

EINFLUSS KEILGEZINKTER LAMELLEN  
AUF DIE BIEGEFESTIGKEIT VON BRETTSCHICHTHOLZTRÄGERN

von

Jürgen Ehlbeck, François Colling und Rainer Görlacher

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Abt. Ingenieurholzbau

Universität Fridericiana Karlsruhe

o.Prof.Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

1984

EINFLUSS KEILGEZINKTER LAMELLEN  
AUF DIE BIEGEFESTIGKEIT VON BRETTSCHICHTHOLZTRÄGERN

von

Jürgen Ehlbeck, François Colling und Rainer Görlacher

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Abt. Ingenieurholzbau

Universität Fridericiana Karlsruhe

o.Prof.Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

1984

## V O R W O R T

Die Zuverlässigkeit der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern kann bis heute nicht befriedigend beurteilt werden. Insbesondere spielt dabei die Qualität der Brettlamellen in der Biegezugzone eine entscheidende Rolle. Diese Lamellen enthalten neben den aufgrund der Sortierungsbestimmungen zulässigen Wuchsunregelmäßigkeiten aber auch Keilzinkenverbindungen. Ihr Einfluß muß beträchtlich sein, da erfahrungsgemäß bei Trägerprüfungen die Biegebrüche vorwiegend von solchen Keilzinkenverbindungen ausgehen.

Diese Arbeit entstand in den Jahren 1981 bis 1984 im Auftrage der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. und wurde durch Forschungsmittel des Instituts für Bautechnik, Berlin, und der Centralen Marketing Gesellschaft der Deutschen Agrarwirtschaft mbH, Bonn, gefördert. Hinzu kam eine Unterstützung durch die deutsche Holzleimbau-Industrie (siehe Abschnitt 4.1.1).

Besonders gedankt sei der Firma Christian Burgbacher GmbH & Co, Trossingen, die die Versuchsträger entsprechend den besonderen Wünschen für den Trägeraufbau herstellte, und dem Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Holzbau der Technischen Universität München, Prof. Dr.-Ing. B. Heimeshoff, der die Zugversuche an keilgezinkten Brettlamellen mit der dort vorhandenen speziellen Versuchseinrichtung unter Leitung von Herrn Dr.-Ing. P. Glos durchführte. Mit großem Interesse widmeten sich die Herren Dipl.-Ing. F. Colling und Dipl.-Ing. R. Görlacher dieser Forschungsaufgabe und wurden dabei von den Herren G. Rüd und J. Lafferthon bei den Versuchen tatkräftig unterstützt. Auch den wissenschaftlichen Hilfskräften des Lehrstuhls, insbesondere Herrn cand.ing. R. Dinort, ist für ihre gewissenhafte Mithilfe bei Auswertungen und Ergebnisdarstellungen zu danken.

Jürgen Ehlbeck

I n h a l t

1	Ziel der Forschungsarbeit	3
2	Auswertung des Schrifttums	5
2.1	Festigkeit der Brettlamellen	5
2.1.1	Festigkeit nicht keilgezinkter Bretter	5
2.1.2	Festigkeit keilgezinkter Bretter	7
2.2	Trägeraufbau	8
2.2.1	Güteklassen	8
2.2.2	Laminierungseffekt	9
2.2.3	Keilzinkenverbindungen	10
2.3	Trägergröße und Art der Belastung	10
2.3.1	Trägergröße (Trägervolumen)	10
2.3.2	Art der Belastung	11
2.4	Das Simulationsmodell von FOSCHI und BARRETT	11
3	Entwicklung eines Rechenmodells	15
3.1	Simulationsprogramm	15
3.1.1	Simulation des Trägeraufbaus und der Holzeigenschaften	15
3.1.2	Berechnung der Steifigkeits- und Festigkeits- eigenschaften	17
3.1.3	Programmablauf	20
3.2	Finite Elemente-Programm	24
3.2.1	Allgemeines	24
3.2.2	Programmablauf	24
4	Zugversuche an keilgezinkten Brettlamellen aus Fichte (picea abies)	30
4.1	Versuchsdurchführung	30
4.1.1	Probenahme, Versuchsumfang, Form und Abmessungen der Versuchskörper	30
4.1.2	Bestimmung der Rohdichte und der Holzfeuchtigkeit	31

4.1.3	Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zug-Elastizitätsmoduls	31
4.2	Ergebnis der Versuche	32
4.3	Auswertung der Versuche	33
5	Tragverhalten einer Keilzinkenverbindung in BSH-Träger	35
6	Trägerversuche	41
6.1	Trägeraufbau	41
6.2	Versuchsdurchführung	45
6.3	Ergebnisse der Versuche	45
7	Anwendung des Rechenmodells	48
7.1	Grundlagen für das Simulationsprogramm	48
7.2	Grundlagen für das Finite-Elemente-Programm	55
7.3	Durchführung der Berechnungen	57
8	Ergebnisse der Berechnungen und Vergleich mit den Versuchsergebnissen	58
8.1	Vergleich der Bruchlasten und der Bruch- ursachen	58
8.2	Vergleich der Biege-Elastizitätsmoduln	58
8.3	Vergleich von Kraft-Durchbiegungsdiagrammen	61
9	Diskussion und Zusammenfassung	63
9.1	Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen	63
9.2	Rechenmodelle	
9.3	Überprüfung der Rechenmodelle durch Versuche	
9.4	Zusammenfassende Beurteilung	
10	Schrifttum	

## 1 Ziel der Forschungsarbeit

In der deutschen Norm für die Bemessung und Ausführung von Holzbauwerken (DIN 1052) sind Festlegungen über zulässige Längsstöße von Brettlamellen für die Herstellung von Brettschichtholzträgern (BSH-Träger) angegeben. In der Praxis erfolgt die Längsverbinding von Einzelbrettern in der Regel mittels Keilzinkenverbindungen nach DIN 68 140. Bei einer Zinkenlänge von 20 mm beträgt der Verschwächungsgrad für die Beanspruchungsgruppe I  $v = 0,16$ . Beim Tragfähigkeitsnachweis von Biegeträgern aus Brettschichtholz darf die Schwächung durch die Keilzinkenverbindungen unberücksichtigt bleiben, wenn die Bretter einzeln gezinkt sind und die Zinkenverbinding in einem besonderen Arbeitsgang vor dem endgültigen Aushobeln der einzelnen Bretter auf die Solldicke hergestellt wird. Es wird aber gelegentlich empfohlen, die Abstände der Keilzinkenverbindungen benachbarter Brettlamellen mit mindestens 30 cm zu wählen.

Der Abstand zweier Keilzinkenverbindungen innerhalb eines Brettes ist jedoch sehr unterschiedlich. Er hängt von der Qualität und der Breite des verwendeten Brettes ab. Die Lage einer Keilzinkenverbinding im fertigen BSH-Träger ist also rein zufällig. Durch den hohen Grad der Automatisierung in den Holzleimbaubetrieben kann ohne größeren Zeit- und Arbeitsaufwand die Einhaltung eines bestimmten Abstandes der Keilzinkenverbindungen daher nicht gewährleistet werden.

Andererseits ist nachgewiesen, daß Biegebrüche von BSH-Trägern in der Regel auf das Versagen von Keilzinkenverbindungen in hochbeanspruchten Zonen zurückzuführen sind. Der Lage der Keilzinkenstöße im BSH-Träger kommt daher eine große Bedeutung zu.

Das Hauptziel dieses Forschungsprojektes war es, einerseits die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften von Keilzinkenverbindungen zu untersuchen und andererseits ein Rechenmodell zu entwickeln, mit dessen Hilfe der Einfluß der Keilzinkenstöße der Einzellamellen auf das Tragverhalten der fertigen BSH-Träger abgeschätzt werden kann. Die Zuverlässigkeit eines solchen Rechenmodelles war durch gezielte Tragfähigkeitsversuche an ausgewählten BSH-Trägern zu überprüfen.

In einem weiterführenden Forschungsprojekt sollen später wichtig erscheinende Einflußgrößen (z.B. Trägerhöhe, Lamellengüte) auf den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit aufbauend untersucht werden.

## 2 Auswertung des Schrifttums

Die Biegefestigkeit eines BSH-Trägers hängt in erster Linie ab

- von der Festigkeit der einzelnen Brettlamellen, insbesondere ihrer Zug- und Druckfestigkeit,
- vom Aufbau des Trägers, d.h. von der Anordnung der Brettlamellen zueinander, auch bei unterschiedlicher Holzgüte,
- von der Größe und der Art der Belastung des Trägers.

Die Festigkeit und damit auch die Güte der Brettlamellen wird aber maßgebend durch die Qualität der Keilzinkenverbindungen bestimmt.

### 2.1 Festigkeit der Brettlamellen

#### 2.1.1 Festigkeit nicht keilgezinkter Bretter

Die Festigkeit nicht keilgezinkter Bretter wird außer von der Holzart von einigen Materialeigenschaften entscheidend bestimmt. Dies sind in erster Linie der Elastizitätsmodul, die Äste, die Rohdichte, der Feuchtigkeitsgehalt, die Faserabweichungen und der Druckholzanteil. In den vergangenen Jahren wurden verstärkte Anstrengungen unternommen, um die Festigkeit von Schnittholz in Bauteilgröße in Abhängigkeit von diesen Parametern zu erfassen. DAWE (1964) stellte den Einfluß der Astgröße auf die Zugfestigkeit an europäischer Kiefer dar, OROSZ (1969) wies den Elastizitätsmodul und die Festigkeitsklasse für Biegung als zwei Indikatoren für die Zugfestigkeit des Holzes nach. In den 70er Jahren setzte an mehreren Holzforschungsinstituten eine intensive Beschäftigung mit diesen Fragen ein. APLIN (1972) berichtete über lamellenverleimtes Holz, das nach der Steifigkeit klassifiziert wurde. In den USA waren es vor allem ETHINGTON und GERHARDS (1971 bis 1974) in Madison (Wisc.), sowie SCHNIEWIND und LYON (1971) in Richmond (Cal.), die der

Frage der Zugfestigkeit des mit Wuchsunregelmäßigkeiten behafteten Bauschnittholzes nachgingen und Möglichkeiten der Vorherbestimmung aufzeigten. KUNESH (1972) wies den Einfluß der Querschnittsgröße nach, MOODY u.a. (1970, 1979) behandelten das biegebeanspruchte Brettschichtholz. In England behandelten CURRY und TORY (1976) den Zusammenhang zwischen der Biegefestigkeit und dem Biegeelastizitätsmodul, während PIERCE (1980) über Festigkeitsprognosen für Bauholz berichtete. In Südafrika untersuchte VINOPAL (1980) den gleichzeitigen Einfluß von Rohdichte und Ästigkeit auf die mechanischen Eigenschaften des Bauholzes. Systematische Untersuchungen von Brettlamellen für BSH-Träger in Dänemark wurden von LARSEN (1980, 1982) ausführlich beschrieben. In Deutschland wurden ähnliche Untersuchungen von GLOS und HEIMESHOFF (1978, 1980) durchgeführt, die gezielt dazu dienten, die für BSH-Träger verwendeten Brettlamellen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften zuverlässig beschreiben zu können.

Aus allen vorliegenden Untersuchungen zeigt sich, daß die Streuung der Festigkeitswerte besonders durch den Elastizitätsmodul erklärt werden kann. Die Ästigkeit, die in vielen Ländern als wichtigstes Kriterium bei der visuellen Gütesortierung des Bauholzes herangezogen wird, scheint danach erst von sekundärer - wenn auch nicht vernachlässigbarer - Bedeutung zu sein.

Die Zuverlässigkeit bei der Vorhersage der Festigkeitseigenschaften von Bauholz läßt sich natürlich steigern, wenn man mehrere wichtige Parameter gleichzeitig berücksichtigt. Die Wahl dieser Parameter ist von der Art der Beanspruchung abhängig, d.h. davon, ob man die Zug-, Druck- oder Biegefestigkeit beschreiben will. Der Elastizitätsmodul und die Ästigkeit üben offenbar den größten Einfluß auf die Zugfestigkeit aus, während bei der Druckfestigkeit die Holzfeuchtigkeit einen weiteren deutlichen Einfluß hat. Bei Berücksichtigung dieser Parameter übt die Rohdichte

keinen zusätzlichen Einfluß auf die Festigkeitseigenschaften von Bauholz aus, ihr Einfluß wird offenbar vollständig über den Elastizitätsmodul erklärt (siehe HELMESHOFF und GLOS (1980)). Weitere Parameter spielen bei Schnittholz in Bauteilgröße nur eine untergeordnete Rolle, so daß durch die Einbeziehung dieser Parameter die Aussage über die Zug- bzw. Druckfestigkeit nur noch unwesentlich verbessert werden kann.

Da in den Lamellen in den Randbereichen eines BSH-Trägers näherungsweise nur Zug- bzw. Druckspannungen auftreten, ist die Biegefestigkeit der Brettlamellen nicht von unmittelbarer Bedeutung. Sie spielt nur dann eine Rolle, wenn man zuverlässig von der Biege- auf die Zugfestigkeit schließen kann, da die Biegefestigkeit mit geringerem Aufwand experimentell bestimmt werden kann.

#### 2.1.2 Festigkeit keilgezinkter Bretter

Ein BSH-Träger wird aus Brettlamellen zusammengefügt, die quasi aus einem "Endlosbrett" herausgeschnitten werden. Dieses "Endlosbrett" entsteht durch das Aneinanderreihen und Verbinden einzelner gütesortierter Bretter. Als Längsverbinding wird dabei die Keilzinkenverbinding verwendet. Die Festigkeit einer Brettlamelle hängt daher entscheidend von der Festigkeit eines solchen Keilzinkenstoßes ab. Die Festigkeit der Keilzinkenverbinding ist daher besonders wichtig. EGNER und KOLB (1966) haben aufgezeigt, daß allein die Holzart schon die Qualität der Keilzinkenverbinding beeinflusst. SELBO (1963) und EBY (1968) berichteten über die Bedeutung der Geometrie der Keilzinken. STRICKLER und PELLERIN (1971) berichteten über eine zuverlässigere Vorhersage der Zugfestigkeit einer Keilzinkung mit Hilfe einer Vor- bzw. Probelastung. Die Arbeiten von GLOS und HELMESHOFF (1978, 1980) sowie LARSEN (1980) zeigten, daß die Streuung der Keilzinkenfestigkeit nur zu einem geringen Teil mit der Rohdichte und dem Elastizitätsmodul erklärt werden kann. Ohne Zweifel spielen auch die technischen Herstellungsbedingungen, d.h. die Schärfe

der Fräsen, Paket- oder Einzelfräsung, die Leimzusammensetzung, die Leimtemperatur, der Anpreßdruck, die Anpreßzeit, die Aushärtezeit und das Aushärteverfahren eine wichtige Rolle. Diese Faktoren lassen sich zahlenmäßig schwer erfassen, so daß eine Vorhersage der Festigkeit der Keilzinkenverbindung mit einer großen Unsicherheit behaftet bleibt. Die vielerorts gewonnenen Untersuchungsergebnisse lassen sich daher auch sehr schwer direkt miteinander vergleichen.

## 2.2 Trägeraufbau

### 2.2.1 Güteklassen

Die Bretter werden vor ihrer endgültigen Verarbeitung in verschiedene Güteklassen eingeteilt. Diese Einteilung erfolgt nach den in den jeweiligen Ländern gültigen Sortiervorschriften. Hierbei bilden bei der visuellen Sortierung die Ästigkeit und bei der maschinellen Sortierung (vornehmlich in den nordamerikanischen Ländern) der Elastizitätsmodul die wichtigsten Beurteilungskriterien.

Die Güteklasse eines BSH-Trägers wird von der Güte der Lamellen in den Randbereichen, insbesondere in der Zugzone bestimmt. So müssen nach den deutschen Bestimmungen der DIN 1052 nur die äußeren 15 % der Trägerhöhe, mindestens aber die beiden äußeren Lamellen in der Zugzone der jeweiligen Güteklasse entsprechen, während die restlichen Lamellen der nächst niedrigeren Klasse angehören dürfen. Bei maschineller Holzsortierung kann man wegen der vielfältigen Variationsmöglichkeiten für den Trägeraufbau eine größere Anzahl an Festigkeitsklassen schaffen. LARSEN (1982) sowie MARX und MOODY (1982) haben verstärkt auf die Bedeutung der äußersten Zuglamelle, der sog. "Decklamelle", und auf die Zuverlässigkeit der Gütesortierung hingewiesen. Die Arbeiten von PELLERIN und STRICKLER (1971) sowie KERSKEN-BRADLEY und MAIER (1977) zeigen auf, daß bei

einer zuverlässigeren Gütesortierung die Streuungen der Festigkeitswerte erheblich abnehmen. Bei einem gezielten Trägeraufbau sind folglich auch höhere zulässige Biegespannungen denkbar. Die Qualität der Gütesortierung läßt sich noch weiter verbessern, wenn man den Elastizitätsmodul und die Ästigkeit gleichzeitig als Sortierkriterien heranzieht (siehe Abschnitt 2.1.1).

### 2.2.2 Laminierungseffekt

Die Untersuchungen von LARSEN (1980, 1982), der neben Biegeversuchen an BSH-Trägern vergleichende Zugversuche mit Brettern der gleichen Güte wie die Zuglamellen des Biegeträgers durchführte, zeigten, daß die Biegefestigkeiten der BSH-Träger höher waren, als man dies anhand der Zugfestigkeit der Lamellen erwarten konnte. PETERSON und NOZISKA (1973) haben gezeigt, daß die Zugfestigkeit von Prüfkörpern aus Brettschichtholz beträchtlich über der Zugfestigkeit der einzelnen Bretter lag. Die Ursache dieses "Laminierungseffektes", der durch das Zusammenleimen der einzelnen Bretter erzielt wird, ist noch nicht ganz geklärt.

Im reinen Zugversuch stellen die Äste Schwachstellen dar, an denen überproportional große Verformungen auftreten können. So entstehen besonders bei Randästen durch die Kraftumleitung Biegemomente, die eine seitliche Durchbiegung des Prüfkörpers bewirken. Die Behinderung einer seitlichen Verformung durch das Verleimen der Lamellen in dem BSH-Träger wird von FOSCHI und BARRETT (1980) und von LARSEN (1982) als mögliche Ursache für diesen Laminierungseffekt genannt. Nach ETHINGTON/GERHARDS (1971) und PELLERIN/STRICKLER (1971) wachsen aber auch die Längsdehnungen im Bereich der Äste stark an, so daß der Laminierungseffekt auch mit der Behinderung der großen Längsdehnungen von örtlichen Schwachstellen erklärt werden kann.

### 2.2.3 Keilzinkenverbindungen

Bisherige Untersuchungen von APLIN (1972), KOLB (1974) sowie SCHULER/GRANT/MOODY (1979) haben deutlich gezeigt, daß die Lage einer Keilzinkenverbindung im Träger einen großen Einfluß auf die Biegefestigkeit eines BSH-Trägers hat. Besonders bei Lamellen hoher Qualität stellt der Keilzinkenstoß eine Schwächung dar, die die Zugfestigkeit der Lamelle merklich herabsetzt. Daher ist bei Trägern, die einer hohen Güteklasse entsprechen, das Versagen meistens auf die Keilzinkenverbindungen zurückzuführen.

Nach STRICKLER/PELLERIN (1971) und LARSEN (1982) wird die Bedeutung der Lage der Keilzinkungen in den hochbeanspruchten Zonen eines Biegeträgers noch durch weitere Versuchsergebnisse verstärkt, die auf ein Zusammenspiel benachbarter Keilzinkenverbindungen hinweisen. Die Biegefestigkeit von BSH-Trägern mit unmittelbar übereinanderliegenden Keilzinkenstößen erwies sich durchweg als geringer als die Biegefestigkeit solcher Träger, bei denen die Keilzinkenverbindungen benachbarter Lamellen gegeneinander versetzt angeordnet waren.

## 2.3 Trägergröße und Art der Belastung

### 2.3.1 Trägergröße (Trägervolumen)

WEIBULL (1939) entwickelte eine Theorie über das Tragverhalten eines homogenen, isotropen und spröden Materials, die es ermöglicht, den Einfluß des Volumens auf die Festigkeit zahlenmäßig abzuschätzen. Diese Theorie basiert auf dem Prinzip des schwächsten Gliedes ("weakest link failure"), welche besagt, daß die Tragfähigkeit eines Körpers dann erreicht ist, wenn die Festigkeit des schwächsten Gliedes überschritten wird.

Je größer ein Körper wird, umso größer wird dann auch die Wahrscheinlichkeit, daß ein noch schwächeres Glied auftaucht, so daß die Festigkeit mit wachsendem Volumen abnehmen muß.

Dieser Abfall der Biegefestigkeit mit wachsender Trägergröße ist auch im Holzbau zu beobachten. Da bei Zugversuchen und auch bei Biegeversuchen ein sprödes Bruchverhalten vorliegt, wurde Weibulls Theorie schon 1966 von BOHANNAN übernommen und erweitert. Da Holz aber weder ein homogener noch ein isotroper Werkstoff ist, blieb der "Volumeneffekt" in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen.

Ein Abfall der Festigkeit mit wachsendem Volumen konnte dabei nicht immer nachgewiesen werden und wenn, dann war er je nach Holzart, Güteklasse und Art der Beanspruchung unterschiedlich ausgeprägt.

### 2.3.2 Art der Belastung

Die Tragfähigkeit eines Biegeträgers hängt von der Anzahl der Schwachstellen in den hochbeanspruchten Zonen und deren Festigkeit ab. Je nach Art der Belastung (z.B. Einzellasten in Feldmitte oder in den Drittelpunkten eines Einfeldträgers) wird aber ein mehr oder weniger großer Bereich des Trägers einer hohen Beanspruchung ausgesetzt, so daß - ähnlich wie beim Trägervolumen - auch die Größe des Bereiches hoher Beanspruchung das Tragvermögen eines BSH-Trägers mitbestimmt.

## 2.4 Das Simulationsmodell von FOSCHI und BARRETT

Im Jahre 1980 veröffentlichten FOSCHI und BARRETT ein Simulationsmodell zur Berechnung der Biegefestigkeit von BSH-Trägern. Mit Hilfe dieses Modells kann der Einfluß des Trägervolumens, der Art der Belastung und des Trägeraufbaues aus Lamellen

unterschiedlicher Güte abgeschätzt werden. Die Festigkeit und Lage der Keilzinkungen wurde nicht berücksichtigt, weil den Autoren hierüber nicht genügend Informationsmaterial zur Verfügung stand. Als Eingangsdaten für dieses Modell werden Ergebnisse von Zugversuchen mit Brettern unterschiedlicher Güteklasse und Angaben über die Verteilung von Ästen innerhalb jeder Güteklasse benötigt.

Das Simulationsmodell ist nach dem Prinzip der Finiten Elemente (FE) aufgebaut. Der Träger wird dabei in kleine "Zellen" unterteilt, die alle – entsprechend den zugeordneten Materialeigenschaften wie Rohdichte oder Astgröße – verschiedene Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften besitzen. Die Zuordnung der Materialeigenschaften erfolgt rein zufällig auf der Grundlage der für die jeweilige Güteklasse bekannten oder vorgegebenen Verteilungsfunktionen. Der Einfluß der Astgröße auf die Zugfestigkeit einer "Zelle" wird mit Hilfe von Reißbeiwerten abgeschätzt, die aus der Sprödbruchtheorie übernommen wurden. Hierbei wird zwischen Mitten- und Randast unterschieden. Die freien Konstanten in diesen Reißformeln wurden an vorliegende Ergebnisse von Zugversuchen angepaßt. Der Laminierungseffekt (siehe Abschnitt 2.2.2) wird auf die Behinderung der seitlichen Durchbiegung eines Brettes unter Zugbeanspruchung durch die angrenzenden Lamellen zurückgeführt. Die Größe dieses Laminierungsfaktors wird mit Hilfe einer theoretischen Gleichung abgeschätzt, deren Konstanten wiederum mittels Kalibrierung bestimmt wurden.

Für den Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit werden zweiparametrische Weibull-Verteilungen angenommen, aus denen jeder Zelle zufällige Werte zugewiesen werden.

Die Berechnung der Spannungsverteilung im Biegeträger bei gegebener Belastung erfolgt mit Hilfe eines linearen FE-Programms. Zur Bestimmung der Biegefestigkeit wird das Prinzip

des schwächsten Gliedes ("weakest link failure") herangezogen, nach dem die Tragfähigkeit des Biegeträgers dann erreicht ist, wenn die Festigkeit der schwächsten "Zelle" überschritten wird.

Das Simulationsmodell von FOSCHI und BARRETT bildete die Grundlage für die im Rahmen dieses Forschungsauftrages entwickelten Programme (siehe Abschnitt 3). Nicht übernommen wurden jedoch einige Beziehungen, Annahmen und Vereinfachungen, von denen die wichtigsten im folgenden kurz erläutert werden:

- Häufigkeitsverteilungen von Zug- und Biegeversuchen besitzen oft eine "positive Schiefe", d.h. die Verteilungen weisen einen längeren Arm in Richtung der hohen Festigkeitswerte auf. Diese Verteilungen können am besten mit einer Log-Normalverteilung oder der dreiparametrischen Weibull-Verteilung dargestellt werden. Die zweiparametrische Weibull-Verteilung besitzt eine positive Schiefe erst ab einem Variationskoeffizienten von mehr als 30 %, so daß bei den im Holzbau üblichen Streuungen diese Verteilung als ungeeignet angesehen wurde. Die sehr einfache, mathematische Handhabung dieser Verteilung mag FOSCHI und BARRETT dazu bewogen haben, sie dennoch anzuwenden.
- Der Rohdichteverlauf entlang eines Brettes ist stark autokorreliert, d.h. die Rohdichten zweier hintereinanderliegender "Zellen" unterscheiden sich kaum voneinander. Hierauf wurde schon von KERSKEN-BRADLEY und MAIER (1977) sowie GLOS (1981) hingewiesen. Eine rein zufällige Zuordnung der Zellen-Rohdichten anhand der zugehörigen Verteilung für die Holzart insgesamt ist somit nicht realistisch.
- Im Simulationsmodell von FOSCHI und BARRETT werden nur Angaben über die Zugfestigkeit von Brettlamellen benötigt, nicht aber über die Druckfestigkeit. Berücksichtigt man

aber nicht die Festigkeit der Druckzone des BSH-Trägers, dann setzt man voraus, daß die Biegefestigkeit von den gedrückten Lamellen völlig unbeeinflußt bleibt. Da aber der Ausfall einiger gedrückter "Zellen" und die daraus resultierende nichtlineare Spannungsverteilung über die Querschnittshöhe - siehe u.a. MALHOTRA/BAZAN (1980) - eine Spannungserhöhung in den Zuglamellen bewirkt stellt die Vernachlässigung der Druckzone eine Vereinfachung dar, die besonders bei Trägern hoher Festigkeit zu ungenauer Beurteilung der Tragfähigkeit führen muß.

- Das Bruchkriterium des "schwächsten Gliedes" sollte nicht uneingeschränkt auf Holzträger übertragen werden. Die Last kann in manchen Fällen nach dem Versagen eines kleinen Trägerbereiches noch gesteigert werden. Das ist wegen örtlicher Kraftumlagerungen möglich. Für das Rechenmodell bedeutet dies, daß nach dem Ausfall einer "Zelle" ihr Anteil von den angrenzenden "Zellen" übernommen wird. Eine solche Möglichkeit der Kraftumlagerung wird im Simulationsmodell von FOSCHI und BARRETT nicht berücksichtigt.

### 3 Entwicklung eines Rechenmodells

#### 3.1 Simulationsprogramm

Das im folgenden beschriebene Simulationsprogramm ermöglicht es, die Herstellung eines BSH-Trägers mit vorgegebenem Trägeraufbau nachzuvollziehen. Auf diese Weise können beliebig viele Träger simuliert werden, die zwar alle nach den gleichen Kriterien aufgebaut sind, aber entsprechend den Streuungen der Werkstoffkennwerte verschiedene Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften besitzen.

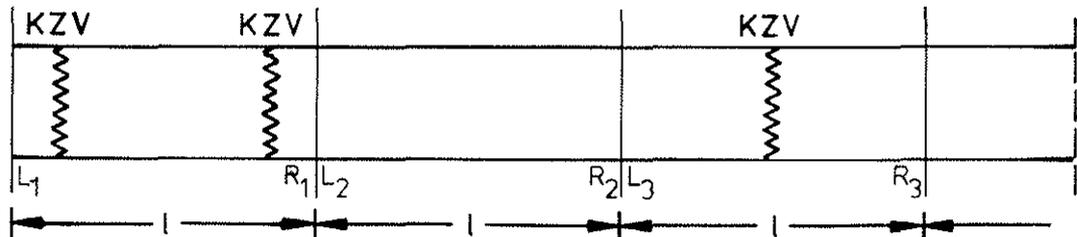
Jede Lamelle des Trägers wird in einzelne Brettabschnitte, nachfolgend als "Zellen" bezeichnet, unterteilt. Als Zellenlänge wurden 150 mm gewählt, auch deshalb, weil in DIN 4074 und den ECE-Regeln zur Bestimmung der Ästigkeit Einzeläste innerhalb eines Bereiches von 150 mm zusammengefaßt werden.

Ist die Lage der Keilzinkenverbindungen in einer Lamelle bekannt und sind ferner die Rohdichte und die Ästigkeit jeder Zelle dieser Lamelle vorgegeben, dann beschränkt sich die Simulation auf die Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Festigkeit jeder Zelle nach dem in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Verfahren. Da diese Eingangsgrößen aber im allgemeinen nicht bekannt sind, werden die Lage der Keilzinkenstöße und die Holzeigenschaften jeder "Zelle" simuliert.

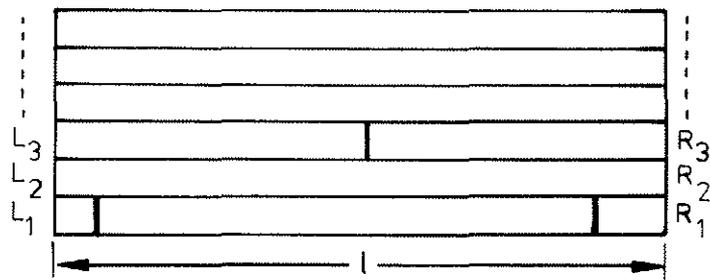
##### 3.1.1 Simulation des Trägeraufbaus und der Holzeigenschaften

Bei einer solchen Simulation muß die Güteklasse der einzelnen Lamellen bekannt sein, da beispielsweise die Verteilung der Ästigkeit von Güteklasse zu Güteklasse verschieden ist. Übereinander liegende Lamellen gleicher Güte werden nach folgendem

System aus der produzierten "Endloslamelle" herausgeschnitten und in den Träger eingebaut (Bild 3.1):



KZV= Keilzinkenverbindung



**Bild 3.1:** Prinzip des Aufbaus eines BSH-Trägers aus einer "Endloslamelle "

Mit Hilfe eines solchen Schnittmusters ist somit auch die Lage der Keilzinkenverbindungen im Träger festgelegt. Zur Simulation einer Endloslamelle sind aber nun Angaben über die in den Leimbaubetrieben üblichen Brettängen erforderlich. LARSEN (1980) gibt die statistische Verteilung von gebräuchlichen Brettängen für zwei verschiedene Brettbreiten aufgrund von Erhebungen bei dänischen Holzbaubetrieben an. Er weist dabei darauf hin, daß Längen unter 2,40 m und über 6,30 m kaum vorkommen. Die charakteristischen Werte dieser Verteilungen sind in Tabelle 3.1 (Anlage 1) angegeben. Zur Simulation einer Endloslamelle werden aus der Verteilung der Brettängen Bretter zufällig ausgewählt und aneinandergereiht. Anschließend erfolgt für jede Zelle die

Zuordnung der wichtigsten Werkstoffkennwerte und zwar des Feuchtigkeitsgehalts, der Rohdichte und der Ästigkeit. Hierbei kann der Holzfeuchtigkeitsgehalt in hinreichender Näherung für alle Zellen als konstant angesehen werden. Aus einer repräsentativen Rohdichteverteilung wird dann beispielsweise mit den Werten für die Darr-Rohdichte nach GLOS (siehe Tabelle 3.1), jedem Brett ein Wert zugeordnet, der für sämtliche Zellen dieses Brettes als gleichbleibend angesehen wird. Schließlich wird aus einer für die jeweilige Güteklasse oder das verwendete Brettangebot repräsentativen Häufigkeitsverteilung für die Ästigkeit für jede Zelle eine zufällige Ästigkeit ausgewählt. Die Methoden für die Zuordnung dieser Werkstoffkennwerte sind in Abschnitt 7 (Simulationen) näher erläutert.

3.1.2 Berechnung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften

GLOS (1978, 1980, 1982) hat das Tragverhalten von 137,5 mm langen Brettabschnitten im Hinblick auf ihre Werkstoffeigenschaften untersucht. Mit Hilfe der schrittweisen Regression wählte er aus sämtlichen Einflußgrößen diejenigen Parameter heraus, deren Einfluß als signifikant bezeichnet werden kann. Danach wird das Tragverhalten einer "Zelle" unter Zugbeanspruchung vereinfacht nur von der Rohdichte und der Ästigkeit bestimmt, während bei einer Druckbeanspruchung auch der Feuchtigkeitsgehalt zusätzlich beachtet werden muß. Als Maß für die Rohdichte wurde hierbei die Darr-Rohdichte nach DIN 52 182 verwendet, während die Ästigkeit mit der auf den Brettquerschnitt projizierten Astfläche, dem sog. KAR-Wert (Knot Area Ratio) nach den Richtlinien der Economic Commission for Europe (ECE) (1982) beschrieben wird. Bei den Versuchen von GLOS wurde der "Zelle" ein ebener Verformungszustand aufgeprägt, um die Beanspruchung eines Brettabschnittes im BSH-Träger möglichst wirklichkeitsnah zu erfassen. Durch die Behinderung der seitlichen Verformungen

(s. auch Laminierungseffekt, Abschnitt 2.2.2) spielte die Lage der Äste eine untergeordnete Rolle, so daß sich die Angabe des einfachen KAR-Wertes als ausreichend erwies.

Die Gleichungen, die man mit Hilfe einer linearen Regression erhält, haben die Form

$$Y = a_1 \cdot X_1 + b_1 \cdot X_2 + c_1 + S_1(0; s_1). \quad (3.1)$$

Hierbei bezeichnet  $Y$  die abhängige Variable (z.B. den Zug-Elastizitätsmodul), während  $X_1$  und  $X_2$  die unabhängigen Variablen (z.B. die Darr-Rohdichte und die Ästigkeit) darstellen.  $a_1$ ,  $b_1$  und  $c_1$  sind Konstanten, die anhand der Versuchswerte zu bestimmen sind.  $S_1$  bezeichnet die sog. Reststreuung (Residuum) von  $Y$ , die auch nach Vorgabe von  $X_1$  und  $X_2$  noch verbleibt. Diese Reststreuung ist normalverteilt mit dem Mittelwert  $\bar{x} = 0$  und der Standardabweichung  $s_1$  und ist für alle Werte  $X_1$  und  $X_2$  gleich groß. Die im Holzbau mehrfach festgestellte Zunahme der Streuung mit wachsenden Variablen  $X_1$  und  $X_2$  kann durch Gl. (3.1) nicht erfaßt werden. Geeigneter ist daher folgende Beziehung:

$$\ln(Y) = a_2 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + c_2 + S_2(0; s_2) \quad (3.2)$$

Die Gl. (3.2) bewirkt zwar keine Steigerung der Aussagekraft (d.h. der Korrelationskoeffizient bleibt der gleiche wie bei (3.1)), sie berücksichtigt aber, daß z.B. die Streuung des Zug-Elastizitätsmoduls mit wachsender Rohdichte oder Ästigkeit zunimmt. Aus diesem Grunde wurden die in Tabelle 3.2 (Anlage 2) angegebenen logarithmischen Regressionsgleichungen gewählt.

Bei den Versuchen mit Keilzinkenverbindungen (siehe auch Abschnitt 4) stellte sich heraus, daß der Elastizitätsmodul und die Festigkeit am besten mit der niedrigeren der beiden Rohdichten

der verbundenen Bretter ausgedrückt werden können. In den Regressionsgleichungen für keilgezinkte Brettabschnitte ("Zellen") wird für  $\rho_c$  daher stets der kleinere Wert der Rohdichte der beiden miteinander verbundenen Bretter eingesetzt.

Zu jedem mit Hilfe der Regressionsgleichungen berechneten Wert wird ein zufällig gewählter Wert aus der zugehörigen Reststreuung hinzugezählt. Hierdurch wird berücksichtigt, daß "Zellen" mit gleicher Darr-Rohdichte und gleichem KAR-Wert unterschiedliche Elastizitätsmoduln und Festigkeiten besitzen können.

Ist der Elastizitätsmodul  $E$  jeder "Zelle" einer Lamelle bekannt, so wird der "zusammengesetzte" Elastizitätsmodul  $E_{sim}$  dieser Lamelle berechnet. Unter Annahme einer reinen Zug- bzw. Druckbeanspruchung ergibt sich mit den Bezeichnungen nach Bild 3.2:

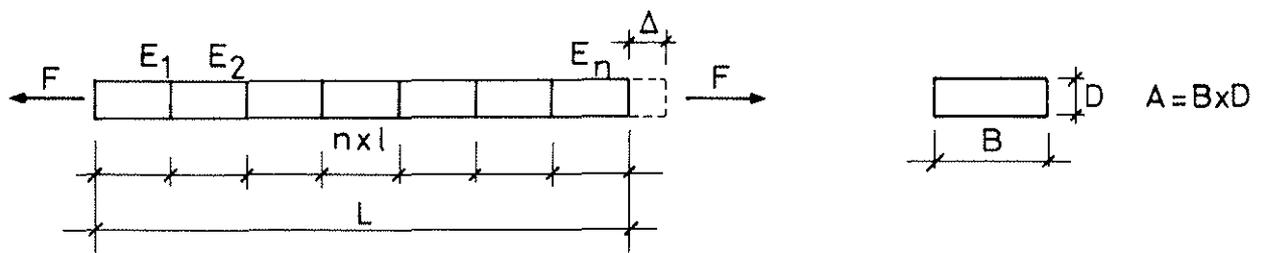


Bild 3.2: Zur Berechnung des "zusammengesetzten" Elastizitätsmoduls  $E_{sim}$

$$\Delta = \frac{F \cdot L}{E_{sim} \cdot A} = \frac{F \cdot n \cdot l}{A} \cdot \frac{1}{E_{sim}} = \sum \Delta_i \quad (3.3a)$$

$$\Delta_i = \frac{F \cdot l}{A} \cdot \frac{1}{E_i} \quad (3.3b)$$

$$E_{sim} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i}} \quad (3.4)$$

Ist der tatsächliche Elastizitätsmodul der Lamelle  $E_{soll}$  bekannt, so wird  $E_{sim}$  mit diesem Wert verglichen. Sind beide Werte innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches gleich, so kann mit der Simulation der nächsten Lamelle fortgefahren werden. Ist dies nicht der Fall, dann wird die Simulation dieser Lamelle wiederholt. Sind  $E_{sim}$  und  $E_{soll}$  auch nach 50 Simulationen nicht gleich groß, so wird beim nächsten Durchlauf der Elastizitätsmodul  $E_i$  jeder Zelle mit einem Faktor multipliziert, der dem Verhältnis von  $E_{soll}$  zum Mittelwert  $\bar{E}_{sim}$  der 50 Simulationen entspricht. Nach Abschluß der Simulation sind von jeder Zelle der Druck- bzw. Zug-Elastizitätsmodul und die Druck- bzw. Zugfestigkeit vorgegeben.

### 3.1.3 Programmablauf

Die wesentlichen Schritte des Simulationsprogrammes sind in Bild 3.3 in Form eines Flußdiagramms dargestellt. Nachstehend ist der Programmablauf erläutert:

① Start

Speicherplatz und Rechenzeit sind gering, so daß dies-  
bezüglich keine Einschränkungen zu machen sind.

② Eingabe des Trägeraufbaus

Es werden angegeben:

- die Anzahl der Zellen pro Lamelle NZL,

- die Anzahl der Lamellen NL,
- die Güteklasse jeder Lamelle.

Wahlweise können angegeben werden:

- die Lage einer oder mehrerer Keilzinkenverbindungen (KZV) innerhalb einer Lamelle. Erfolgt diese Angabe nicht, so wird die betreffende Lamelle als aus einem simulierten Endlosbrett "herausgeschnitten" angenommen,
- die Rohdichte eines Brettes,
- der KAR-Wert einer Zelle,
- gegebenenfalls der bekannte Elastizitätsmodul  $E_{\text{soll}}$  einer Lamelle

### ③ Zuordnung der Werkstoffkennwerte

Sind die Rohdichte eines Brettes und/oder der KAR-Wert einer "Zelle" nicht von vornherein bekannt, dann wird eine Simulation dieser Werkstoffkennwerte erforderlich:

- aus der statistischen Verteilung der Rohdichte wird ein zufälliger Wert für die Rohdichte gewählt, der dann j e d e r Zelle dieses Brettes zugewiesen wird,
- aus der zugehörigen statistischen Verteilung der Ästigkeit wird jeder "Zelle" ein zufälliger KAR-Wert zugewiesen.

### ④ Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Festigkeit

Diese erfolgt für jede Zelle unter Berücksichtigung der Lage im Träger (Druck- oder Zugzone) mit den in Tabelle 3.2 angegebenen Regressionsgleichungen.

⑤ Ende einer Lamelle

Ist das Lamellenende erreicht, so wird mit der Berechnung des zusammengesetzten Elastizitätsmoduls  $E_{sim}$  fortgefahren, wenn nicht, erfolgt die Simulation der nächsten Zelle.

⑥ Berechnung von  $E_{sim}$

Sie erfolgt mit Hilfe der Gl. (3.4)

⑦ Vorgegebener oder bekannter Elastizitätsmodul

Ist der Elastizitätsmodul der Lamelle bekannt (siehe ②), dann wird mit ⑧ fortgefahren, andernfalls mit ⑨.

⑧ Übereinstimmung zwischen  $E_{sim}$  und  $E_{soll}$

Sind  $E_{sim}$  und  $E_{soll}$  innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches (z.B.  $\pm 5\%$ ) gleich groß, so wird mit ⑨ fortgefahren; andernfalls wird die Simulation der betreffenden Lamelle wiederholt.

⑨ Ende des Trägers

Ist das Trägerende erreicht, so ist die Simulation beendet, andernfalls wird die Rechnung mit der nächsten Lamelle fortgesetzt.

⑩ Ende

Elastizitätsmodul und Festigkeit jeder Zelle werden gespeichert.

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥
- ⑦
- ⑧
- ⑨
- ⑩

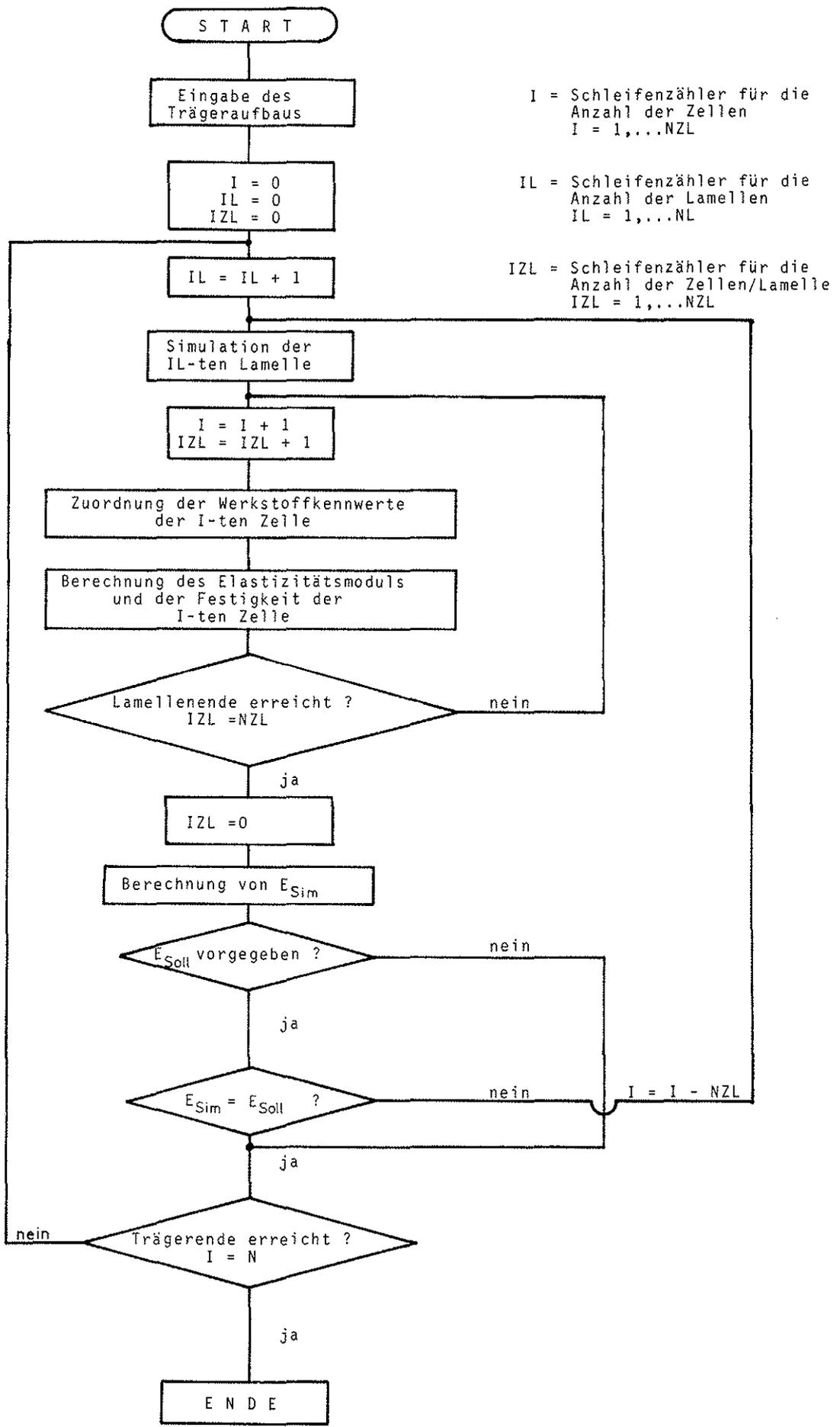


Bild 3.3 : Flußdiagramm des Simulationsprogrammes

## 3.2 Finite Element-Programm

### 3.2.1 Allgemeines

Die Finite Elemente-Methode (FEM) nähert Lösungen für Probleme der Kontinuumsmechanik durch Tragwerke an, die aus geeigneten finiten (endlichen) Elementen bestehen. Diese Elemente werden durch eine endliche Anzahl von Knotenpunkten miteinander verbunden. Für die vorliegende Problemstellung wurde aus folgenden Überlegungen ein neues Finite Element-Programm entwickelt:

1. Da im Rahmen nationaler und internationaler Zusammenarbeit auch der Austausch von Software wichtig ist, sollte das Programm möglichst wenig an das Software-Angebot des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe angebunden sein.
2. Das Programm sollte folgenden einfachen "Bruchmechanismus" berücksichtigen: bei Erreichen der Zugfestigkeit einer Zelle soll eine neue Berechnung durchgeführt werden, bei der die "ausgefallene" Zelle keine Kräfte mehr aufnehmen kann.
3. Im Druckbereich der BSH-Träger sollte das nichtlineare Werkstoffverhalten des Holzes berücksichtigt werden.

### 3.2.2 Programmablauf

Die wesentlichen Schritte des Finite Elemente-Programmes sind in Bild 3.4 in Form eines Flußdiagramms dargestellt. Nachstehend ist der Programmablauf erläutert:

#### ① Start

Es muß gewährleistet sein, daß ein ausreichender Speicherplatz im Rechner vorhanden ist. Zum Abspeichern von Daten während des Programmablaufes müssen etwa das 100-fache der Knotenanzahl an Speicherplätzen zur Verfügung stehen.

② Eingabe der Trägergeometrie und der Werkstoffkennwerte

Zunächst erfolgt die Eingabe der gesamten Anzahl der Zellen und der Knoten. Aus der Anzahl der Zellen in X-Richtung (Trägerlängsrichtung) und Y-Richtung und den Abmessungen einer Zelle wird der Trägeraufbau generiert. Fehlt die Angabe einer Trägerbreite wird mit der "Einheitsbreite" 1 gerechnet. Jeder Zelle können folgende Werkstoffkennwerte in beliebiger Größe zugewiesen werden: Elastizitätsmodul parallel ( $E_{||}$ ) und rechtwinklig ( $E_{\perp}$ ) zur Faserrichtung des Holzes, Schubmodul ( $G$ ), Querdehnungszahl ( $\nu_1$ ), Zugfestigkeit ( $\beta_Z$ ), Druckfestigkeit ( $\beta_D$ ). Verschiedene Auflagerbedingungen werden durch Angabe von in X- und/oder Y-Richtung unverschieblichen Knotenpunkten erreicht.

③ Eingabe des Lastvektors

Der Lastvektor  $|F|^0$  setzt sich aus den an jedem Knoten wirkenden Kräften  $F_{ix}^0$  (X-Richtung) und  $F_{iy}^0$  (Y-Richtung) zusammen. Da diese Kräfte nur an den Knotenpunkten mit äußeren Belastungen von Null verschieden sind, genügt die Angabe dieser Knoten mit der entsprechenden Belastung in X-oder/und Y-Richtung. Die so angegebene Belastung stellt die erste Laststufe dar, mit der der Träger berechnet wird. Als Schrittweite für die Lastzunahme im "nichtlinearen Bereich" der Berechnungen wird 10 % dieser Laststufe gewählt.

④ Aufstellen der Gesamtsteifigkeitsmatrix

Für jede Zelle (4-Knoten-Element) wird die Elementsteifigkeitsmatrix  $|K|_i = \int |B|^T \cdot |D| \cdot |B| \cdot dx \, dy \, dz$  aufgestellt. Die Glieder dieser Matrix werden in die Gesamtsteifigkeitsmatrix  $|K|$  eingebaut. Dabei werden jedoch nur die von Null verschiedenen Glieder gespeichert. Eine zweite,

gleichzeitig gebildete Matrix gibt die Lage dieser Glieder in der Gesamtsteifigkeitsmatrix an. Dieses Verfahren, das u.a. von ZIENKIEWICZ (1975) ausführlich erläutert wurde, reduziert den erforderlichen Speicherplatzbedarf erheblich, beispielsweise bei 500 Knoten auf 3,6 % des ursprünglichen Bedarfs.

⑤ Berechnung des Knotenverschiebungsvektors

Durch Lösen des Gleichungssystems  $|K| \cdot |V|^0 = |F|^0$  wird der Knotenverschiebungsvektor  $|V|^0$  berechnet, dessen Glieder  $V_i$  die Verschiebungen jedes Knotens in X- und Y-Richtung angeben. Als Lösungsverfahren wurde das "Verfahren der konjugierten Gradienten" gewählt, das u.a. von ZURMÜHL (1958) beschrieben wurde. Dieses Iterationsverfahren arbeitet stets an der ursprünglichen Matrix, so daß während des Lösungsvorganges keine zusätzlichen Glieder entstehen, die den erforderlichen Speicherplatzbedarf erhöhen würden.

⑥ Berechnung des Spannungsvektors

Nach der Beziehung  $|\sigma|^0 = |D| \cdot |B| \cdot |V|^0$  wird aus den Knotenpunktverschiebungen  $|V|^0$  der Spannungsvektor  $|\sigma|^0$  ermittelt, der für jede Zelle die Längs-, Quer- und Schubspannungen beinhaltet.

⑦ Auftreten des ersten Versagens

Die Berechnung erfolgt bis zu diesem Schritt mit einer gewählten Anfangsbelastung  $|F|^0$ . Da bis zum Auftreten des ersten Versagens einer Zelle (Zug- oder Druckversagen) von einer linearen Arbeitslinie ausgegangen wird, können weitere Laststufen durch einfache Multiplikation des Last-, Verschiebungs- und Spannungsvektors mit einer skalaren Größe erreicht werden.

⑧ Zugfestigkeit einer Zelle erreicht

Bei Erreichen der Zugfestigkeit einer Zelle erfolgt die Abfrage, ob die jetzt erreichte Laststufe größer als eine bereits vorher erreichte Laststufe ist. Andernfalls wird davon ausgegangen, daß der Träger durch Kraftumlagerung aufreißt (Rißfortschritt) und somit das endgültige Versagen eingeleitet ist. Die Tragfähigkeit des Trägers gilt unter dieser Bedingung als erreicht, und die Rechnung wird abgeschlossen. Liegt die erreichte Laststufe aber noch höher als die vorangegangenen Laststufen, dann werden die Werkstoffkennwerte der ausgefallenen Zelle zu Null gesetzt, so daß an der entsprechenden Stelle im Träger ein Riß (bzw. ein Loch) entsteht. Die Steifigkeitsmatrix wird mit diesen Angaben neu formuliert und die Berechnung des Trägers erfolgt erneut mit der Anfangsbelastung.

⑨ Druckfestigkeit einer Zelle erreicht

Ist die Druckfestigkeit in einer Zelle erreicht, dann wird die vorhandene Steifigkeitsmatrix derart korrigiert, daß die betroffene Zelle keine zusätzlichen Kräfte in Längsrichtung mehr aufnehmen kann. Man geht also bis zum Erreichen der Druckfestigkeit von einer ideal elastischen Arbeitslinie und danach von einem ideal plastischen Werkstoffverhalten aus. Mit der korrigierten Steifigkeitsmatrix  $|\bar{K}|$  wird erneut ein Knotenverschiebungsvektor  $|\bar{V}|$  ermittelt. Als Belastung wird 10 % der Anfangsbelastung gewählt. Durch die Größe der Anfangsbelastung kann also die Schrittweite im nichtlinearen Bereich der statischen Berechnung des Trägers gewählt werden. Aus dem errechneten Knotenverschiebungsvektor wird nach der bekannten Beziehung der Spannungsvektor  $|\bar{\sigma}|$  ermittelt.

Nun ergibt sich die nächste Laststufe durch Addition folgender zweier Lastfälle:

Die bereits vorher erreichte Laststufe wird um 10 % der Anfangsbelastung erhöht. Die zugehörigen Spannungen erhält man durch Addition von  $|\sigma|^1$  und  $|\bar{\sigma}|$ , d.h. zu den bereits erreichten Spannungen wird ein Lastfall addiert, durch den das plastifizierte Element keine Kräfte mehr aufgenommen hat.

Weitere Laststufen können durch fortgesetzte Additionen erreicht werden. Dieses Verfahren wird solange fortgesetzt bis eine weitere Zelle seine Zug- oder Druckfestigkeit erreicht hat. Dann erfolgt ein Rücksprung nach ⑧ oder ⑨.

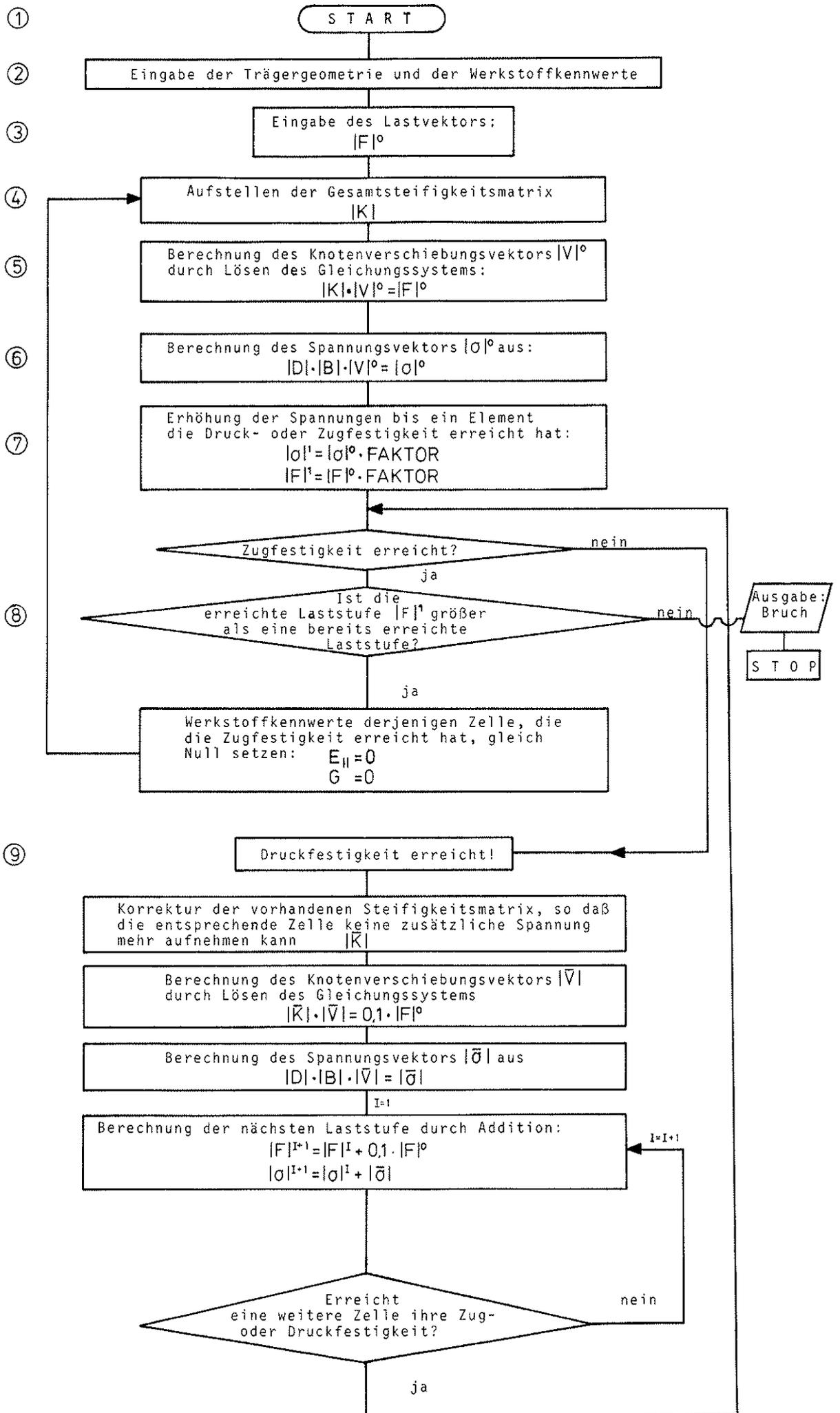


Bild 3.4: Flußdiagramm für das Finite Elemente - Programm

#### 4 Zugversuche an keilgezinkten Brettlamellen aus Fichte (picea abies)

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Zugversuche an keilgezinkten Brettlamellen wurden wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen von HEIMESHOFF/GLÓS (1980) mit der am Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Holzbau der Technischen Universität München vorhandenen Versuchsvorrichtung durchgeführt (HEIMESHOFF/GLÓS (1983)).

##### 4.1 Versuchsdurchführung

###### 4.1.1 Probenahme, Versuchsumfang, Form und Abmessungen der Versuchskörper

Das Versuchsmaterial stellt eine repräsentative Stichprobe der in der deutschen Holzbauindustrie hergestellten Keilzinkenverbindungen dar.

Die Probenahme erfolgte in der Zeit vom 06.09.1982 bis 17.09.1982 bei folgenden 18 Holzleimbaubetrieben:

Karl Achberger GmbH & Co.KG, Bobingen  
Alfred Bergstedt Holzbau GmbH, Verden  
Christian Burgbacher GmbH & Co., Trossingen  
W. u. J. Derix GmbH & Co., Niederkrüchten  
HW Fritz KG, Tübingen  
Fürst zu Fürstenberg KG, Hüfingen  
B. Grossmann KG, Rosenheim  
Karl Härle KG, Biberach  
Anton Hess KG, Miltenberg  
Wilhelm Hobein GmbH, Bochum  
Hüttemann Holz GmbH & Co.KG, Olsberg  
Kirschner GmbH & Co.KG, Dülmen  
Heinrich Kunstin & Sohn, Hörden

Losberger Holzleimbau GmbH + Co., Eppingen  
Poppensieker Baugesellschaft mbH, Westerkappeln  
Schaffitzel Holzindustrie GmbH, Schwäbisch Hall  
F. Timmermann Holzleimbau, Kamen  
Lothar Wiedmann, Rheinfelden-Minseln

Den Firmen sei für die kostenlose Bereitstellung des Versuchsmaterials auch an dieser Stelle gedankt.

Bei zwischen 7 und 20 entnommenen Proben je Firma ergaben sich insgesamt 239 Einzelproben. Die Keilzinkenform sämtlicher Proben entsprach dem Profil I-20 DIN 68 140. Die Abmessungen der Lamellen waren unterschiedlich. Die Anzahl der Einzelproben und ihre Querschnittsabmessungen gehen aus Tabelle 4.1 (Anlage 3) hervor. Bei einer Einspannlänge von etwa 330 mm auf jeder Seite war bei jedem Zugversuch eine freie Prüflänge von 440 mm vorhanden.

#### 4.1.2 Bestimmung der Rohdichte und der Holzfeuchtigkeit

An einem 20 mm breiten Brettabschnitt, der den gesamten Brettquerschnitt erfaßte, wurde die Darr-Rohdichte  $\rho_0$  nach DIN 52 182 bestimmt. An jedem Prüfkörper wurde die Rohdichte beider durch die Keilzinkung verbundener Brettlamellen ermittelt.

An den gleichen Brettabschnitten wurde auch der Feuchtigkeitsgehalt  $u$  zum Zeitpunkt der Prüfung nach DIN 52 183 festgestellt.

#### 4.1.3 Bestimmung der Zugfestigkeit und des Zug-Elastizitätsmoduls

Die Versuchsbedingungen waren bestmöglichst den Bedingungen anzupassen, denen eine Brettlamelle im zugbeanspruchten Teil eines BSH-Trägers ausgesetzt ist. Deshalb wurde dem Prüfkörper

eine Verschiebung in Form eines ebenen Verformungszustandes aufgeprägt. Bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 3 ‰ je Minute wurde die Bruchkraft i.a. nach  $1,0 \pm 0,3$  min erreicht.

Die Zugfestigkeit  $\beta_Z^{KZV}$  wurde ohne Berücksichtigung des Ver-  
schwächungsgrades im Zinkengrund auf den Bruttoquerschnitt  
bezogen:

$$\beta_Z^{KZV} = \frac{F_u}{B \cdot D} \quad |N/mm^2| \quad (4.1)$$

mit  $F_u$  = aufnehmbare Zugkraft in N

$B$  = Breite des Prüfkörpers in mm

$D$  = Dicke des Prüfkörpers in mm

Die Kraft wurde mit einer Anzeigegenauigkeit von  $\pm 100$  N ge-  
messen. Die Brettbreiten bzw. Brettdicken wurden mit einer elek-  
trischen Schieblehre auf 0,1 mm bzw. 0,025 mm genau bestimmt.

Der Zug-Elastizitätsmodul wurde als Tangentenmodul im ersten  
Drittel des Spannungs-Dehnungs-Diagramms definiert. Die zuge-  
hörige Dehnung wurde als arithmetischer Mittelwert aus drei  
Meßstellen festgelegt und auf 1/100 ‰ genau berechnet.

#### 4.2 Ergebnis der Versuche

In Bild 4.1 (Anlage 4) sind die Zugfestigkeiten getrennt nach  
den 18 Herstellwerken dargestellt. Die Streuung der Versuchswerte  
innerhalb der einzelnen Firmen ist so groß, daß im Vergleich  
dazu die Variation zwischen den Betrieben vernachlässigt werden  
kann. Sämtliche 239 Versuche wurden somit zu einer Stichprobe  
zusammengefaßt und ausgewertet. Der mittlere Feuchtigkeits-  
gehalt zum Zeitpunkt der Prüfung betrug 10,8 ‰ bei einer Stan-  
dardabweichung von 0,9 ‰.

Die ermittelten Rohdichten entsprachen der in Tabelle 3.1 angegebenen Verteilung.

Die charakteristischen Werte für den Zug-Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit sind ebenfalls in Tabelle 3.1 enthalten.

Bei den 239 Prüfkörpern trat der Bruch in 214 Fällen ausschließlich oder überwiegend in der Keilzinkenverbindung ein, in 25 Fällen ergaben sich reine Holzbrüche außerhalb der Keilzinkenstöße, also ohne ursächlichen Zusammenhang mit der Keilzinkenverbindung. Dabei trat der Bruch in der Regel in der Lamelle mit der niedrigeren Rohdichte ein. Zur Versuchsauswertung wurden sämtliche Versuche unabhängig von der Versagensart herangezogen.

#### 4.3 Auswertung der Versuche

Wie aus Tabelle 3.1 ersichtlich, wird der Zug-Elastizitätsmodul einer Lamelle durch eine Keilzinkenverbindung praktisch nicht beeinträchtigt; er entspricht dem einer fehlerfreien Brettlamelle. Die mittlere Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung ist jedoch erheblich niedriger als die mittlere Zugfestigkeit nicht keilgezinkter Brettlamellen. Nach den in Tabelle 3.2 angegebenen Regressionsgleichungen entspricht die mittlere Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung der Zugfestigkeit einer "Zelle", die bei  $\rho_0 = 0,43 \text{ g/cm}^3$  einen KAR-Wert von etwa 0,32 aufweist.

Die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Rohdichte ist erwartungsgemäß schwächer ausgeprägt als bei nicht keilgezinkten Brettlamellen. Auf der Grundlage der Versuche wurde folgende Regressionsgleichung ermittelt:

$$\ln \{E_Z^{KZV}\} = 8,459 + 2,517 \cdot \rho_0 \quad (4.2)$$

Hierbei ist für  $\rho_0$  die kleinere der Darr-Rohdichten der beiden miteinander verbundenen Bretter einzusetzen. Der Korrelationskoeffizient betrug  $r = 0,61$  bei einer Standardabweichung der Reststreuung von  $s = 0,142$ .

Auch der Einfluß des Zug-Elastizitätsmoduls auf die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung ist geringer als bei nicht keilgezinkten Brett lamellen (siehe auch Abschnitt 2.1.2). Aufgrund der 239 Versuche wurde folgende Regressionsgleichung berechnet:

$$\ln (\beta_Z^{KZV}) = 2,716 + 5,905 \cdot 10^{-5} \cdot E_Z^{KZV} \quad (4.3)$$

Der Korrelationskoeffizient betrug  $r = 0,52$  bei einer Standardabweichung der Reststreuung von  $s = 0,231$ . Gl. (4.3) ist zusammen mit den Versuchswerten in Bild 4.2 (Anlage 5) dargestellt.

## 5 Tragverhalten einer Keilzinkenverbindung im BSH-Träger

An zwei BSH-Trägern wurde in Vorversuchen das Tragverhalten einer Keilzinkenverbindung im Biegeträger mit Hilfe von Dehnungs-Meßstreifen (DMS) untersucht. Die DMS mit einer Meßlänge von  $l_M = 20$  mm wurden im Bereich von planmäßig eingebauten Keilzinkenverbindungen angeordnet. Der Aufbau der Träger und die Lage der DMS sind in Bild 5.1 bis 5.4 dargestellt.

Die Bruchlasten betragen  $F_U = 127,1$  kN bei Versuch 1 und  $F_U = 90,2$  kN bei Versuch 2. Dies entsprach einer rechnerischen Biegerandspannung von  $\sigma_R = 42,09$  N/mm<sup>2</sup> bzw.  $\sigma_R = 30,07$  N/mm<sup>2</sup>.

In Bild 5.5 bis 5.8 sind die Bruchbilder und Kraftdehnungsdiagramme von jeweils zwei Meßstellen dargestellt.

In Versuch 1 versagte der Träger zuerst in einer Keilzinkenverbindung der zweiten Lamelle von unten. Ein Ast, der unmittelbar unter dieser Keilzinkenverbindung lag, bewirkte einen glatten Durchbruch an dieser Stelle und ein anschließendes Abschälen der beiden unteren Lamellen. In Versuch 2 ging das Versagen von einer Keilzinkenverbindung der untersten Lamelle aus. Nach Ausfall dieser "Zelle" wurde bei der gleichen Last die Tragfähigkeit einer nahegelegenen Keilzinkenverbindung in der nächsten Lamelle überschritten. Das Versagen der Träger trat in beiden Fällen plötzlich ein, ohne daß anschließend noch einmal eine Laststeigerung möglich war. Eine Kraftumlagerung infolge eines vorzeitigen Ausfalls einer "Zelle" war daher nicht feststellbar.

An sämtlichen Dehnungs-Meßstreifen war eine nahezu lineare Dehnungszunahme bis zum Bruch zu beobachten. Die Dehnungen der verschiedenen Meßstellen streuten aber erheblich. Auch die Meßstellen auf der Trägervorderseite und der Trägerrückseite zeigten deutlich unterschiedliche Meßwerte an. Dieses Verhalten ist in erster Linie auf die starke Inhomogenität des Holzes zurückzuführen. Aufgrund solcher Messungen können daher zuverlässige

Rückschlüsse auf die Dehnungsverteilungen über die Trägerlänge und über die Trägerbreite nicht gezogen werden. Allerdings können aus diesen Dehnungsmessungen einige qualitative Aussagen gewonnen werden:

- die Spannungs-Dehnungslinie einer Keilzinkenverbindung verläuft linear bis zum Bruch und unterscheidet sich nicht von der einer nicht keilgezinkten, fehlerfreien Brettlamelle,
- da das Versagen in beiden Fällen von einer Keilzinkenverbindung ausging, ist davon auszugehen, daß die Keilzinkenverbindungen eine geringere Zugfestigkeit als die nicht keilgezinkten Brettlamellen besitzen.

Diese Aussagen bestätigen auch die Ergebnisse an den in Abschnitt 4 erläuterten Zugversuchen an keilgezinkten Brettlamellen.

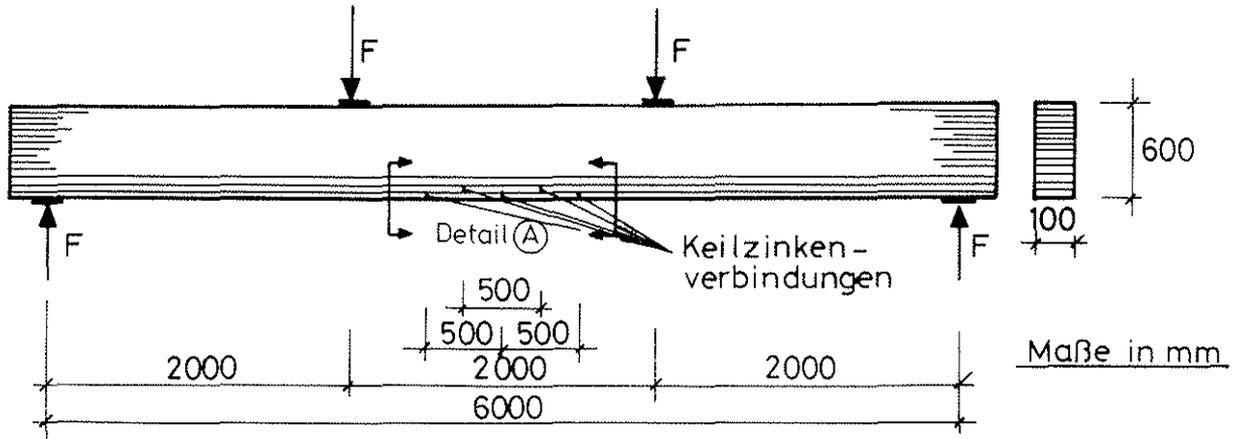


Bild 5.1 : Versuchsaufbau , Versuch 1

Detail (A) :

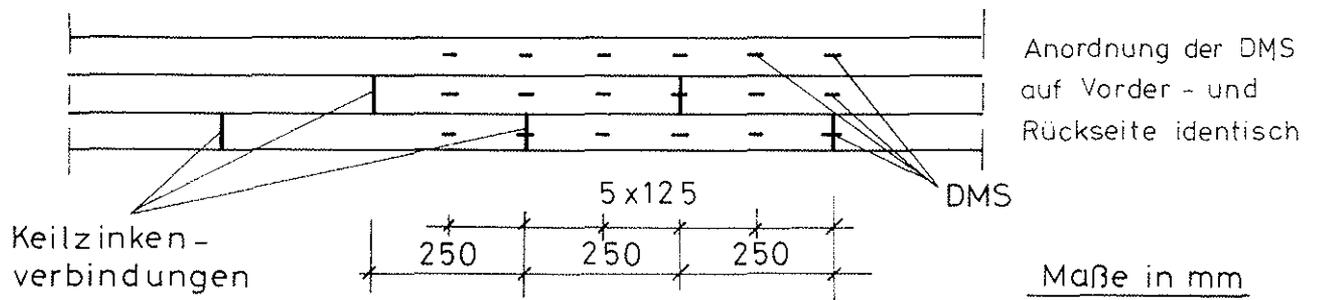


Bild 5.2 : Anordnung der Dehnungs- Meßstreifen (DMS) für Versuch 1

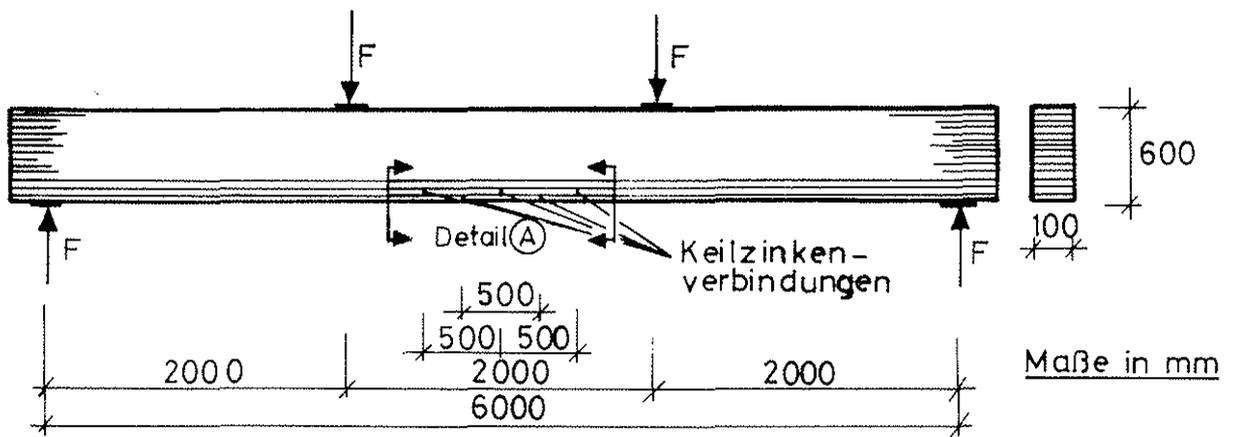


Bild 5.3: Versuchsaufbau, Versuch 2

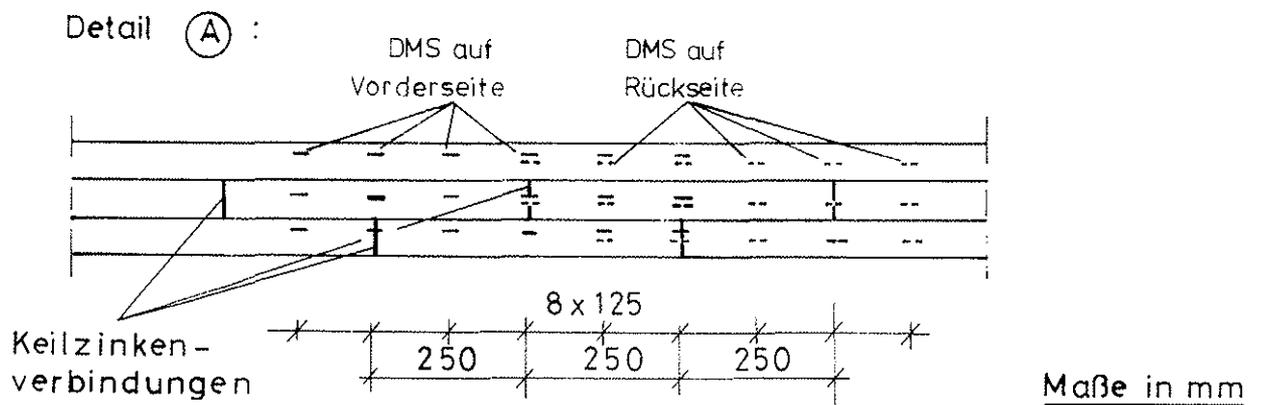


Bild 5.4: Anordnung der Dehnungs-Meßstreifen (DMS) für Versuch 2

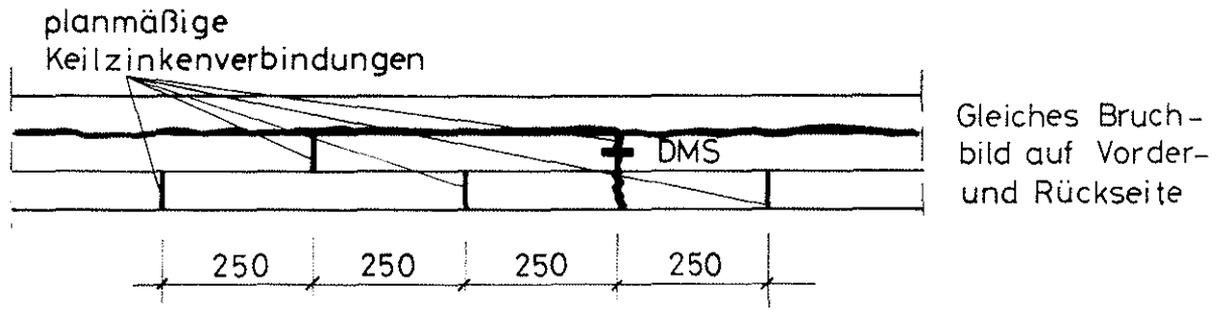


Bild 5.5: Bruchbild des Trägers aus Versuch 1

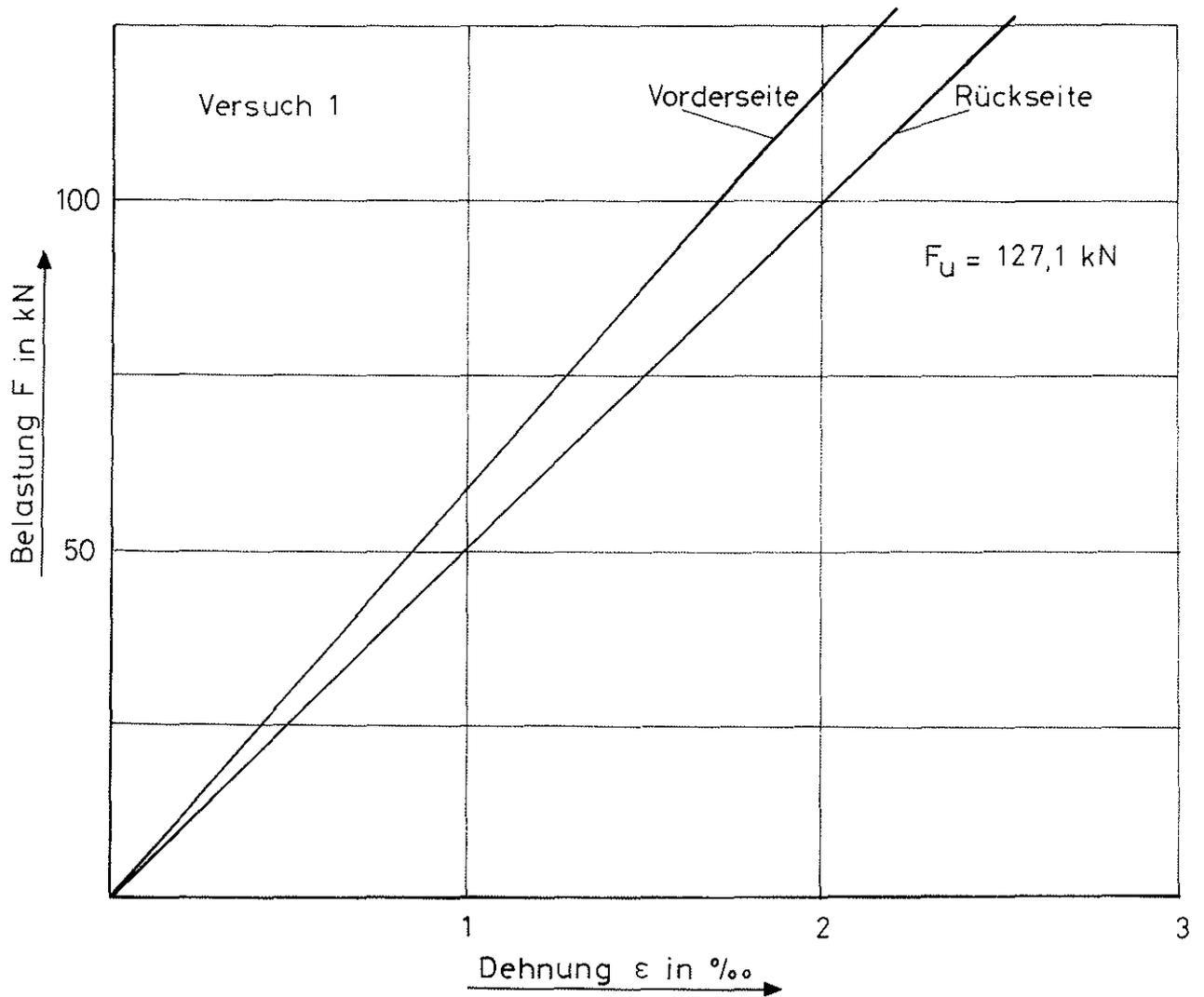


Bild 5.6: Kraft - Dehnungsdiagramm in einer Keilzinkung  
(siehe Bild 5.5)

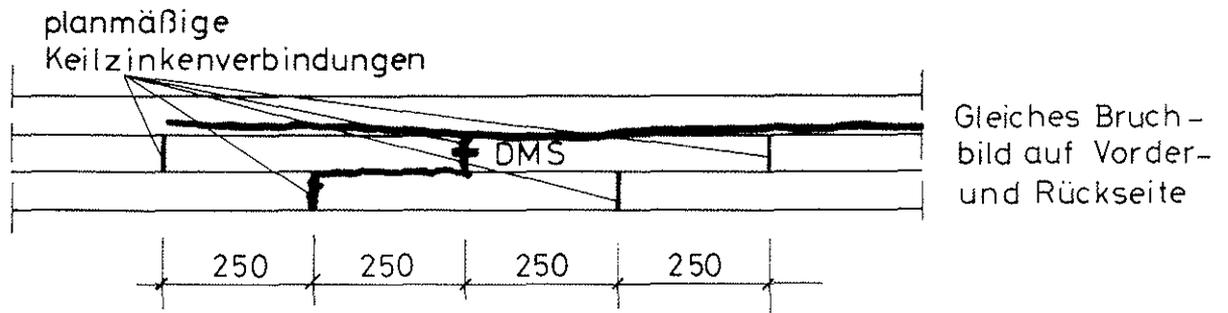


Bild 5.7: Bruchbild des Trägers aus Versuch 2

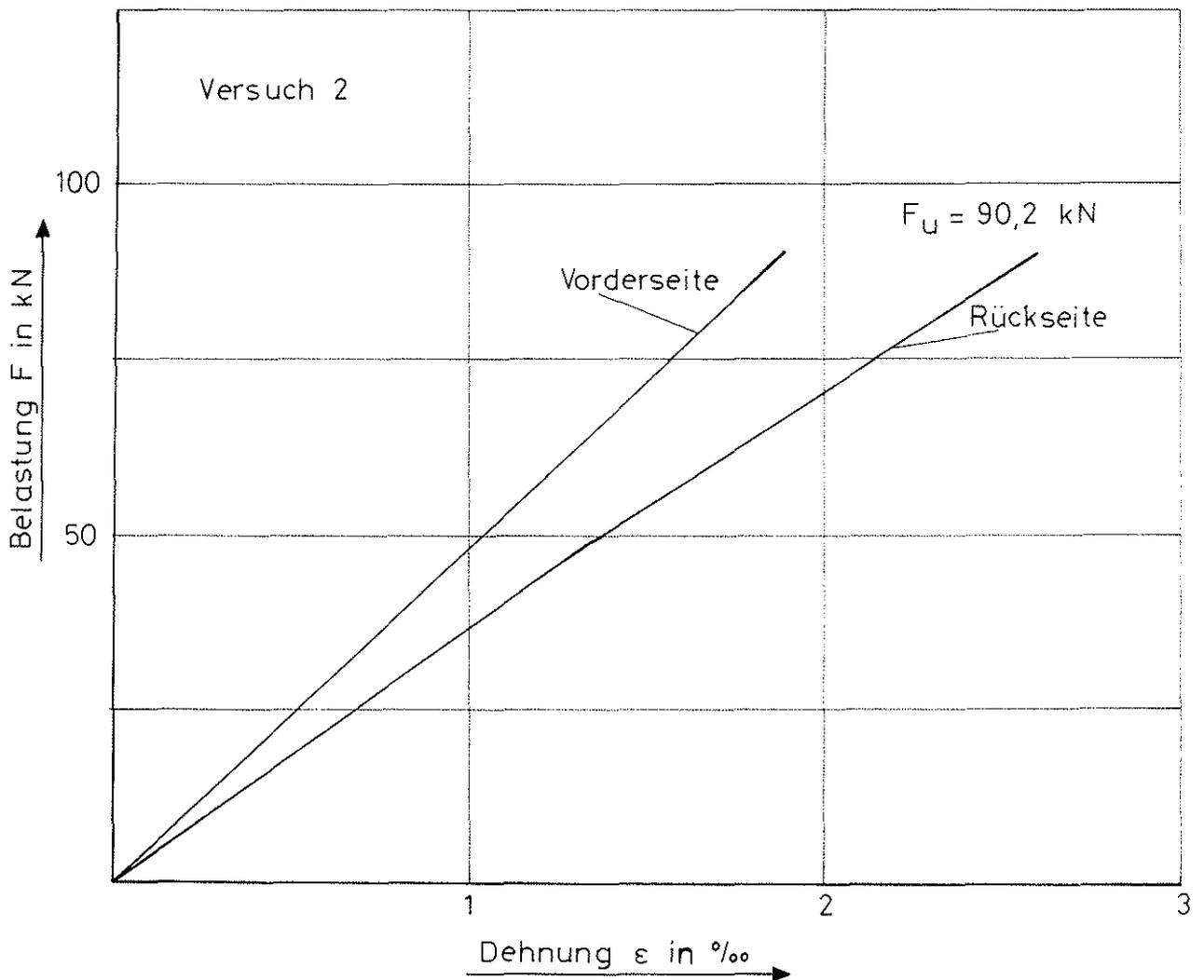


Bild 5.8 Kraft-Dehnungsdiagramm in einer Keilzinkung  
(siehe Bild 5.7)

## 6 Trägerversuche

Es war zu erwarten, daß die Tragfähigkeit von BSH-Trägern im wesentlichen durch die Eigenschaften der in der äußeren Zugzone liegenden Lamellen bestimmt wird. Deshalb wurden acht Versuchsreihen mit je drei Versuchsträgern geplant, bei denen die drei äußersten Zuglamellen an definierten Stellen charakteristische Merkmale (Keilzinkenstöße, Äste, Stumpfstöße) aufwiesen. Insbesondere sollte der Einfluß der Keilzinkenverbindung auf die Biegefestigkeit der BSH-Träger untersucht werden. Gleichzeitig war mit diesen Versuchen die Zuverlässigkeit des Rechenmodells (siehe Abschnitt 3) nachzuweisen.

### 6.1 Trägeraufbau

Alle Versuchsträger waren einheitlich 3,90 m lang, 33 cm hoch (10 Lamellen à 3,3 cm) und 10 cm breit. In Bild 6.1 sind die Abmessungen, die Stützweite, die Lastanordnung für die Versuche und die Zelleneinteilung für das Rechenmodell angegeben. Die charakteristischen Merkmale der Träger waren in den drei untersten Lamellen im Bereich des größten Biegemomentes angeordnet (Zellen 10 bis 17, 36 bis 43 und 62 bis 69). Tabelle 6.1 enthält eine Übersicht der insgesamt acht Versuchsreihen und wird nachstehend erläutert:

Ein nichtverleimter Stumpfstoß ("Nullstelle") in der zweiten Lamelle sollte zwischen zwei möglichst fehlerfreien Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul (Reihe 1) bzw. zwischen zwei großen Ästen bzw. Astansammlungen (Reihe 2) angeordnet werden. In Reihe 3 war eine Keilzinkenverbindung in der zweiten Lamelle von zwei fehlerfreien Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul umgeben. In Reihe 4 bis 8 waren die Keilzinkenverbindungen in der untersten Lamelle angeordnet. Die Eigenschaften der darüberliegenden Lamelle wurden dabei systematisch verändert, und



Tabelle 6.1: Charakteristische Merkmale der neun ausgewählten "Zellen" der Versuchsträger

Versuchs- Reihe Nr.	Charakteristische Merkmale nach <u>Bild 6.1</u>	Anforderungen an den übrigen Trägeraufbau									
1	<table border="1"> <tr><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td></tr> <tr><td>FF</td><td>NULL</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td></tr> </table>	FF/HE	FF/HE	FF/HE	FF	NULL	FF	FF/HE	FF/HE	FF/HE	Güteklasse II, mittlerer E-Modul
FF/HE	FF/HE	FF/HE									
FF	NULL	FF									
FF/HE	FF/HE	FF/HE									
2	<table border="1"> <tr><td>FF</td><td>AST</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF</td><td>NULL</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF</td><td>AST</td><td>FF</td></tr> </table>	FF	AST	FF	FF	NULL	FF	FF	AST	FF	Güteklasse II, mittlerer E-Modul
FF	AST	FF									
FF	NULL	FF									
FF	AST	FF									
3	<table border="1"> <tr><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td></tr> </table>	FF/HE	FF/HE	FF/HE	FF	KZV	FF	FF/HE	FF/HE	FF/HE	Güteklasse II, mittlerer E-Modul
FF/HE	FF/HE	FF/HE									
FF	KZV	FF									
FF/HE	FF/HE	FF/HE									
4	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> </table>				FF/HE	FF/HE	FF/HE	FF	KZV	FF	Güteklasse II, mittlerer E-Modul
FF/HE	FF/HE	FF/HE									
FF	KZV	FF									
5	<table border="1"> <tr><td>FF</td><td>FF</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF</td><td>AST</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> </table>	FF	FF	FF	FF	AST	FF	FF	KZV	FF	Güteklasse II, mittlerer E-Modul
FF	FF	FF									
FF	AST	FF									
FF	KZV	FF									
6	<table border="1"> <tr><td>FF</td><td>FF</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> </table>	FF	FF	FF	FF	KZV	FF	FF	KZV	FF	Güteklasse II, mittlerer E-Modul
FF	FF	FF									
FF	KZV	FF									
FF	KZV	FF									
7	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td><td>FF/HE</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> </table>				FF/HE	FF/HE	FF/HE	FF	KZV	FF	Güteklasse I u. II, hoher E-Modul
FF/HE	FF/HE	FF/HE									
FF	KZV	FF									
8	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>FF/NE</td><td>FF/NE</td><td>FF/NE</td></tr> <tr><td>FF</td><td>KZV</td><td>FF</td></tr> </table>				FF/NE	FF/NE	FF/NE	FF	KZV	FF	Güteklasse II u. III, niedriger E-Modul
FF/NE	FF/NE	FF/NE									
FF	KZV	FF									

FF = fehlerfrei

AST = großer Ast

KZV = Keilzinkenverbindung

NULL = nichtverleimter Stumpfstoß (Nullstelle)

HE/NE = hoher bzw. niedriger E-Modul

zwar sollten eine fehlerfreie Lamelle mit hohem Elastizitätsmodul (Reihe 4), ein großer Ast (Reihe 5) und eine weitere Keilzinkenverbindung (Reihe 6) unmittelbar über der Keilzinkenverbindung liegen. Im übrigen bestanden alle BSH-Träger der Reihen 1 bis 6 aus Brettern der Güteklasse II nach DIN 4074 ohne weitere Anforderungen an bestimmte Eigenschaften. Bei Reihe 7 lag über der Keilzinkung wie bei der Reihe 4 ein fehlerfreies Brett mit hohem Elastizitätsmodul, jedoch war im übrigen der gesamte Träger aus Lamellen mit überdurchschnittlich hohem Elastizitätsmodul aufgebaut. Die BSH-Träger der Reihe 8 bestanden aus Lamellen mit geringem Elastizitätsmodul. Insbesondere sollte über der Keilzinkenverbindung ein fehlerfreies Brett, jedoch mit niedrigem Elastizitätsmodul liegen.

Zur Auswahl der Lamellen für die Versuche wurden der laufenden Produktion eines deutschen Leimbaubetriebes etwa 250 Bretter von 3,90 m bis 4,50 m Länge entnommen. Der Querschnitt der bereits vorgehobelten und gütesortierten Bretter betrug einheitlich 36 x 113 mm. Durch Wägungen wurden die mittleren Rohdichten sämtlicher Bretter ermittelt. Die Holzfeuchtigkeiten, die stichprobenartig bestimmt wurden, betrugen dabei etwa 12 %. Zusätzlich wurden 111 Brettern an beiden Brettenden Proben zur genaueren Rohdichtebestimmung entnommen. Mit Hilfe eines Schwingungsmeßgerätes und der von GÖRLACHER (1984) beschriebenen Meß- und Auswertemethode wurden die dynamischen Elastizitätsmoduln ermittelt.

Die mittleren Rohdichten und die dynamischen Elastizitätsmoduln sämtlicher Bretter sowie deren jeweilige Lage in den Versuchsträgern sind in den Tabellen 6.2 bis 6.9 (Anlagen 6 bis 13) angegeben.

Von 90 Brettern, die im wesentlichen als die drei äußeren Zuglamellen der Träger verwendet wurden, wurde zusätzlich die Ästigkeit aufgenommen. Daraus wurden die KAR-Werte von 150 mm langen Brettabschnitten bestimmt. Diese KAR-Werte und ihre Lage im Träger sind in die Darstellungen der Versuchsergebnisse in Abschnitt 8 übernommen worden (siehe Bild 8.1 bis 8.24, Anlage 42 bis 65). Dabei sind jeweils die für eine Berechnung relevanten Werte aufgeführt, die im Bereich des größten Biegemomentes lagen. Die Holzfeuchtigkeit während der Versuchsdurchführung wurde an zwei Darrproben eines jeden BSH-Trägers bestimmt und betrug im Mittel 10,6 %.

## 6.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsträger wurden entsprechend der Darstellung in Bild 6.1 mit einer Stützweite von 3,60 m unter einer 2 x 100 kN-Prüfanlage in den Drittelpunkten mit einer kontinuierlichen Kraftzunahme von 5 kN/min bis zum Bruch belastet.

Mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer wurde die Durchbiegung der Schwerlinie in Feldmitte gegenüber derjenigen über dem Auflager gemessen.

## 6.3 Ergebnisse der Versuche

In Bild 6.2 bis 6.25 (Anlagen 14 bis 37) sind die Bruchbilder (nach dem Versuch sichtbare Risse bzw. Druckfalten), die Bruchlast  $F_u$  sowie die Kraft-Durchbiegungsdiagramme für jeden Versuch angegeben. Bild 6.26 bis 6.33 (Anlagen 38 bis 41) zeigen einen BSH-Träger aus jeder Versuchsreihe nach dem Bruch. Bei fast allen Versuchen trat das Versagen durch ein plötzliches Aufreißen des Trägers ein; der genaue Reißfortschritt konnte daher nicht beobachtet werden. Lediglich die Versuche 6/3 und 7/3

wiesen schon vor Erreichen der Höchstlast sichtbare Holzerstörungen in der äußeren Zuglamelle auf; bei  $F = 65 \text{ kN}$  trat an der Keilzinkenverbindung des Trägers 6/3 ein ca. 2 cm langer Riß auf der Trägerunterseite auf. Ebenso zeigte sich beim Träger 7/3 bei  $F = 61,1 \text{ kN}$  ein Absplittern im Bereich der Keilzinkenverbindung. In beiden Fällen konnte die Belastung jedoch noch weiter gesteigert werden.

Da bei einigen BSH-Trägern das Versagen nicht wie erwartet durch Überschreiten der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen erfolgte, konnten die noch intakten Keilzinkenverbindungen den Versuchsträgern entnommen und in einem anschließenden Zugversuch geprüft werden. Die Querschnittsabmessungen dieser geprüften Keilzinkenstöße und die zugehörigen Zugfestigkeiten sind in Tabelle 6.10 angegeben.

Tabelle 6.10: Ergebnisse der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen aus den Versuchsträgern

Träger	Querschnitt des geprüften Keil- zinkenstoßes  mm × mm	Bruchlast $F_u$  kN	Zugfestigkeit $f_t$  N/mm <sup>2</sup>
3/1	43,7 × 24,7	57,2	52,99
3/1	43,7 × 24,7	64,5	59,74
4/2	43,7 × 24,7	55,8	51,70
4/2	43,7 × 24,6	57,3	53,30
7/1	43,8 × 24,7	21,7	(20,06)*)
7/3	43,7 × 24,7	47,5	44,01
8/3	43,7 × 24,7	51,3	47,53
		Mittelwert	51,55

\*) war im Zinkengrund bereits vor der Prüfung gerissen.

## 7 Anwendung des Rechenmodells

### 7.1 Grundlagen für das Simulationsprogramm

Mit Hilfe der in Tabelle 3.1 angegebenen Regressionsgleichungen wurde jeder Versuchsträger simuliert. Bei der Simulation nach Abschnitt 3.1 wurden folgende Eingangsdaten verwendet:

#### a) Trägeraufbau

Die Lage eines jeden Brettes und jeder Keilzinkenverbindung im Träger war bekannt, so daß keine Simulation des Trägeraufbaus mit Hilfe der in Tabelle 3.1 angegebenen Brettlängenverteilung zu erfolgen brauchte. Von jeder Brettlamelle waren die Güteklasse, der dynamische Elastizitätsmodul und die mittlere Rohdichte, von den äußeren Zuglamellen außerdem die genaue Ästigkeitsverteilung vorher bestimmt worden.

#### b) Feuchtigkeitsgehalt $u$

Die Holzfeuchtigkeit der verwendeten Bretter wurde vor der Verleimung der BSH-Träger stichprobenartig zu  $u = 12 \%$  (Mittelwert) bestimmt. In die Regressionsgleichungen wurde daher ein für alle Zellen konstanter Wert von  $u = 0,12$  eingesetzt.

#### c) Rohdichte $\rho_0$

Die vor der Herstellung der BSH-Träger ermittelte mittlere Rohdichte der Brettlamellen wurde nach DIN 52 182 auf die in den Regressionsgleichungen benötigte Darr-Rohdichte  $\rho_0$  umgerechnet. Zusätzlich wurde an insgesamt 111 Brettern die Rohdichte an beiden Brettenden bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 7.1 dargestellt. In mehr als 80 % aller Fälle war danach der Rohdichteunterschied kleiner als  $0,04 \text{ g/cm}^3$ .

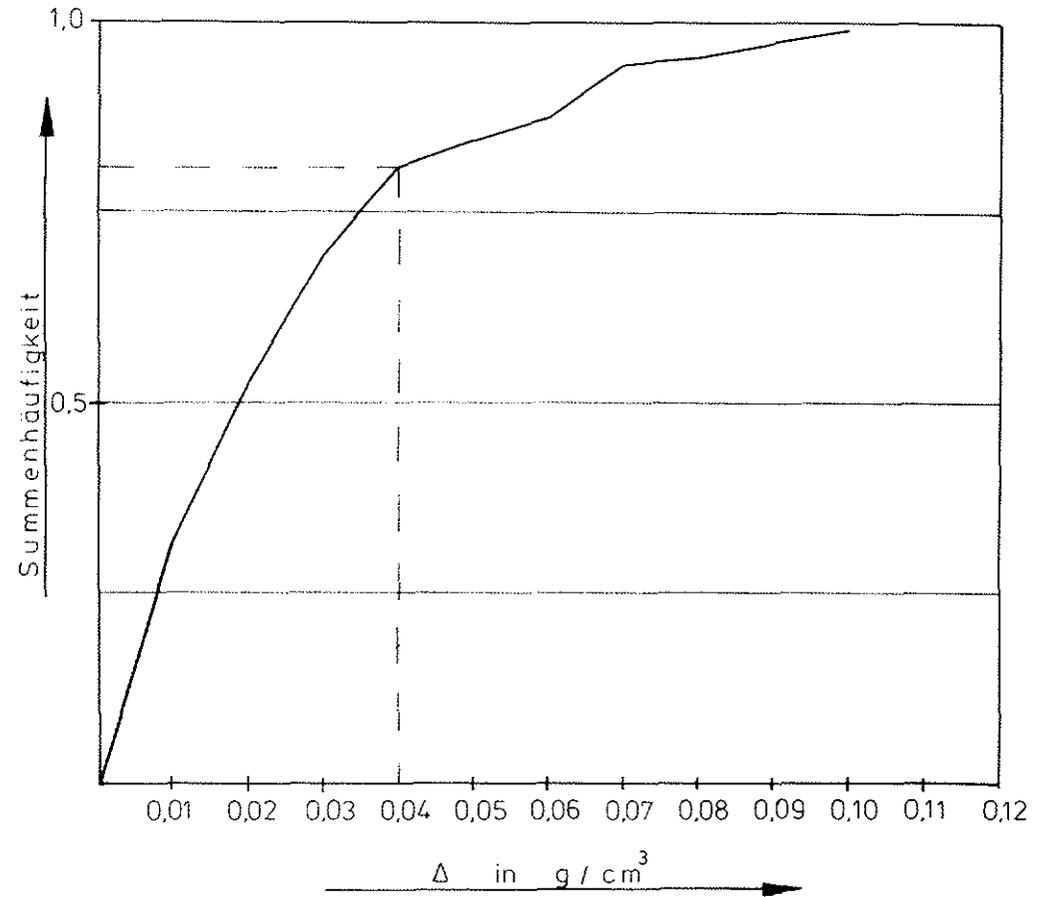
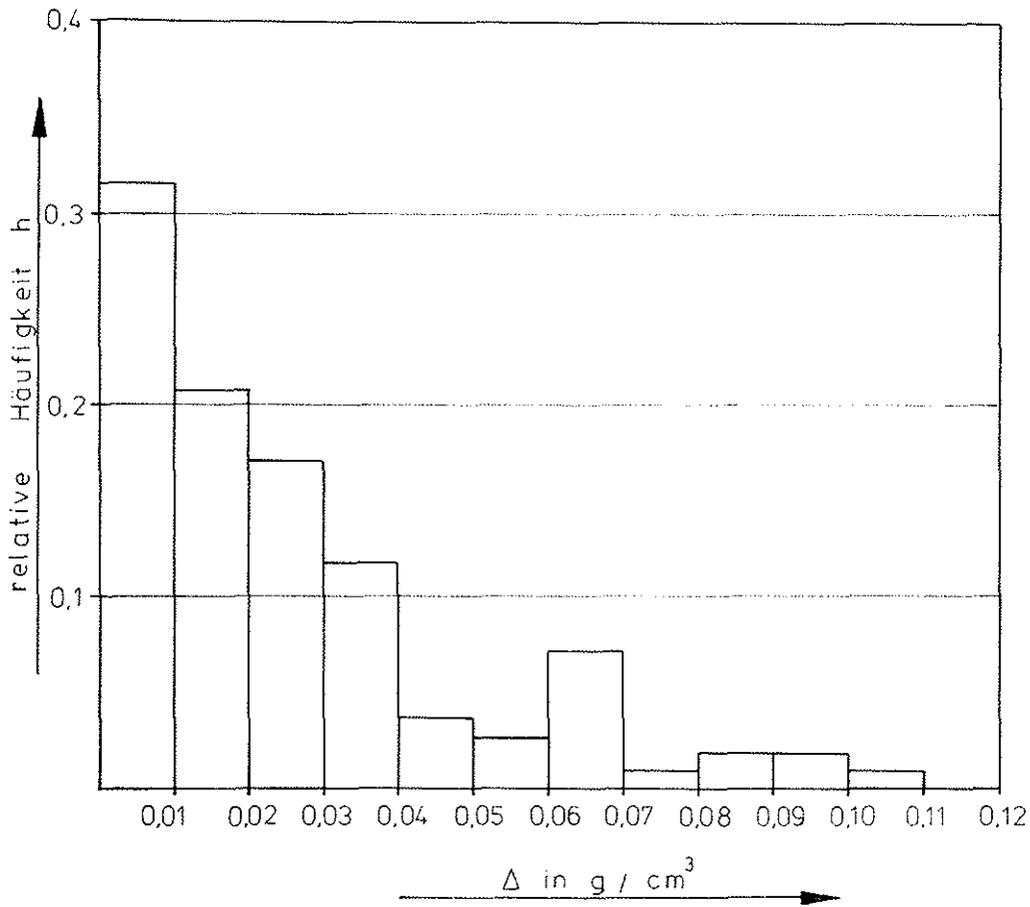


Bild 7.1:

Histogramm und Summenhäufigkeit für die Differenz  $\Delta$  der Rohdichten an den beiden Brettenden (N = 111 Bretter)

Dies deutet auf eine geringe Schwankung der Rohdichte in Brett­längsrichtung hin. Bei der Simulation wurde daher näherungsweise die Rohdichte eines Brettes als konstant angesehen.

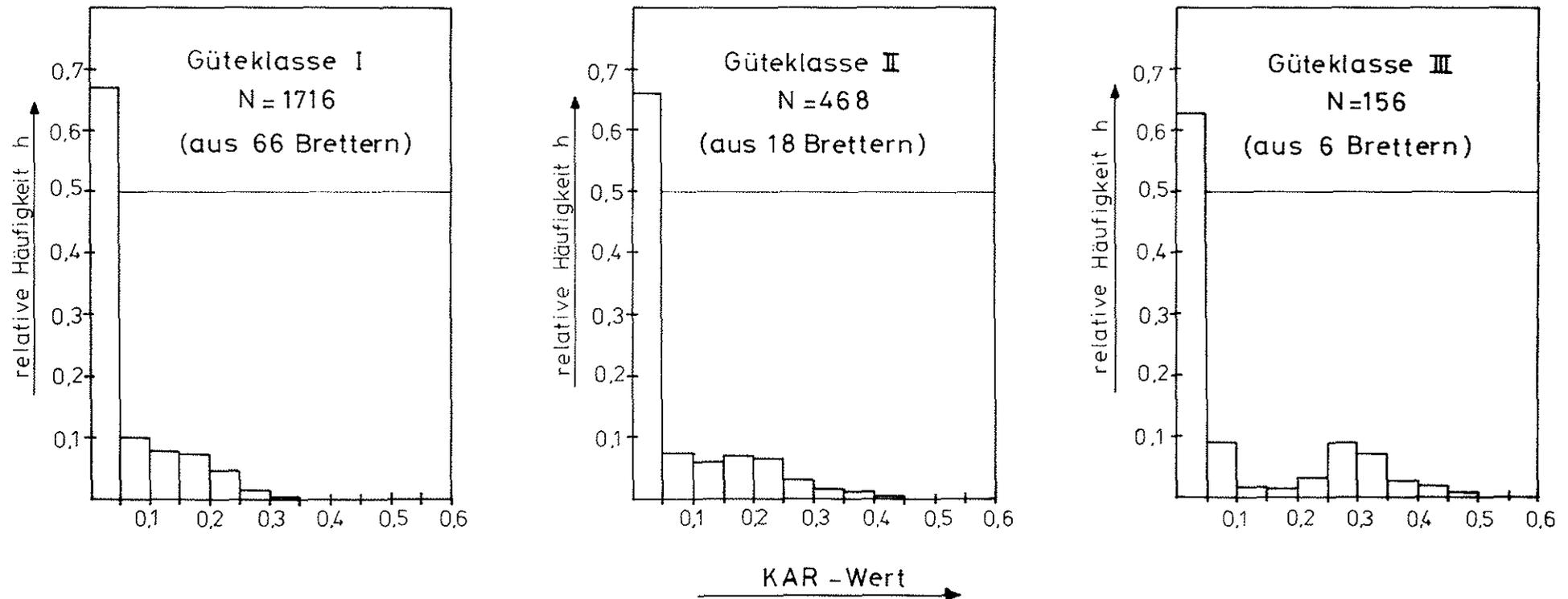
Eine wirklichkeitsnähere Verteilung der Rohdichte in Brett­längsrichtung kann in dem entwickelten Simulationsprogramm jederzeit berücksichtigt werden, sobald hierüber weitere Untersuchungen vorliegen.

d) Ästigkeit

An insgesamt 90 Brett­lamellen, die überwiegend im äußeren Zugbereich der BSH-Träger eingebaut wurden, wurde von jedem 15 cm-Abschnitt der KAR-Wert bestimmt. Die Häufigkeits­verteilungen dieser "Zellen"-KAR-Werte sind getrennt für jede Güteklasse in Bild 7.2 dargestellt. Da die Bretter, deren Ästigkeitsverteilung nicht bekannt war, aus der gleichen Lieferung stammten, wurden die ermittelten Häufigkeitsverteilungen als repräsentativ für alle verwendeten Bretter angesehen. Wegen der geringen Probenzahl können allerdings diese Daten nicht als allgemeingültig für alle im Holzleimbau verwendeten Brett­lamellen angesehen werden.

Bei der Simulation der Holzeigenschaften wurde jeder "Zelle", deren Ästigkeit nicht bekannt war, aus der zugehörigen Häufigkeitsverteilung ein zufälliger KAR-Wert zugewiesen.

Eine wirklichkeitsnähere Zuordnung der Ästigkeit entlang eines Brettes, die bestimmte Regelmäßigkeiten infolge der Wuchseigenschaften eines Baumes berücksichtigt, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht verwirklicht. Da aber die Ästigkeit eines Brettes oder einer "Zelle" einen großen Einfluß auf das Tragverhalten und insbesondere auf die Tragfähigkeit ausübt, ist eine genauere Kenntnis der Ästigkeitsverteilungen in Brett­lamellen wünschenswert.



**Bild 7.2 :** Auftretenshäufigkeit eines bestimmten KAR - Wertes in einem Brettabschnitt der Länge  $L = 150 \text{ mm}$  für die verschiedenen Güteklassen nach DIN 4074

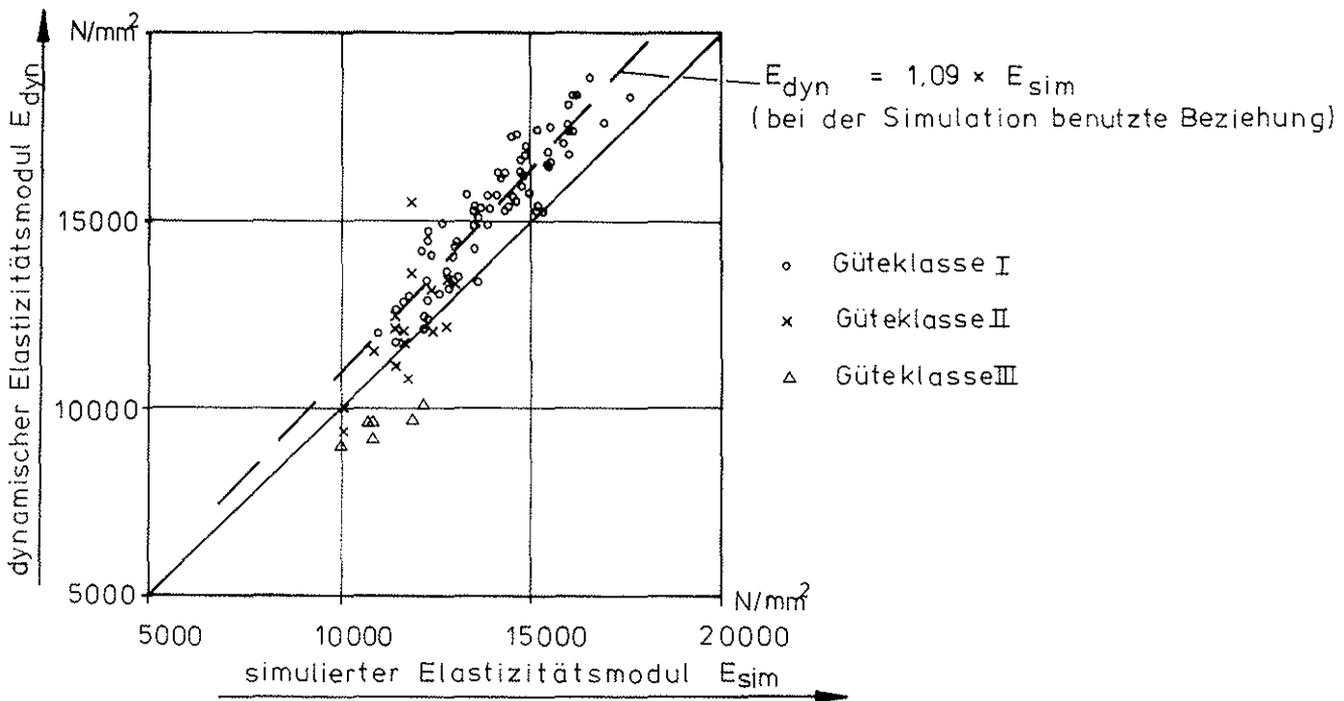
e) Brett-Elastizitätsmodul

GÖRLACHER (1984) und KOLLMANN, KRECH (1960) haben gezeigt, daß der dynamische Elastizitätsmodul des Holzes größer ist als der im statischen Versuch ermittelte Elastizitätsmodul. In Bild 7.3 und 7.4 sind für jede Brettlamelle der Versuchsträger der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$  (nach Abschnitt 6) und der simulierte Elastizitätsmodul  $E_{sim}$  (nach Gleichung 3.4) miteinander verglichen. Nach GÖRLACHER besteht zwischen dem dynamischen und statischen Biege-Elastizitätsmodul folgender linearer Zusammenhang:

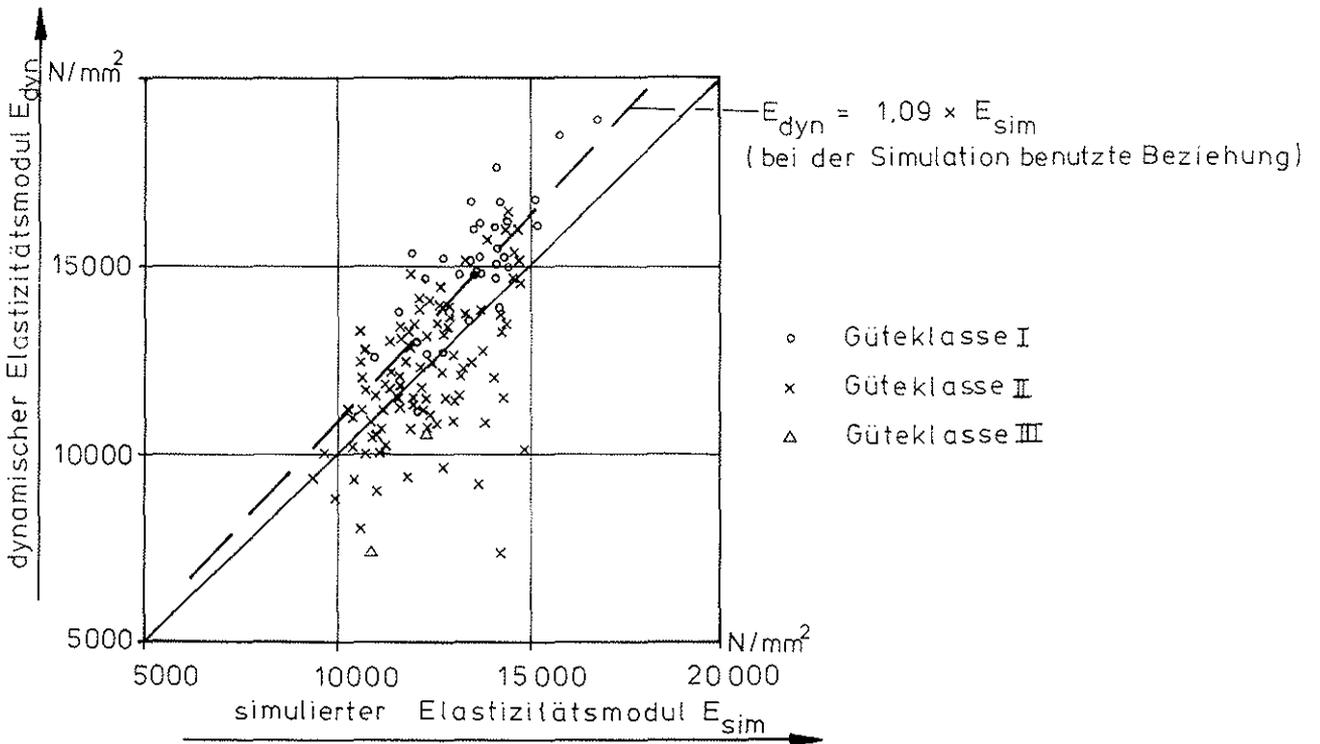
$$E_{B,dyn} = 1,09 \cdot E_{B,stat} \quad (7.1)$$

Bild 7.3 zeigt für  $E_{sim} > 12000 \text{ N/mm}^2$  eine gute Übereinstimmung mit Gl. (7.1), obwohl diese Beziehung nicht an ganzen Brettern mit einer Länge von über 4 m ermittelt wurde und somit nicht als gesichert angesehen werden kann. Bei  $E_{sim} < 12000 \text{ N/mm}^2$  und bei Brettern deren Ästigkeit nicht bekannt war (Bild 7.4), ist eine Abhängigkeit nach Gl. (7.1) nicht mehr gesichert. Daß insbesondere bei Brettlamellen der Güteklasse I eine gute Übereinstimmung zwischen simuliertem und tatsächlichem Elastizitätsmodul erkennbar ist, weist auf die Bedeutung der Ästigkeit für den Elastizitätsmodul der Lamellen hin:

- Die benutzten Regressionsgleichungen (siehe Tabelle 3.2) sind im Bereich großer Äste ( $KAR > 0,45$ ) nur durch wenige Versuche belegt, so daß die Berechnung des "zusammengesetzten" Elastizitätsmoduls  $E_{sim}$  bei Brettlamellen der Güteklasse II, besonders aber der Güteklasse III noch mit einer deutlichen Unsicherheit behaftet ist,



**Bild 7.3 :** Vergleich zwischen dynamischem Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$  und simuliertem Elastizitätsmodul  $E_{sim}$  für Bretter mit bekannter Ästigkeit



**Bild 7.4 :** Vergleich zwischen dynamischem Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$  und simuliertem Elastizitätsmodul  $E_{sim}$  für Bretter mit unbekannter Ästigkeit

- da ein Ast eine höhere Rohdichte besitzt als das fehlerfreie Holz, liefert die Bestimmung der mittleren Brettroh-dichte rechnerisch einen geringfügig zu hohen Wert. Diese Ungenauigkeit wirkt sich bei der Berechnung des Elastizitätsmoduls jeder einzelnen Zelle aus, so daß besonders bei Brettlamellen geringer Güte ein zu hoher Elastizitätsmodul simuliert wird,
- im Bereich großer Äste und Astansammlungen verlaufen die Fasern erst in einem größeren Abstand von den Ästen wieder parallel zueinander. Dies bedeutet, daß auch "Zellen" mit dem KAR-Wert "null" aufgrund des gestörten Faserverlaufes dennoch in Wirklichkeit nicht absolut fehlerfrei sind. Die Folge davon ist wiederum, daß besonders bei Brettlamellen geringer Güte der tatsächliche Elastizitätsmodul kleiner sein muß als der nach dem angegebenen Verfahren simulierte Elastizitätsmodul,
- Inhomogenitäten beeinträchtigen auch das Schwingungsverhalten eines Brettes, so daß Größe und Lage der Äste auch den dynamischen Elastizitätsmodul beeinflussen können.

Wegen der guten Übereinstimmung mit Gl. (7.1) bei den maßgebenden Brettlamellen für den äußeren Zugbereich der Versuchsträger (vgl. Bild 7.3) wurde bei der Eingabe des Trägeraufbaus für  $E_{\text{soll}}$  der um den Faktor 1,09 abgeminderte dynamische Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  verwendet:

$$E_{\text{soll}} = \frac{E_{\text{dyn}}}{1,09} \quad (7.2)$$

#### f) Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen

Die Probenentnahme für die in Abschnitt 4 beschriebenen Zugversuche an keilgezinkten Brettlamellen erfolgte im September 1982 in vielen verschiedenen Betrieben, während die in

Abschnitt 6 beschriebenen BSH-Träger für die Versuche im Oktober 1983 in einem Betrieb hergestellt wurden. Da in diesem Betrieb in der Zwischenzeit maschinelle Veränderungen im Produktionsablauf vorgenommen worden waren, war zu prüfen, ob und in welchem Maße die Festigkeit der Keilzinkenverbindungen von diesen Umstellungen beeinflusst worden war. Hierzu wurden die betriebsinternen Protokolle über die Eigenkontrollen der Keilzinkenbiegefestigkeit ausgewertet. In Bild 7.5 sind die Tagesmittelwerte der Biegefestigkeiten für die Jahre 1982 und 1983 eingetragen. Deutlich zu erkennen ist, daß in den beiden Entnahmezeiträumen ein unterschiedliches Festigkeitsniveau bestand. Die mittlere Keilzinkenbiegefestigkeit im Oktober 1983 ( $\bar{\beta}_B^{KZV} = 53 \text{ N/mm}^2$ ) war um 23 % höher als die im September 1982 ( $\bar{\beta}_B^{KZV} = 43 \text{ N/mm}^2$ ). Die von LARSEN (1980) und NEW ZEALAND STANDARD (1978) beschriebenen Beziehungen zwischen der Biegefestigkeit und der Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen ließ darauf schließen, daß eine Festigkeitssteigerung auch bei der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen eingetreten war. Deshalb wurde bei der Simulation die mit Hilfe der zugehörigen Regressionsgleichung (siehe Gl. (4.3)) berechnete Zugfestigkeit jeder Keilzinkenverbindung um 23 % erhöht in Ansatz gebracht.

## 7.2 Grundlagen für das Finite-Elemente-Programm

Als Grundlage für die Berechnung der Tragfähigkeit von BSH-Trägern mit Hilfe des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Finite-Elemente-Programms dienten die durch das Simulationsprogramm für jede Zelle erzeugten Werkstoffkennwerte, d.h. die Elastizitätsmoduln und die Zugfestigkeiten.

Die Tragfähigkeit eines Trägers gilt nach diesem Programm als erreicht, wenn als unmittelbare Folge des Zugversagens einer Zelle eine weitere, in der Regel unmittelbar darüber oder darunterliegende Zelle ebenfalls ausfällt (Rißfortschritt).

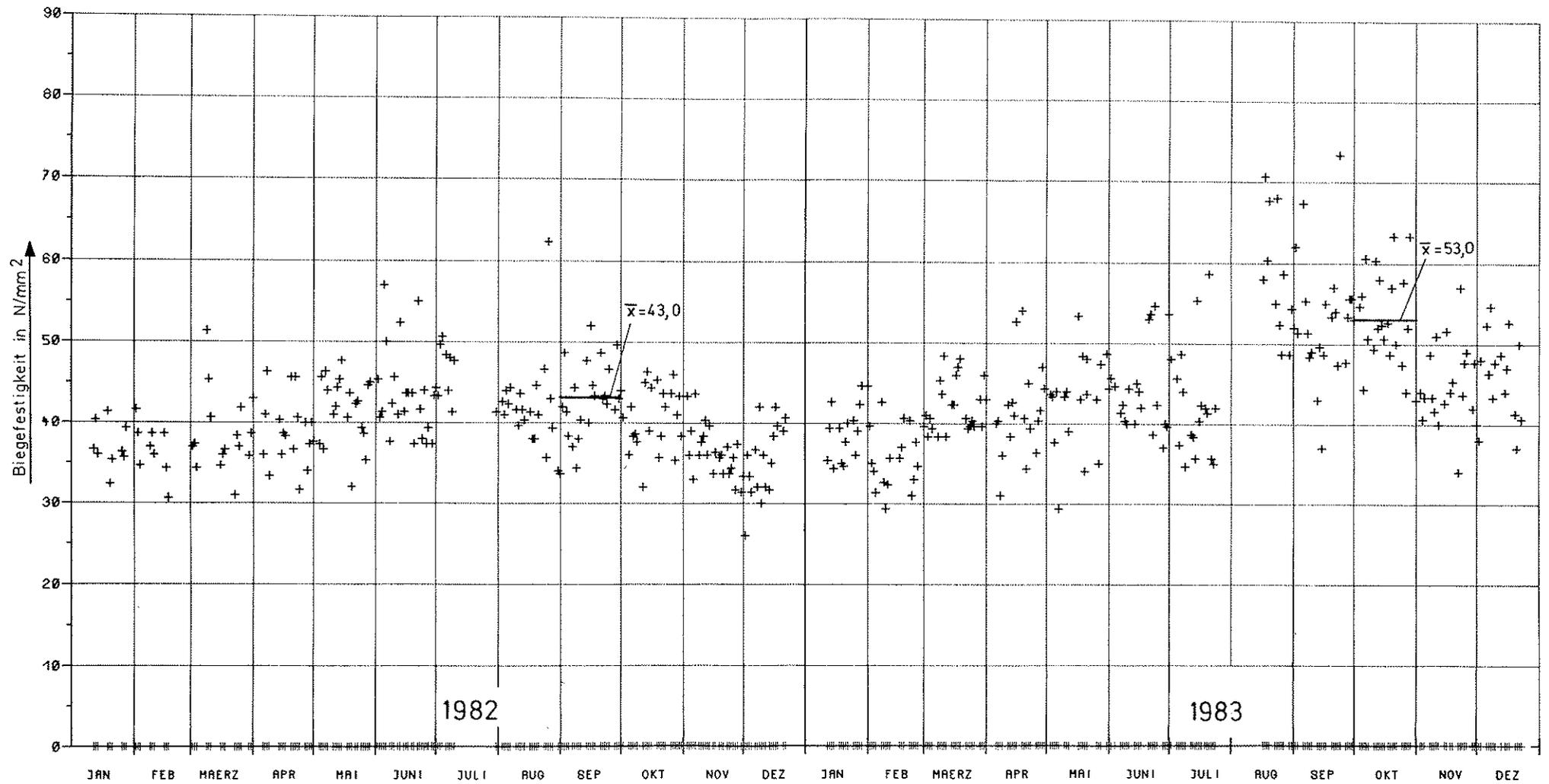


Bild 7.5 : Tagesmittelwerte der Keilzinkenbiegefestigkeit

Zur Berechnung mit dem Finite-Elemente-Programm werden neben dem Elastizitätsmodul und der Zugfestigkeit jeder "Zelle" noch der Schubmodul  $G$ , der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung  $E_{\perp}$  und die Querdehnungszahl  $\nu_1$  benötigt. Da diese Kennwerte aber nur einen untergeordneten Einfluß auf die Tragfähigkeit eines auf Biegung beanspruchten Trägers haben, war es ausreichend, diese Werte in allen Fällen als konstant anzunehmen. Es wurden die von NEUHAUS (1981) angegebenen Werte benutzt:

$$\begin{aligned} G &= 650 \text{ N/mm}^2 \\ E_{\perp} &= 400 \text{ N/mm}^2 \\ \nu_1 &= 0,035 \end{aligned}$$

### 7.3 Durchführung der Berechnungen

Für jeden Versuchsträger wurden 50 Simulationsrechnungen durchgeführt, d.h. es wurden mit den bekannten Werkstoffkenngrößen eines jeden Versuchsträgers (Elastizitätsmodul, Rohdichte, Ästigkeit) 50 nach statistischen Gesichtspunkten mögliche Trägeraufbauten simuliert und deren Tragfähigkeit mit dem vorgestellten Finite-Elemente-Programm berechnet. Als zusätzliches Bruchkriterium wurde angenommen, daß die Tragfähigkeit eines BSH-Trägers dann erreicht ist, wenn zwei übereinander liegende "Zellen" der beiden untersten, in der Zugzone liegenden Lamellen ausgefallen sind, auch dann, wenn die dritte Lamelle rechnerisch noch in der Lage wäre, die durch Kraftumlagerung entstehenden Längsspannungen aufzunehmen. Wie aus den Versuchsergebnissen sichtbar wurde, tritt in der Regel aber infolge der Überschreitung von Querkzug- und Schubfestigkeiten in diesen Fällen ein "Abschälen" der untersten Lamellen auf. Dieses zusätzliche Bruchkriterium war jedoch sehr selten ausschlaggebend, so daß es auf die mittleren Tragfähigkeiten der jeweils 50 Berechnungen für einen BSH-Träger praktisch keinen Einfluß hatte.

## 8 Ergebnisse der Berechnungen und Vergleich mit den Versuchsergebnissen

### 8.1 Vergleich der Bruchlasten und der Bruchursachen

In den Bildern 8.1 bis 8.24 (Anlage 42 bis 65) ist für jeden Versuchsträger (V) die Bruchlast bzw. die sich daraus ergebende maximale Randspannung aufgetragen. Zum Vergleich sind Mittelwert und Standardabweichung (M, S) aus 50 Simulationsrechnungen angegeben. Diese 50 Einzelwerte sind außerdem getrennt nach den wichtigsten Bruchursachen bzw. der Ausgangszelle des Bruches eingezeichnet. In einer Übersicht in Bild 8.25 sind die Bruchlasten aller Versuche mit den Mittelwerten und Standardabweichungen aus den Simulationen zusammengestellt.

### 8.2 Vergleich der Biege-Elastizitätsmoduln

Aus den Durchbiegungsmessungen im elastischen Verformungsbereich der Versuchsträger wurde nach den Formeln der technischen Biegelehre der Biege-Elastizitätsmodul  $E_B$  bestimmt. Wie in Abschnitt 3.2 bereits beschrieben, liefert das Finite-Element-Programm während der Rechnung einen sogenannten Knotenverschiebungsvektor, der die Verschiebungen eines jeden Knotens in X-Richtung (Trägerlängsrichtung) und in Y-Richtung (Durchbiegungsrichtung) enthält. Aus der Differenz der Verschiebungen der Knoten in der Schwerlinie des Trägers über den Auflagern und in Feldmitte kann der Biege-Elastizitätsmodul sämtlicher "simulierter" Träger berechnet werden. Ein Vergleich der Biegeelastizitätsmoduln aus Versuch und von je zehn Simulationsrechnungen ist in Tabelle 8.1 angegeben. Die mittlere Abweichung der Elastizitätsmoduln aus den Simulationen von demjenigen aus den Versuchen beträgt nur 1 %.

Charakteristische Eigenschaften der 1., 2. und 3. Lamelle des jeweiligen Trägertyps

FF/HE
NULL
FF/HE

AST
NULL
AST

FF/HE
KZV
FF/HE

FF/HE
KZV

FF/HE
AST
KZV

FF/HE
KZV
KZV

FF/HE
FF/HE
KZV

NE
FF/NE
KZV

3. Lamelle
2. Lamelle
3. Lamelle

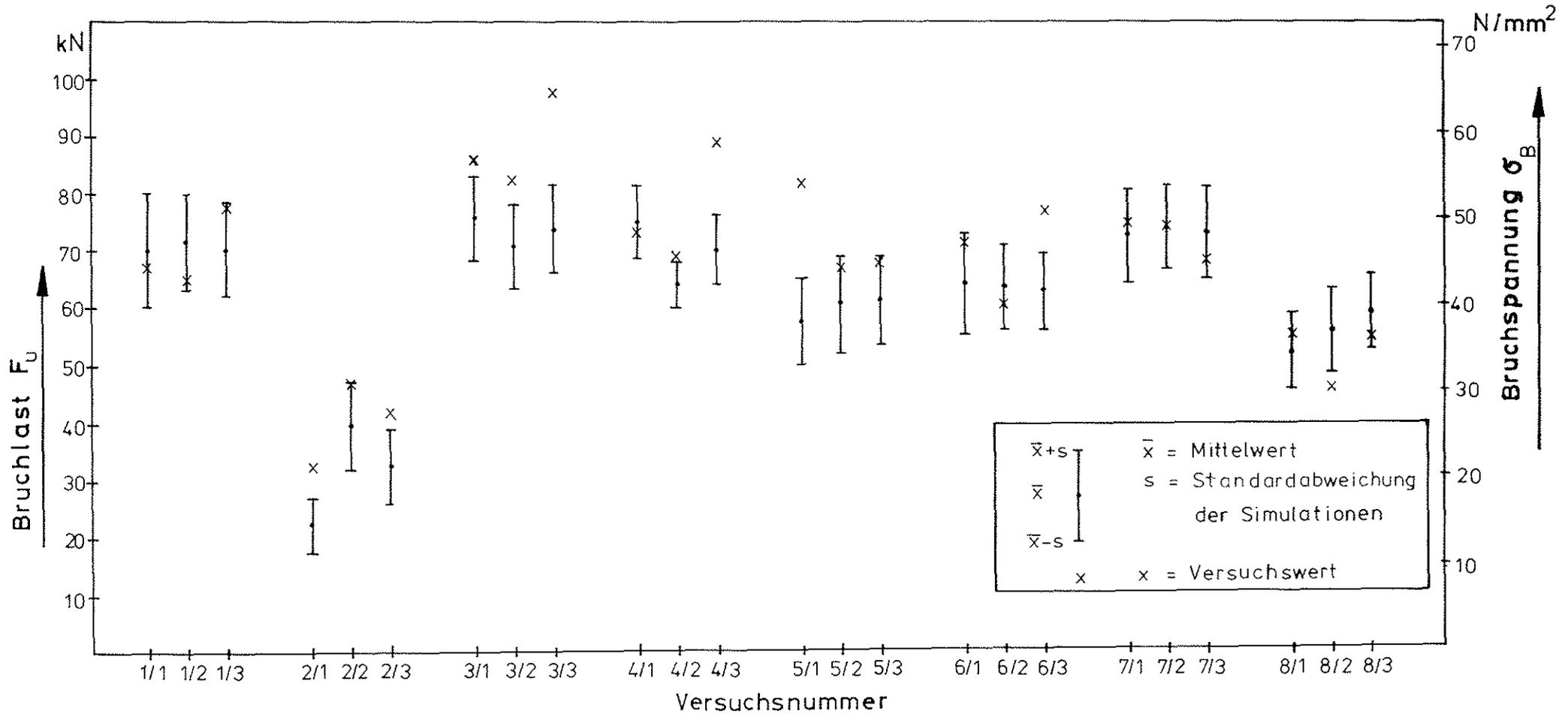


Bild 8.25: Vergleich der Bruchlasten aus den Versuchen mit den Rechenergebnissen (Übersicht)

Tabelle 8.1: Biegeelastizitätsmoduln aus Versuch im Vergleich zu je zehn Simulationsrechnungen

Versuch Nr.	Biegeelastizitätsmodul aus		
	Versuch $E_{B,V}$	Zehn Simulationen $E_{B,SIM}$	Quotient $E_{B,V}/E_{B,SIM}$
1/1	12260	11780	1,04
2	11880	11760	1,01
3	12590	11850	1,06
2/1	9670	9810	0,99
2	10610	10410	1,02
3	9640	9550	1,01
3/1	12230	11960	1,02
2	11760	11600	1,01
3	12270	12100	1,01
4/1	11900	11790	1,01
2	10940	10260	1,07
3	11760	11260	1,04
5/1	10980	11010	1,00
2	11520	11330	1,02
3	10740	10810	0,99
6/1	11640	11290	1,03
2	11190	11520	0,97
3	10790	10860	0,99
7/1	12300	12520	0,98
2	12560	12440	1,01
3	12640	12370	1,02
8/1	9360	9360	1,00
2	8980	9330	0,96
3	9700	9580	1,01
		Mittel	1,01

### 8.3 Vergleich von Kraft-Durchbiegungsdiagrammen

Für die Versuche 4/3 und 6/3 sowie zugehörige Simulationsrechnungen ist der Verlauf der Kraft-Durchbiegungsdiagramme im oberen Kraftbereich ( $F > 40$  kN) in Bild 8.26 und 8.27 dargestellt. Bild 8.26 zeigt den typischen, nichtlinearen Zusammenhang zwischen Kraft und Durchbiegung oberhalb einer Belastung von 50 kN entsprechend einer rechnerischen Biege-randspannung von  $33 \text{ N/mm}^2$ . Die Simulationsrechnung zeigt die gleiche Tendenz.

In Bild 8.27 sind die Diagramme für den Versuchsträger 6/3 und zwei zugehörige Simulationsrechnungen dargestellt. Der Versuchsträger erlitt an einer Keilzinkenverbindung bei etwa  $F = 65$  kN einen deutlich sichtbaren Anriß; die Last ließ sich in diesem Falle dennoch steigern, und zwar bis zu einer Höhe, die aufgrund der Simulationsrechnungen nicht zu erwarten war (vgl. hierzu Bild 8.18, Anlage 59). Die Größen der Durchbiegungen zeigten nach Rechnung und Versuch dennoch auch in diesem Falle eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

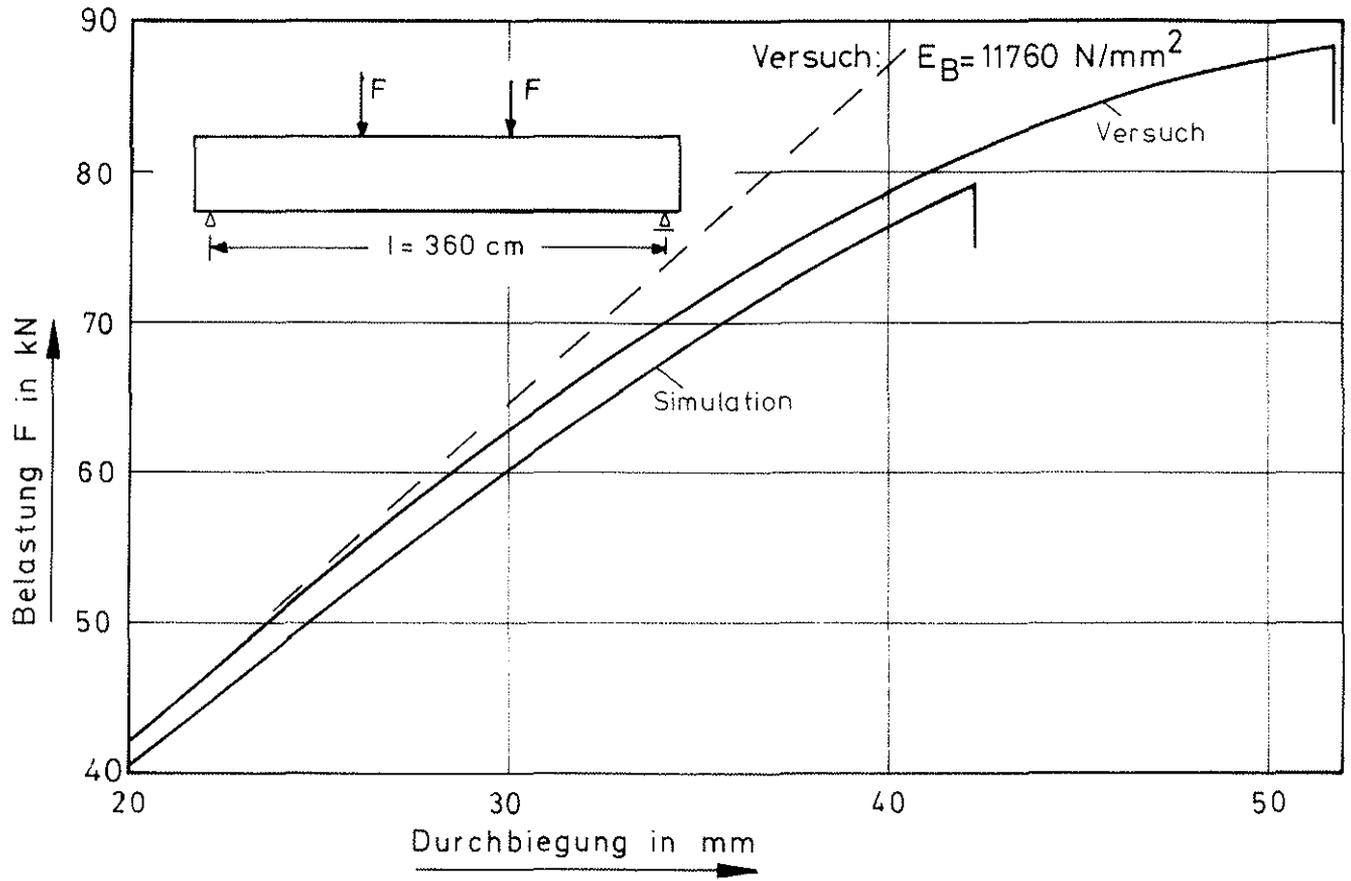


Bild 8.26: Vergleich des Kraft-Durchbiegungsdiagramms des Versuchsträgers 4/3 mit einer Simulationsrechnung

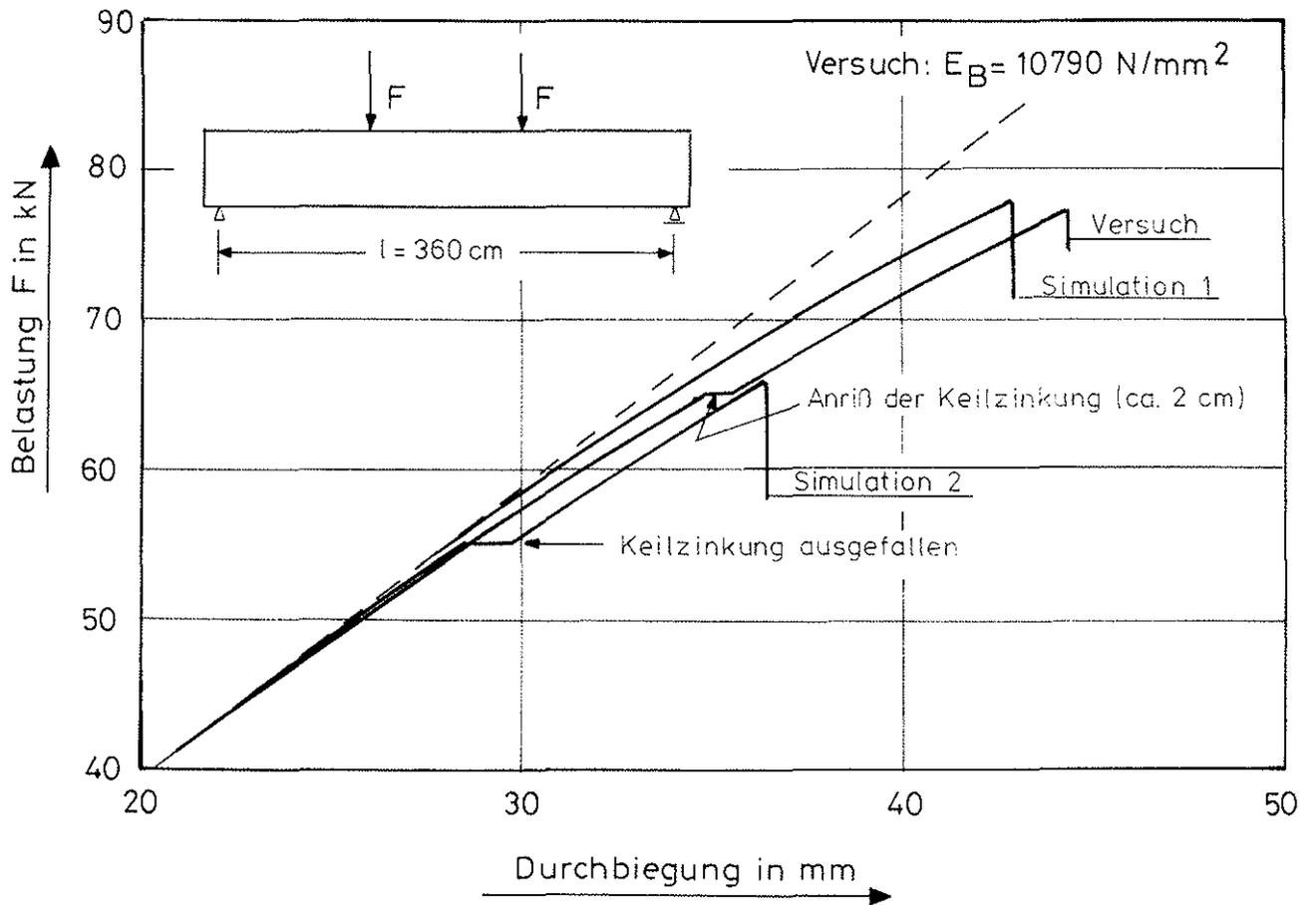


Bild 8.27: Vergleich des Kraft - Durchbiegungsdiagramms des Versuchsträgers 6/3 mit zwei Simulationsrechnungen

## 9 Diskussion und Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war in erster Linie, ein hinreichend zuverlässiges Rechenmodell zu entwickeln, um einerseits den Trägeraufbau von BSH-Trägern zu simulieren und andererseits auf der Basis der FE-Methoden die Tragfähigkeit dieser Träger vorauszubestimmen. Da es von vornherein sicher war, daß die Festigkeit der Keilzinkenverbindungen einen mitentscheidenden Einfluß auf die Tragfähigkeit ausübt, mußten gleichzeitig weitere Untersuchungen über die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen angestellt werden. Das aufgestellte Rechenmodell mußte durch Versuche an solchen BSH-Trägern überprüft werden, deren Aufbau hinsichtlich der Qualität der Einzellamellen, vor allem in der Biegezone, weitgehend bekannt war.

### 9.1 Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen

Die Zuverlässigkeit eines Rechenmodells wird in erheblichem Maße von der Güte der Eingabedaten bestimmt. Im vorliegenden Falle betraf dies neben den Güte- und Festigkeitsdaten der ungestoßenen Brettlamellen, für die auf bereits vorliegende Untersuchungen zurückgegriffen werden konnte, besonders die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen der Brettlamellen. Es wurde versucht, hierüber repräsentative Werte aus der deutschen Holzleimbauindustrie durch gezielte Probennahmen in den Betrieben des Holzleimbaues zu gewinnen und diese Festigkeiten durch Funktionen zu beschreiben, die die wichtigsten Einflußparameter - nämlich die Holzrohddichte und den Elastizitätsmodul der keilgezinkten Zone des Holzes - erfassen.

Es ist aber darauf hinzuweisen, daß diese Materialkennwerte bei weitem nicht allein die Güte einer Keilzinkenverbindung bestimmen. Dies zeigte sich im Rahmen dieser Untersuchungen durch eine erhebliche Streuung, die sich bei den Regressionsanalysen ergab. Aus

anderen laufenden Untersuchungen der Holzleimbauindustrie Deutschlands über die Qualität von Keilzinkenverbindungen ist bekannt, daß der Herstellungsprozeß in den Betrieben eine große Bedeutung hat. Die maschinellen Einrichtungen, die Herkunft des Holzes (Wuchsregionen) und die Fachkenntnisse des Personals sind mitbestimmend für die Zuverlässigkeit der Festigkeitsmerkmale. Eine Reduzierung der festgestellten Streuwerte erhöht zwangsläufig die Zuverlässigkeit der Vorhersagen mit Hilfe von Rechenmodellen und eröffnet Möglichkeiten zur verbesserten Festigkeitsklassifizierung von Brettschichtholzträgern.

## 9.2 Rechenmodelle

Das entwickelte Rechenmodell zur Simulierung des Trägeraufbaues erfaßt die wichtigen Werkstoffkennwerte Rohdichte und Ästigkeit. Mit diesen Daten werden über Regressionsgleichungen von GLOS die Druck- und Zugelastizitätsmoduln sowie die Zug- und Druckfestigkeiten des Holzes der Brettlamellen abschnittsweise ("Zellen") berechnet.

Da entlang eines Brettes die Rohdichteschwankungen relativ gering sind, wird im vorliegenden Modell für jede Brettlamelle eine unveränderliche, also konstante Rohdichteverteilung angenommen. Diese Vereinfachung kann durch systematische Untersuchungen über den Rohdichteverlauf in Brettlamellen ersetzt werden. Das gleiche gilt für die auftretenden Schwankungen des Elastizitätsmoduls und der möglichen Ästigkeit entlang des Brettes für die verschiedenen Güteklassen des Holzes. Das entwickelte Simulationsmodell für den Aufbau von BSH-Trägern gewinnt bereits durch derartig verbesserte Eingangsdaten an Genauigkeit, ohne daß zusätzliche Parameter in das Rechenmodell eingebaut werden müßten.

Das vorliegende Rechenmodell zur Vorausbestimmung der Biegefestigkeit von BSH-Trägern berücksichtigt neben den Keilzinkenverbindungen gegenüber früher entwickelten Modellen auch mögliche Kraftumlagerungen bei frühzeitigem Versagen einer Zelle, also dem "schwächsten Glied", und das nichtlineare Werkstoffverhalten des Holzes unter Druckbeanspruchung.

Verbesserungen, die zu einer erhöhten Aussagekraft führen können, sind denkbar, wenn auch gleichzeitig die örtlich auftretenden Querkzugspannungen und die Schubspannungen berücksichtigt und den entsprechenden Festigkeiten während des Rechenablaufes gegenübergestellt werden. Derartige Erweiterungen des Modells sind mit Sicherheit erforderlich, wenn auch die Tragfähigkeit biegebeanspruchter BSH-Träger mit veränderlicher Trägerhöhe oder gekrümmter Träger erfaßt werden soll.

### 9.3 Überprüfung der Rechenmodelle durch Versuche

Die Brauchbarkeit der beschriebenen Rechenmodelle wurde durch acht Versuchsreihen mit jeweils drei Einzelversuchen überprüft. Den Versuchswerten wurden jeweils 50 Simulationen und daraus resultierende Tragfähigkeitsprognosen gegenübergestellt. In Bild 9.1 sind die Versuchswerte in Abhängigkeit von den mittleren berechneten Tragfähigkeiten dargestellt. Über den gesamten Tragfähigkeitsbereich ist danach eine befriedigende Übereinstimmung festzustellen. Dennoch sollte eine Verbesserung der Prognosen möglich sein, wenn die in Abschnitt 9.1 und 9.2 diskutierten Möglichkeiten geschaffen werden.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 - also die Versuche an BSH-Trägern mit großen Ästen bzw. Astansammlungen im gefährdeten Bereich der äußeren Zuglamellen - lagen über den mittleren Prognoseergebnissen, weil die verwendeten Regressionsgleichungen zur

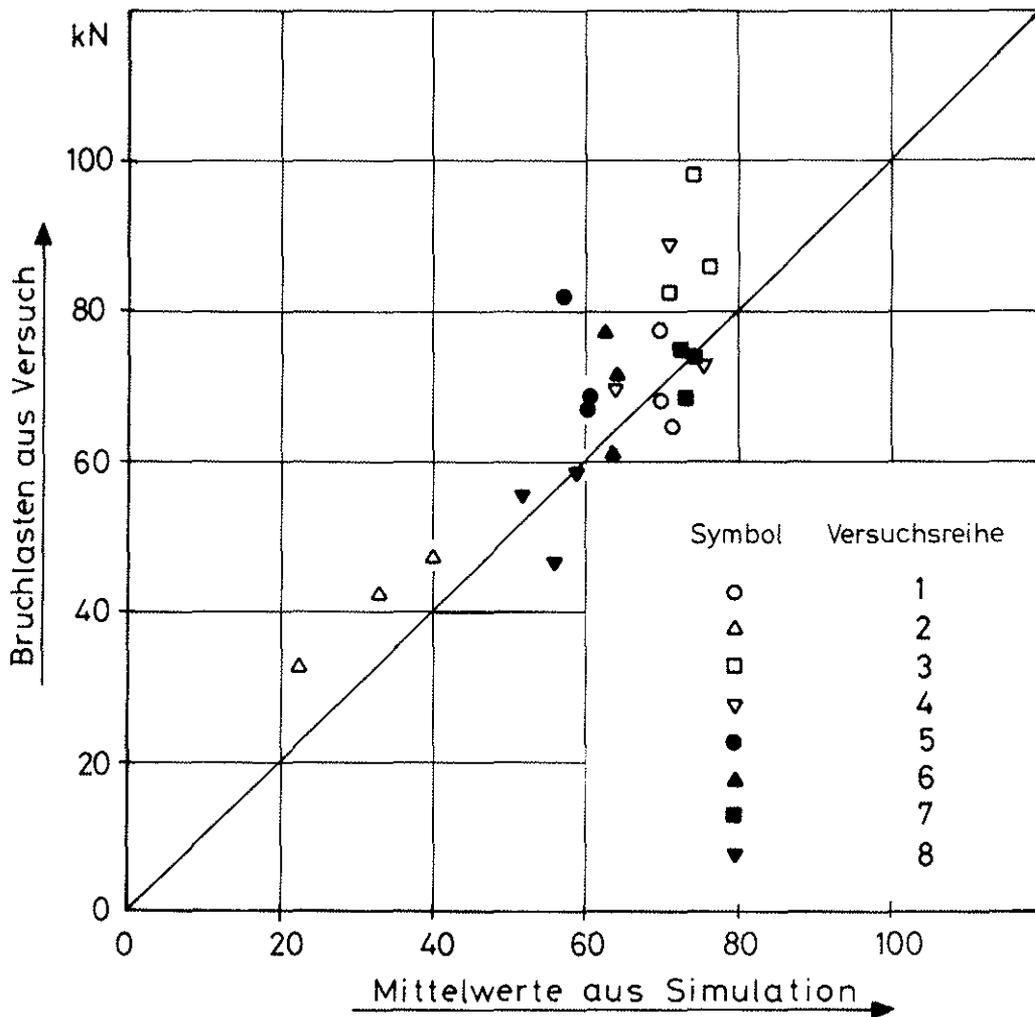


Bild 9.1: Vergleich der Tragfähigkeiten aus den Versuchen mit den mittleren Prognosen aufgrund von 50 Simulationsrechnungen

Bestimmung der Festigkeiten und der Elastizitätsmoduln der "Zellen" nur für den Bereich der bei gütesortiertem Bauholz üblichen KAR-Werte als statistisch gesichert angesehen werden können, während bei den Versuchen verhältnismäßig große KAR-Werte vorlagen.

Werden bei der Simulation geringere Streuungen für den Elastizitätsmodul innerhalb einer Brettlamelle in Ansatz gebracht (dafür fehlen z.Zt. noch zuverlässige Grundlagen, vgl. Abschnitt 9.2), dann führt das im Rechenmodell zu einer Anhebung der mittleren Tragfähigkeit, insbesondere bei solchen BSH-Trägern, die in der äußeren Zuglamelle extrem hohe Elastizitätsmoduln aufweisen. Hierauf deuten vor allem die Ergebnisse der Versuchsreihe 3 hin.

Schließlich ist auf die natürliche Streuung hinzuweisen, die bei nur drei Einzelversuchen je Versuchsreihe von vornherein die Möglichkeit von Einzelwerten offenläßt, die am Rande des Streubereiches der Simulationsrechnungen liegen.

#### 9.4 Zusammenfassende Beurteilung

Eine Fehlstelle in der zweiten Lamelle (Versuchsreihe 1), die durch eine äußere Lamelle hoher Qualität überdeckt wird, ist verhältnismäßig ungefährlich. Versuche und Simulationen ergaben Biegefestigkeiten von rund  $45 \text{ N/mm}^2$  (siehe Tabelle 9.1). Bei Brett-schichtholz-Biegeträgern mit äußeren Zuglamellen minderer Qualität führen extreme Schwachstellen in der zweiten Lamelle zu erheblichem Tragfähigkeitsabfall. Zwar lagen in Versuchsreihe 2 die Festigkeiten mit KAR-Werten von 0,32, 0,37 und 0,68 bereits außerhalb des zulässigen Bereiches nach den deutschen Gütesortierbestimmungen, der Festigkeitsabfall auf rund  $27,0 \text{ N/mm}^2$  ist jedoch beachtlich.

Tabelle 9.1: Zusammenstellung der Bruchlasten und Biegefestigkeiten sämtlicher Versuche

Versuch Nr.	Bruchlast $F_u$ kN	Biegefestigkeit $\beta_B$ N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert $\bar{\beta}_B$ N/mm <sup>2</sup>	Bemerkungen
1/1 1/2 1/3	67,9 64,7 77,7	44,9 42,8 51,4	46,4	Stumpfstoß in der zweiten Lamelle mit fehlerfreien Lamellen überdeckt
2/1 2/2 2/3	32,7 47,1 42,3	21,6 31,1 28,0	26,9	Stumpfstoß in der zweiten Lamelle mit großen Ästen überdeckt
3/1 3/2 3/3	86,4 82,4 98,6	57,1 54,5 65,2	58,9	KZV in der zweiten Lamelle mit fehlerfreien Lamellen überdeckt
4/1 4/2 4/3	73,0 69,6 88,7	48,3 46,0 58,6	51,0	KZV in der äußersten Lamelle und Bretter unterschiedlicher Qualität in der zweiten Lamelle
5/1 5/2 5/3	81,8 66,9 68,7	54,1 44,2 45,4	47,9	
6/1 6/2 6/3	70,8 60,6 77,1	46,8 40,1 51,0	46,0	
7/1 7/2 7/3	74,9 74,2 68,4	49,5 49,1 45,2	47,9	Wie Reihe 7, jedoch mit Lamellen mit niedrigem Elastizitätsmodul
8/1 8/2 8/3	55,2 46,7 58,6	36,5 30,9 38,7	35,4	

Eine zunehmende Güte der äußeren Lamelle fördert die Tragfähigkeit und läßt Keilzinkenverbindungen in der zweiten Lamelle völlig unschädlich werden (Versuchsreihe 3). Bei einer praktisch fehlerfreien äußeren Lamelle können Biegefestigkeiten von nahezu  $60 \text{ N/mm}^2$  erreicht werden. Die Simulationsrechnungen erwiesen sich gerade in diesen Fällen noch auf der "sicheren Seite" liegend und können verbessert werden (vgl. Abschnitt 9.3). Vor allen Dingen die Streuung der Simulationsrechnungen ist in solchen Fällen noch zu groß und läßt weitere Untersuchungen für angebracht erscheinen.

Die Versuchsreihen 4 bis 7 mit Keilzinkenverbindungen in der äußeren Zuglamelle zeigten keine auffallenden Unterschiede, die auf verschiedene Güteeigenschaften der die Keilzinkenverbindungen umgebenden "Zellen" zurückzuführen wären. Bei den Versuchsträgern muß aber darauf hingewiesen werden, daß die Keilzinkenverbindungen selbst von überdurchschnittlicher Qualität waren, so daß in vier von zwölf Fällen der Biegebruch sogar außerhalb der Keilzinkenverbindung eingeleitet wurde. Bei guter Qualität der Keilzinkenverbindung in der äußeren Zuglamelle erscheinen mittlere Biegefestigkeiten von  $45 \text{ N/mm}^2$  und 5%-Fraktilwerte von  $40 \text{ N/mm}^2$  nach den Versuchsergebnissen möglich. Die Simulationsrechnungen ergeben allerdings noch nicht ein so günstiges Bild.

Bei den Versuchsreihen 7 und 8 wurde der Einfluß der die Keilzinkenverbindung in der äußeren Zuglamelle umgebenden Bereiche deutlich. Die niedrigen Elastizitätsmoduln in Reihe 8 führten nach Versuch und Simulationsrechnung zu einem Tragfähigkeitsverlust. Inwieweit dies auch auf die Güte der weiter im Trägerinneren liegenden Brettlamellen oder der Lamellen in der Biegedruckzone zutrifft, läßt sich bereits durch Simulationsrechnungen überprüfen.

Es muß bei allen Schlußfolgerungen beachtet werden, daß sich die Versuche und die zugehörigen Rechnungen ausschließlich auf Träger mit einer Lamellenbreite von 10 cm und einer Gesamthöhe von 33 cm beziehen. Die Volumeneinflüsse sind noch nicht erfaßt.

Das vorliegende Rechenmodell läßt sich bei der Behandlung vieler offener Fragen des Holzleimbaus einsetzen. Benötigt werden hierzu lediglich Daten über die maßgebenden Materialkennwerte und ihrer natürlichen Streuungen. So kann die Auswirkung einer Veränderung der Qualität der Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit bzw. Zuverlässigkeit von BSH-Trägern ohne größeren Aufwand rechnerisch untersucht werden. Auch kann der Einfluß des Trägeraufbaus insbesondere der Güteklasse der Einzellamellen und der Qualität und Lage der Keilzinkenverbindungen auf die Biegefestigkeit eines BSH-Trägers abgeschätzt werden. Der Einfluß der Trägergröße (Trägerhöhe) und der Belastungsart (Volumeneffekt), der je nach Aufbau oder Güteklasse des BSH-Trägers unterschiedlich groß sein kann, läßt sich ebenso mit dem vorliegenden Rechenmodell erfassen. Ein wesentlicher Vorteil besteht dabei darin, daß bei einer Vielzahl von Simulationen nur eine begrenzte Zahl von kostenintensiven Großversuchen nötig ist, um die Rechenergebnisse zu überprüfen.

Eine große Zahl an Simulationen ermöglicht auch eine gesicherte Aussage über die Zuverlässigkeit (Versagenswahrscheinlichkeit) von BSH-Trägern, was sonst nur durch eine Vielzahl von Trägerversuchen möglich wäre. Dies ist besonders im Hinblick auf moderne Sicherheitskonzepte von großer Bedeutung.

Auch Neuerungen auf dem Gebiet des Holzleimbaus können in dieses Modell eingebaut werden. So kann der Einfluß einer verfeinerten Gütesortierung (z.B. gleichzeitige Berücksichtigung der Ästigkeit und des Elastizitätsmoduls) oder einer Verstärkung von BSH-Trägern (z.B. mit Hilfe von Glasfaserlamellen, Furnierschichtholz oder einer neu eingeführten Güteklasse "o" auf die Biege-

festigkeit abgeschätzt werden. Unter Einbeziehung der Schubfestigkeit und der Querkzugfestigkeit des Holzes oder eines Interaktionskriteriums läßt sich das Rechenmodell auch auf gekrümmte oder Satteldachträger erweitern.

Eine auf den Erkenntnissen dieses Forschungsvorhabens aufbauende Fortführung der Untersuchungen ist begonnen.

10    Schrifttum

Aplin, E.N. 1972: Stiffness Graded Eastern Spruce Laminated Beams. Forest Products Journal, Vol. 22, No. 1

Bohannon, B. 1966: Effect of Size on Bending Strength of Wood Members. U.S. Forest Service, Research Paper FPL 56

Curry, W.T., Tory, J.R. 1976: The Relation between the Modulus of Rupture (Ultimate Bending Stress) and Modulus of Elasticity of Timber. Princes Risborough Laboratory, Building Research Establishment, Current Paper CP 30/76

Dawe, P.S. 1964: The Effect of Knot Size on the Tensile Strength of European Redwood. Wood, November 1964

Eby, R.E. 1968: Structural Finger-Jointing Criteria and Performance. Journal of the Structural Division, March 1968

Egner, K., Kolb, H. 1966: Geleimte Träger und Binder aus Buchenholz. Bauen mit Holz, Heft 4/66

Ethington, R.L., 1971: Gerhards, C.C. Lumber in Tension. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Paper No. 14

Fewell, A.R., Curry, W.T. 1983: Depth Factor Adjustment in the Determination of Characteristic Bending Stresses for Visually Graded Timber. Building Research Establishment Information Paper IP 1/83

Foschi, R.O., Barrett, J.D. 1980: Glued Laminated Beam Strength: A Model. Journal of the Structural Division 1980

Gerhards, C.C. 1972: Relationship of Tensile Strength of Southern Pine Dimension Lumber to Inherent Characteristics. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, FPL 174

Gerhards, C.C., Ethington, R.L. 1974: Evaluation of Models for Predicting Tensile Strength of 2- by 4- Inch Lumber. Forest Products Journal, Vol. 24, No. 12

Glos, P. 1978: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 35

Glos, P. 1981: Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 61

Glos, P., Michel, Th. 1982: The Strength Distribution of Timber as Dependant on Stress Grading Efficiency. IUFRO Wood Engineering Group Meeting, Boras, Sweden, May 1982

Glos, P., Heimeshoff, B. 1982: Möglichkeiten und Grenzen der Festigkeitssortierung von Brettlamellen für den Holzleimbau. Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis. Herausgeber Ehlbeck J. und Steck G., Bruderverlag Karlsruhe

Glos, P. 1982: Festigkeitsverhalten von Brettschichtholz bei Zugbeanspruchung und seine Abhängigkeit von Werkstoff- und Einwirkungsgrößen. Bericht zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 63

Görlacher, R. 1984: Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 42 (1984)

Heimeshoff, B., Glos, P. 1980: Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brettlamellen. Holz als Roh- und Werkstoff 38 (1980)

Heimeshoff, B., Glos, P. 1983: Zugversuche an keilgezinkten Brettlamellen aus Fichtenholz (unveröffentlicht). Untersuchung durchgeführt im Auftrag des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe. Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Holzbau, Technische Universität München.

Kersken-Bradley, M., Maier, W. 1977: Sortierung von Brettschichtholz und Tragfähigkeit von Brettschicht-holzbauteilen. Holz als Roh- und Werkstoff 35 (1977)

Kolb, H. 1974: Versuche mit verleimten Holzbauteilen. Holz als Roh- und Werkstoff 32 (1974)

Kollmann, F., Krech, H. 1960: Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. Holz als Roh- und Werkstoff, 18 (1960)

Kunesh, R.H., Johnson, J.W. 1972: Effect of Single Knots on Tensile Strength of 2-by 8- Inch Douglas-Fir Dimension Lumber. Forest Products Journal, Vol. 22, No. 1

Kunesh, R.H., Johnson, J.W. 1974: Effect of Size on Tensile Strength of Clear Douglas-Fir and Hem-Fir Dimension Lumber. Forest Products Journal, Vol. 24, No. 8

Larsen, H.J. 1980: Strength of Glued Laminated Beams. Part 2 (Properties of Glulam Laminations). Institute of Building Technology and Structural Engineering, Report No. 8004. Aalborg University, Danmark, April 1980

Larsen, H.J. 1980: Strength of Finger Joints. Institute of Building Technology and Structural Engineering, IFB/A 8002. Aalborg University, Danmark, May 1980

Larsen, H.J. 1982: Strength of Glued Laminated Beams. Part 5 (Test of Beams). Institute of Building Technology and Structural Engineering, Report No. 8201. Aalborg University, Danmark, Jan. 1982

Malhotra, S.K., Bazan, I.M.M. 1980: Ultimate Bending Strength Theory for Timber Beams. Wood Science, Vol. 13, No. 1, July 1980

Marx, C.M., Moody, R.C. 1982: Effect of Lumber Width and Tension Lamination Quality on the Bending Strength of Four-Ply Laminated Beams. Forest Products Journal Vol. 32, No. 1

Moody, R.C. 1970: Glued Laminated Timber Research at the Forest Products Laboratory. Forest Products Journal Vol. 20, No. 9

Neuhaus, F.H. 1981: Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Mitteilung Nr. 81-8, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum

New Zealand Standard 1978: Specification for Finger Jointed Timber, NZS 3616

Orosz, I. 1969: Modulus of Elasticity and Bending Strength Ratio as Indicators of Tensile Strength of Lumber. Journal of Materials, Vol. 4, No. 4, Dec. 1969

Pellerin, R.F., Strickler, M.D. 1971: Tension Proof Loading of Lam Stock for Laminated Beams. Forest Products Journal Vol. 21, No. 5

Peterson, J., Noziska, D. 1973: The Tensile Strength of Laminated Members. Forest Products Journal Vol. 23, No. 11

Pierce, C.B. 1980: Strength Prediction and Sampling Timber in Structural Sizes. Princes Risborough Laboratory, Jan. 1980

Schniewind, A.P., Lyon, D.E. 1971: Tensile Strength of Redwood Dimension Lumber. I. Relation to Grade and Working Stress. Forest Products Journal, Vol. 21, No. 7

Schniewind, A.P., Lyon, D.E. 1971: Tensile Strength of Redwood Dimension Lumber. II. Prediction of Strength Values. Forest Products Journal Vol. 21, No. 8

Selbo, M.L. 1963: Effect of Joint Geometry on Tensile Strength of Finger Joints. Forest Products Journal, Vol. 13, No. 9

Schuler, C.E., Grant, D.A., Moody, R.C. 1979: Evaluation of Glued Laminated Beams of Eastern Spruce and Eastern Hemlock. Forest Products Journal Vol. 29, No. 7

Strickler, M.D., Pellerin, R.F. 1971: Tension Proof Loading of Finger Joints for Laminated Beams. Forest Products Journal Vol. 21, No. 6

Tory, J.R. 1976: ECE Knot Area Ratio Grades. IUFRO Wood Engineering Group Meeting. Denmark/Norway 1976, Paper 18

Vinopal, G.W. 1980: Determination of the Combined Influence of Density and Knots on the Mechanical Properties of Full-Size Structural Timber. IUFRO Wood Engineering Group Meeting, Oxford, England, Paper B4, April 1980

Weibull, W. 1939: A Statistical Theory of the Strength of Materials. Swedish Royal Inst. Eng. Res. Proc., Stockholm

Zienkiewicz, O.C. 1975: Methode der finiten Elemente. Carl Hauser Verlag, München Wien

Zurmühl, R. 1958: Matrizen. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg

Normen:

DIN 1052 Teil 1: Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung. Ausgabe Oktober 1969.

DIN 4074 Teil 1: Bauholz für Holzbauteile; Gütebedingungen für Bauschnittholz (Nadelholz). Ausgabe Dezember 1958.

DIN 52 182: Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte. Ausgabe September 1976.

DIN 52 183: Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Ausgabe November 1977.

DIN 68 140: Keilzinkenverbindung von Holz. Ausgabe Oktober 1971.

United Nations/Economic Commission for Europe (ECE):

ECE recommended standards for stress grading and  
finger-jointing of structural coniferous sawn timber.  
Genf, November 1982.

Kenngrößen		Dimen- sion	Mittel- wert $\bar{x}$	Standard- abweichung s	Variations- koeffizient v %
Brettlänge L <sup>1)</sup>					
	B = 100 mm		4,30	0,71	17
	B = 150 mm	m	4,62	0,67	15
Darr-Rohdichte $\rho_0$ <sup>2)</sup>		g/cm <sup>3</sup>	0,43	0,05	12
nicht-keil- gezinkte Brettlamellen	Druck-Elastizitätsmodul $E_D$ <sup>2)</sup>	N/mm <sup>2</sup>	12410	2840	23
	Druckfestigkeit $\beta_D$ <sup>2)</sup>		39,8	10,2	26
	Zug-Elastizitätsmodul $E_Z$ <sup>2)</sup>		12250	3150	26
	Zugfestigkeit $\beta_Z$ <sup>2)</sup>		50,2	16,4	33
keilgezinkte Brettlamellen	Druck-Elastizitätsmodul $E_D^{KZV}$ <sup>2)</sup>	N/mm <sup>2</sup>	11680	<b>2800</b>	24
	Druckfestigkeit $\beta_D^{KZV}$ <sup>2)</sup>		33,6	8,8	26
	Zug-Elastizitätsmodul $E_Z^{KZV}$ <sup>3)</sup>		13580	2350	17
	Zugfestigkeit $\beta_Z^{KZV}$ <sup>3)</sup>		34,8	8,4	24

1) nach LARSEN (1980)

2) nach GLOS (1978, 1982)

3) siehe Abschnitt 4

Tabelle 3.1 Charakteristische Verteilungswerte für Kenngrößen von Brettlamellen

Kenngrößen		Regressionsgleichungen	Standardabweichung des Residuums	Korrelationskoeffizient
nicht-keil- gezinkte Brettlamellen	Druck-Elastizitätsmodul $E_D^{1)}$	$\ln(E_D) = 8,22 + 3,19 \cdot \rho_o - 0,602 \cdot A - 13,6 \cdot \rho_o \cdot u^2 - 11,0 \cdot A \cdot u^2$	0,142	0,80
	Druckfestigkeit $\beta_D^{1)}$	$\ln(\beta_D) = 3,23 + 2,8 \cdot \rho_o - 0,825 \cdot A - 5,37 \cdot u$	0,088	0,94
	Zug-Elastizitätsmodul $E_Z^{1)}$	$\ln(E_Z) = 8,2 + 3,13 \cdot \rho_o - 1,17 \cdot A$	0,180	0,77
	Zugfestigkeit $\beta_Z^{1)}$	$\ln(\beta_Z) = -4,22 + 0,876 \cdot \ln(E_Z) - 0,093 \cdot A \cdot \ln(E_Z)$	0,187	0,86
keilgezinkte Brettlamellen	Druck-Elastizitätsmodul $E_D^{KZV 1)}$	$\ln(E_D^{KZV}) = 8,43 + 2,53 \cdot \rho_o - 10,3 \cdot u^2$	0,231	0,56
	Druckfestigkeit $\beta_D^{KZV 1)}$	$\ln(\beta_D^{KZV}) = -3,05 + 0,816 \cdot \ln(E_D^{KZV}) + 68,4 \cdot \rho_o \cdot u^2 - 1,3 \cdot u \cdot \ln(E_D^{KZV})$	0,116	0,92
	Zug-Elastizitätsmodul $E_Z^{KZV 2)}$	$\ln(E_Z^{KZV}) = 8,459 + 2,517 \cdot \rho_o$	0,142	0,61
	Zugfestigkeit $\beta_Z^{KZV 2)}$	$\ln(\beta_Z^{KZV}) = 2,716 + 5,905 \cdot 10^{-5} \cdot E_Z^{KZV}$	0,231	0,52

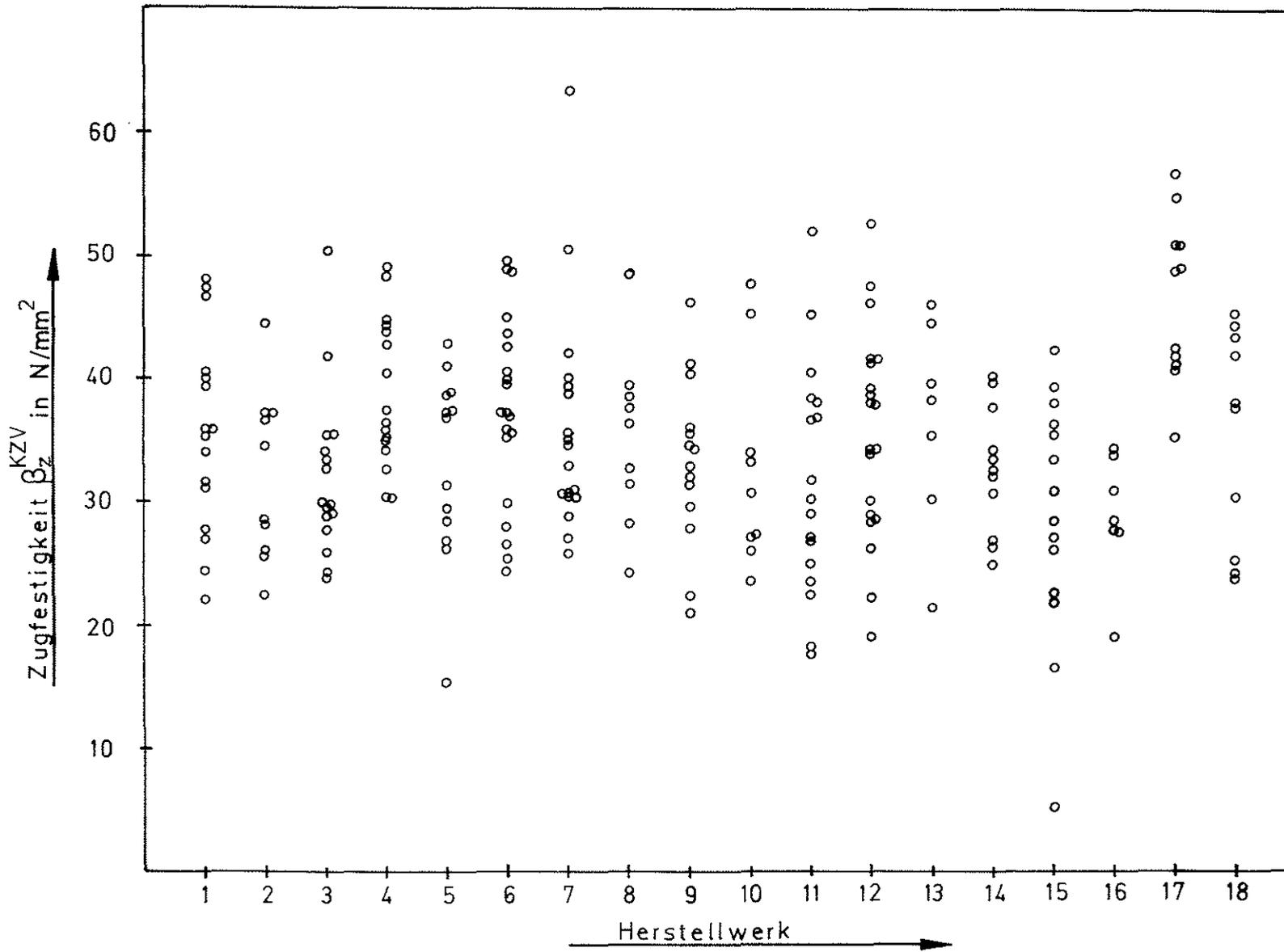
1) nach GLOS (1978, 1982)  
2) siehe Abschnitt 4

$\rho_o$  = Darr-Rohdichte in  $[g/cm^3]$   
 $u$  = Feuchtigkeitsgehalt [-]  
 $A$  = KAR - Wert [-]

Tabelle 3.2 Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften von Brettabschnitten ("Zellen")

Dicke mm \ Breite mm	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
20										2			
24					1			3	1	1		2	3
28	2	3	4	13	10	4	9	13	14	5	7	5	19
30		1	4	9	13	16	15	10	19	5	5	1	14
34					1						1	1	3

Tabelle 4.1 Anzahl der Prüfkörper und ihre Querschnittsabmessungen



**Bild 4.1:** Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen  
(239 Proben aus 18 Herstellwerken)

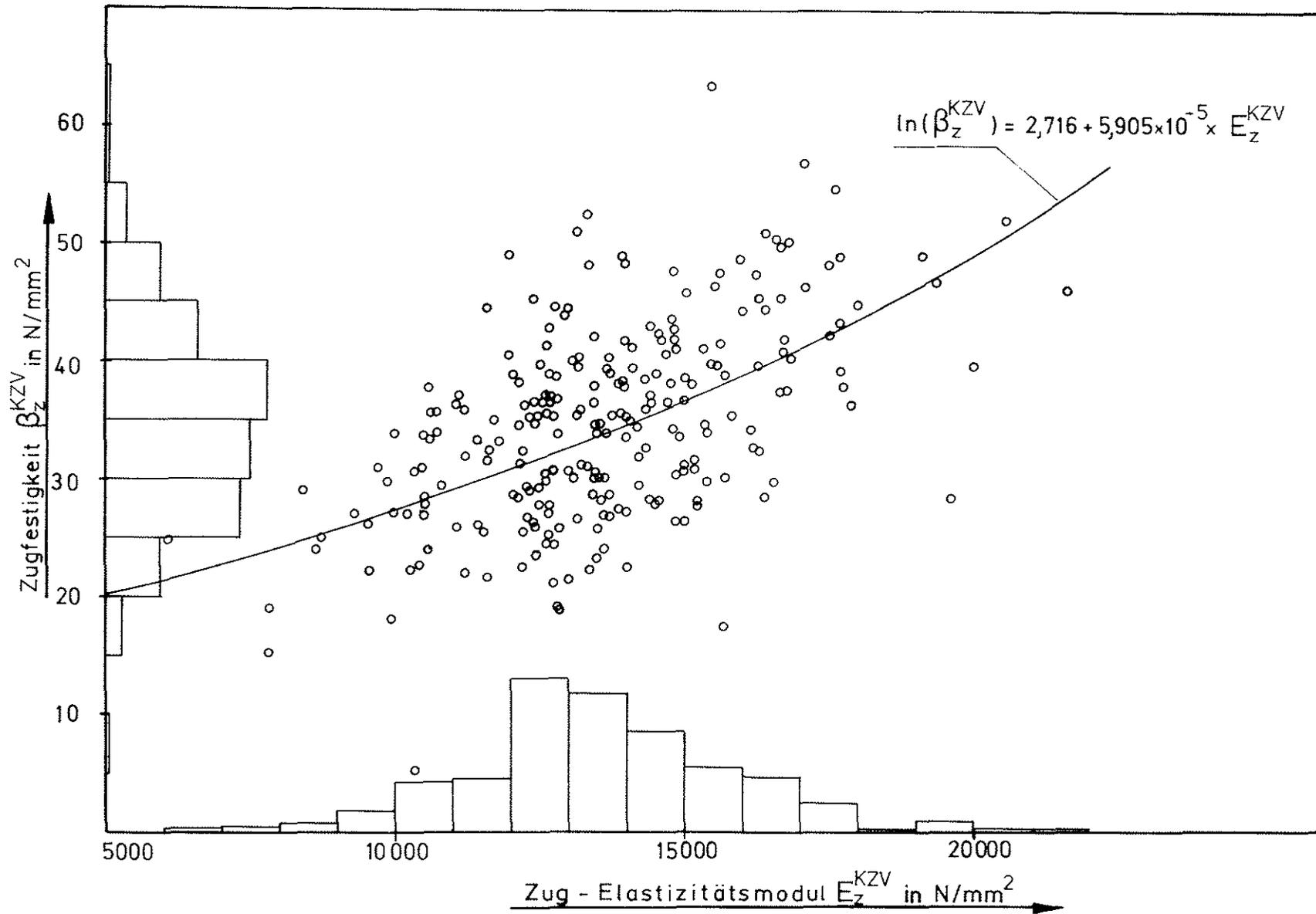


Bild 4.2: Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit vom Zug - Elastizitätsmodul

Tabelle 6.2 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 1

	Traeger 1/1		Traeger 1/2		Traeger 1/3		charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	dynamischer E-Modul E <sub>dyn</sub> N/mm <sup>2</sup>	Rohdichte $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	dynamischer E-Modul E <sub>dyn</sub> N/mm <sup>2</sup>	Rohdichte $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	dynamischer E-Modul E <sub>dyn</sub> N/mm <sup>2</sup>	
10. Lamelle	0.39	11280	0.44	14010	0.45	11520	---
9. Lamelle	0.49	13750	0.39	11090	0.44	12170	---
8. Lamelle	0.44	13430	0.49	14690	0.43	13780	---
7. Lamelle	0.43	13090	0.50	15240	0.47	12610	---
6. Lamelle	0.45	14020	0.40	13330	0.45	13890	---
5. Lamelle	0.43	11770	0.42	12610	0.41	7400	---
4. Lamelle	0.44	11120	0.41	12740	0.48	13580	---
3. Lamelle	0.53	17560	0.52	17460	0.50	17200	fehlerfrei, hoher E-Modul
2. Lamelle	0.49	15290	0.48	14780	0.47	15080	Stumpfstoss
1. Lamelle	0.55	18330	0.50	17050	0.54	18760	fehlerfrei, hoher E-Modul

Tabelle 6.3 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 2

	Traeger 2/1		Traeger 2/2		Traeger 2/3		charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	
	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	
	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
10. Lamelle	0.48	10860	0.45	11850	0.50	12040	---
9. Lamelle	0.42	11320	0.43	13390	0.48	14070	---
8. Lamelle	0.41	11260	0.50	16710	0.45	13080	---
7. Lamelle	0.43	12110	0.44	13260	0.42	10790	---
6. Lamelle	0.44	12290	0.37	8920	0.46	14540	---
5. Lamelle	0.44	11430	0.46	13570	0.45	13480	---
4. Lamelle	0.44	11300	0.48	13890	0.47	11480	---
3. Lamelle	0.42	12470	0.45	10150	0.45	9700	AST
2. Lamelle	0.50	15940	0.49	15580	0.48	15280	Stumpfstoss
1. Lamelle	0.46	12020	0.43	11840	0.42	9160	AST

Tabelle 6.4 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 3

	Traeger 3/1		Traeger 3/2		Traeger 3/3		Charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	
	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	
	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
10. Lamelle	0.47	11630	0.51	14720	0.49	15000	---
9. Lamelle	0.49	17700	0.46	10810	0.47	12250	---
8. Lamelle	0.43	11540	0.48	12600	0.46	10870	---
7. Lamelle	0.53	18540	0.49	10770	0.50	10110	---
6. Lamelle	0.40	12350	0.46	10760	0.47	12010	---
5. Lamelle	0.45	12710	0.43	11790	0.45	11100	---
4. Lamelle	0.46	11580	0.42	8110	0.50	11490	---
3. Lamelle	0.43	14140	0.47	15660	0.49	16270	fehlerfrei, hoher E-Modul
2. Lamelle	0.48	14730	0.50	15680	0.50	15240	Keilzinkenverbindung
1. Lamelle	0.49	16680	0.48	14870	0.53	18380	fehlerfrei, hoher E-Modul

Tabelle 6.5 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 4

	Traeger 4/1		Traeger 4/2		Traeger 4/3		Charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte	dynamischer E-Modul	Rohdichte	dynamischer E-Modul	Rohdichte	dynamischer E-Modul	
	$\rho$	$E_{dyn}$	$\rho$	$E_{dyn}$	$\rho$	$E_{dyn}$	
	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
10. Lamelle	0.44	12660	0.49	7430	0.43	12280	---
9. Lamelle	0.49	13930	0.45	12550	0.41	11720	---
8. Lamelle	0.47	11250	0.45	12670	0.43	12970	---
7. Lamelle	0.55	18870	0.48	12550	0.40	12010	---
6. Lamelle	0.42	11230	0.47	13720	0.41	10470	---
5. Lamelle	0.46	13720	0.48	13660	0.45	11940	---
4. Lamelle	0.48	12480	0.47	10940	0.47	14500	---
3. Lamelle	0.52	16400	0.51	16560	0.42	13580	---
2. Lamelle	0.52	16860	0.50	17290	0.53	17440	fehlerfrei, hoher E-Modul
1. Lamelle	0.46	14400	0.46	14020	0.48	15010	Keilzinkenverbindung

Tabelle 6.6 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 5

	Traeger 5/1		Traeger 5/2		Traeger 5/3		
	Rohdichte	dynamischer E-Modul	Rohdichte	dynamischer E-Modul	Rohdichte	dynamischer E-Modul	charakteristische Merkmale der Lamellen
	$\rho$	$E_{dyn}$	$\rho$	$E_{dyn}$	$\rho$	$E_{dyn}$	
	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
10. Lamelle	0.52	13550	0.45	13580	0.42	12950	---
9. Lamelle	0.40	12010	0.46	13210	0.41	11180	---
8. Lamelle	0.44	11550	0.44	11770	0.43	10180	---
7. Lamelle	0.46	13880	0.46	12580	0.44	14000	---
6. Lamelle	0.49	15340	0.45	13440	0.42	11920	---
5. Lamelle	0.44	11460	0.49	12790	0.45	12300	---
4. Lamelle	0.42	11560	0.44	13310	0.45	12660	---
3. Lamelle	0.52	17530	0.53	18110	0.54	18440	fehlerfrei, hoher E-Modul
2. Lamelle	0.39	9000	0.42	9660	0.42	9600	AST
1. Lamelle	0.49	15660	0.49	16320	0.50	15520	Keilzinkenverbindung

Tabelle 6.7 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 6

	Traeger 6/1		Traeger 6/2		Traeger 6/3		charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	
	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	
	$g/cm^3$	$N/mm^2$	$g/cm^3$	$N/mm^2$	$g/cm^3$	$N/mm^2$	
10. Lamelle	0.43	10830	0.42	12570	0.43	11880	---
9. Lamelle	0.49	15250	0.45	12540	0.43	12120	---
8. Lamelle	0.45	14870	0.44	11690	0.45	13230	---
7. Lamelle	0.44	13010	0.49	16140	0.42	12840	---
6. Lamelle	0.44	12840	0.44	11470	0.47	15230	---
5. Lamelle	0.44	12720	0.43	11210	0.45	12050	---
4. Lamelle	0.45	14080	0.39	9310	0.45	12390	---
3. Lamelle	0.44	14940	0.46	13470	0.44	13130	fehlerfrei
2. Lamelle	0.46	14330	0.48	15280	0.48	14190	Keilzinkenverbindung
1. Lamelle	0.48	15230	0.50	16310	0.45	14390	Keilzinkenverbindung

Tabelle 6.8 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 7

	Traeger 7/1		Traeger 7/2		Traeger 7/3		charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	
	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	
	$\text{g/cm}^3$	$\text{N/mm}^2$	$\text{g/cm}^3$	$\text{N/mm}^2$	$\text{g/cm}^3$	$\text{N/mm}^2$	
10. Lamelle	0.48	16710	0.50	16520	0.53	16840	---
9. Lamelle	0.51	15960	0.47	14830	0.45	14710	---
8. Lamelle	0.47	15160	0.49	15470	0.43	13390	---
7. Lamelle	0.51	13320	0.50	16030	0.47	15170	---
6. Lamelle	0.48	14830	0.49	15790	0.51	14570	---
5. Lamelle	0.44	14770	0.51	16080	0.48	15350	---
4. Lamelle	0.50	16080	0.48	16080	0.49	16220	---
3. Lamelle	0.49	16070	0.48	15000	0.48	16220	---
2. Lamelle	0.51	16820	0.53	16780	0.55	17570	fehlerfrei, hoher E-Modul
1. Lamelle	0.45	12910	0.46	13990	0.46	13210	Keilzinkenverbindung

Tabelle 6.9 : Aufbau der BSH - Traeger fuer Versuchsreihe 3

	Traeger 8/4		Traeger 8/2		Traeger 8/3		charakteristische Merkmale der Lamellen
	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	Rohdichte	dynamischer	
	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	$\rho$	E-Modul	
	$\text{g/cm}^3$	$\text{N/mm}^2$	$\text{g/cm}^3$	$\text{N/mm}^2$	$\text{g/cm}^3$	$\text{N/mm}^2$	
10. Lamelle	0.43	9450	0.39	9450	0.47	9570	---
9. Lamelle	0.41	10410	0.37	9450	0.48	9280	---
8. Lamelle	0.39	10170	0.39	10080	0.44	11990	---
7. Lamelle	0.38	10070	0.40	10580	0.46	12230	---
6. Lamelle	0.48	13300	0.42	13630	0.44	13230	---
5. Lamelle	0.45	13280	0.53	15300	0.42	13050	---
4. Lamelle	0.44	11430	0.44	10660	0.47	12190	---
3. Lamelle	0.42	10140	0.41	9010	0.44	11260	---
2. Lamelle	0.38	10150	0.43	11380	0.40	12080	fehlerfrei, niedr. E-Modul
1. Lamelle	0.46	13580	0.44	13230	0.44	13440	Keilzinkenverbindung

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite



Bild 6.2a: Bruchbild des Trägers 1/1

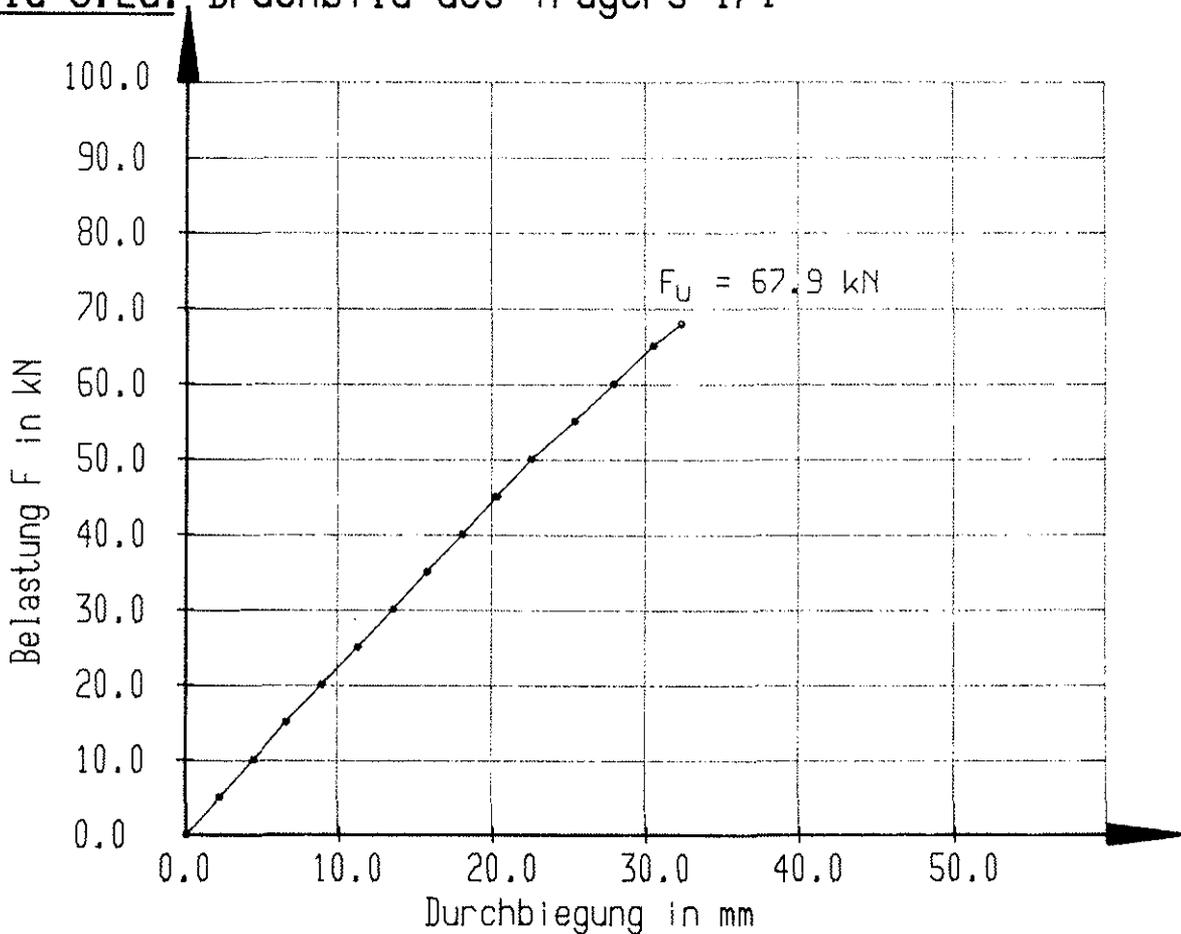


Bild 6.2b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 1/1

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite



Bild 6.3a: Bruchbild des Trägers 1/2

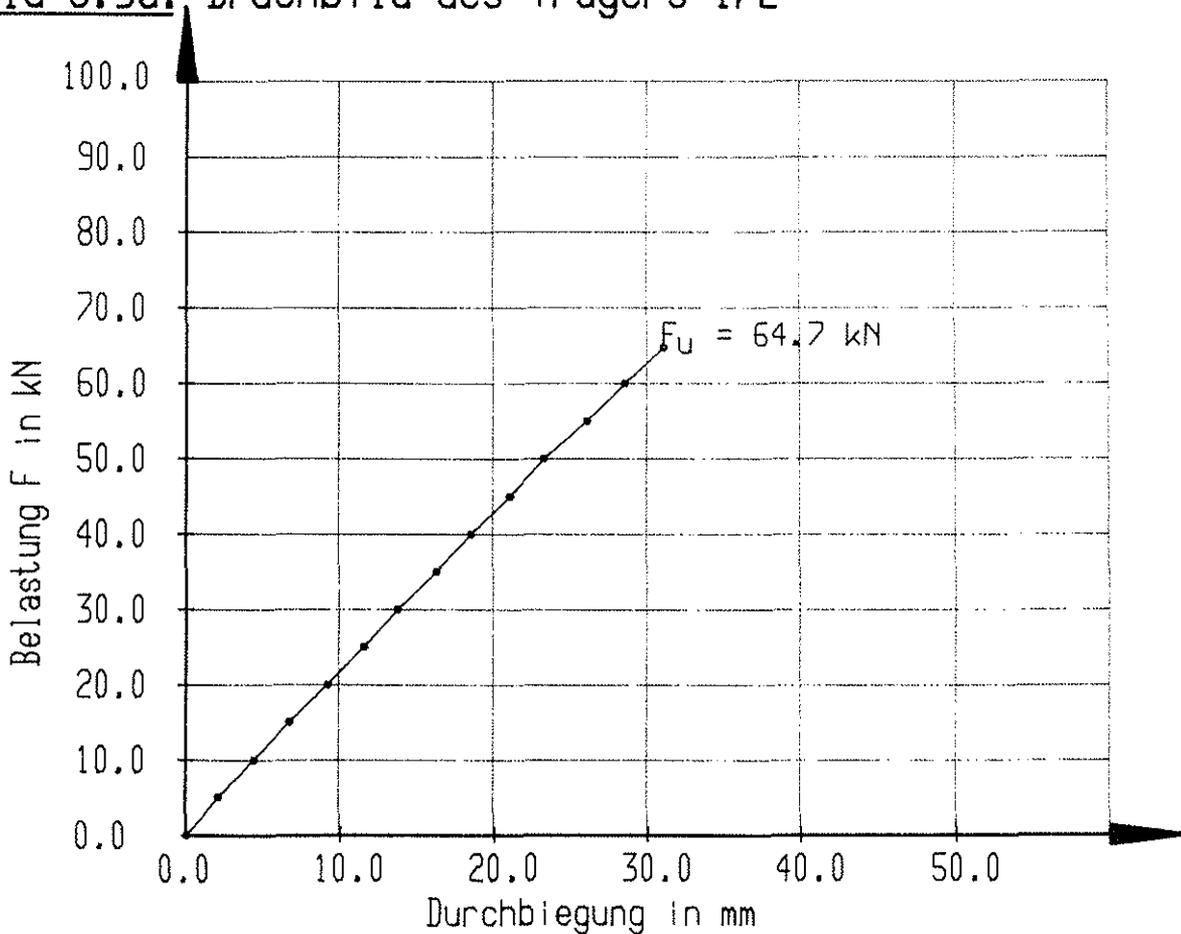


Bild 6.3b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 1/2

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite

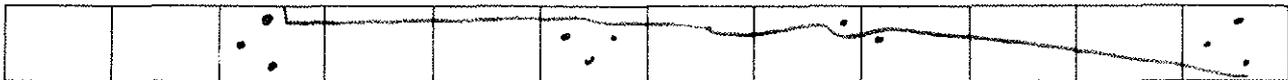


Bild 6.4a: Bruchbild des Trägers 1/3

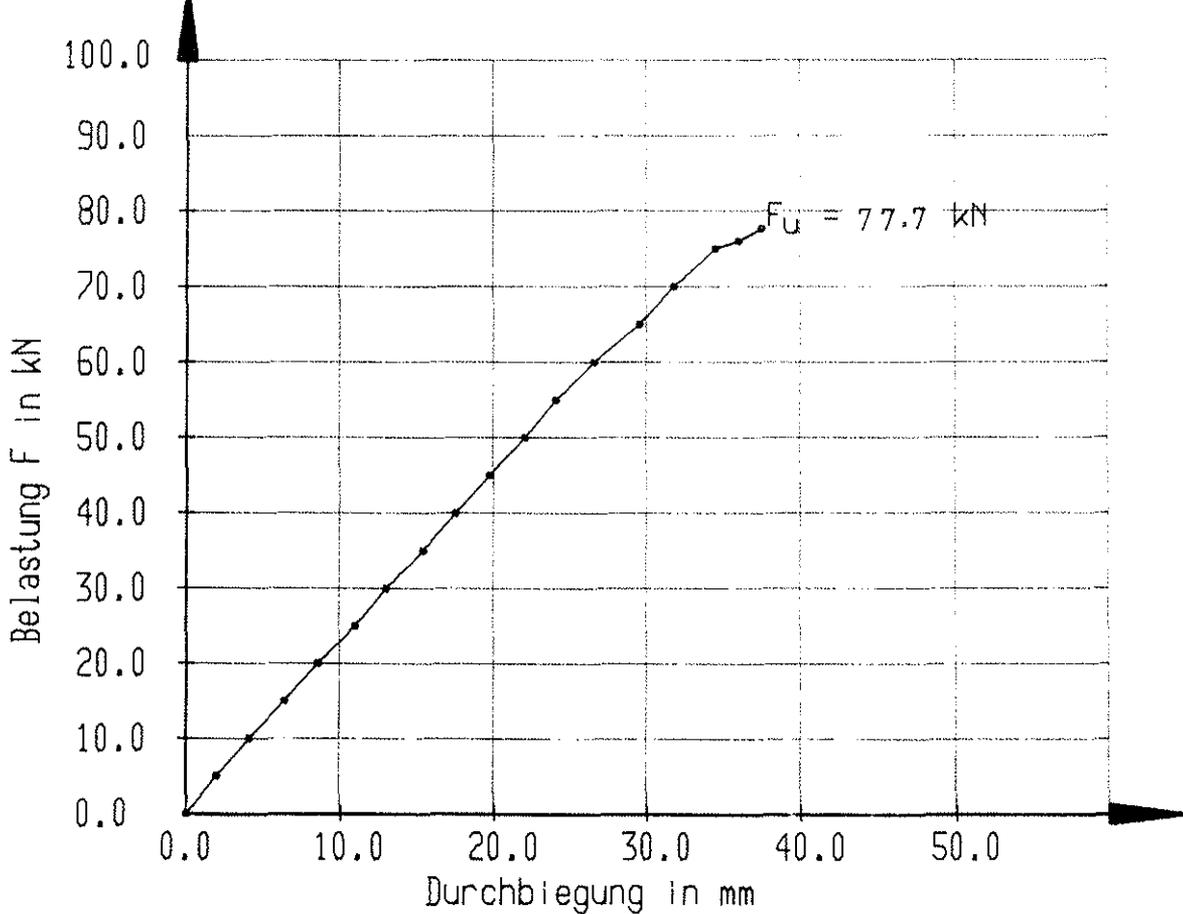


Bild 6.4b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 1/3

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite

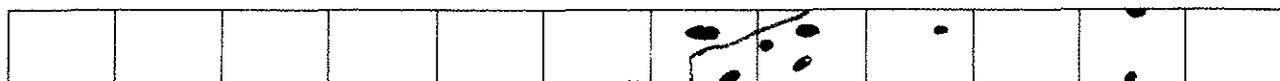


Bild 6.5a: Bruchbild des Trägers 2/1

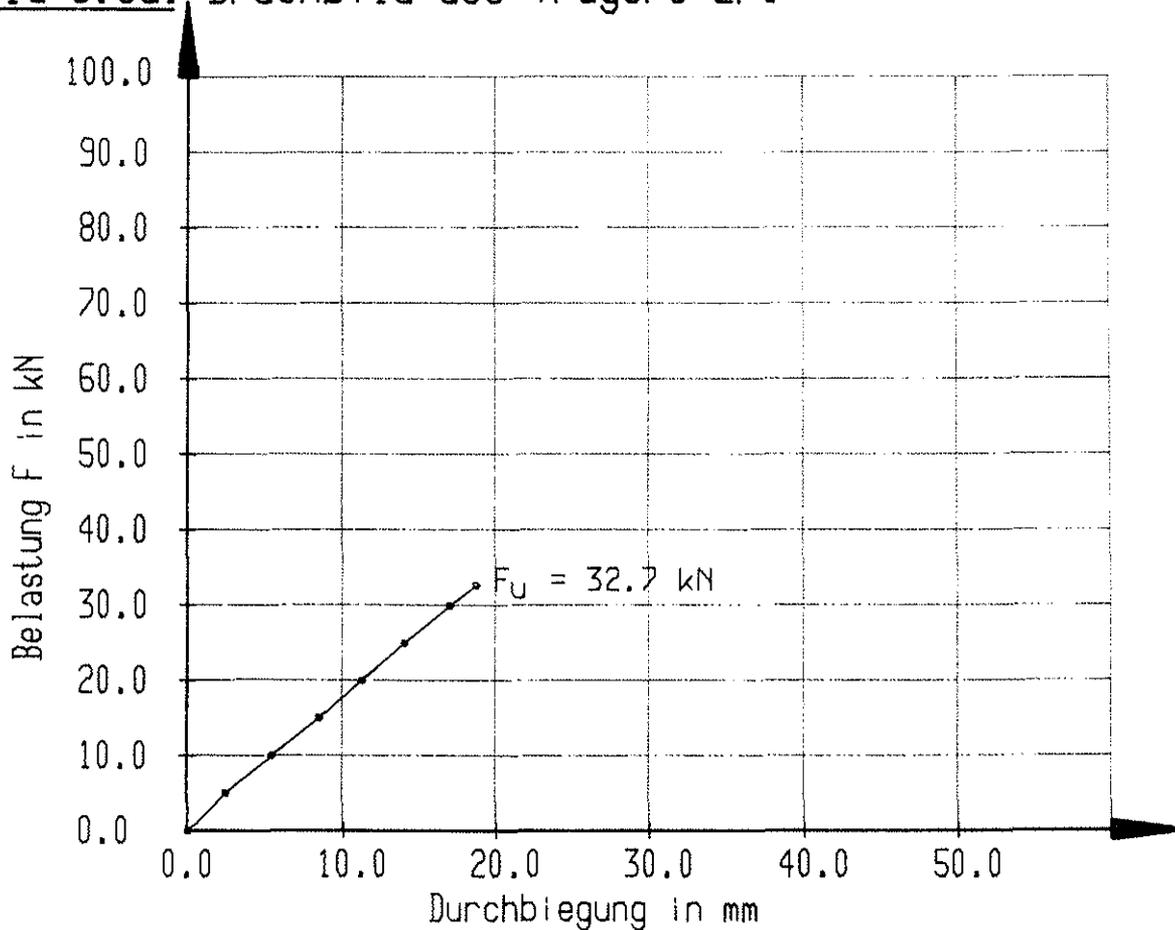
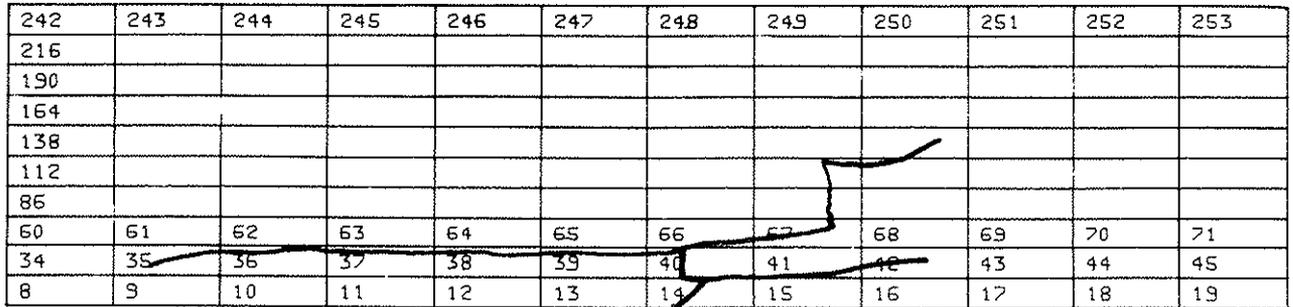
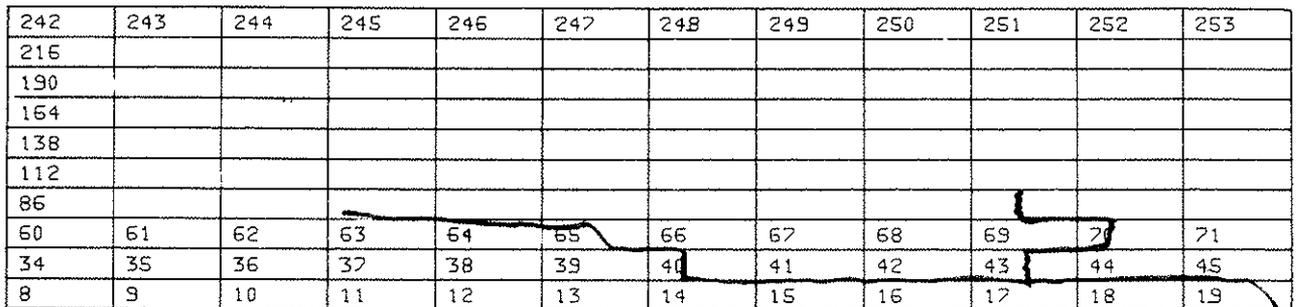


Bild 6.5b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 2/1

Vorderseite



Rückseite



Unterseite



Bild 6.6a: Bruchbild des Trägers 2/2

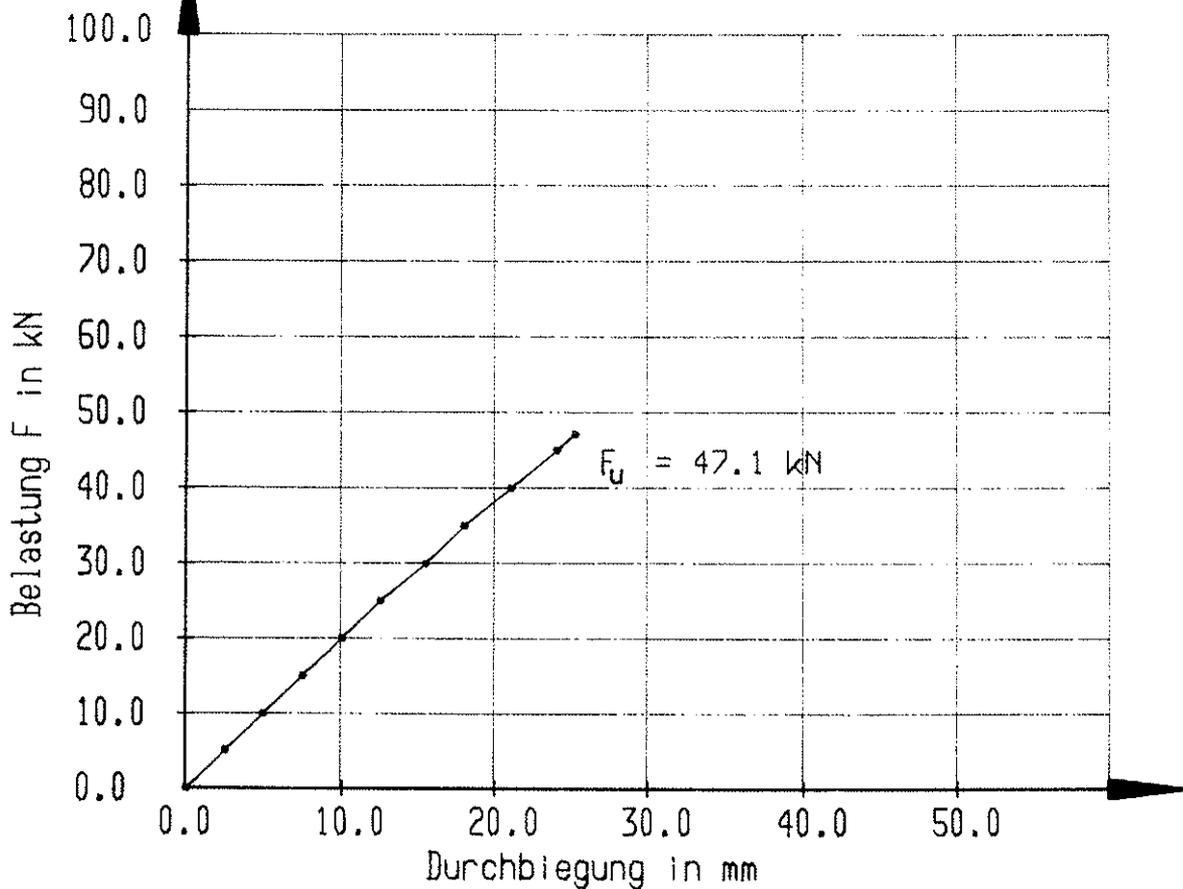
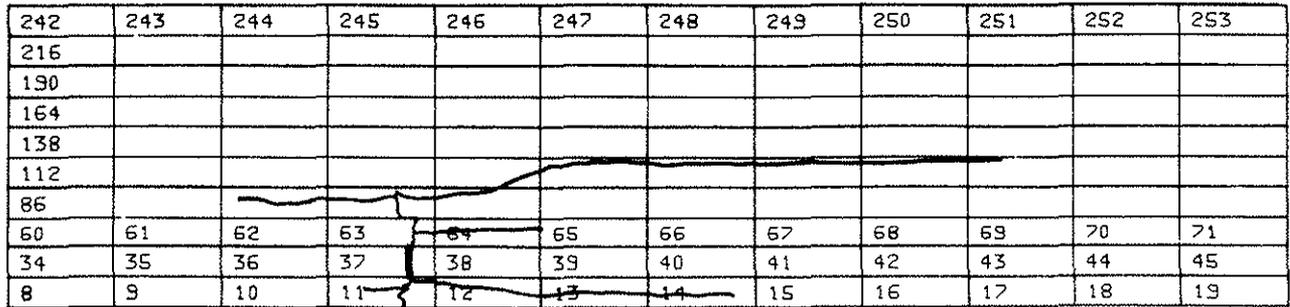
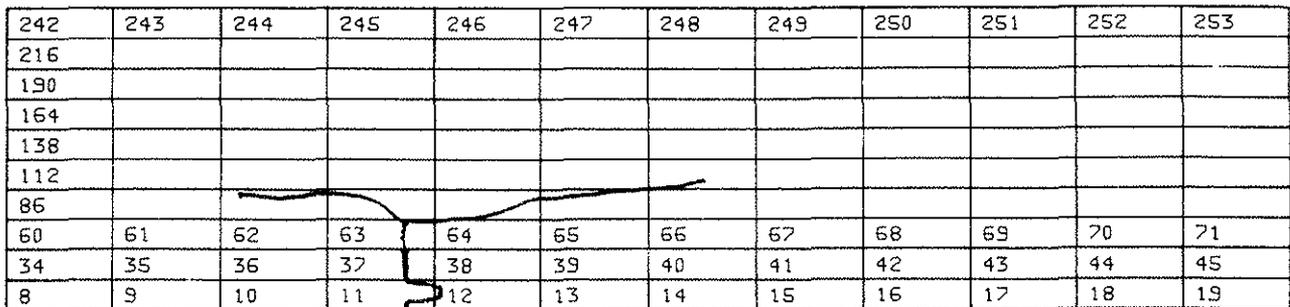


Bild 6.6b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 2/2

Vorderseite



Rückseite



Unterseite

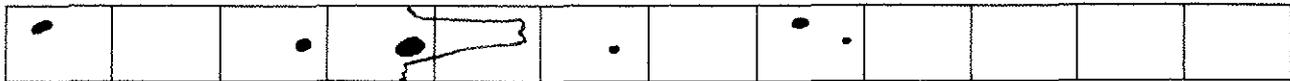


Bild 6.7a: Bruchbild des Trägers 2/3

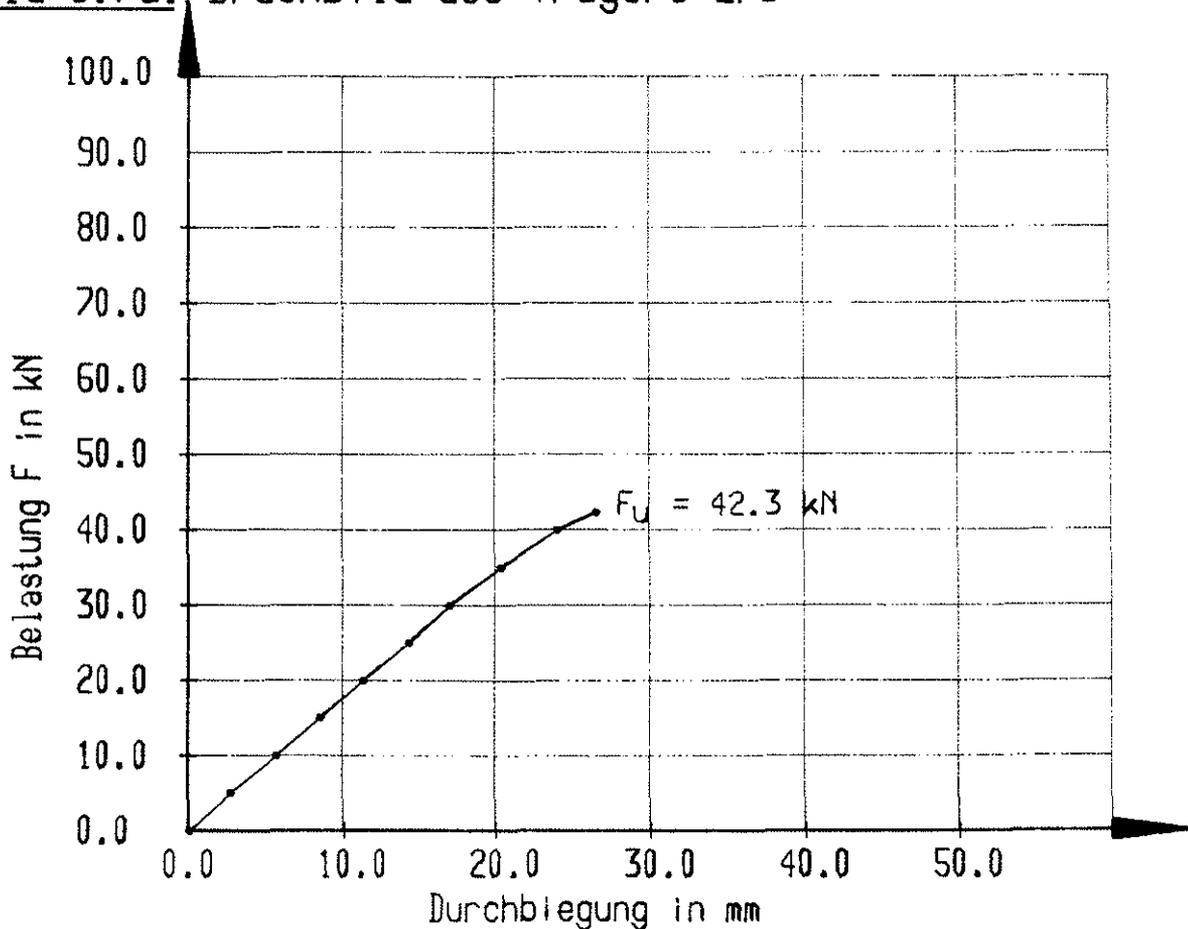


Bild 6.7b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 2/3

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Bild 6.8a: Bruchbild des Trägers 3/1

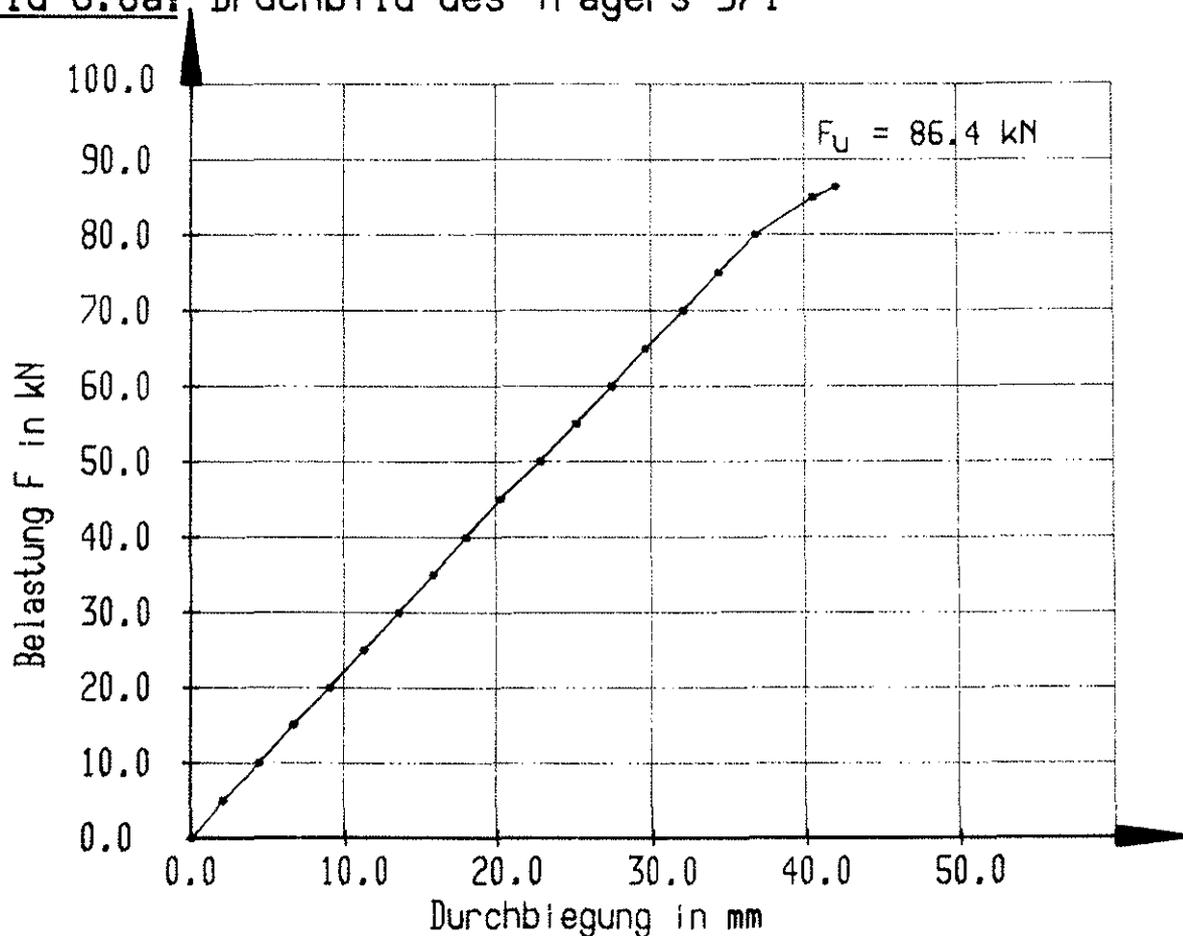
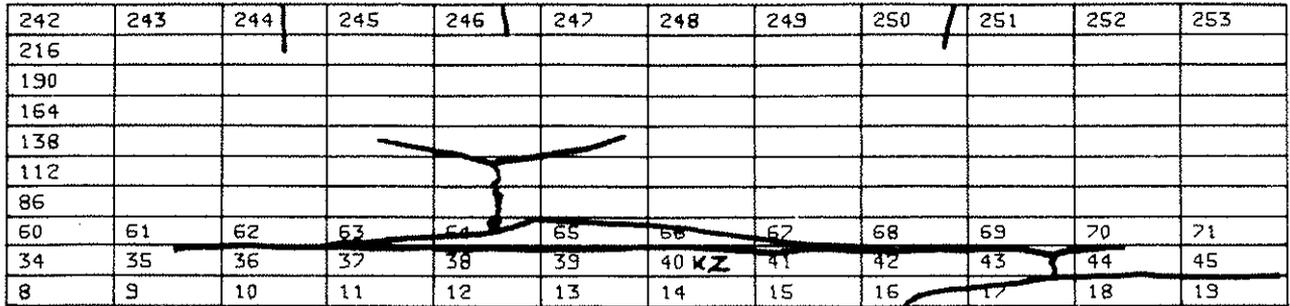
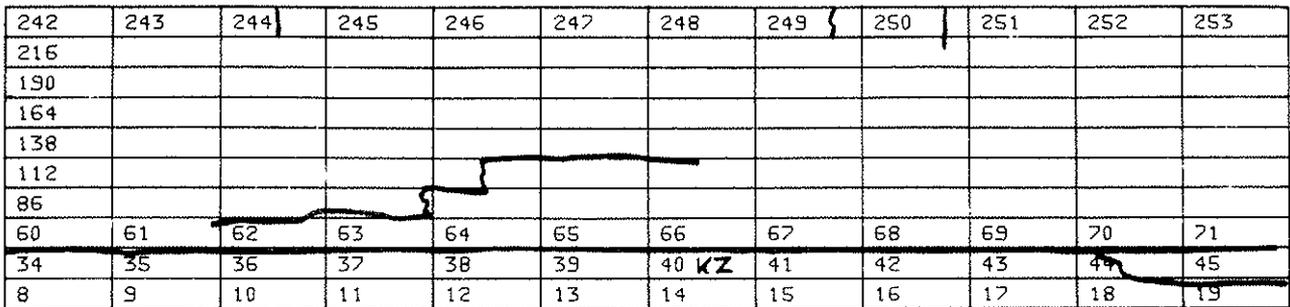


Bild 6.8b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 3/1

Vorderseite



Rückseite



Unterseite



Bild 6.9a: Bruchbild des Trägers 3/2

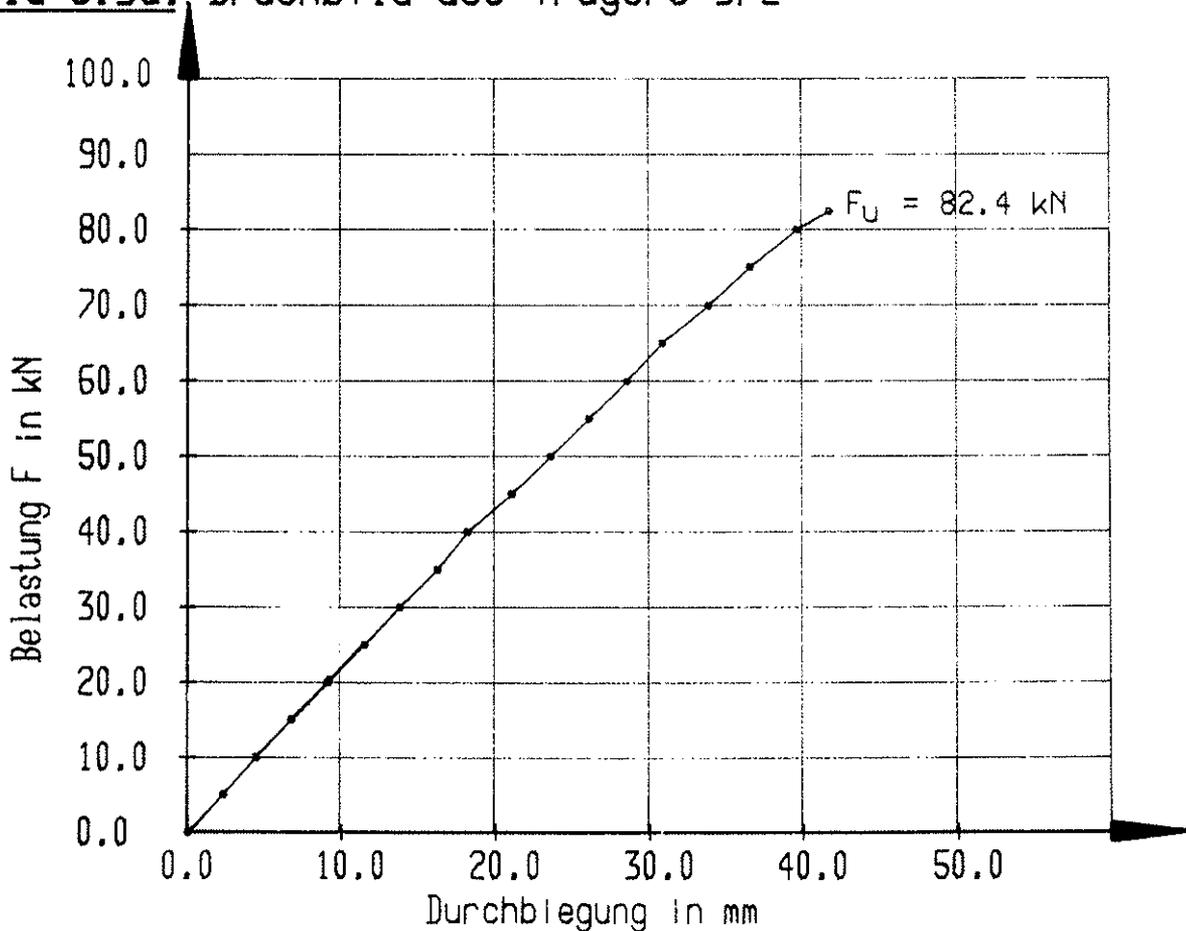


Bild 6.9b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 3/2

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Bild 6.10.a: Bruchbild des Trägers 3/3

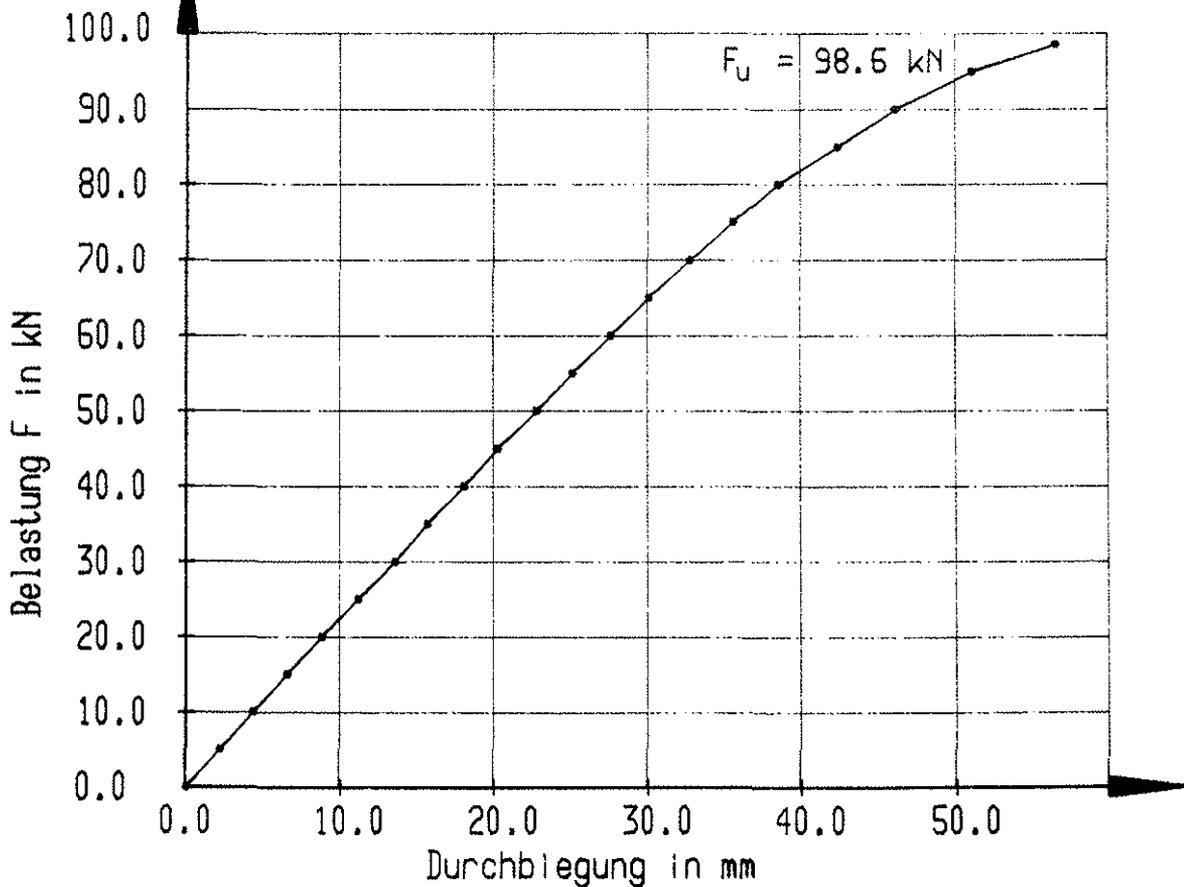


Bild 6.10b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 3/3

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite



Bild 6.11a: Bruchbild des Trägers 4/1

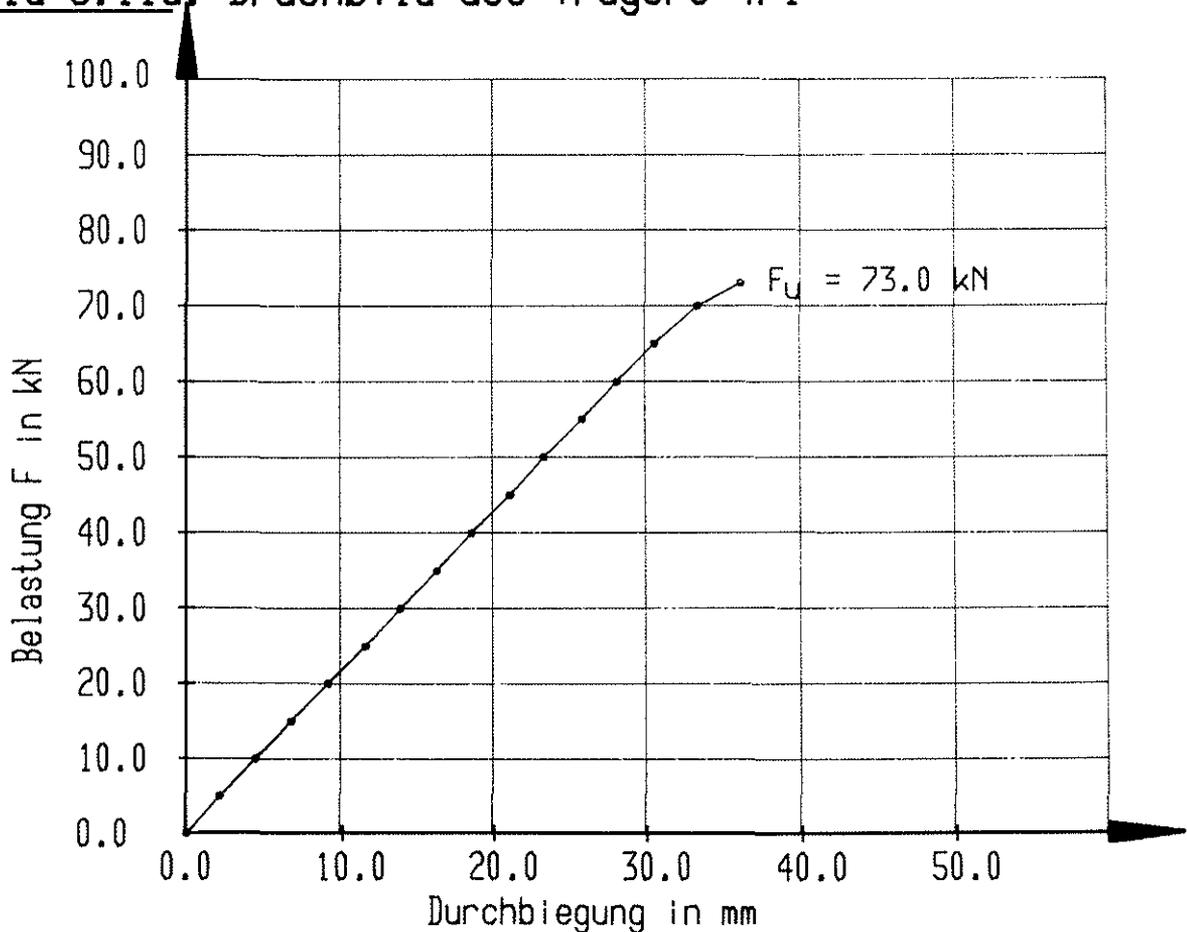


Bild 6.11b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 4/1



Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
8	9	10	11	12	13	14	kz	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
8	9	10	11	12	13	14	kz	15	16	17	18	19

Unterseite

		.	.	.		.	.	.		.	.	
--	--	---	---	---	--	---	---	---	--	---	---	--

Bild 6.13a: Bruchbild des Trägers 4/3

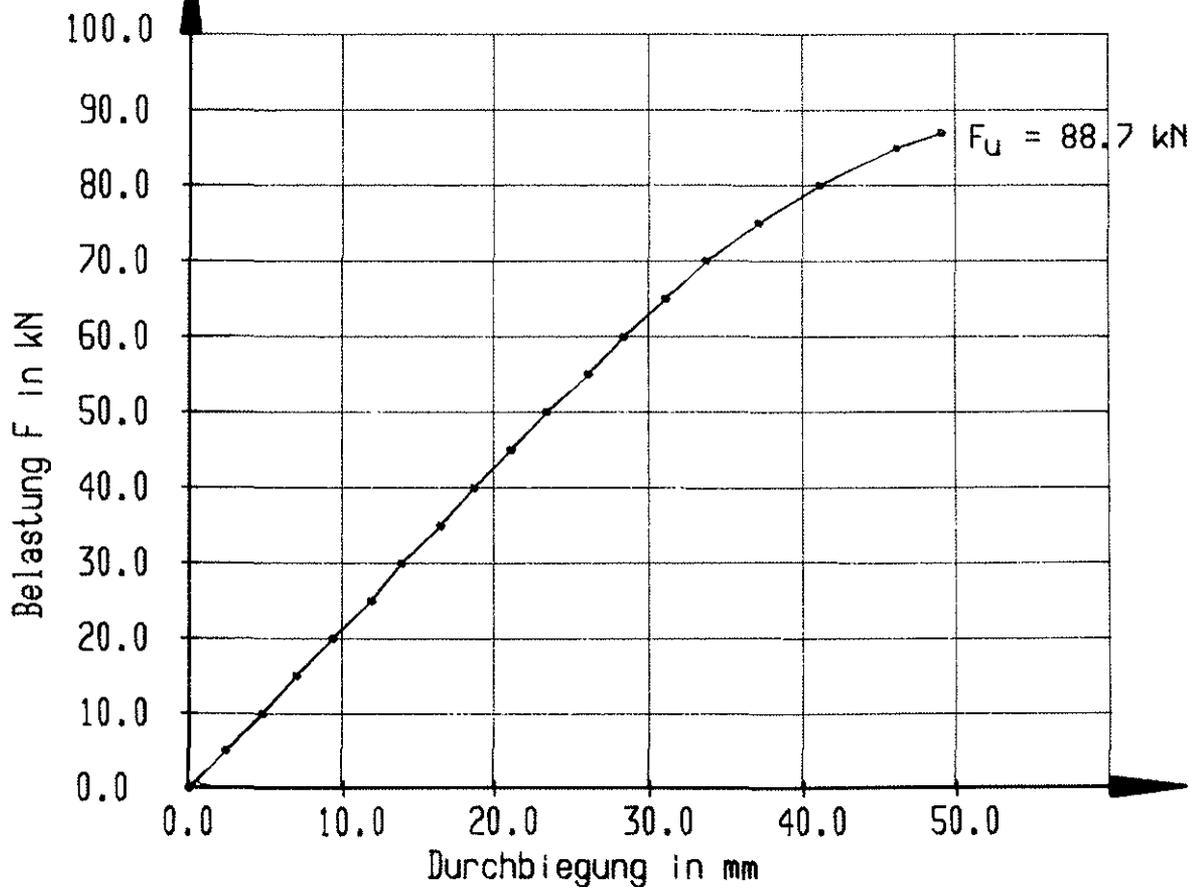


Bild 6.13b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 4/3

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Unterseite

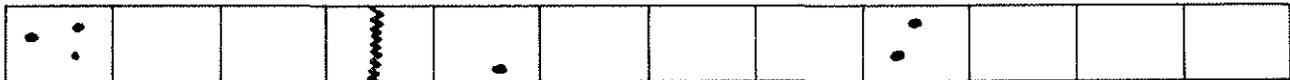


Bild 6.14a: Bruchbild des Trägers 5/1

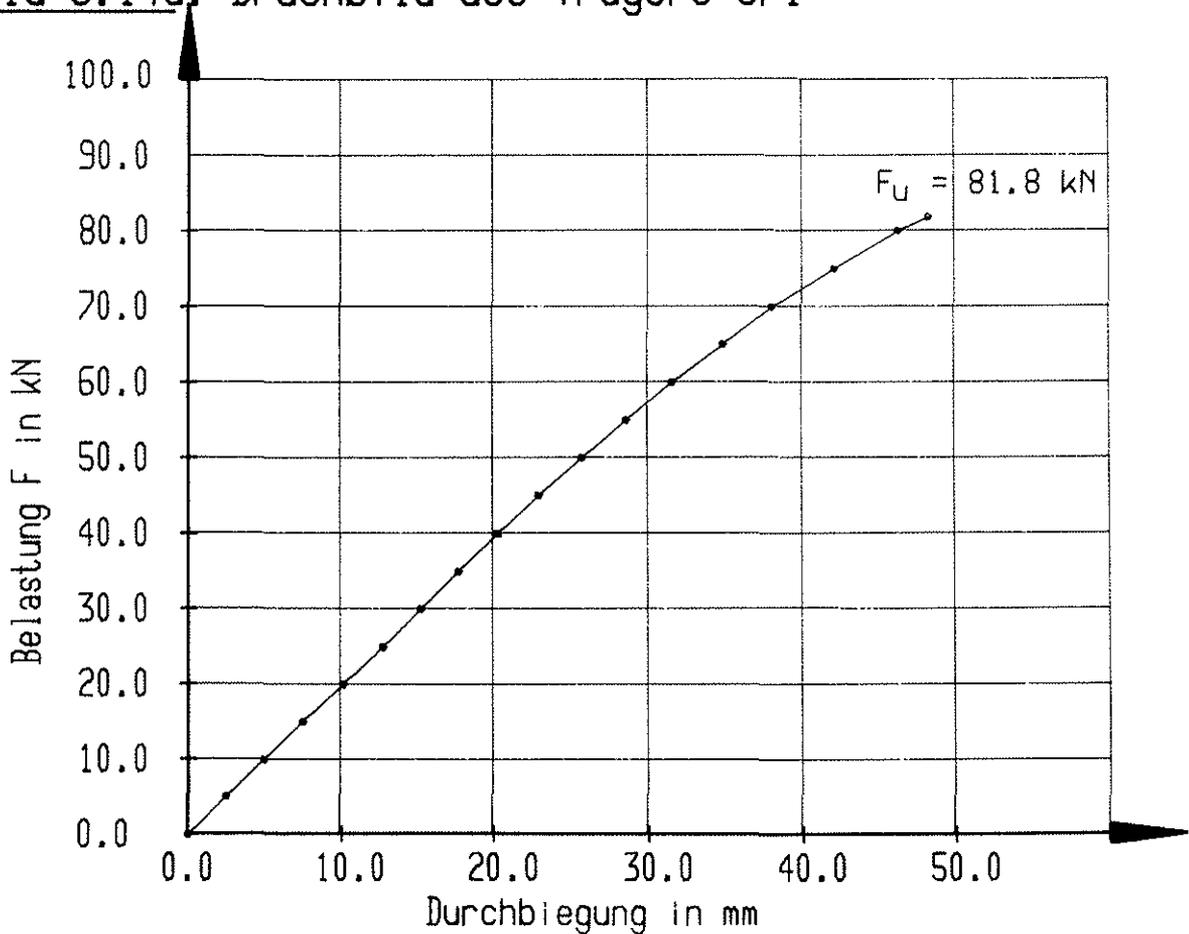


Bild 6.14b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 5/1

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
8	9	10	11	12	13	14	15	KZ	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
8	9	10	11	12	13	14	15	KZ	16	17	18	19

Unterseite



Bild 6.15a: Bruchbild des Trägers 5/2

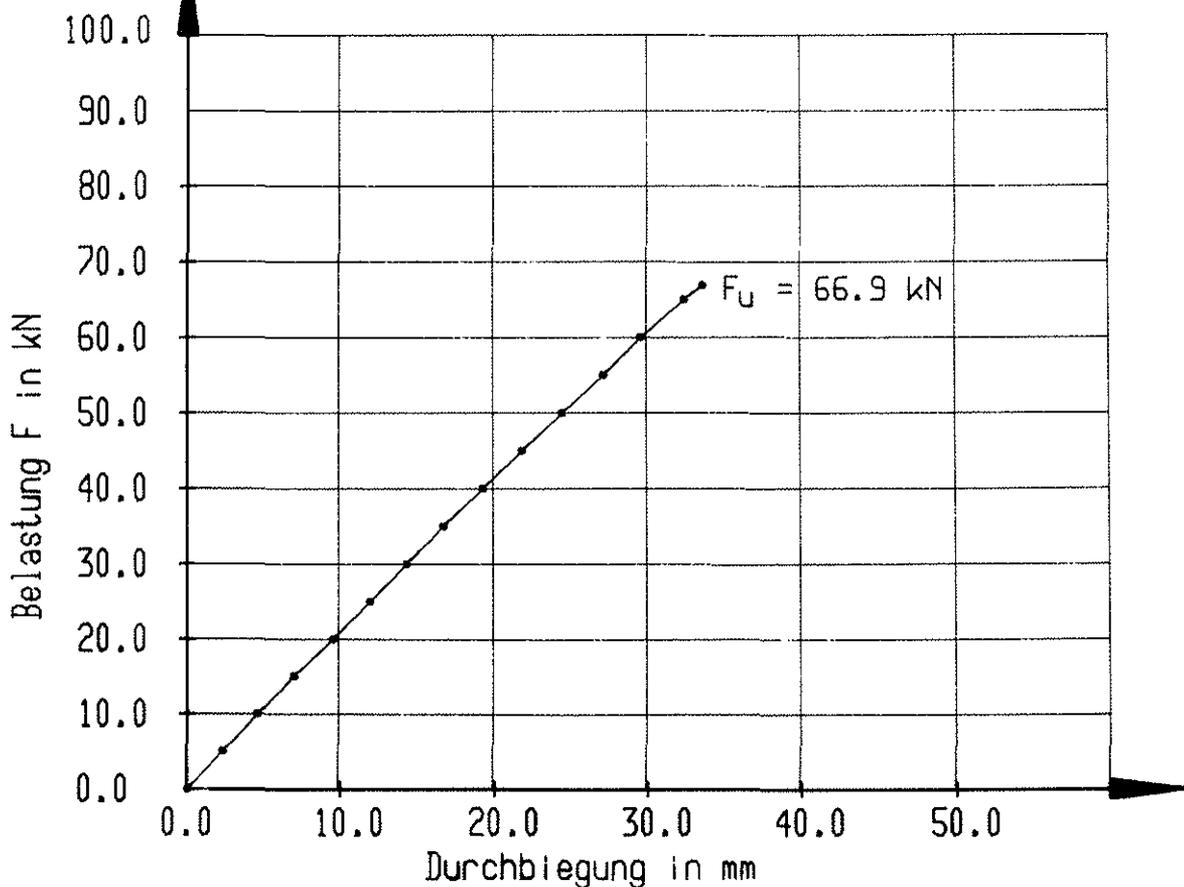


Bild 6.15b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 5/2

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15 KZ	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15 KZ	16	17	18	19

Unterseite



Bild 6.16a: Bruchbild des Trägers 5/3

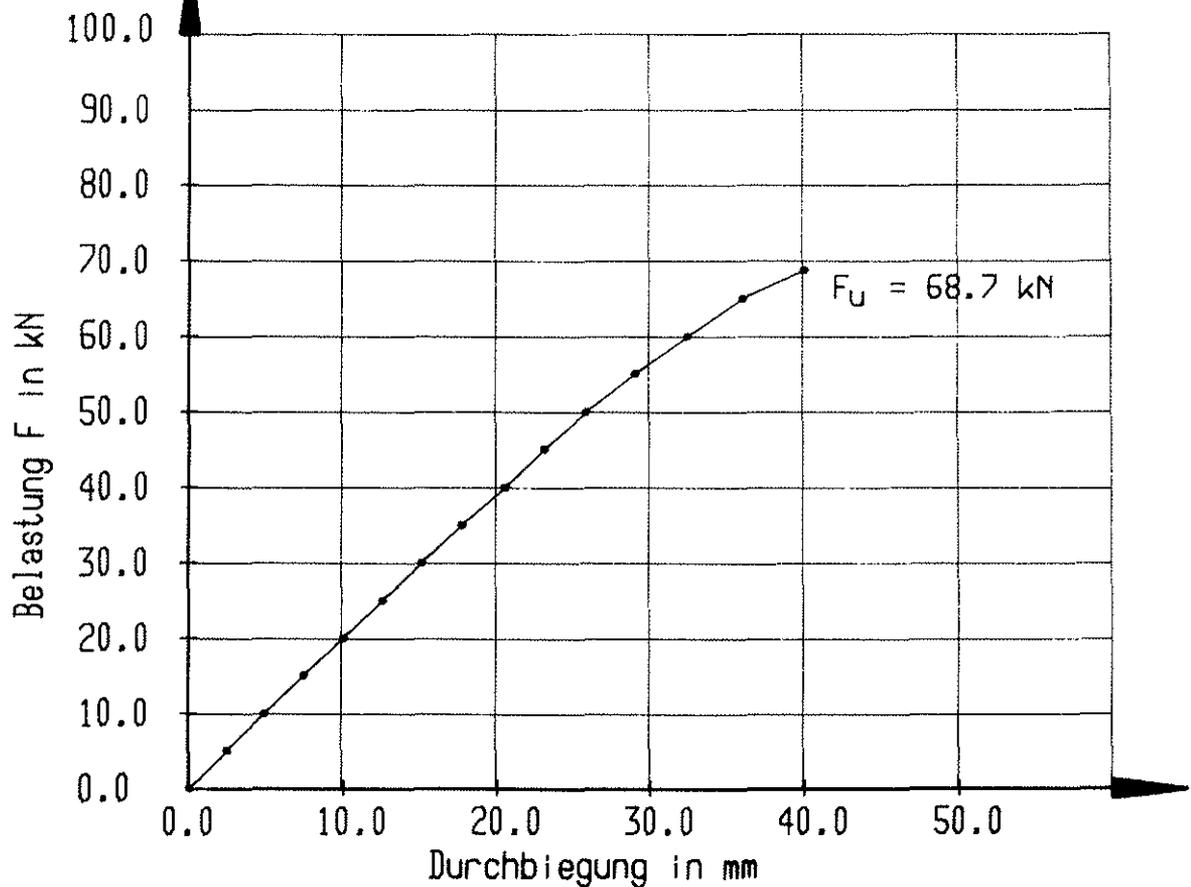


Bild 6.16b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 5/3

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40 KZ	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14 KZ	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40 KZ	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14 KZ	15	16	17	18	19

Unterseite



Bild 6.17a: Bruchbild des Trägers 6/1

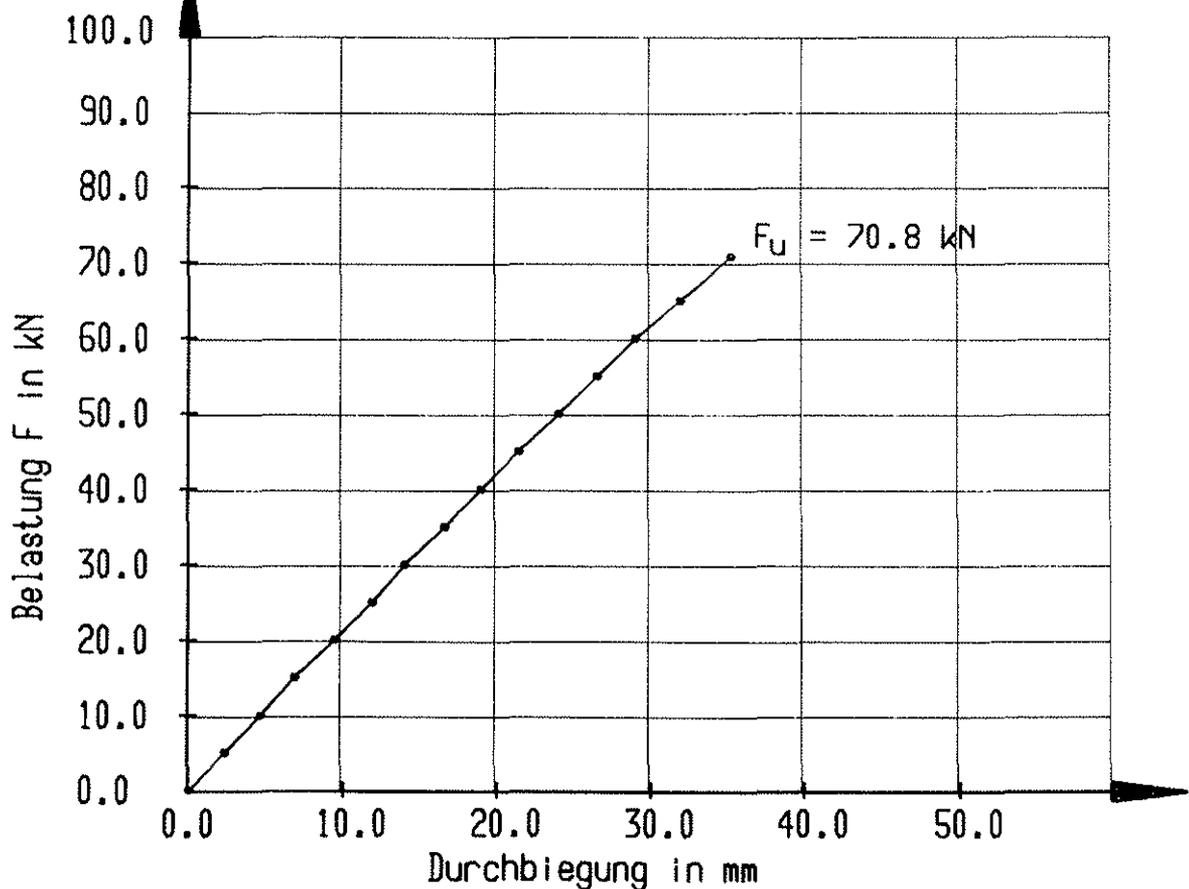


Bild 6.17b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 6/1

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	KZ	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	KZ	14	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	KZ	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	KZ	14	15	16	17	18	19

Unterseite

			•									
--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Bild 6.18a: Bruchbild des Trägers 6/2

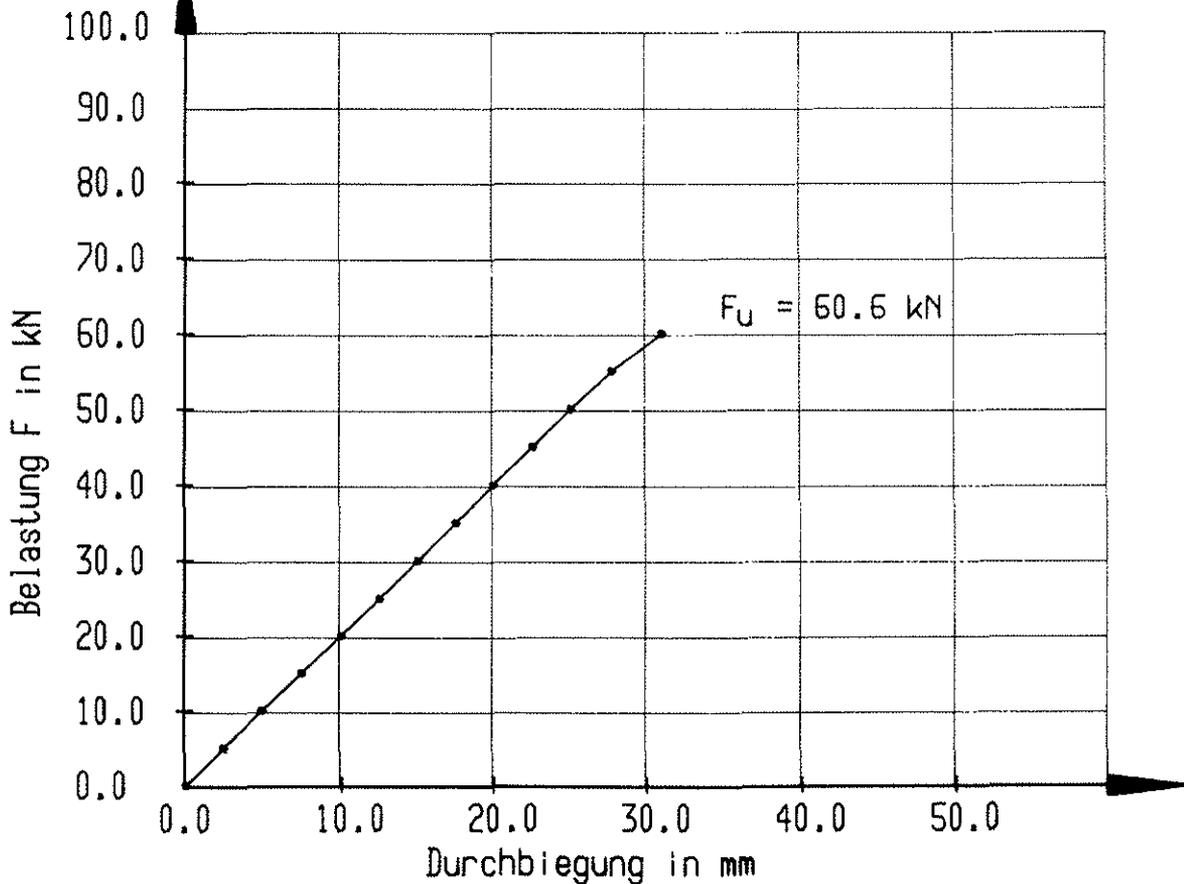


Bild 6.18b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 6/2

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	KZ 43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	KZ 17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	KZ 43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16	KZ 17	18	19

Unterseite



Bild 6.19a: Bruchbild des Trägers 6/3

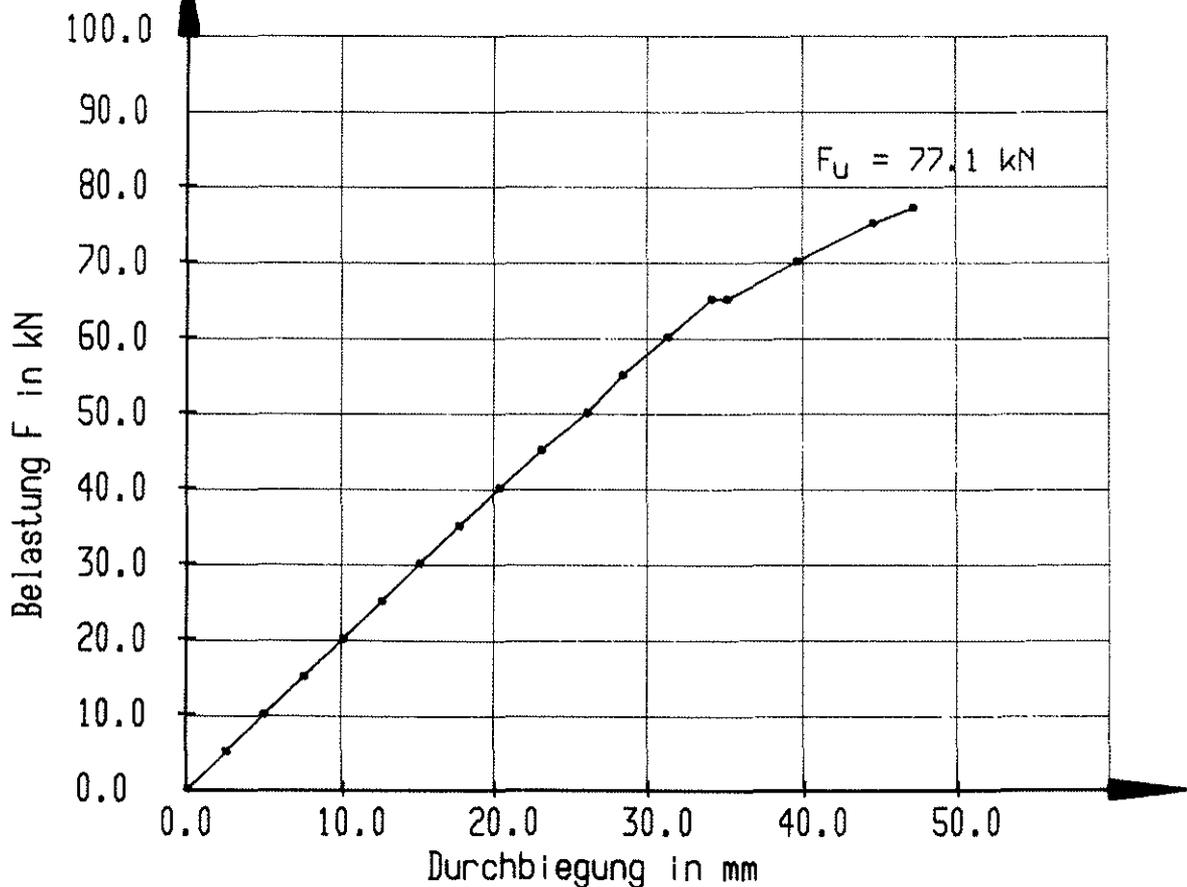


Bild 6.19b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 6/3

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15 KZ	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15 KZ	16	17	18	19

Unterseite

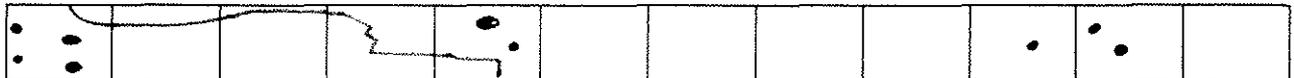


Bild 6.20a: Bruchbild des Trägers 7/1

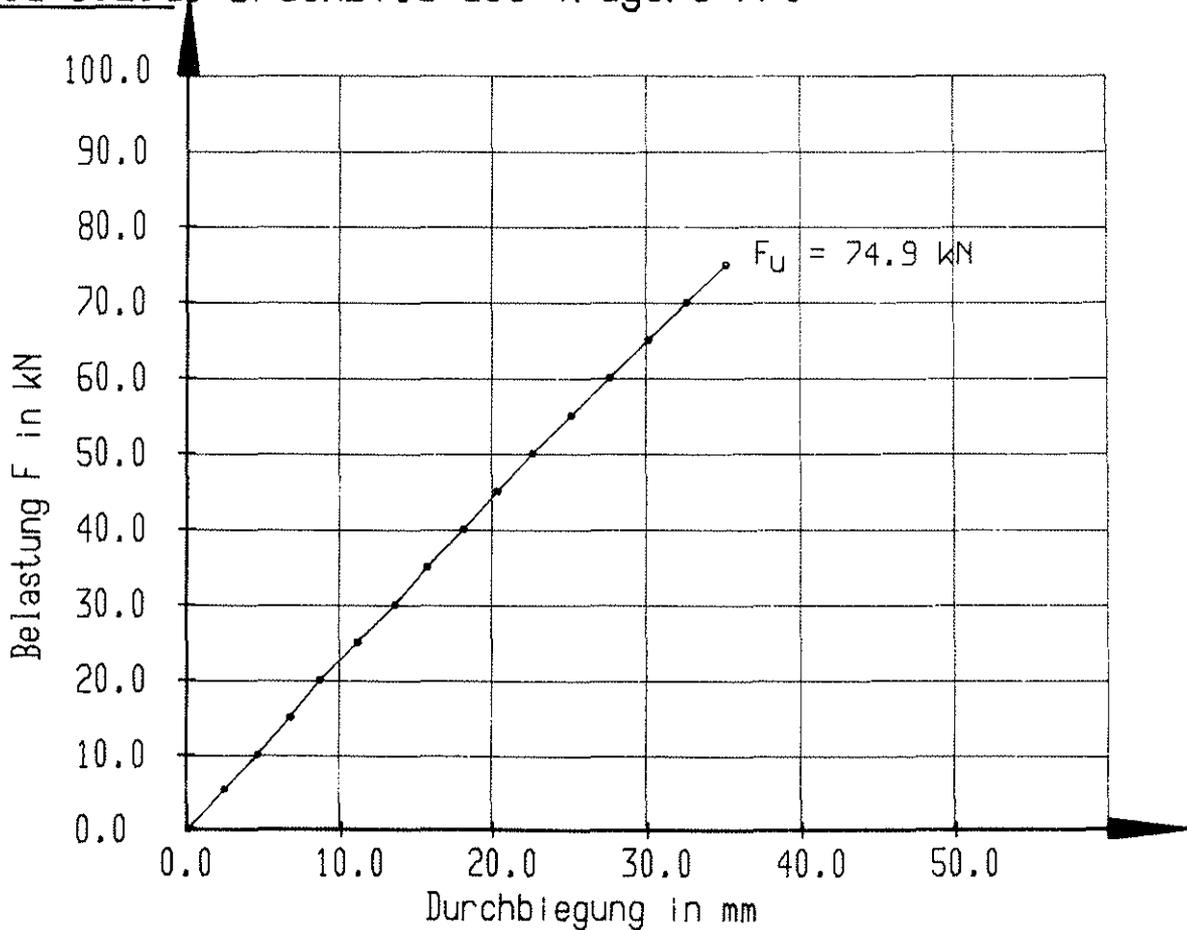


Bild 6.20b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 7/1

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
8	9	10	11	12	13	14	KZ	15	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	
216												
190												
164												
138												
112												
86												
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
8	9	10	11	12	13	14	KZ	15	16	17	18	19

Unterseite

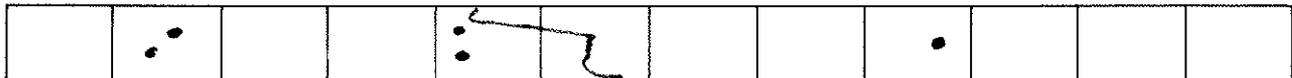


Bild 6.21a: Bruchbild des Trägers 7/2

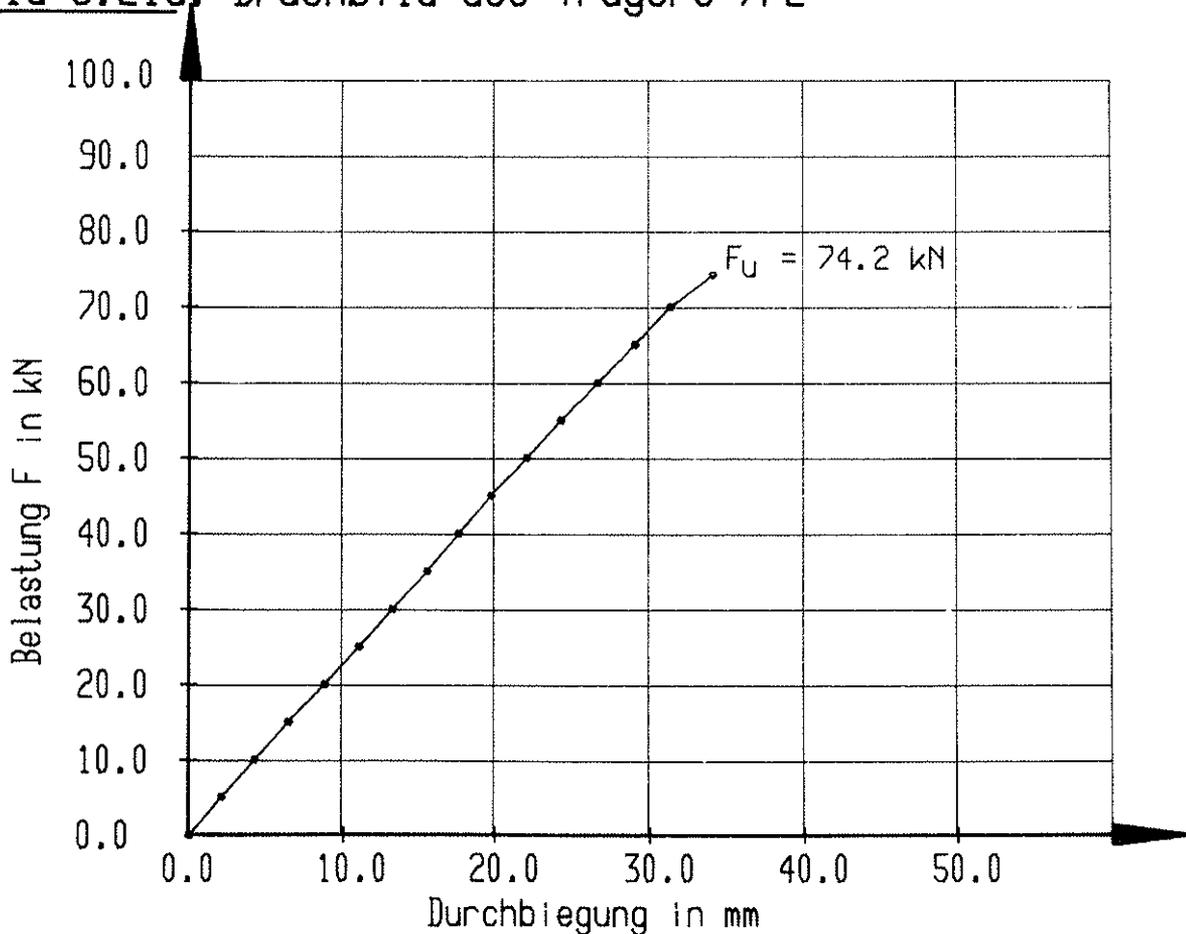


Bild 6.21b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 7/2



Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16 KZ	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15	16 KZ	17	18	19

Unterseite



Bild 6.23a: Bruchbild des Trägers 8/1

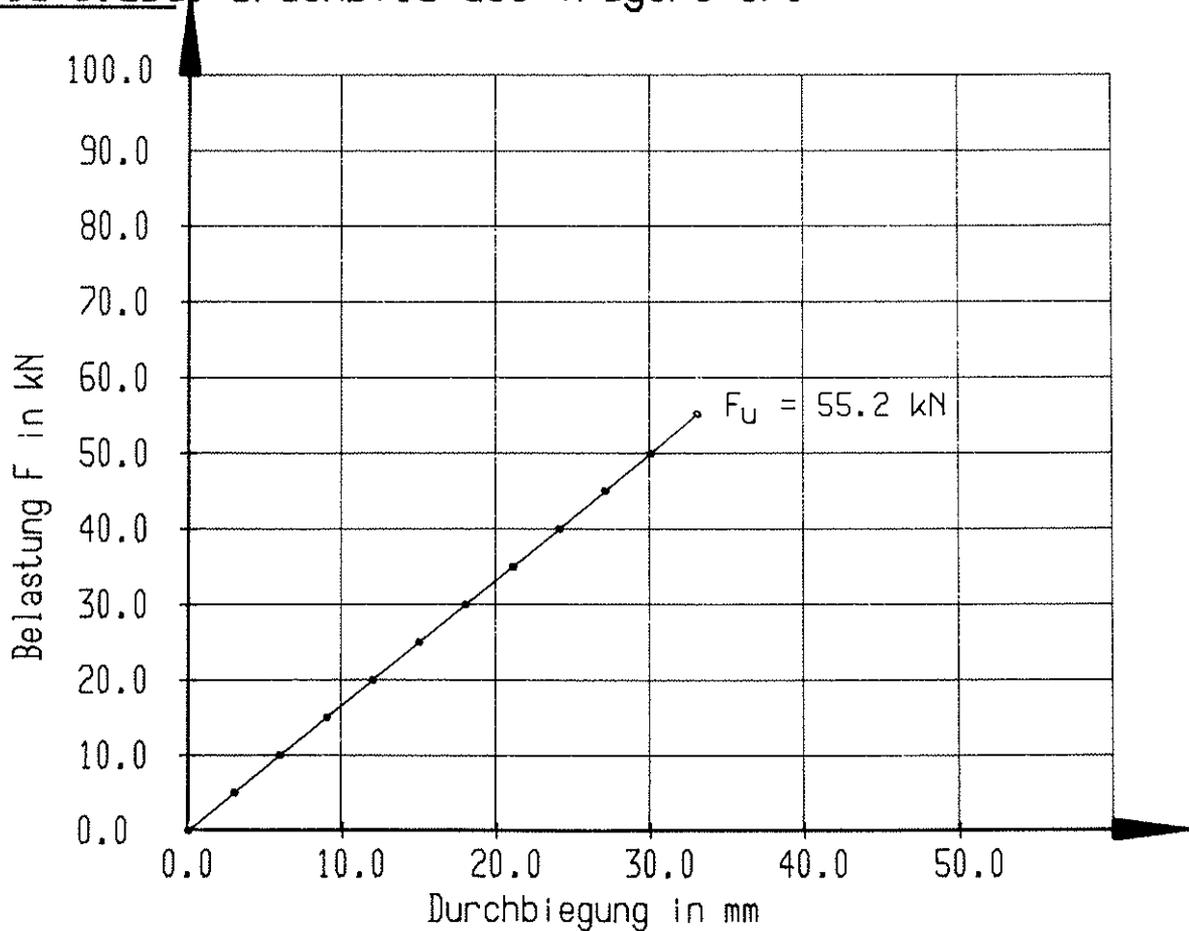


Bild 6.23b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 8/1

Vorderseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15 KZ	16	17	18	19

Rückseite

242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
216											
190											
164											
138											
112											
86											
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
8	9	10	11	12	13	14	15 KZ	16	17	18	19

Unterseite

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Bild 6.24a: Bruchbild des Trägers 8/2

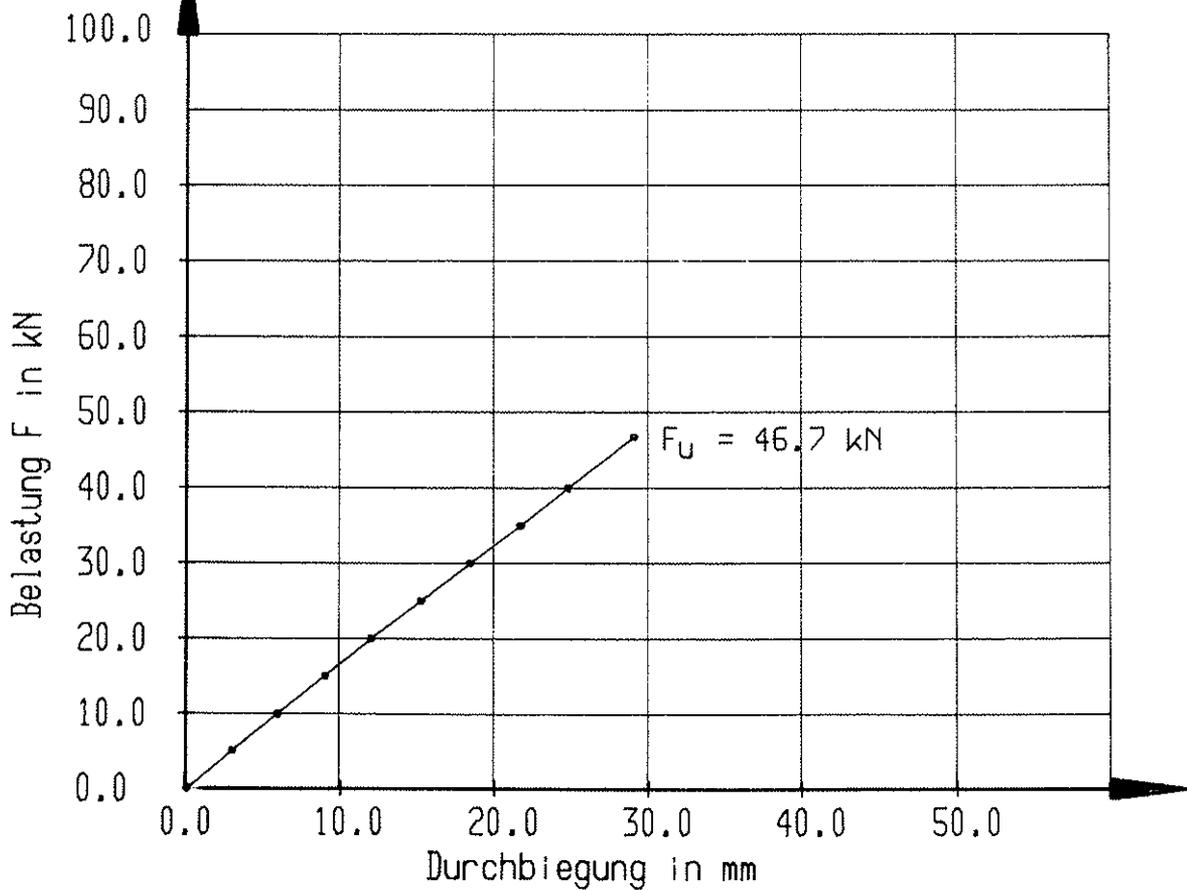
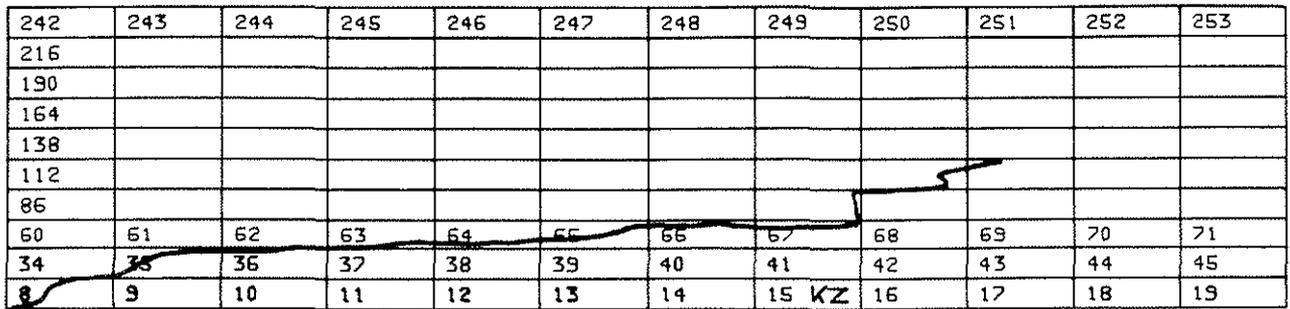
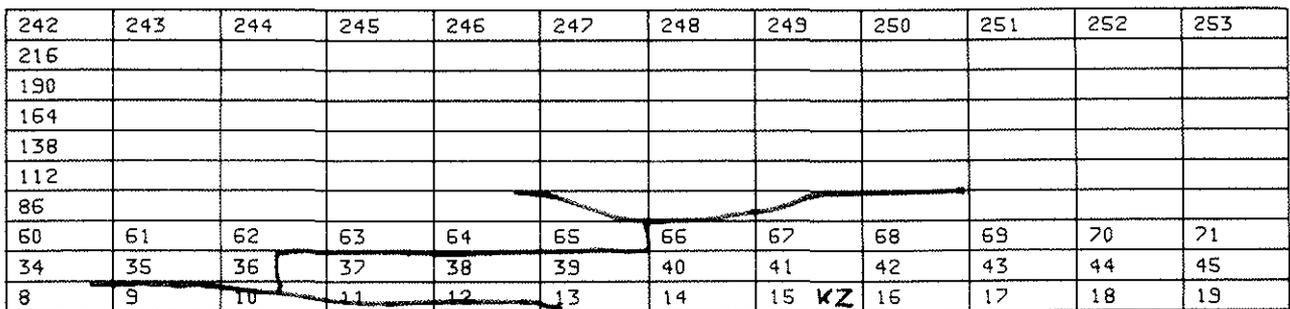


Bild 6.24b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 8/2

Vorderseite



Rückseite



Unterseite



Bild 6.25a: Bruchbild des Trägers 8/3

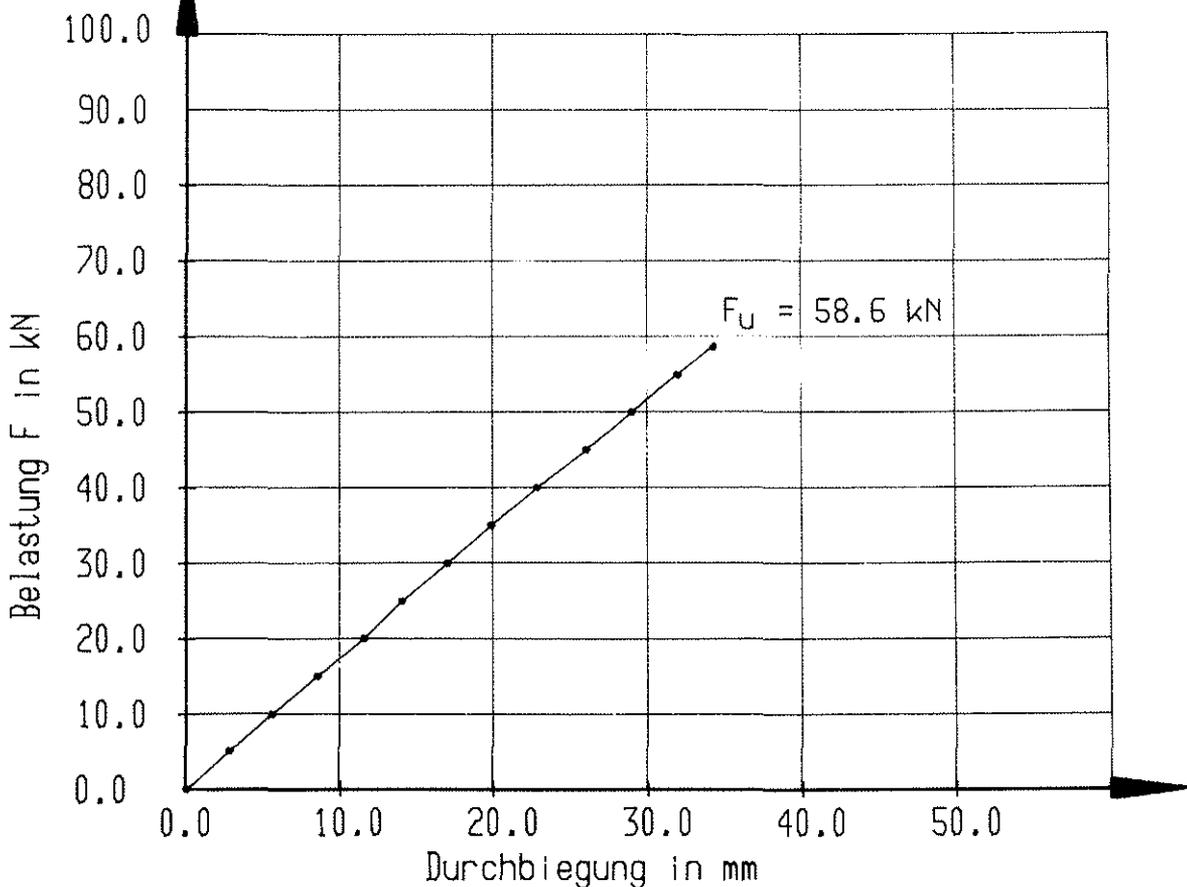


Bild 6.25b: Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Trägers 8/3

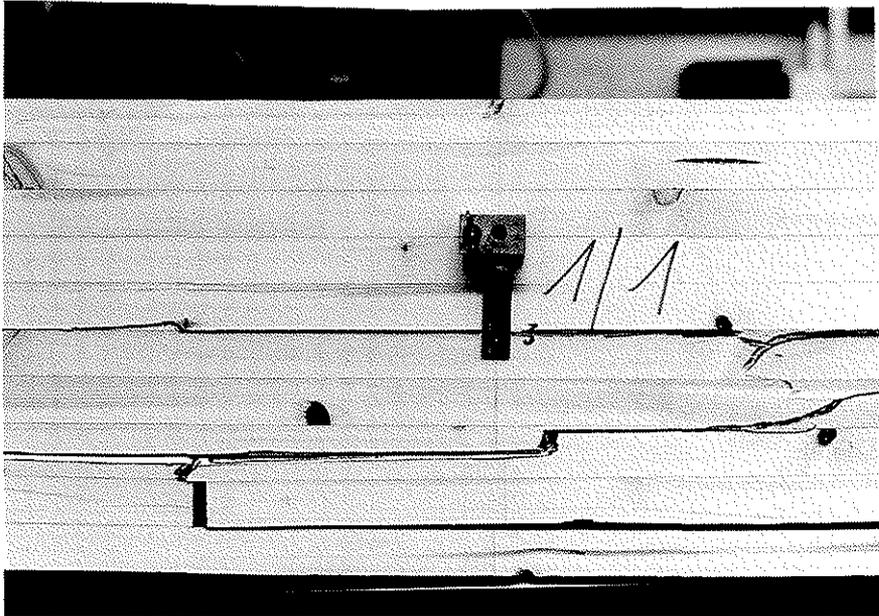


Bild 6.26: Versuchsträger 1/1 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 67,9 \text{ kN}$

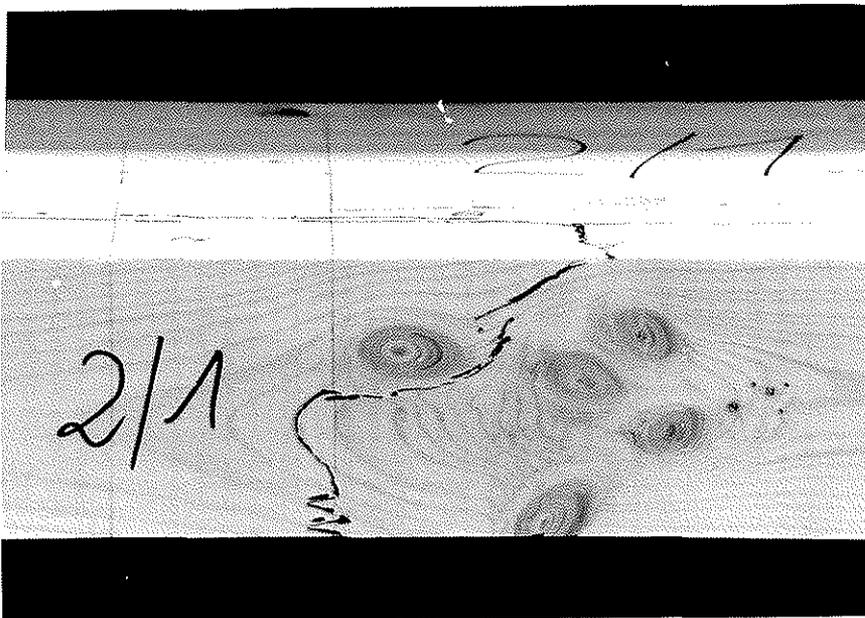


Bild 6.27: Versuchsträger 2/1 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 32,7 \text{ kN}$  (Trägerunterseite)

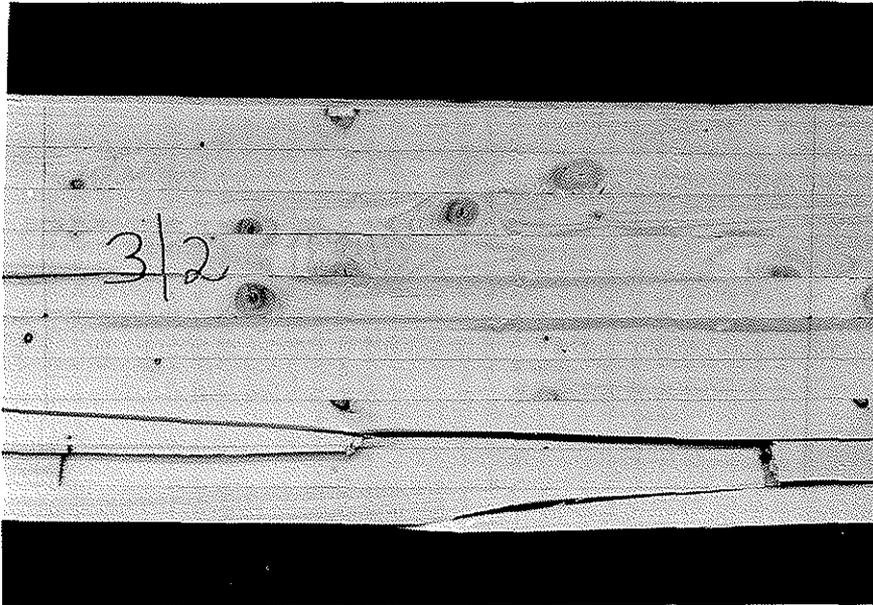


Bild 6.28: Versuchsträger 3/2 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 82,4$  kN



Bild 6.29: Versuchsträger 4/3 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 88,7$  kN

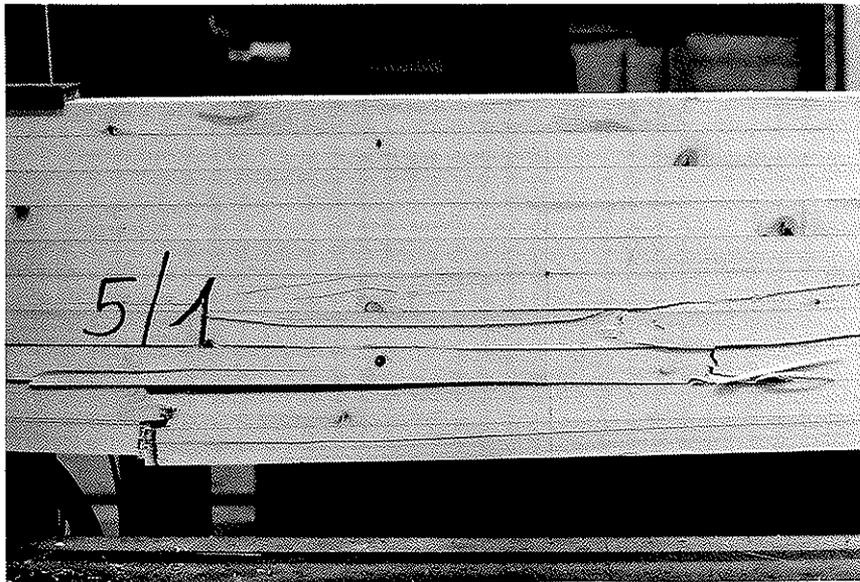


Bild 6.30: Versuchsträger 5/1 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 81,8 \text{ kN}$



Bild 6.31: Versuchsträger 6/3 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 77,1 \text{ kN}$

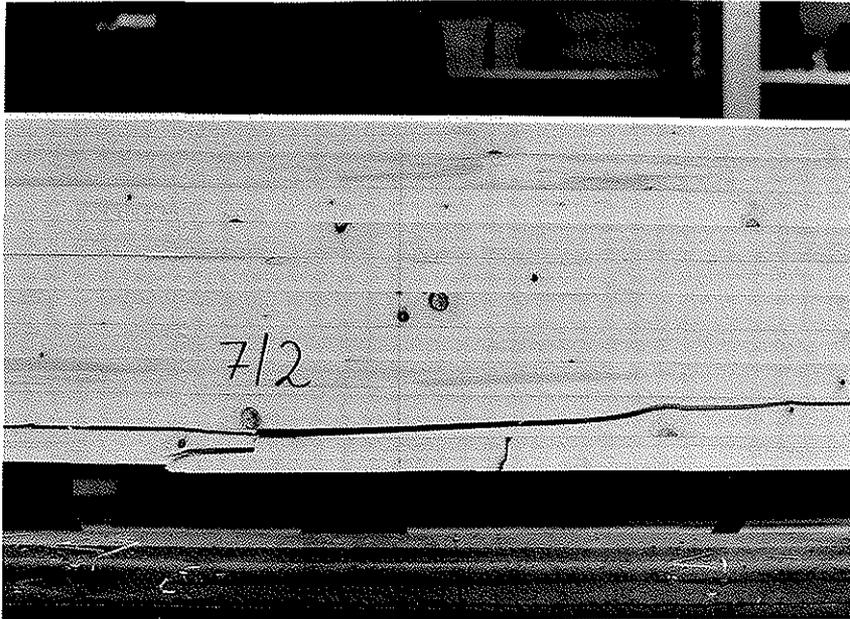


Bild 6.32: Versuchsträger 7/2 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 74,2$  kN

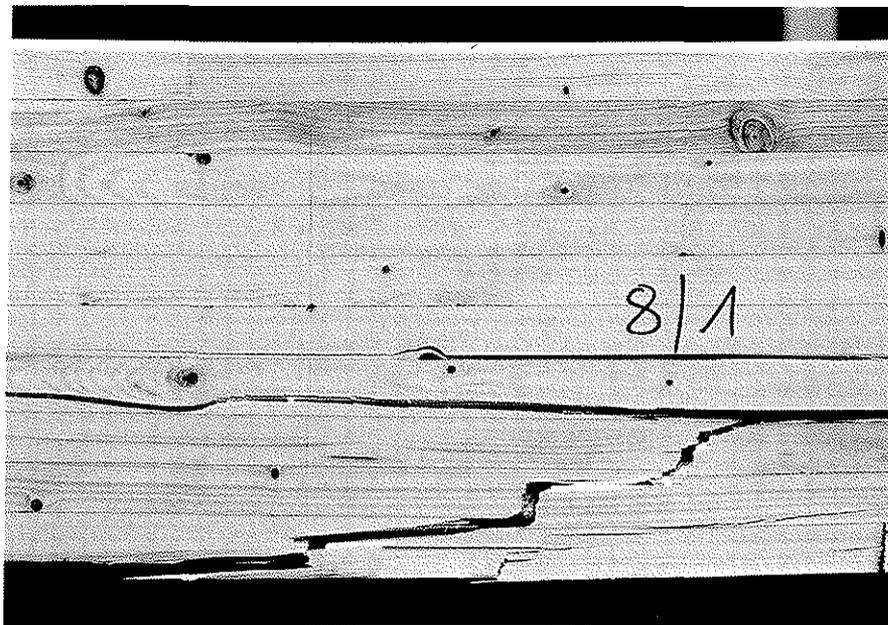
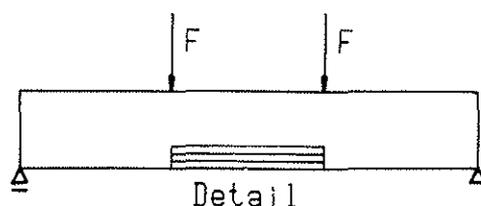


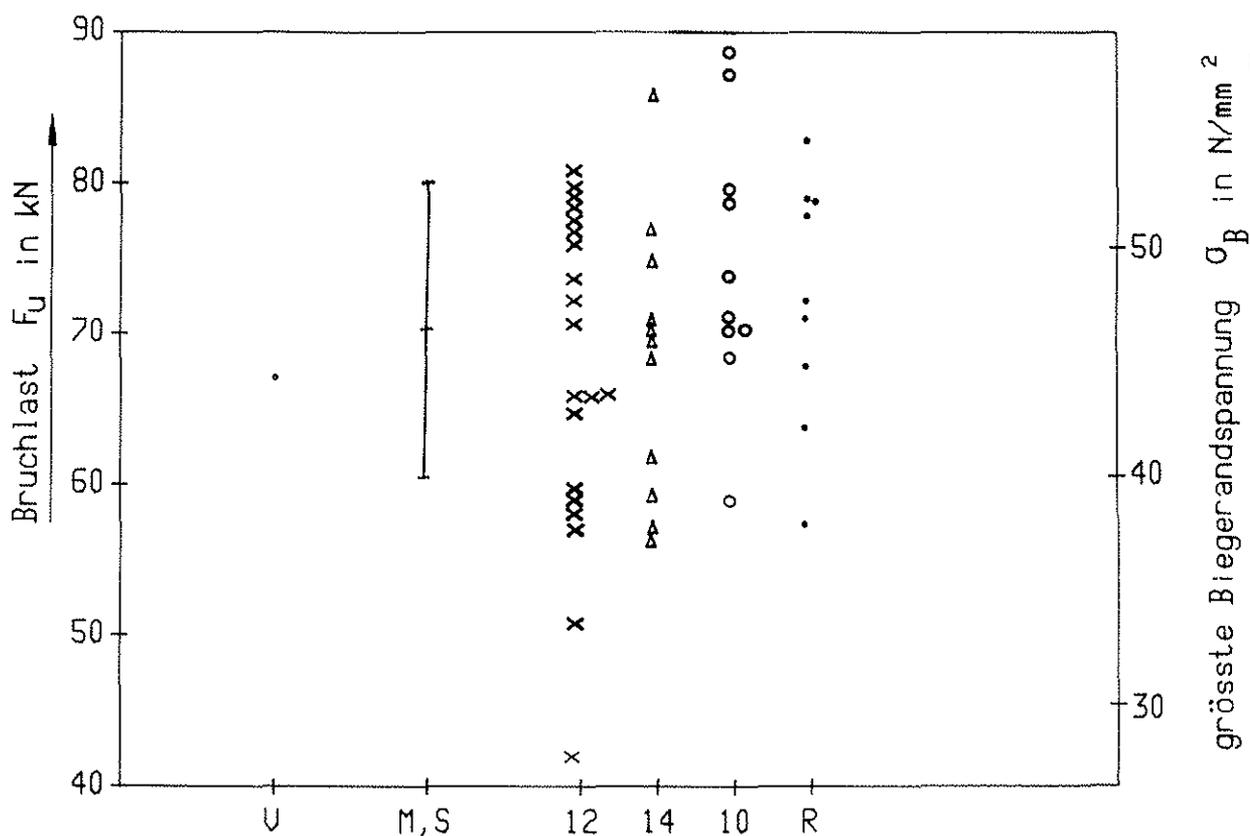
Bild 6.33: Versuchsträger 8/1 nach Erreichen der Höchstlast  $F_u = 55,2$  kN



62	63	64	65	66	67	68	69
0.23			0.07		0.31		
36	37	38	39	40	41	42	43
	0.18	NULL		0.15			0.25
10	11	12	13	14	15	16	17
0.14				0.12			

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
17560	0.53
15290	0.49
18330	0.55

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Schubbruch infolge 'Kraftumleitung'

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

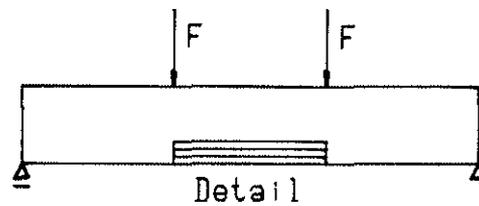
12 = Bruch ausgehend von Zelle 12

14 = Bruch ausgehend von Zelle 14

10 = Bruch ausgehend von Zelle 10

R = Übrige Bruchursachen

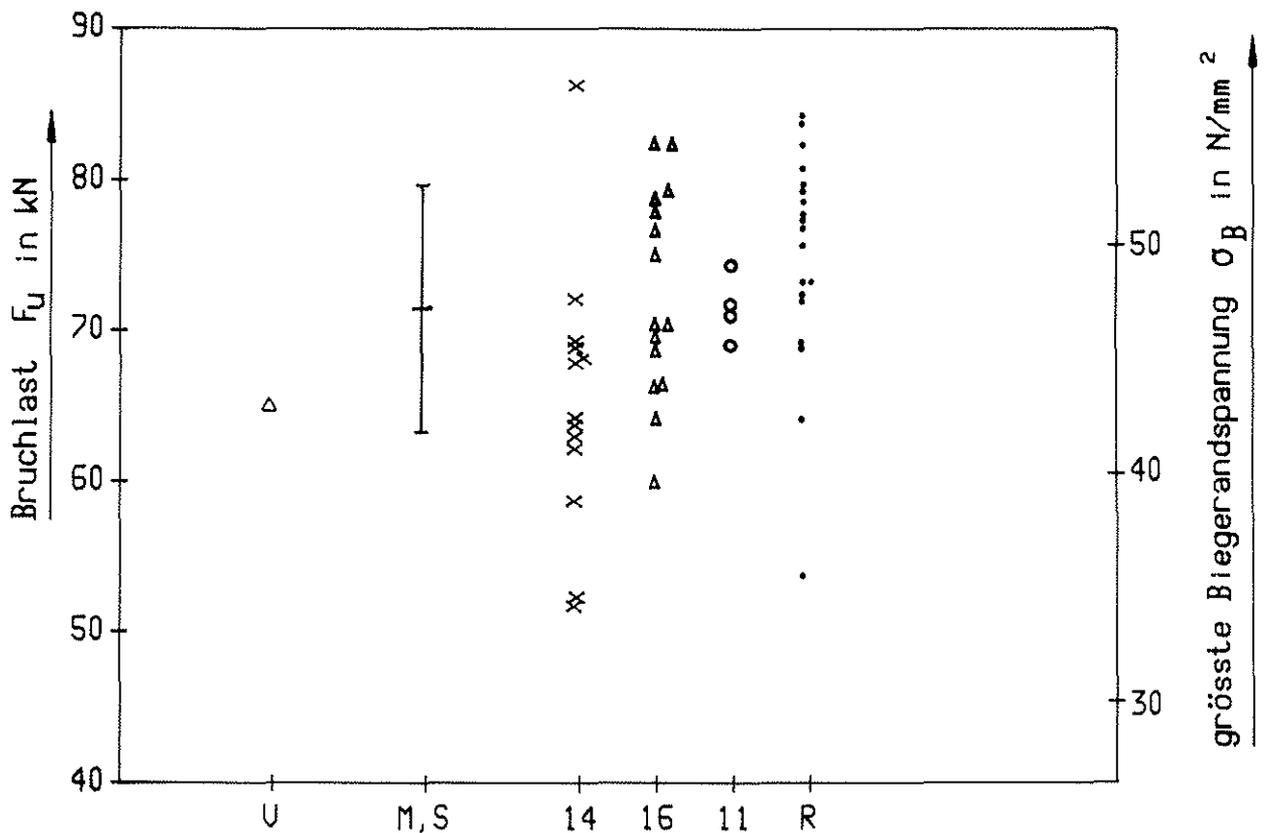
**Bild 8.1** : Vergleich von Versuch 1/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
0.04			0.22			0.14	
36	37	38	39	40	41	42	43
0.11	0.08	0.07		NULL			0.21
10	11	12	13	14	15	16	17
	0.07					0.16	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
17460	0.52
14780	0.48
17050	0.50

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 16

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

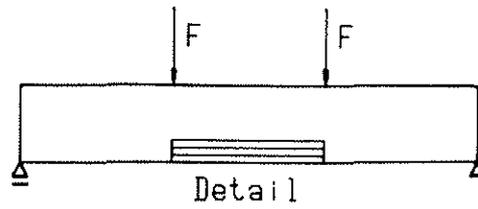
14 = Bruch ausgehend von Zelle 14

16 = Bruch ausgehend von Zelle 16

11 = Bruch ausgehend von Zelle 11

R = übrige Bruchursachen

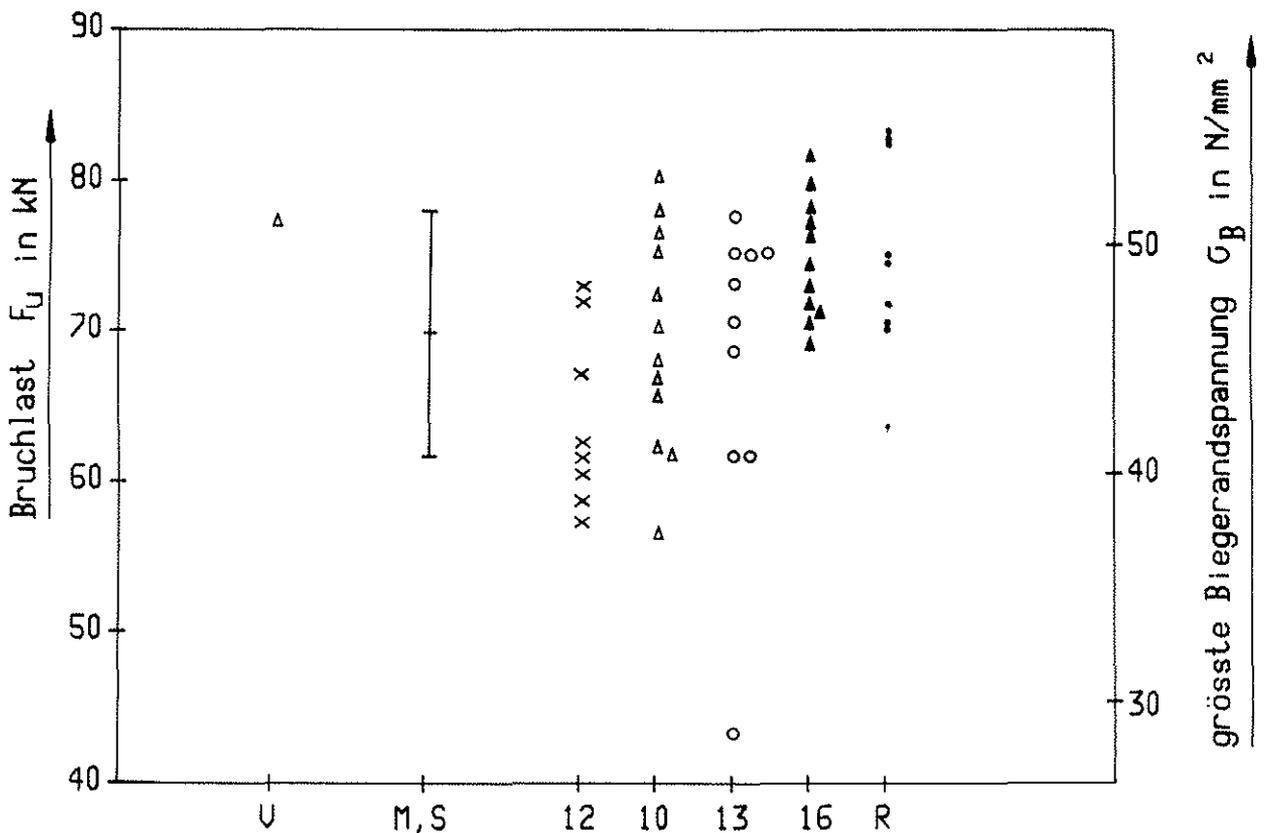
Bild 8.2 : Vergleich von Versuch 1/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.21			0.10			0.20
36	37	38	39	40	41	42	43
		NULL		0.10			0.11
10	11	12	13	14	15	16	17
0.16			0.17			0.14	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
17 200	0.50
15 080	0.47
18 760	0.54

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 10

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

12 = Bruch ausgehend von Zelle 12

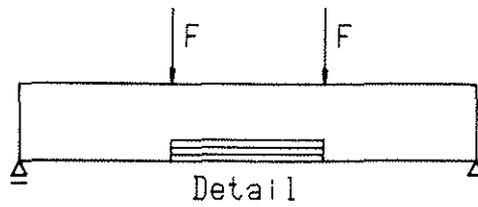
10 = Bruch ausgehend von Zelle 10

13 = Bruch ausgehend von Zelle 13

16 = Bruch ausgehend von Zelle 16

R = übrige Bruchursachen

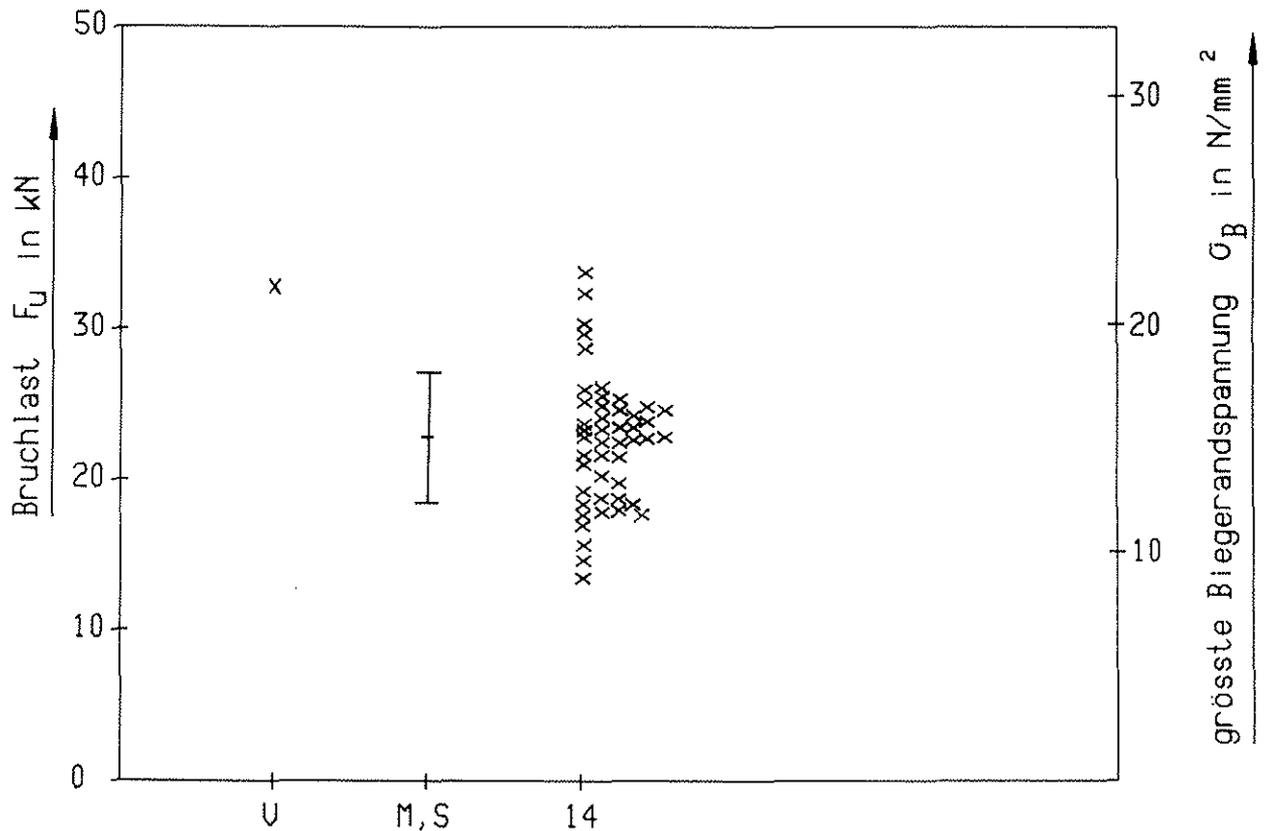
**Bild 8.3** ; Vergleich von Versuch 1/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
0.18				0.35			
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.08	0.11	NULL			0.20
10	11	12	13	14	15	16	17
				0.68		0.14	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
12 470	0.42
15 940	0.50
12 020	0.46

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte

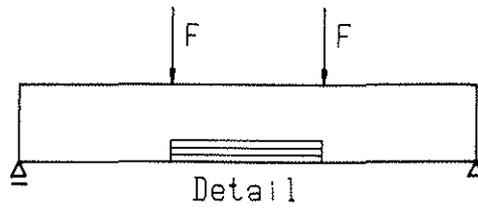


Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 14

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

14 = Bruch ausgehend von Zelle 14

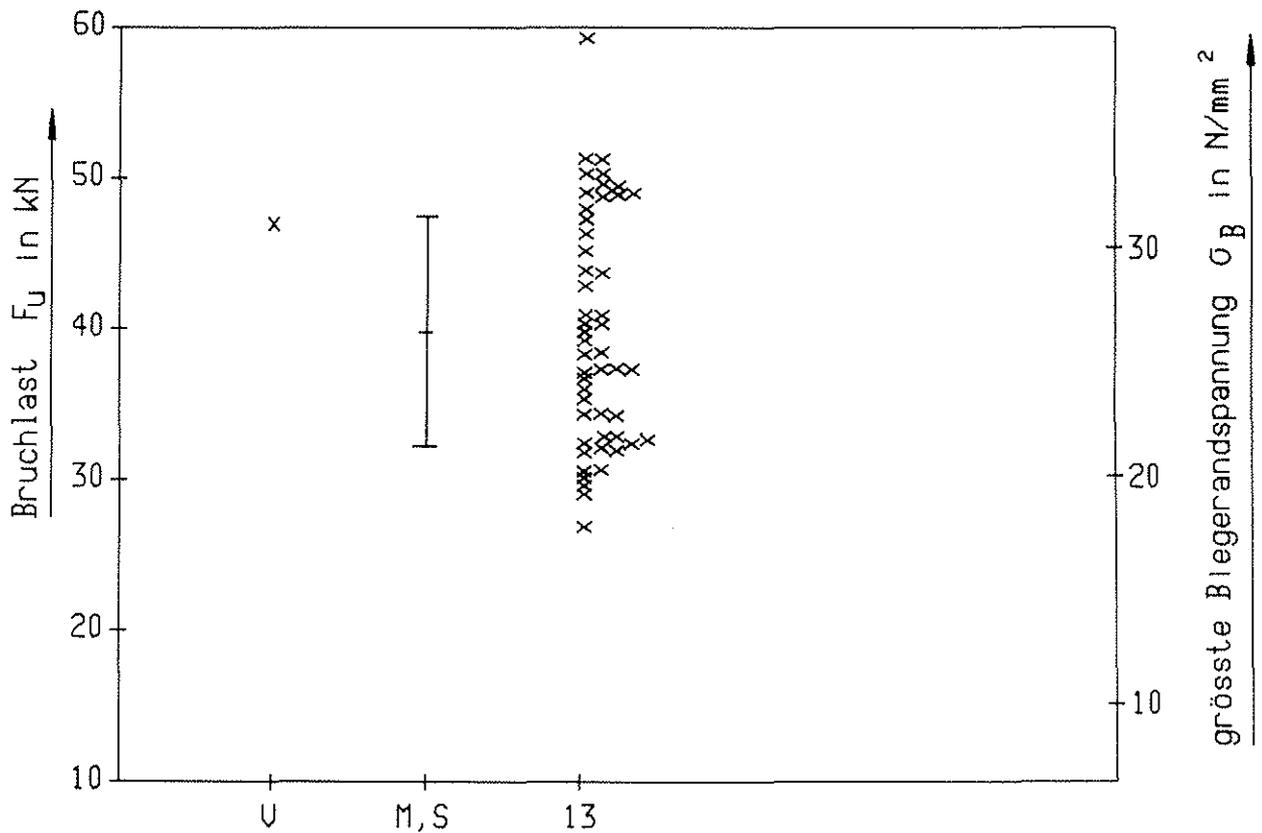
Bild 8.4 : Vergleich von Versuch 2/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63 0.28	64	65 0.26	66	67 0.25	68	69
36	37	38 0.09	39 NULL	40	41	42	43
10	11	12	13 0.32	14	15	16	17

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
10 150	0.45
15 580	0.49
11 840	0.43

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte

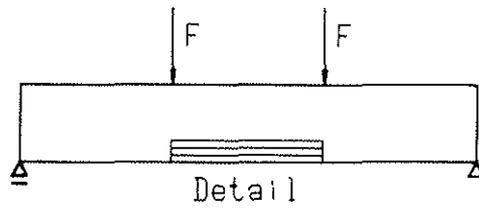


Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 13

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

13 = Bruch ausgehend von Zelle 13

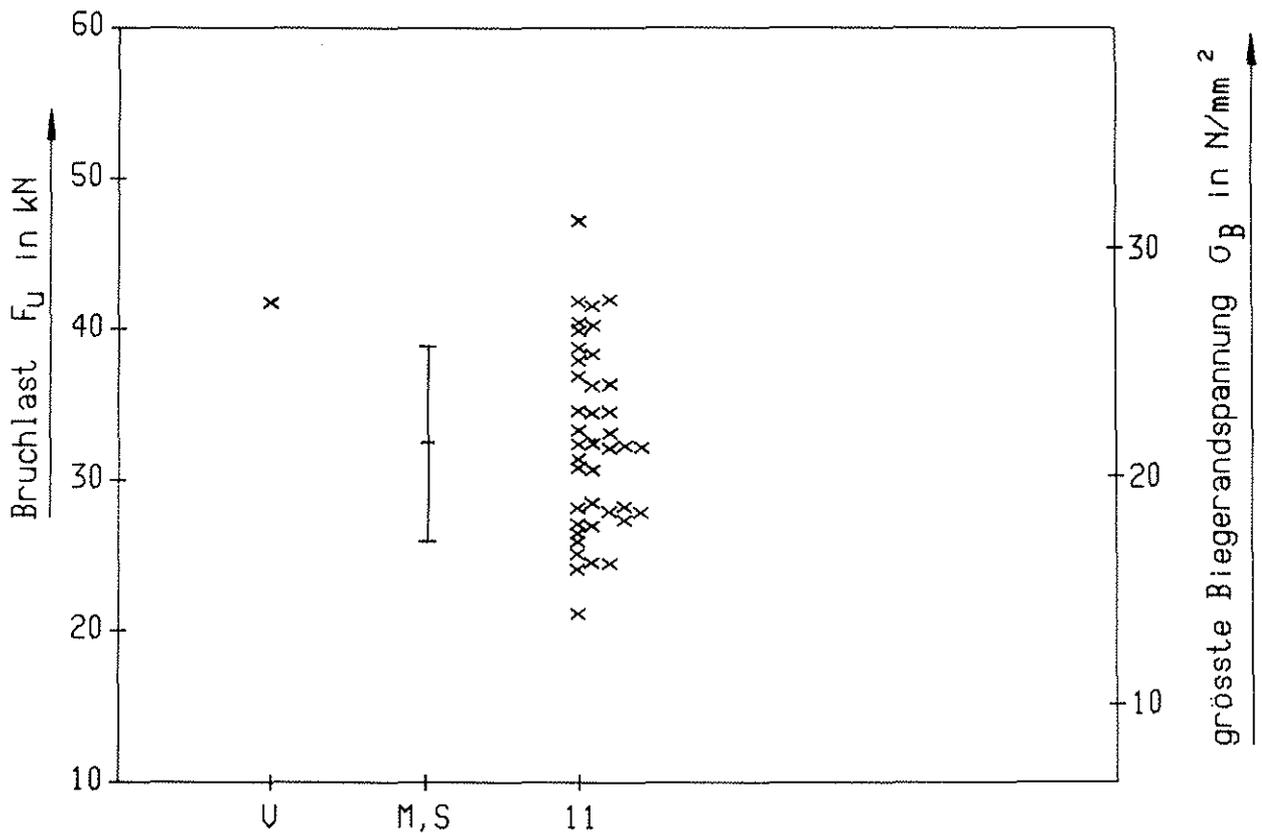
Bild 8.5 : Vergleich von Versuch 2/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.30			0.33			
36	37	38	39	40	41	42	43
0.14	NULL	0.10		0.19			0.17
10	11	12	13	14	15	16	17
0.35	0.37		0.05		0.33		

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
9 700	0.45
15 280	0.48
9 160	0.42

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte

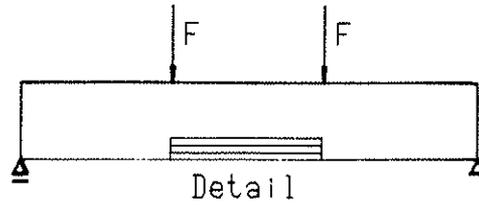


Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 11

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

11 = Bruch ausgehend von Zelle 11

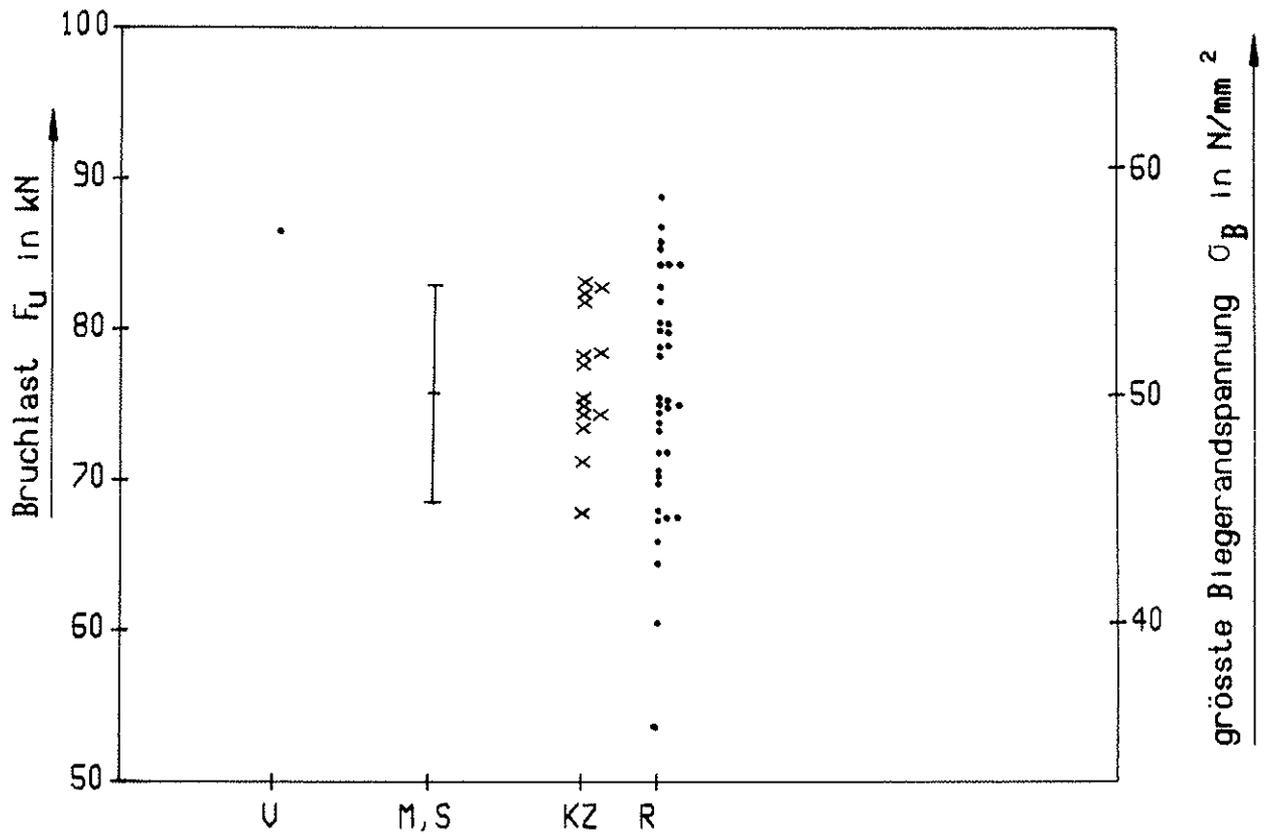
**Bild 8.6** : Vergleich von Versuch 2/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.12					0.12	0.05
36	37	38	39	40	41	42	43
	0.16			KZ		0.08	0.11
10	11	12	13	14	15	16	17

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
14 140	0.43
14 730	0.48
16 680	0.49

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



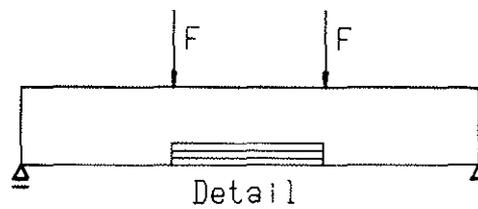
Versuchsergebnis : U = Schubbruch

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

R = übrige Bruchursachen

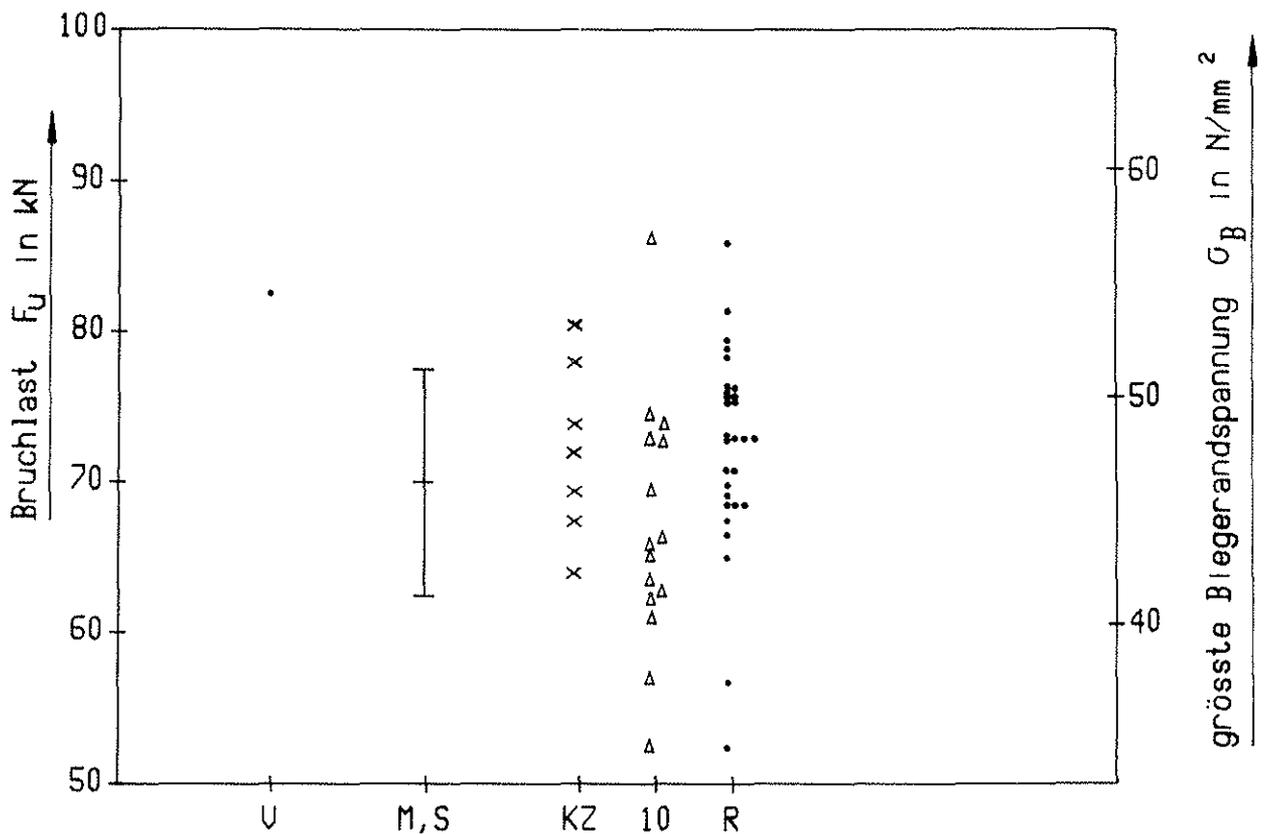
Bild 8.7 : Vergleich von Versuch 3/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.20				0.18		
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.12		KZ	0.15		
10	11	12	13	14	15	16	17
0.19							

Bretteligenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
15 660	0.47
15 680	0.50
14 870	0.48

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 42

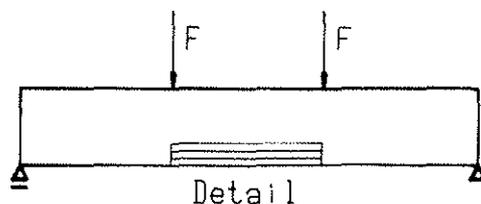
Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

10 = Bruch ausgehend von Zelle 10

R = übrige Bruchursachen

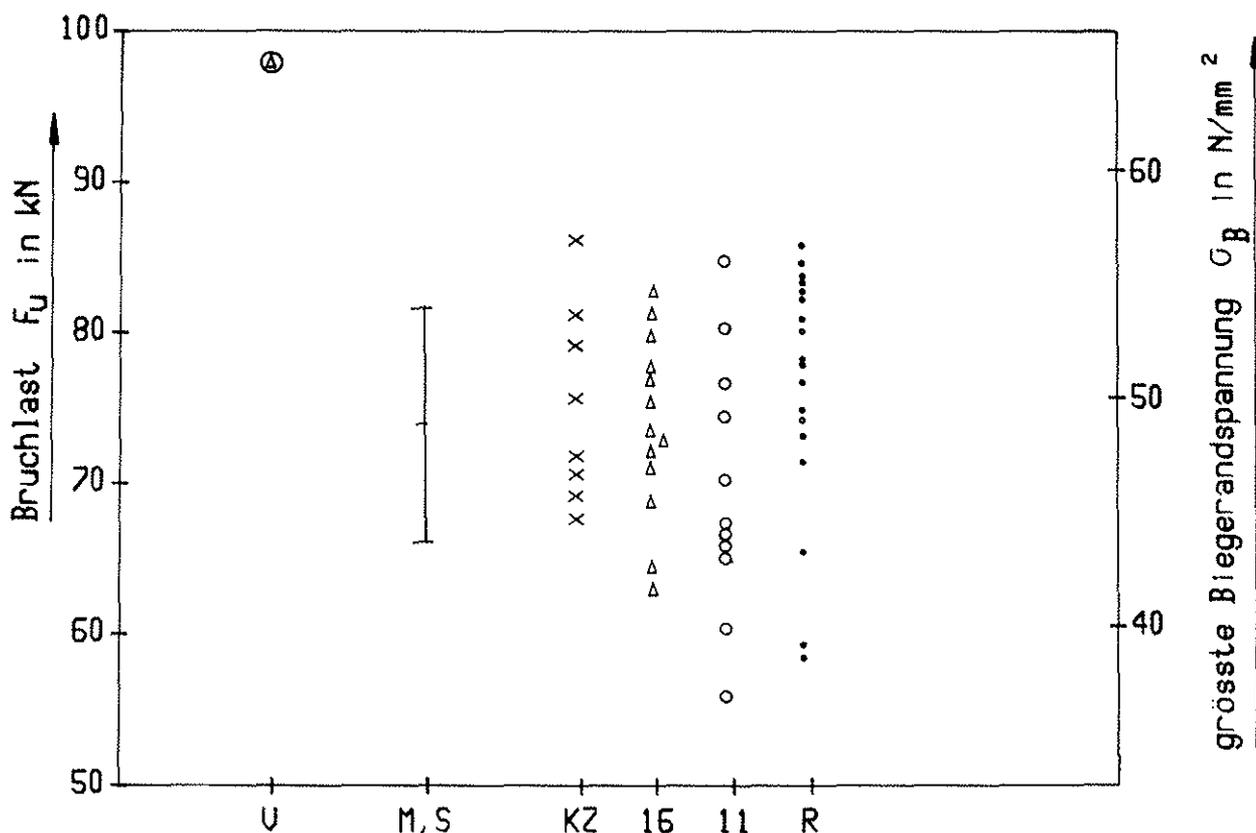
**Bild 8.8** : Vergleich von Versuch 3/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
			0.10			0.09	
36	37	38	39	40	41	42	43
	0.07	KZ			0.17		0.18
10	11	12	13	14	15	16	17
	0.14			0.12		0.19	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
16 270	0.49
15 240	0.50
18 380	0.53

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 11,16

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

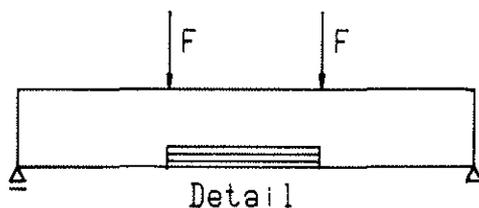
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

16 = Bruch ausgehend von Zelle 16

11 = Bruch ausgehend von Zelle 11

R = übrige Bruchursachen

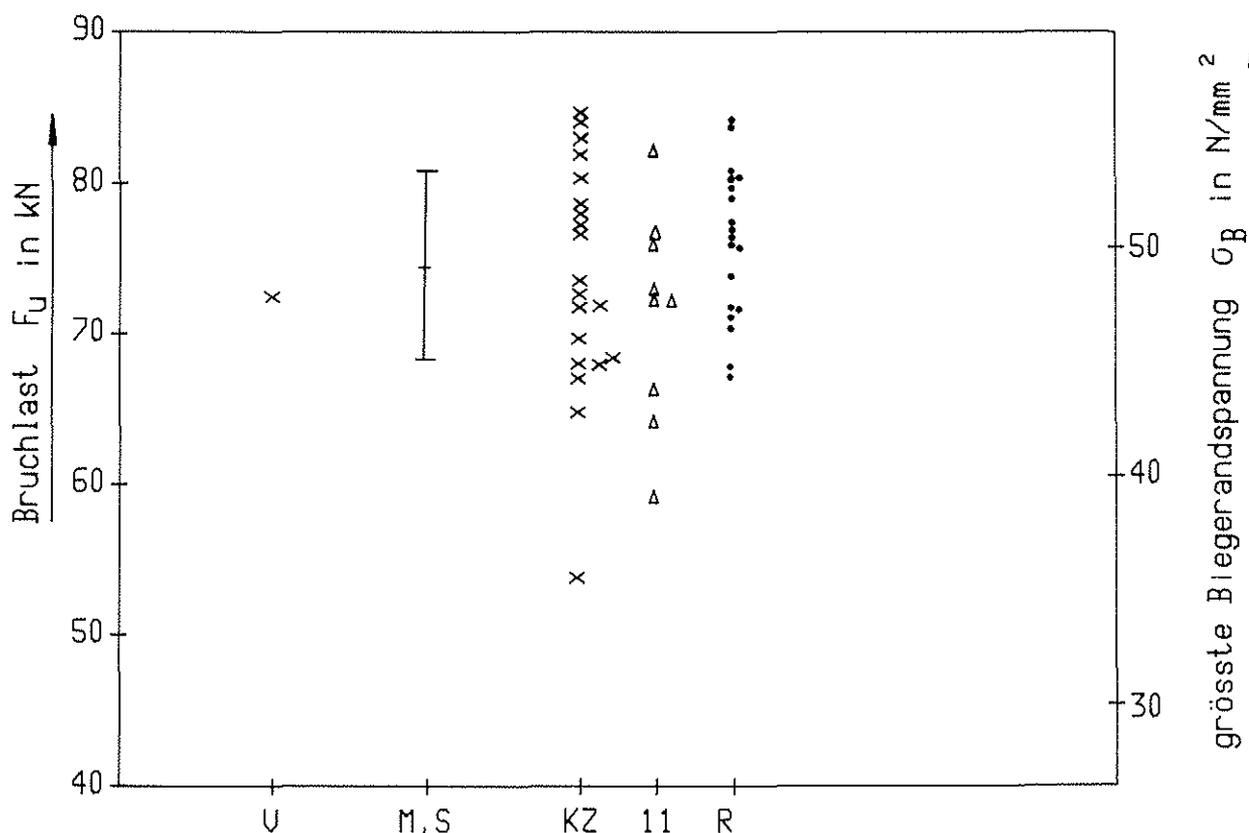
Bild 8.9 : Vergleich von Versuch 3/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
			0.19		0.16		
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.24			0.10		
10	11	12	13	14	15	16	17
	0.16			KZ		0.07	0.08

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
16 400	0.52
16 860	0.52
14 400	0.46

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

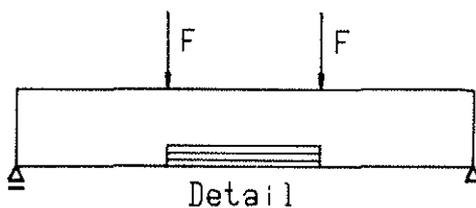
Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

11 = Bruch ausgehend von Zelle 11

R = übrige Bruchursachen

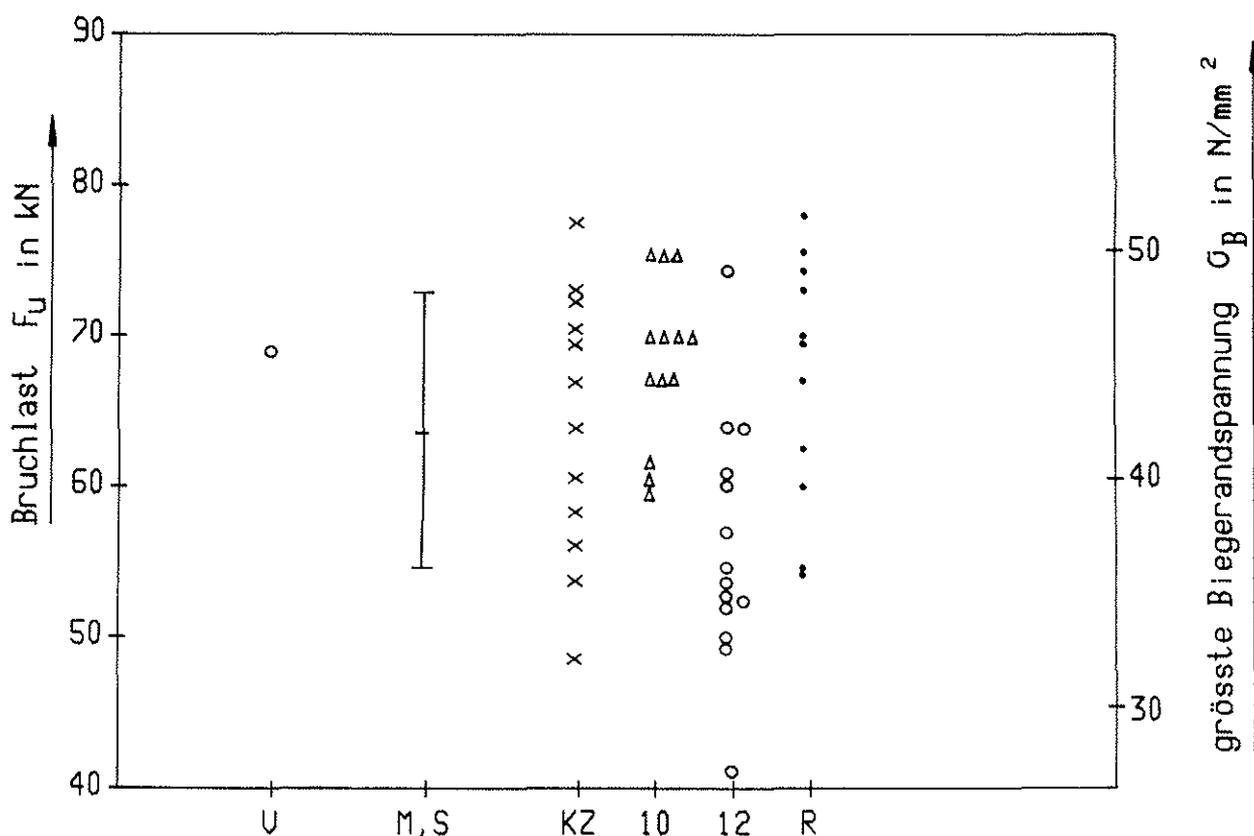
Bild 8.10: Vergleich von Versuch 4/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
		0.16			0.17		
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.22				0.27	
10	11	12	13	14	15	16	17
0.21		0.19		KZ		0.06	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
16 560	0.51
17 290	0.50
14 020	0.46

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 12

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

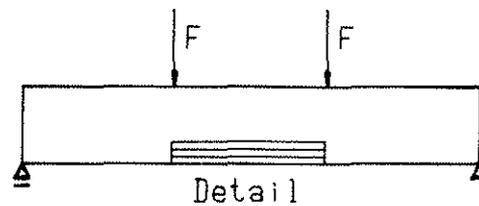
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

10 = Bruch ausgehend von Zelle 10

12 = Bruch ausgehend von Zelle 12

R = übrige Bruchursachen

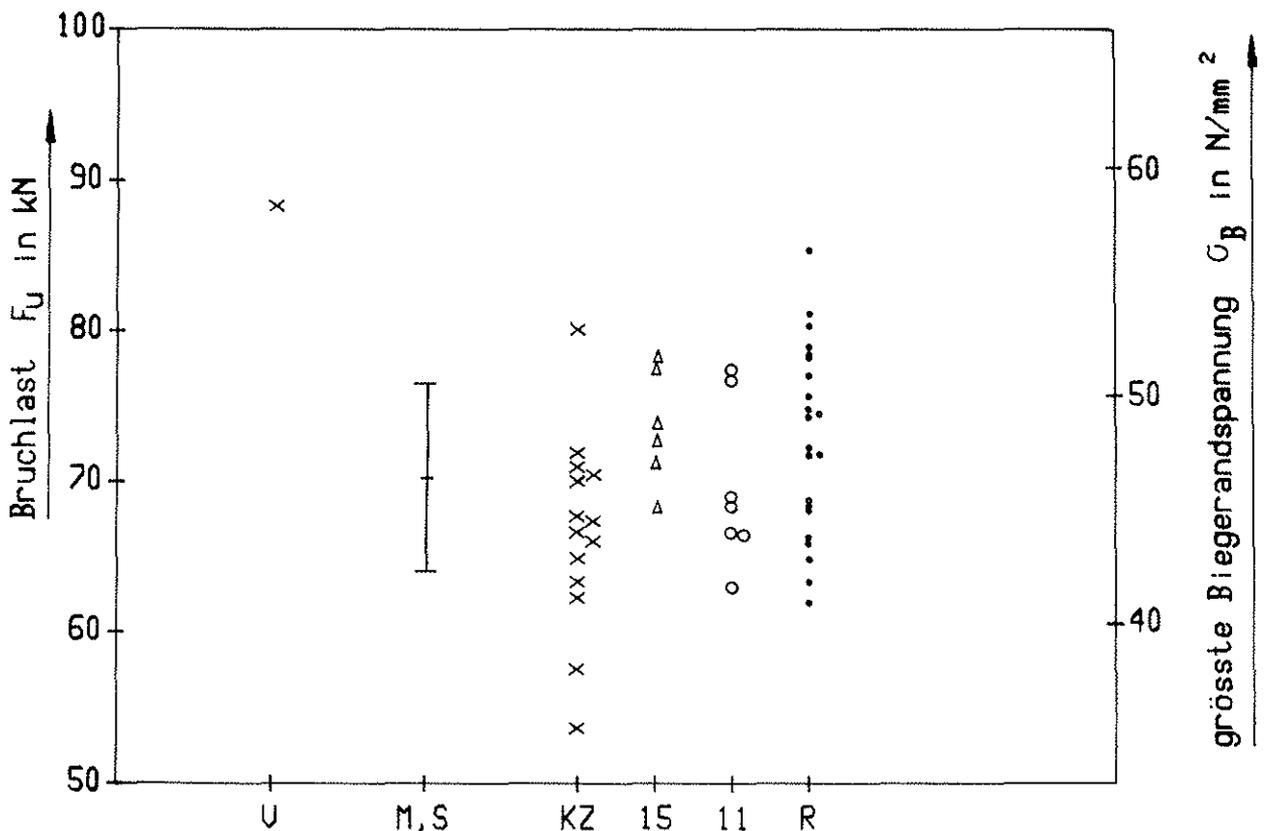
Bild 8.11: Vergleich von Versuch 4/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
0.10			0.10		0.13		0.06
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.08					0.09
10	11	12	13	14	15	16	17
0.07	0.14			KZ	0.14		

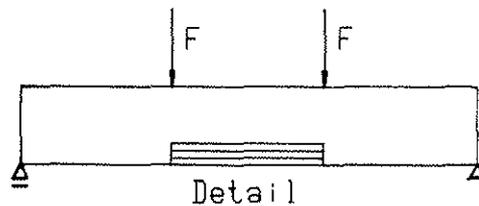
Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
13 580	0.42
17 440	0.53
15 010	0.48

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



- Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung  
 Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung  
 KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung  
 15 = Bruch ausgehend von Zelle 15  
 11 = Bruch ausgehend von Zelle 11  
 R = übrige Bruchursachen

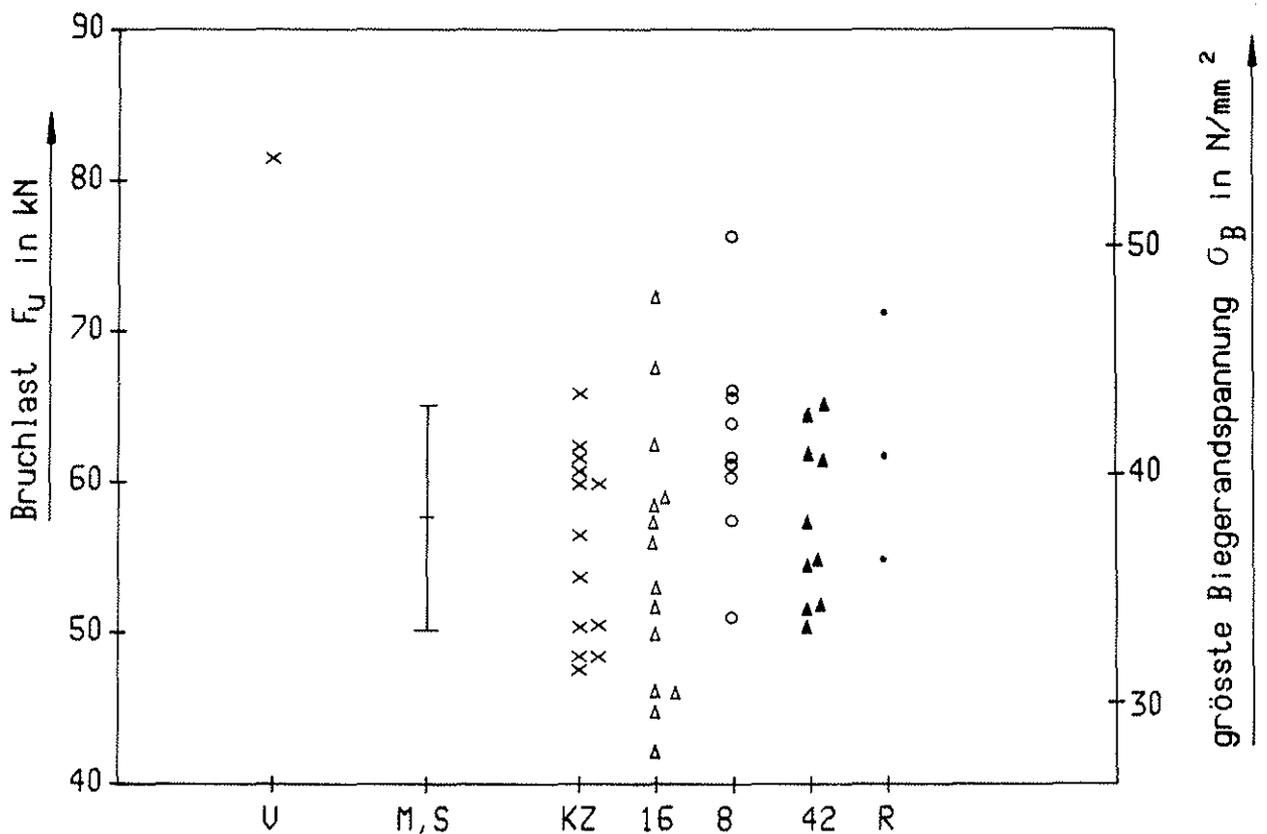
Bild 8.12: Vergleich von Versuch 4/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
0.09		0.15		0.09			0.05
36	37	38	39	40	41	42	43
	0.43		0.06			0.59	
10	11	12	13	14	15	16	17
	KZ	0.10				0.25	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
17 530	0.52
9 000	0.39
15 660	0.49

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

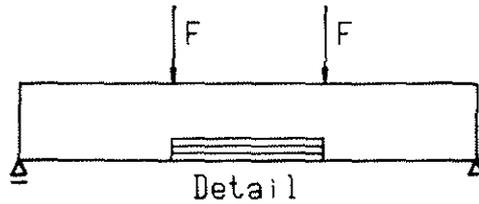
16 = Bruch ausgehend von Zelle 16

8 = Bruch ausgehend von Zelle 8

42 = Bruch ausgehend von Zelle 42

R = übrige Bruchursachen

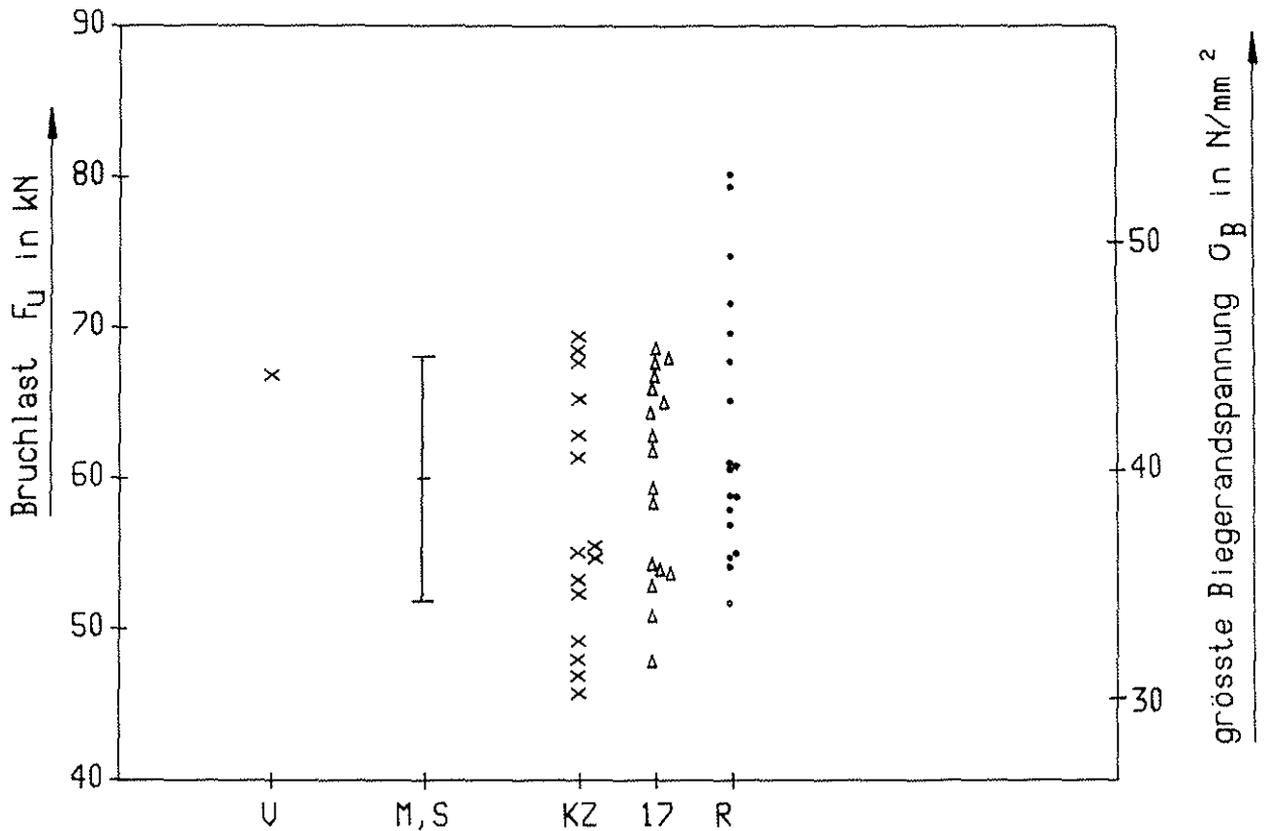
Bild 8.13: Vergleich von Versuch 5/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
			0.29			0.07	0.19
36	37	38	39	40	41	42	43
0.06	0.31			0.05	0.31	0.28	
10	11	12	13	14	15	16	17
0.08		0.12			KZ		0.24

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
18 110	0.53
9 660	0.42
16 320	0.49

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

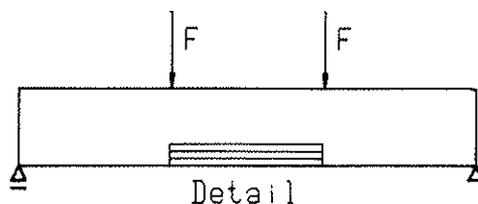
Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

17 = Bruch ausgehend von Zelle 17

R = übrige Bruchursachen

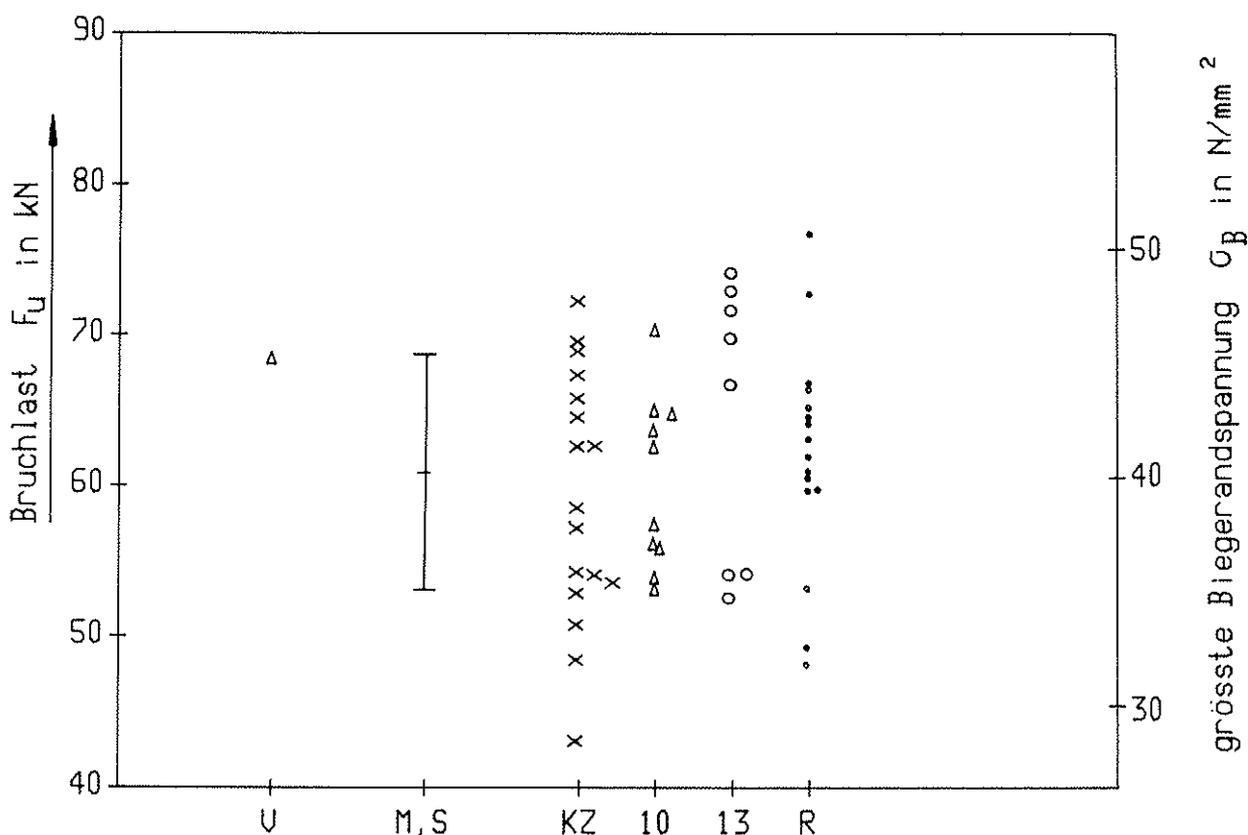
**Bild 8.14:** Vergleich von Versuch 5/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.11			0.11			0.23
36	37	38	39	40	41	42	43
					0.35	0.15	
10	11	12	13	14	15	16	17
0.21			0.11		KZ		

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
18 440	0.54
9 600	0.42
15 520	0.50

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 10

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

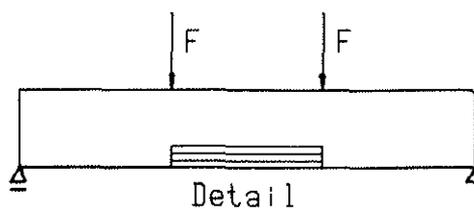
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

10 = Bruch ausgehend von Zelle 10

13 = Bruch ausgehend von Zelle 13

R = übrige Bruchursachen

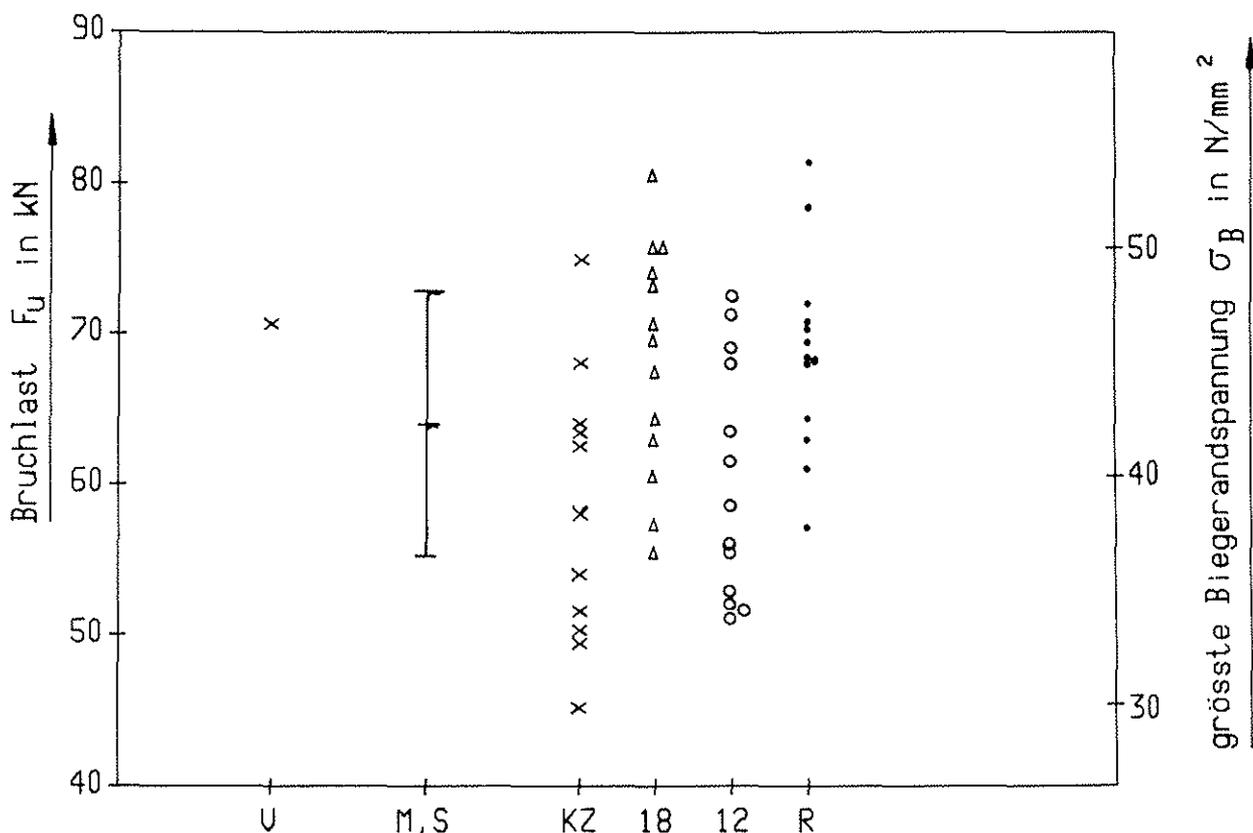
Bild 8.15: Vergleich von Versuch 5/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.19		0.08		0.09		0.07
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.16		KZ		0.08	0.11
10	11	12	13	14	15	16	17
		0.22		KZ			0.07

Bretteligenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
14 940	0.44
14 330	0.46
15 230	0.48

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Keilzinkung und Zelle 18

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

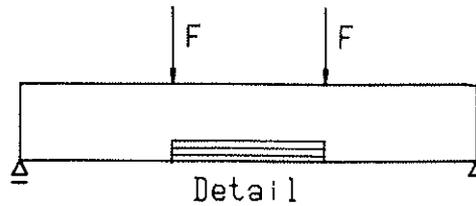
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

18 = Bruch ausgehend von Zelle 18

12 = Bruch ausgehend von Zelle 12

R = übrige Bruchursachen

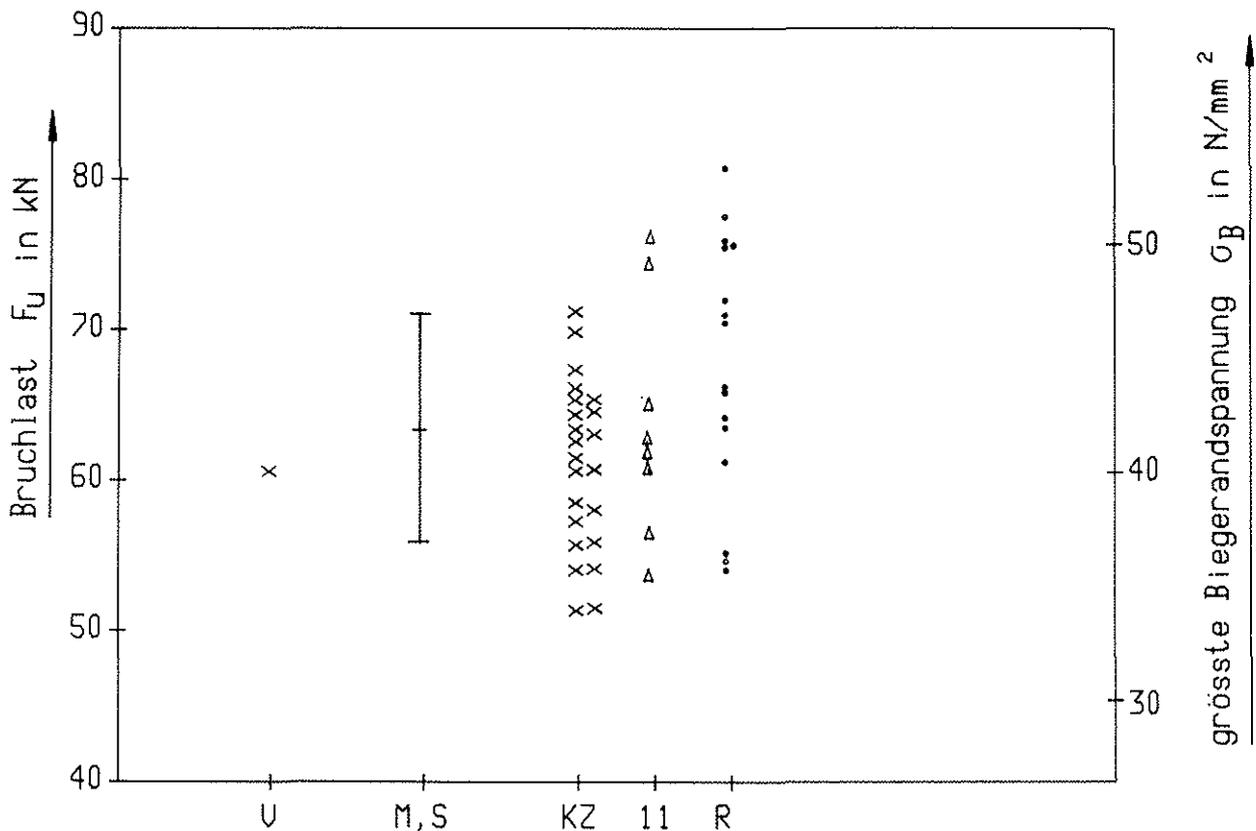
Bild 8.16: Vergleich von Versuch 6/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
	0.15				0.10		
36	37	38	39	40	41	42	43
	0.30	0.05	KZ	0.07			0.08
10	11	12	13	14	15	16	17
	0.18		KZ				0.07

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
13 470	0.46
15 280	0.48
16 310	0.50

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

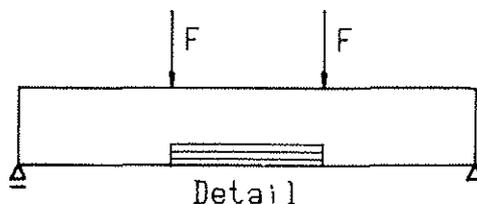
Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

11 = Bruch ausgehend von Zelle 11

R = übrige Bruchursachen

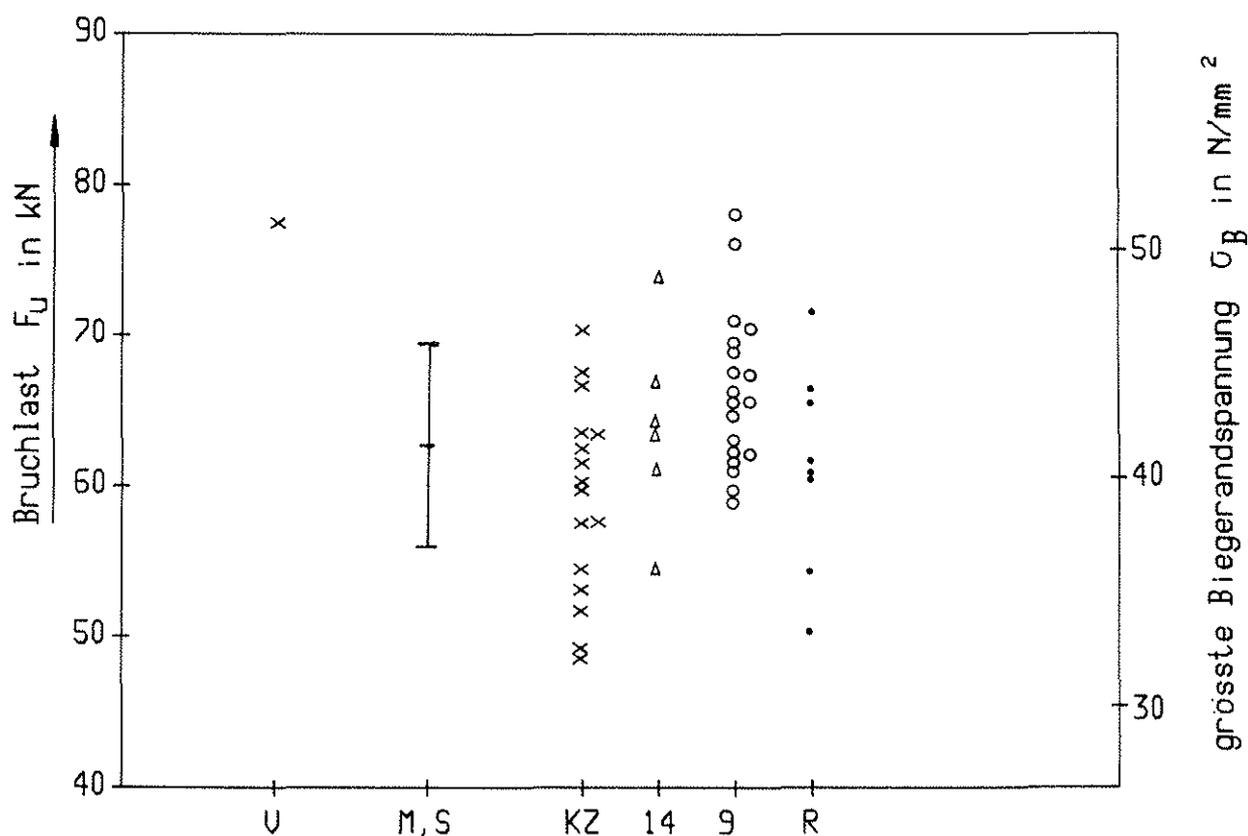
**Bild 8.17:** Vergleich von Versuch 6/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
0.11				0.09			
36	37	38	39	40	41	42	43
		0.08	0.12			KZ	
10	11	12	13	14	15	16	17
			0.09	0.20		KZ	0.10

Bretteligenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
13 130	0.44
14 190	0.48
14 390	0.45

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

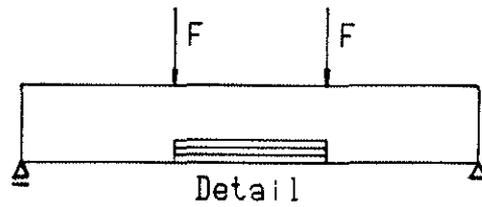
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

14 = Bruch ausgehend von Zelle 14

9 = Bruch ausgehend von Zelle 9

R = übrige Bruchursachen

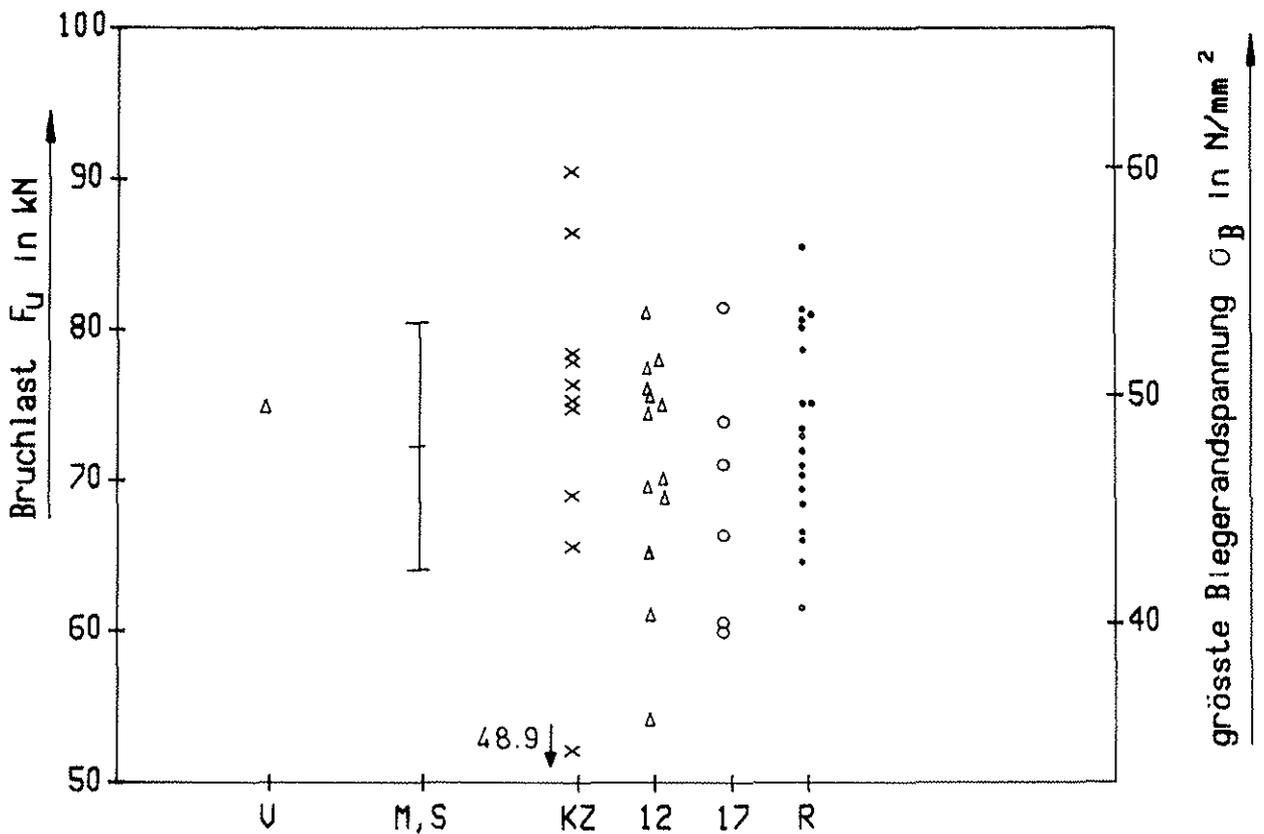
Bild 8.18: Vergleich von Versuch 6/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
36	37	38	39	40	41	42	43
0.16			0.19				0.15
10	11	12	13	14	15	16	17
		0.24			K Z		0.15

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
16 070	0.49
16 820	0.51
12 910	0.45

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 12

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

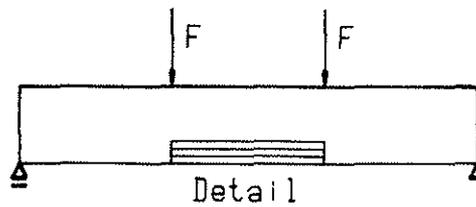
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

12 = Bruch ausgehend von Zelle 12

17 = Bruch ausgehend von Zelle 17

R = übrige Bruchursachen

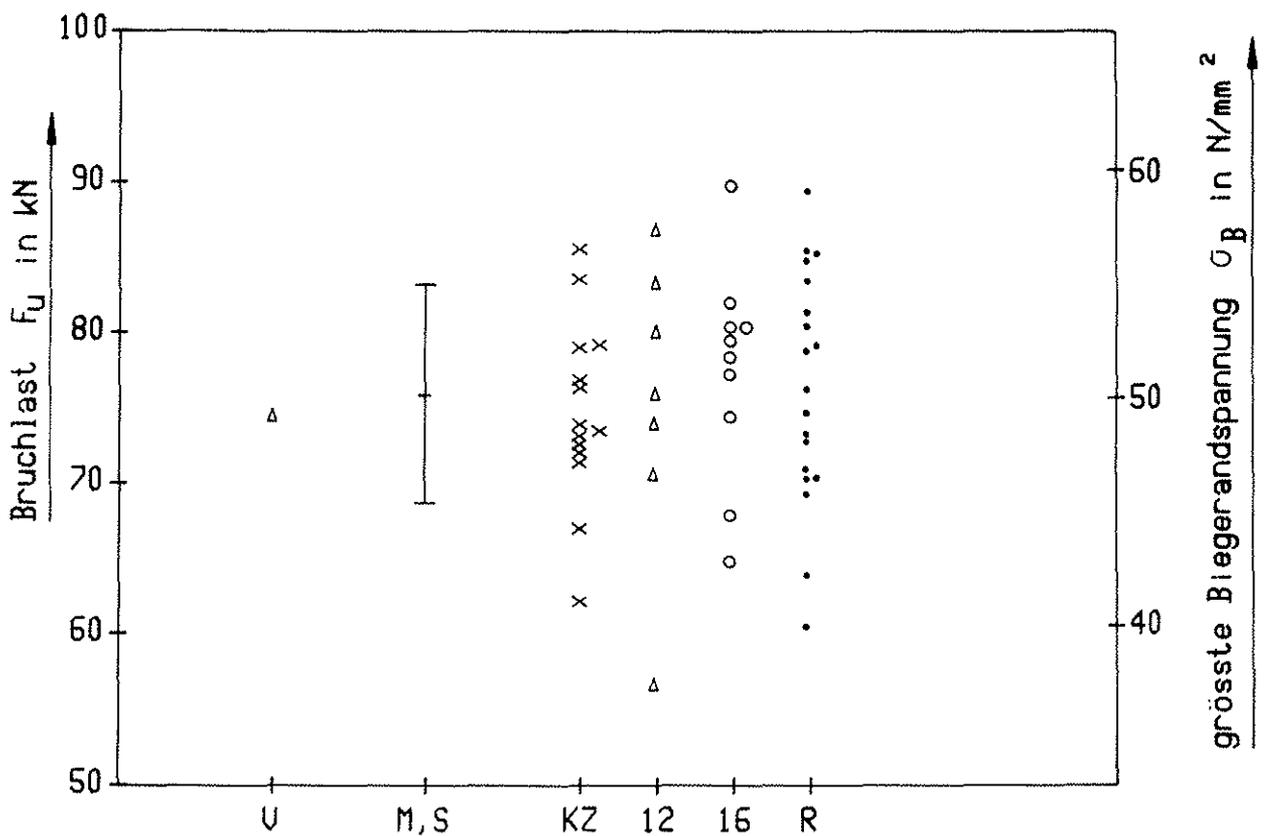
**Bild 8.19:** Vergleich von Versuch 7/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
36	37	38	39	40	41	42	43
0.11			0.09		0.14		
10	11	12	13	14	15	16	17
		0.19		KZ		0.14	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
15 000	0.48
16 780	0.53
13 990	0.46

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 12

Simulationsergebnisse , M,S = Mittelwert und Standardabweichung

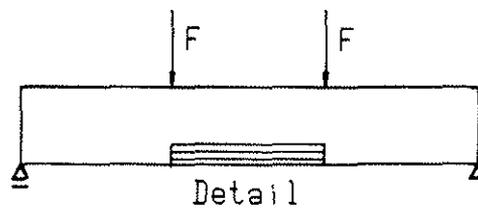
KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

12 = Bruch ausgehend von Zelle 12

16 = Bruch ausgehend von Zelle 16

R = Übrige Bruchursachen

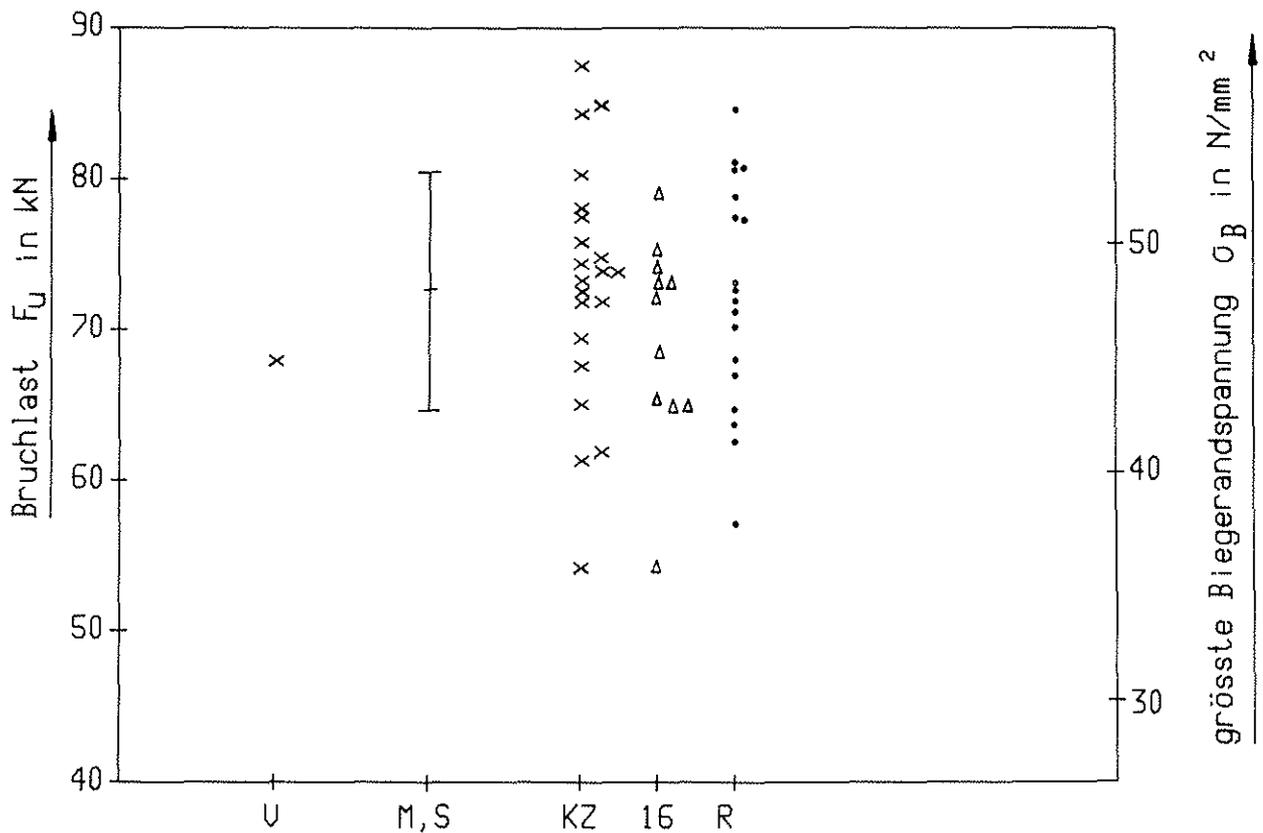
Bild 8.20: Vergleich von Versuch 7/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
36	37	38	39	40	41	42	43
10	11	12	13	14	15	16	17
	0.13			KZ		0.14	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
16 220	0.48
17 570	0.55
13 210	0.46

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

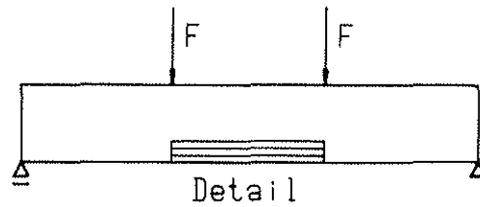
Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von Keilzinkung

16 = Bruch ausgehend von Zelle 16

R = übrige Bruchursachen

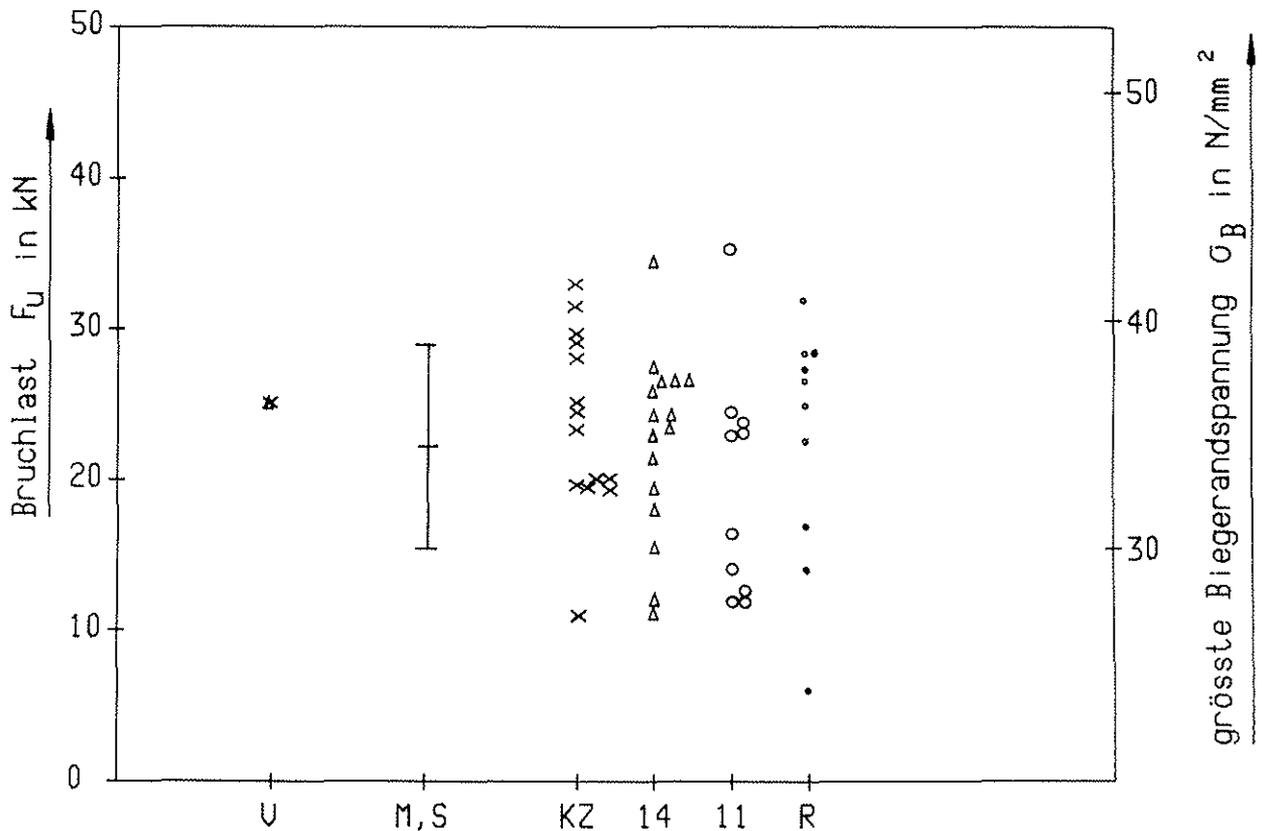
**Bild 8.21:** Vergleich von Versuch 7/3 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
-	-	-	-	-	-	-	-
36	37	38	39	40	41	42	43
	0.11		0.21	0.07			0.18
10	11	12	13	14	15	16	17
	0.23			0.24		KZ	

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
10 140	0.42
10 150	0.38
13 580	0.46

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 14 und Keilzinkung

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

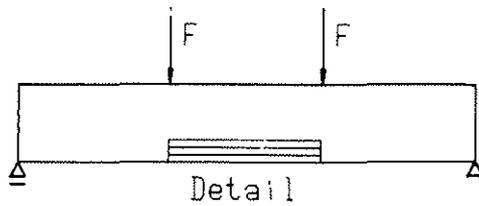
KZ = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

14 = Bruch ausgehend von Zelle 14

11 = Bruch ausgehend von Zelle 11

R = übrige Bruchursachen

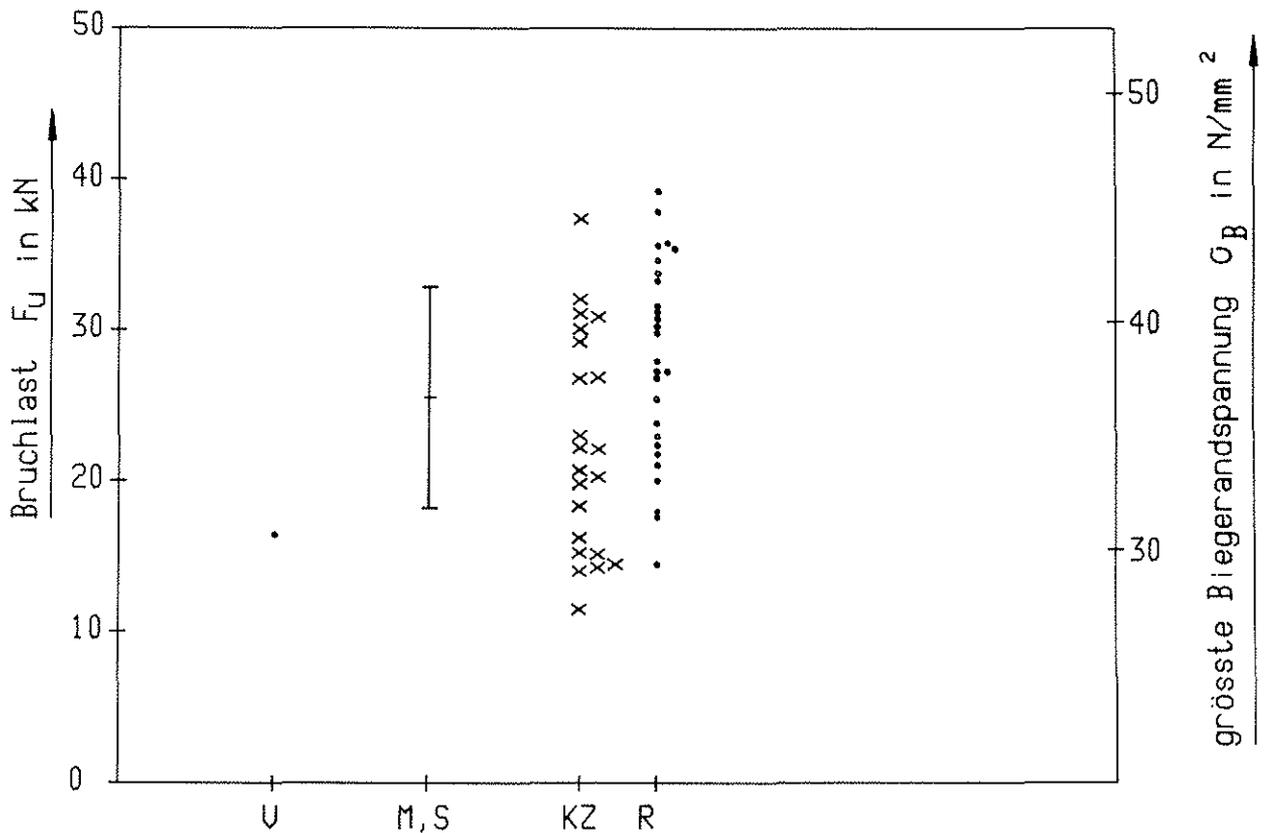
**Bild 8.22:** Vergleich von Versuch 8/1 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
-	-	-	-	-	-	-	-
36	37	38	39	40	41	42	43
0.22						0.11	
10	11	12	13	14	15	16	17
		0.08			KZ		

Bretteligenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
9 010	0.41
11 380	0.43
13 230	0.44

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



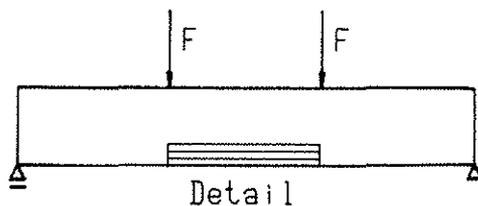
Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 42

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung

KZ = Bruch ausgehend von der Keilzinkung

R = übrige Bruchursachen

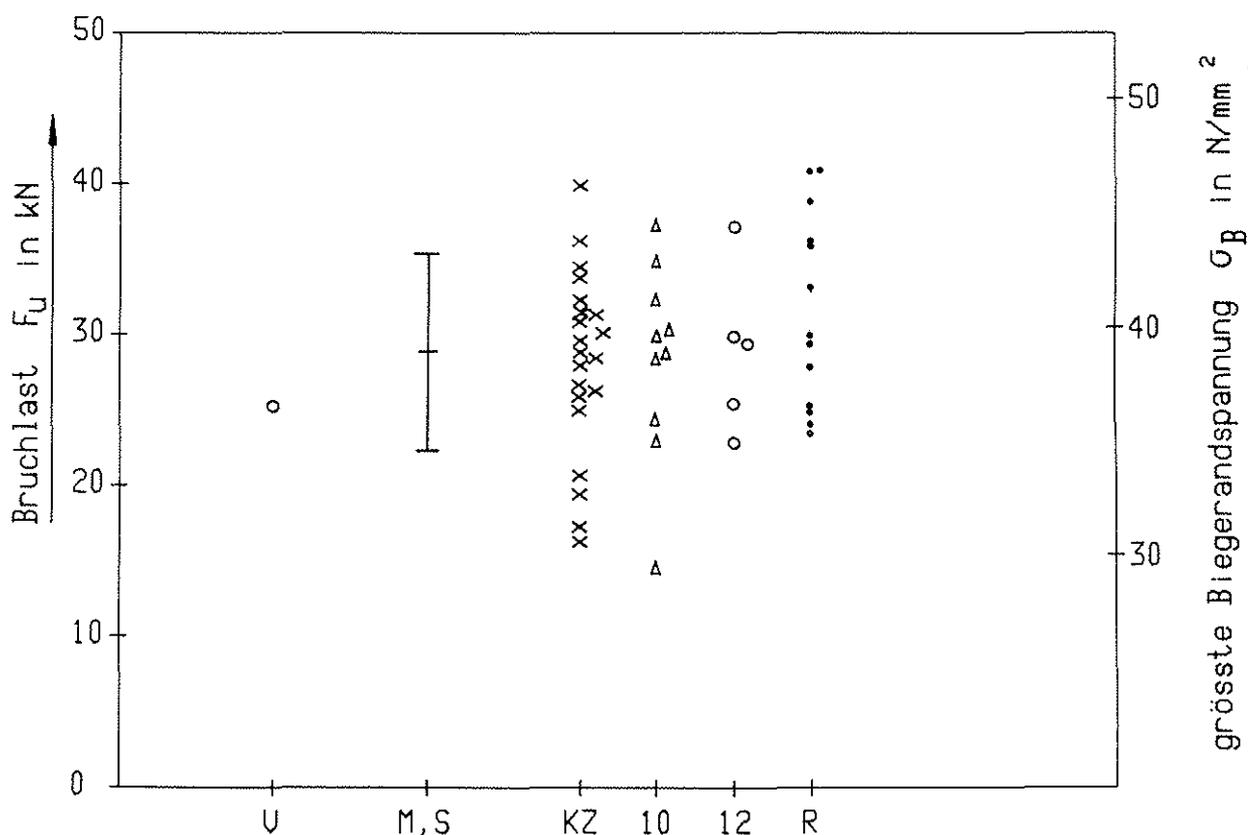
**Bild 8.23:** Vergleich von Versuch 8/2 mit den Simulationsergebnissen



62	63	64	65	66	67	68	69
-	-	-	-	-	-	-	-
36	37	38	39	40	41	42	43
0.08		0.13				0.12	
10	11	12	13	14	15	16	17
0.11		0.09			KZ		

Bretteigenschaften	
$E_{dyn}$	$\rho$
N/mm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>
11 260	0.44
12 080	0.40
13 440	0.44

Detail : Zellennummern und zugehörige KAR - Werte



Versuchsergebnis : U = Bruch ausgehend von Zelle 12 und 7

Simulationsergebnisse : M,S = Mittelwert und Standardabweichung  
 KZ = Bruch ausgehend von der Keilzinkung  
 10 = Bruch ausgehend von Zelle 10  
 12 = Bruch ausgehend von Zelle 12  
 R = ubrige Bruchursachen

**Bild 8.24:** Vergleich von Versuch 8/3 mit den Simulationsergebnissen