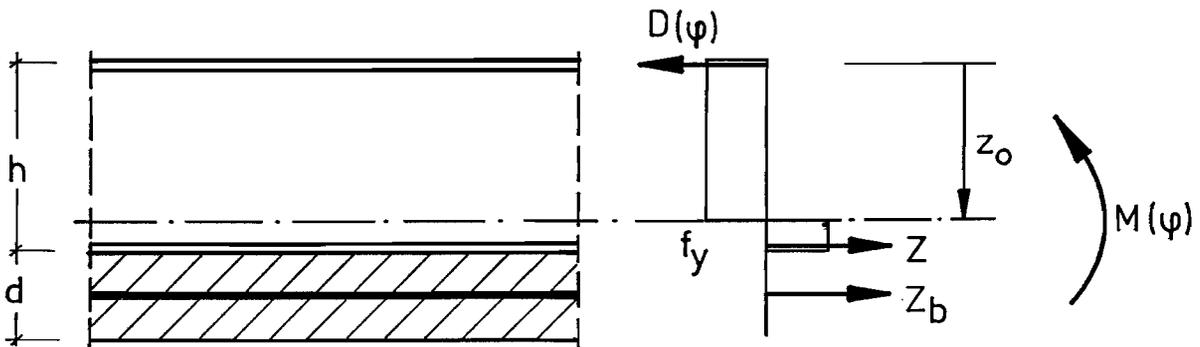


Abb. 7: Spannungsverteilung im Querschnitt und zugehörige Bezeichnungen

- Lage der Nulllinie

$$z_0 \approx h$$

- Inneres, variables Moment (vgl. auch 2.1 und /30/)

$$M(\varphi) = D_u \cdot \left(1 - \frac{h \cdot \varphi}{4t} + \frac{4 \cdot E \cdot b \cdot w^3}{5 \cdot h^2}\right) \cdot h + \frac{\sigma \cdot h^2 \cdot w}{2} + Z_b \cdot \frac{d}{2}$$

mit $D_u = b \cdot t \cdot (f_y + \Delta\sigma)$

- Über Gleichsetzen

$$M(\varphi) = M_{pl}$$

- erhält man

$$\varphi_{rot} = \frac{4t}{h} - \frac{4t}{D_u h^2} \left(M_{pl} - \frac{\sigma h^2 w}{2} - \frac{Z_b d}{2} - \frac{4 E b w^3}{5 h^2} \right)$$

- und die Rotationskapazität

$$R = 1 - \frac{\varphi_{rot}}{\varphi_{pl}}$$

2.2 Nulllinie im Steg bei $\varphi = \varphi_{rot}$

Für diesen Fall werden nachfolgend die Gleichungen zur Bestimmung der Rotationskapazität angegeben.

- Inneres, variables Moment, abhängig vom plastischen Rotationswinkel:

$$M = D(\varphi) \cdot z_0(\varphi) + \frac{(\sigma \cdot z_0(\varphi) \cdot w)}{2} + \frac{(\sigma \cdot (h - z_0(\varphi))^2 w)}{2} + Z_b \left(h + \frac{d}{2} - z_0(\varphi) \right)$$

- Veränderliche Flanschdruckkraft /30/:

$$D(\varphi) = D_u \left(\frac{1 - (h \cdot \varphi)}{4t} \right) + \frac{4 E b w^3}{5 h^2}$$

mit

$$D_u = (f_y + \Delta\sigma) b t$$

- Flanschzugkraft:

$$Z = D_u$$

- Lage der Nulllinie:

aus

$$z_0(\varphi) \cdot \sigma \cdot w + D(\varphi) \approx (h - z_0(\varphi)) \cdot \sigma \cdot w + Z + Z_b$$

folgt

$$z_0(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{h + (Z + Z_b - D(\varphi))}{(\sigma w)}$$

- Über Gleichsetzen

$$M(\varphi) = M_{pl}$$

erhält man die gesuchte Rotation

$$\varphi_{rot}$$

und die Rotationskapazität

$$R = \varphi_{rot} / \varphi_{pl} \cdot$$

II. Rotationsfähigkeit von Verbundträgern mit Betonplatte im Druckbereich

1 Allgemeines

Für Verbundträger, die durch ein positives Momente belastet werden (Betonplatte befindet sich im Druckbereich des Querschnittes) wird die Rotationskapazität i.A. durch das Versagen der Betonplatte nach Überschreitung einer kritischen Stauchung vorgegeben. Die dadurch begrenzte Rotationskapazität muß groß genug sein um

- a) die Ausbildung eines platischen Momentes im Querschnitt zu erlauben ("lokale" Rotationsanforderung)
- b) die Umlagerung von Schnittgrößen, die zur Ausbildung des Traglast-Grenz-zustandes benötigt werden, zu ermöglichen. Diese Forderung ist für Systeme, in denen das erste Fließgelenk im Feld entsteht, relevant.

Während der durchgeführten Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die Rotationsanforderungen für den Verbundquerschnitt über der Stütze wesentlich kritischer sind als die Roationsanforderungen an den Feldquerschnitt. Es ist i. A. zu erwarten, daß bei durchlaufenden Verbundträgern das erste Fließgelenk über der Stütze entsteht und somit an dieser Stelle auch die maximalen Rotationsanforderungen zu erwarten sind.

Bei Trägersystemen, bei denen nach der Fließgelenktheorie das erste Fließgelenk im Feld entsteht, hat sich gezeigt, daß bei Anwendung der Fließzonentheorie eine Fließgelenkbildung über den Stützen eintritt, bevor das volle plastische Feldmoment erreicht wird. Damit reduziert sich die Rotationsanforderung im Feld auch hier in etwa auf die Rotation, die zum Erreichen des plastischen Momentes benötigt wird.

2 Annahmen für die Untersuchungen der Rotationskapazitäten

Die Rotationskapazitäten wurden mittels des entwickelten Programms unter Verwendung der Fließzonentheorie ermittelt.

Hierbei wurde ein trilineares Spannungs-Dehnungsdiagramm für den Baustahl verwendet, in dem die Einflüsse aus der Verfestigung berücksichtigt wurden, und das in EC2 vorgeschlagene Spannungs-Dehnungsdiagramm für den Beton. Als statische Systeme wurden Einfeldträger gewählt, die Belastung wurde entsprechend den Berechnungen zur Rotationsanforderung derart variiert, daß die Momentenbeiwerte ψ Werte zwischen -1 (Streckenlast) und 0 (Einzellast) annahmen.

3 Berechnungsergebnisse

Die Rotationskapazitäten R , die nachfolgend zusammengestellt sind, wurden aus der Gegenüberstellung der Gesamtrotation und des elastischen Anteils der Rotationen ermittelt. Der elastische Anteil wurde hierbei durch die Extrapolation der Anfangsrotation bis zum Bemessungsniveau M_{pl} definiert.

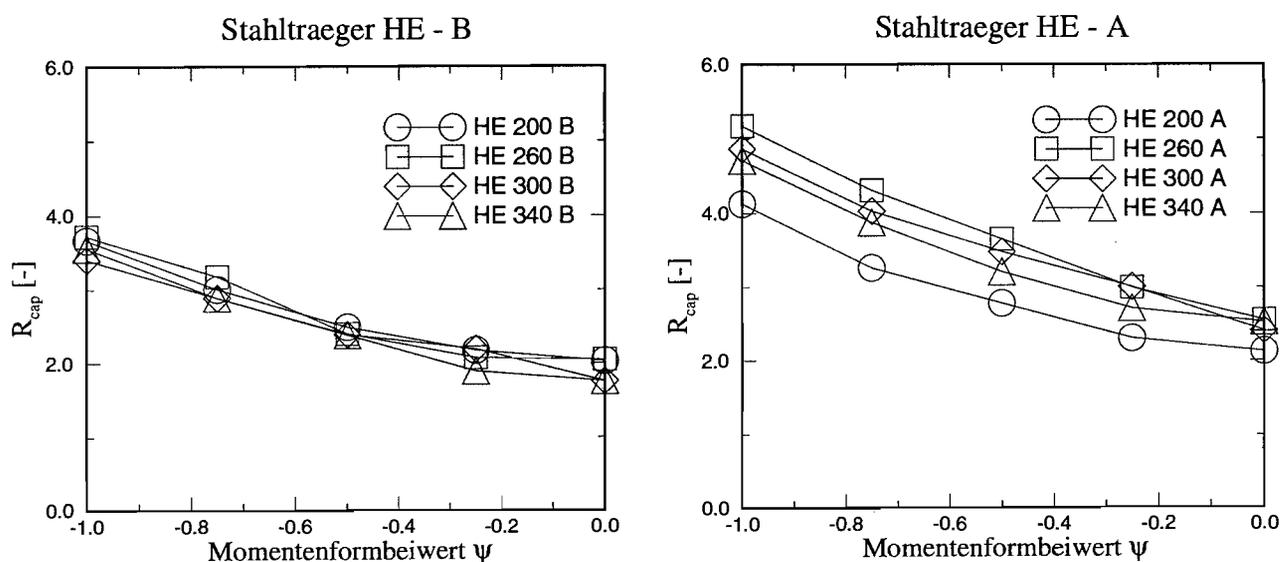


Abb. 8: Rotationsfähigkeiten von Verbundträgern mit Betonplatte im Druckbereich

**Untersuchungen zur Rotationsanforderung bei
Anwendung des Fließgelenkverfahrens
bei Verbundträgern**

im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

AZ Nr.: IV 1 - 5 - 539/88

Anlage C

**Nachrechnung von Versuchen zur Überprüfung
des verwendeten Programms**

Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek, Dipl.-Ing. B. Hoffmeister

Aachen, den 07.07.1994

Anlage C: Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeines	1
2.	Nachrechnung von Verbundträgern	1
3.	Nachrechnung eines Versuches am Stahlbetonbalken	3

1. Allgemeines

Die Überprüfung des verwendeten Programms erfolgte durch die Nachrechnung von Versuchen die an einfeldrigen Verbundträgern durchgeführt wurden. Diese Verbundträger wurden derart belastet, daß die Betonplatte im Druckbereich des Querschnittes lag. Überprüft wurde sowohl die ermittelte maximale Last als auch das Verformungsverhalten der Träger.

Die Überprüfung der gewählten Ansätze für das Verhalten des Betons und der Bewehrung unter Zugbelastung wurde durch die Nachrechnung von Versuchen, die an einfeldrigen Stahlbetonträgern durchgeführt wurden, realisiert. Mit diesen Nachrechnungen konnte auch der Einfluß des Tension Stiffening auf das Last-Verformungsverhalten überprüft werden.

2. Nachrechnung von Verbundträgern

Es werden hier die Nachrechnungen von zwei Verbundträgern aufgeführt, die zur Überprüfung der Eignung des Programms für die vorgesehenen Aufgaben durchgeführt wurden.

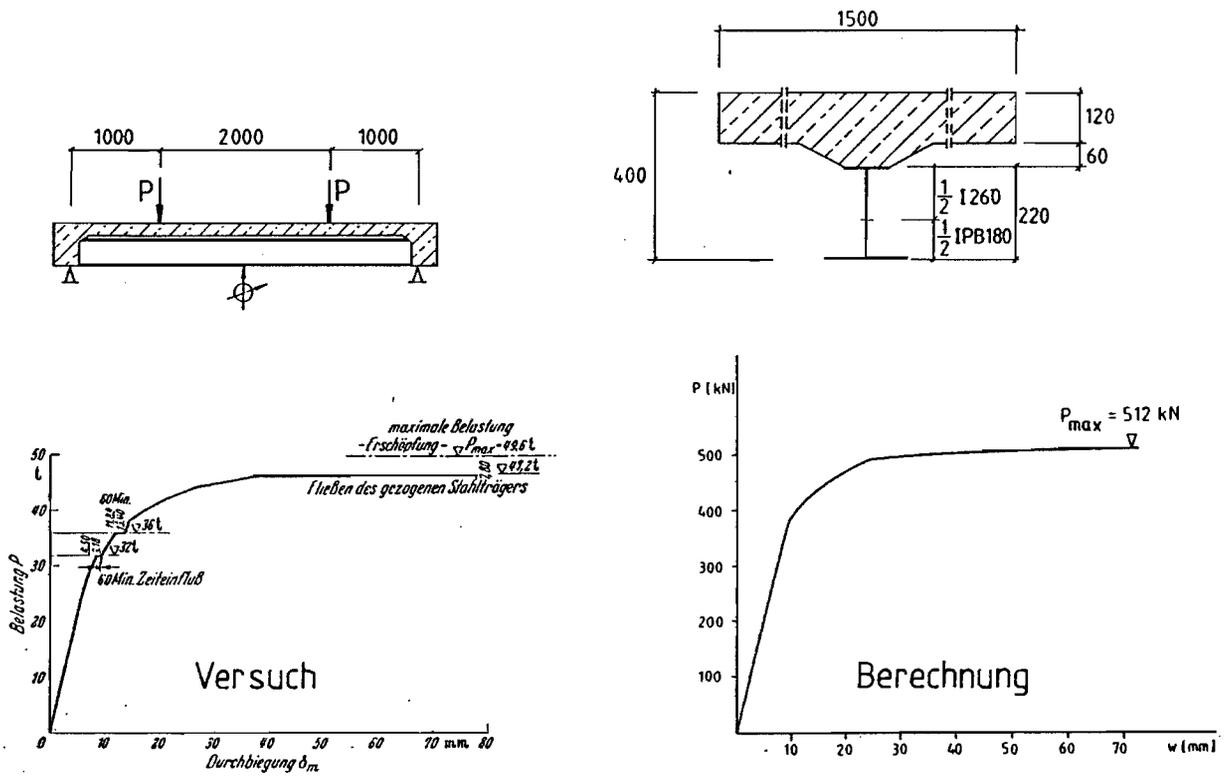


Abb. 1: Nachrechnung des Versuches der EMPA (1942/43)

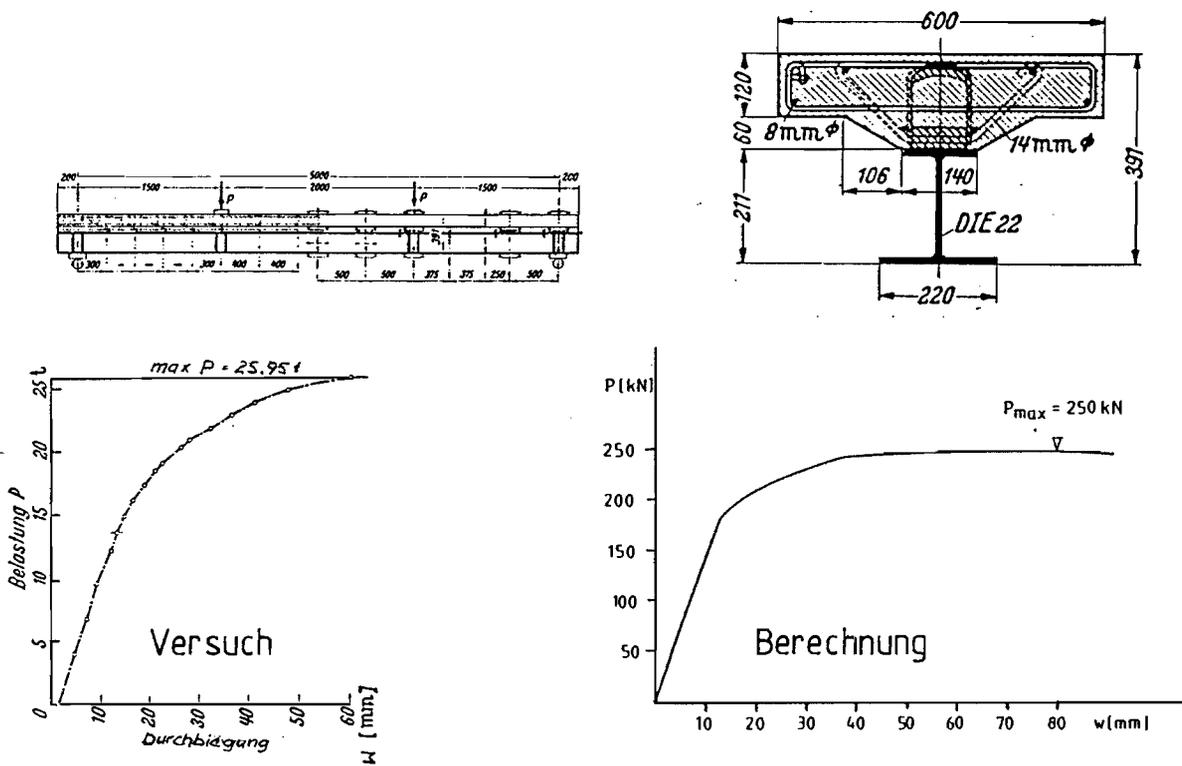


Abb. 2: Nachrechnung des Versuches des DAST (1950)

3. Nachrechnung eines Versuches am Stahlbetonbalken

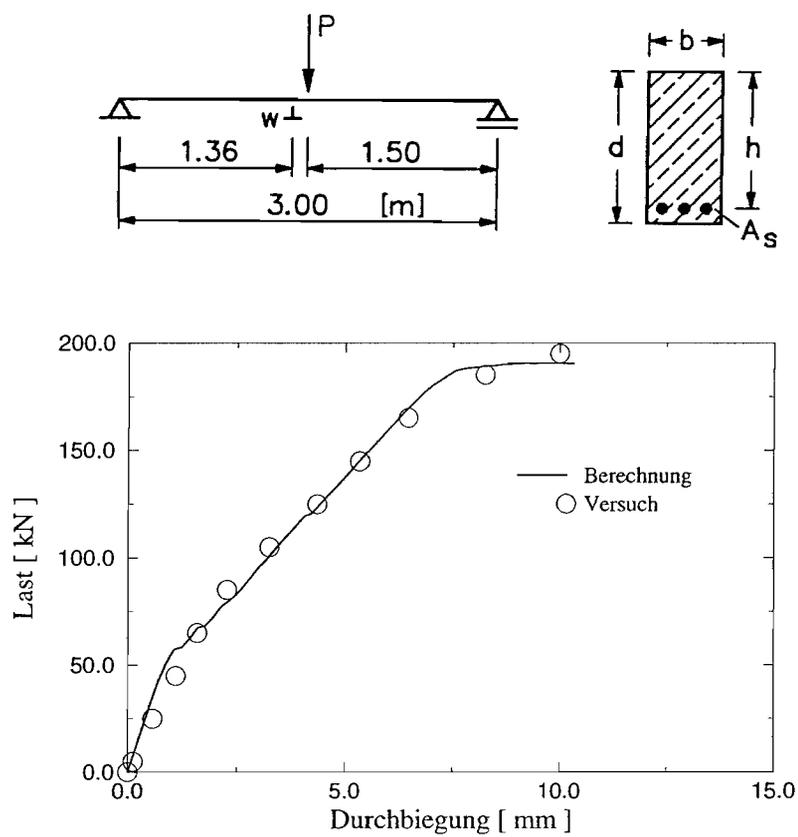


Abb. 3: Nachrechnung des Versuches am einseitig eingespannten Stahlbetonbalken (Franz / Brenker, 1967)