

# Tragverhalten von Fichten-Kanthölzern bei M/N-Interaktion

Autor(en): **Steiger, René**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **115 (1997)**

Heft 30/31

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79281>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

René Steiger, Greifensee

# Tragverhalten von Fichten-Kanthölzern bei M/N-Interaktion

**Am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich durchgeführte Versuche zum Tragverhalten von Fichten-Kanthölzern bei gleichzeitiger Wirkung von Biegemomenten und Normalkräften zeigen, dass die Annahme einer linearen Interaktion im Biege-Zug-Quadranten zu korrekten Bemessungsergebnissen führt. Im Druckbereich ist diese Annahme bei Auftreten von Stabilitätsproblemen (schlanke Stäbe) ebenfalls korrekt. Es gilt dabei zu beachten, dass die Effekte 2. Ordnung nicht nur durch Kriecheinflüsse, sondern auch durch die teilweise Plastifizierung der Druckzone markant ansteigen können. Die Modellierung des Festigkeitsversagens von gedrunenen Stäben verlangt zur optimalen Holznutzung eine nichtlineare Überlagerung von Biegemoment und Normalkraft.**

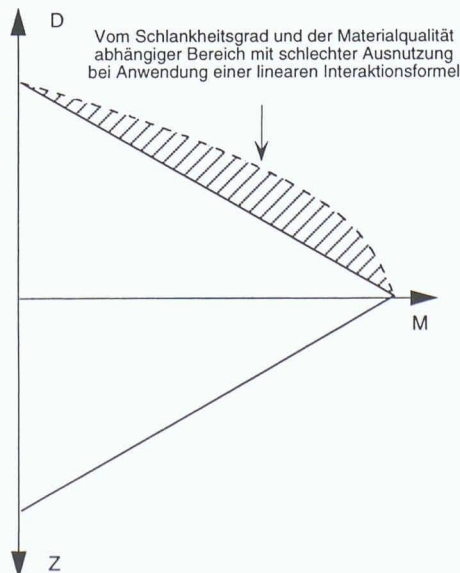
In der Holzbaupraxis treten mit regelmäßiger Häufigkeit kombinierte Beanspruchungen aus Biegemoment ( $M$ ) und Normalkraft ( $N$ ) auf, beispielsweise bei Gurten und Füllgliedern von Fachwerken, bei durch exzentrische Normalkräfte bzw. zentrische Normalkräfte und seitliche Kräfte belasteten Stützen, bei Bogen und biegesteifen Rahmen, aber auch bei geneigten Dächern und Oberlichtern. In Fällen, in denen die Interaktionswirkung zwischen  $M$  und  $N$  nicht vernachlässigt werden kann, sind zur Bemessung spezielle Interaktionsansätze nötig, die aufgrund theoretischer Überlegungen und abgestützt auf Versuchsergebnisse ermittelt werden können.

Ältere Bemessungsmodelle basieren meistens auf Versuchen an strukturstörungsfreien Kleinproben bei zentrischer oder gering exzentrischer Belastung und berücksichtigen weder das nichtlineare Spannungs-Stauchungs-Verhalten bei Druckbeanspruchung, noch das spröde Zugversagen (Volumeneinfluss). Neuere Versuche zur Biegemoment-Normalkraft-Interaktion zeigen, dass die Annahme einer linearen Beziehung zwischen  $M$  und  $N$  zumindest bei der Bemessung von gedrunenen Druckstäben zu konservativen Ergebnissen führt. Die resultierenden Interaktionskurven verlaufen in solchen Fäl-

len vom Ursprung her gesehen konvex, wobei für grosse Biegemomente und kleine Druckkräfte die Kurve am stärksten von einer linearen Beziehung abweicht (Bild 1). Der Grad der Ausbauchung ist abhängig von der Schlankheit und vom Verhältnis von Zug- und Druckfestigkeit bzw. von der Holzqualität (Festigkeitsklasse). Die aus den Versuchen abgeleiteten Bemessungsmodelle erfassen die Nichtlinearität der Interaktionsdiagramme mittels eines elastischen (Zugseite) und eines plastischen Materialverhaltens (Druckseite). Eine noch bessere Übereinstimmung zwischen Rechen- und Versuchswerten erhält man durch Berücksichtigung des Volumeneinflusses (sprödes Versagen auf Zug). Die vorwiegend aus dem angelsächsischen Raum stammenden Versuchsergebnisse sind aufgrund der dort verwendeten deutlich kleineren Holzquerschnitte für schweizerische Verhältnisse allerdings nur von beschränkter Aussagekraft. Ausserdem liegen für den Fall «Biegung mit Zug» wegen der schwierigen Krafteinleitung nur wenige Versuchsergebnisse vor.

In der Schweizer Holzbaunorm SIA 164 [1] werden kombinierte Biege-Zug-Beanspruchungen mittels einer linearen Interaktionsformel erfasst. Im (Biege-)Druckbereich ist das Tragverhalten bekannterweise abhängig von der Bauteilschlankheit. Für das bei gedrunenen Stä-

1  
Interaktion Biegemoment/Normalkraft nach Norm SIA 164 und ENV 1995-1-1



ben sich ergebende Festigkeitsproblem setzt die Norm SIA 164 eine lineare Beziehung zwischen  $M$  und  $N$  an. Zur Berechnung der Stabilität schlanker Stäbe findet man in ihr neben einer allgemeingültigen Spannungsformel 2. Ordnung auch eine linearisierte Näherungsbeziehung. Aufbauend auf dieser gibt der Band 1 der Holzbautabelle (HBT 1) [2] Werte an für eine näherungsweise Erfassung des Einflusses 2. Ordnung ( $\alpha$ -Verfahren).

Die Euronorm ENV 1995-1-1 «Bemessung und Konstruktion von Holzbauten» [3] weicht für den Nachweis der Interaktion zwischen Biegemoment und Druckkraft, falls es sich um ein Festigkeitsproblem handelt, von der bis anhin üblichen linearen Interaktionsformel ab. Für relative Schlankheiten  $\lambda_{rel} > 0,5$  ist Stabilitätsversagen zu überprüfen. Dieses wird mit einem linearen Bemessungsmodell erfasst. Gleichzeitig wirkende Biegemomente und Zugkräfte werden additiv überlagert, was der gängigen Praxis der Norm SIA 164 entspricht. Bild 1 vergleicht die Normansätze von SIA 164 und ENV 1995-1-1 für M/N-Interaktion.

## Versagensarten und Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Holz bei Zug- und bei Druckbeanspruchung ist komplett unterschiedlich. Bei Zugbeanspruchung tritt ein praktisch elastisches Verhalten bis zum Bruch auf und der Zugbruch erfolgt schlagartig. Es besteht eine starke Abhängigkeit der Zugfestigkeit  $f_{t,0}$  von den Strukturstörungen des Holzes. Dabei spielen Astigkeit und

### Druck mit Biegung:

$$\text{SIA 164 (Näherung):} \quad \frac{\sigma_{dl,eff}}{\kappa_K \cdot \sigma_{dl}} + \frac{\sigma_{b,eff}}{\sigma_b} \leq 0,9$$

$$\text{HBT 1 } (\alpha\text{-Verfahren):} \quad \frac{\sigma_{dl,eff}}{\kappa_K \cdot \sigma_{dl}} + \frac{\sigma_{b,eff}}{\sigma_b} \leq \alpha$$

$$\alpha = f \left( \lambda_K, e_0, \frac{\sigma_{b,eff}}{\sigma_b}, \text{Baustoff} \right) \quad 0,9 < \alpha \leq 1,0$$

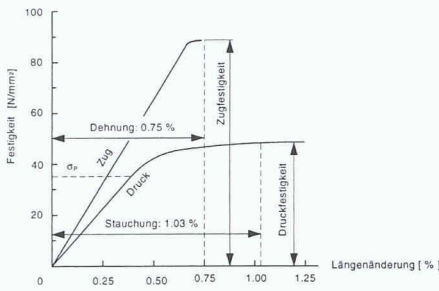
$$\text{ENV 1995-1-1: Festigkeit:} \quad \left( \frac{\sigma_{c,0}}{f_{c,0}} \right)^2 + \frac{\sigma_m}{f_m} \leq 1$$

$$\text{Stabilität:} \quad \frac{\sigma_{c,0}}{\kappa_c \cdot f_{c,0}} + \frac{\sigma_m}{f_m} \leq 1$$

### Zug mit Biegung:

$$\text{SIA 164:} \quad \frac{\sigma_{zl,eff}}{\sigma_{zl}} + \frac{\sigma_{b,eff}}{\sigma_b} \leq 1$$

$$\text{ENV 1995-1-1:} \quad \frac{\sigma_{t,0}}{f_{t,0}} + \frac{\sigma_m}{f_m} \leq 1$$



2

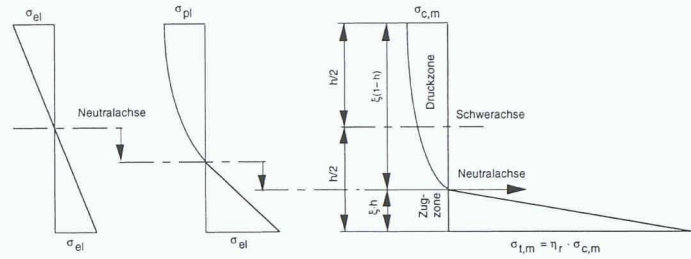
Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Holz bei Zug- und bei Druckbeanspruchung

Schrägfaserigkeit eine bedeutende Rolle. Das spröde Bruchverhalten von Holz bei Zugbeanspruchung bedingt eine Berücksichtigung der Bauteilgröße (Volumeneinfluss) bei der Bemessung.

Das Versagen von Bauteilen unter Druckbelastung ist je nach Schlankheit gegeben durch das Überschreiten der kritischen Last oder der Druckfestigkeit  $f_{c,0}$ . Bei schlanken Stäben wird die Traglast durch seitliches Ausknicken weit unterhalb der Druckfestigkeit erreicht. Bei gedrunenen Stäben unter Druckbeanspruchung weichen die Fasern bei Erreichen der Druckfestigkeit lokal seitlich aus: Es stellen sich Druckstauchungen ein, was zu einem duktilen Verhalten führt. Oberhalb der Proportionalitätsgrenze  $\sigma_p$  wachsen die Verformungen stark an. Die Bruchlast ist in diesen Fällen nicht eindeutig bestimmbar, sondern muss entsprechend einer festgelegten maximalen Verformung aus dem Kraft-Verformungs-Diagramm ermittelt werden. Der Einfluss der Äste und der Schrägfaserigkeit auf die Druck- ist nicht so ausgeprägt wie derjenige auf die Zugfestigkeit. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Holz bei Zug- und bei Druckbeanspruchung ist in Bild 2 dargestellt.

Das Verhalten bei Biegung bildet eine Kombination des Verhaltens bei Zug- und bei Druckbeanspruchung. Es gilt allerdings zu unterscheiden zwischen Biegeträgern aus «Normalem Bauholz», die stets durch Überschreiten der Festigkeit auf der Biegezugseite versagen und Biegeträgern aus «Hochwertigem Holz», bei denen dem Versagen der Biegezugzone eine «Plastifizierung» der Druckzone vorausgehen kann.

Der am weitesten verbreitete Bemessungsansatz für biegebeanspruchte Holzbauteile geht von einem linearen Verlauf der Spannungen  $\sigma_{el}$  über den Querschnitt aus (Bild 3, links). Diese Annahme ist nur zur Beschreibung des Biegeverhaltens von Normalem Bauholz korrekt, wo der Bruch durch das Überschreiten der Zugfestigkeit eintritt, bevor die Spannungen auf der Druckseite  $\sigma_{c,m}$  die Proportionalitätsgrenze überschritten haben. Die sich bei hoch-



3

Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Holz bei Biegung

wertigem Bauholz ergebenden Stauchungen auf der Druckseite führen zu einer Verschiebung der neutralen Achse (Bild 3, Mitte). Der Bruch wird auch in solchen Fällen auf der Zugseite eintreten ( $\sigma_{t,m} > f_{t,0}$ ). Die effektive Bruchlast muss dann unter Berücksichtigung des nicht-linearen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens in der Druckzone berechnet werden (Bild 3, rechts). Da bei Biegung letztlich also ebenfalls die Zugfestigkeit des Holzes und damit ein sprödes Bruchverhalten ausschlaggebend für den Tragwiderstand ist, muss auch hier ein Volumeneinfluss bei der Bemessung berücksichtigt werden.

Es existieren verschiedene Modelle zur Erfassung der inelastischen Biegung bei Holz. Bild 3 zeigt als Beispiel das Modell von Zakic [4], das in der Druckzone von einer Parabel 2. Ordnung und in der Zugzone von einem linearen Modell ausgeht. Zakic verwendet einen einheitlichen Elastizitätsmodul für die Zug- und die Druckzone und zeigt, dass der Plastifizierungsgrad  $\eta_{pl}$  abhängig ist vom Verhältnis der Zug- zur Druckfestigkeit  $\eta_r$ , also direkt von der Holzqualität.

$$\eta_{pl} = \frac{M_{u,pl}}{M_{u,el}} \quad (1)$$

$$\eta_r = \frac{f_{t,0}}{f_{c,0}} \quad (2)$$

Über die Unterschiede des E-Moduls in Abhängigkeit der Beanspruchung (Biegung:  $E_m$ , Zug:  $E_{t,0}$ , Druck:  $E_{c,0}$ ) sind bisher nur wenige Untersuchungen gemacht worden. Die exakte Formel zur Berechnung des Biege-E-Moduls für Materialien mit unterschiedlichem E-Modul für Zug und Druck findet man in [5] bzw. [6]:

$$E_m = \frac{4 \cdot E_{t,0} \cdot E_{c,0}}{(\sqrt{E_{t,0}} + \sqrt{E_{c,0}})^2} \quad (3)$$

Schneider und Phillips zitieren in [5] Kollmann und Côté (1968) [7] sowie Garfinkel

(1973). Während erstere von einem Verhältniswert von 1,0 zwischen dem E-Modul für Zug und Druck ausgehen, nimmt Garfinkel einen Schwankungsbereich von 1,0 bis 1,05 an:

$$E_{t,0} \approx 1,0 \div 1,05 \cdot E_{c,0} \quad (4)$$

Unter der vereinfachenden Annahme, dass der Biege-E-Modul in etwa dem Mittelwert des E-Moduls für Zug und Druck entspricht, ergibt sich:

$$E_m \approx 0,98 \div 1,0 \cdot E_{c,0} \quad (5)$$

Bei der Bemessung von Normalem Bauholz kann man jedoch in erster Näherung davon ausgehen, dass der E-Modul bei Zug, bei Druck und bei Biegung im Bereich der Gebrauchslasten ungefähr gleich gross ist.

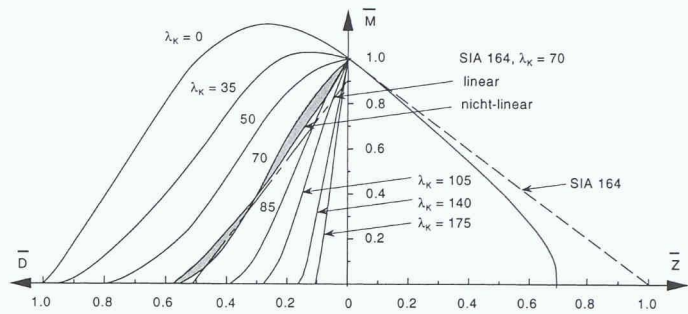
Bei gleichzeitiger Wirkung eines Biegemoments und einer Normalkraft können in einem Holzbauteil je nach Vorzeichen der Normalkraft, vorhandener Schlankheit, Materialqualität und Verhältnis der angreifenden Kräfte verschiedene Versagensformen auftreten. Druckelemente, die gleichzeitig durch Biegemomente und Normalkräfte beansprucht werden, zeigen eine Abhängigkeit des Tragverhaltens von der Geometrie (Bauteilabmessungen, Knicklänge), der Belastung und den Materialeigenschaften. Der Bruch tritt ein durch Überschreiten der Druck- oder der Zugfestigkeit parallel zur Faser. Bei gleichzeitig wirkenden Biegemomenten und Zugkräften ergibt sich kein Stabilitätsproblem. Der Tragwiderstand bei Biegung mit Zugkraft ist durch die Zugfestigkeit parallel zur Faser gegeben. Das für diesen Fall typische spröde Versagen ist mit einem Volumeneinfluss verbunden.

### Bemessungsansätze (SIA, ENV) und aktuelle Forschungsarbeiten

Bilder 4 und 5 zeigen die Ansätze der Norm SIA 164 und der ENV 1995-1-1 zur Be-

messung von Stäben unter Biegung und gleichzeitig wirkender Zug- bzw. Druckkraft. In der ENV 1995-1-1 wird für den Nachweis der Interaktion zwischen Biegemoment und Druckkraft von der bis anhin in der Schweizer Holzbaunorm SIA 164 verwendeten linearen Interaktionsformel abgewichen. Gleichzeitig wirkende Biegemoment- und Zugkraftbeanspruchungen hingegen werden additiv überlagert, was der gängigen Praxis der Norm SIA 164 entspricht.

Die bedeutendsten neueren Arbeiten zur Interaktion zwischen Biegemoment und Normalkraft sind die Versuche von Senft und Suddarth [8], [9] und die umfangreichen Versuche von Buchanan. Letzterer zeigt in [10], [11], [12] und [13], dass die Annahme einer linearen Interaktion zwischen Moment und Druckkraft zu konservativen Ergebnissen führt und gibt verschiedene Bemessungsansätze unter Berücksichtigung der inelastischen Biegung und des Volumeneinflusses. Buchanan baut sein Rechenmodell ausgehend von verschiedenen Lagen der Dehnungsebene auf und rechnet mittels Gleichgewichtsbedingungen die Interaktionsverläufe. Die in das Modell eingehenden Konstanten werden anhand von Versuchen kalibriert. Die Nichtlinearität der Interaktionsdiagramme wird mittels eines elastischen (Zugseite) und eines plastischen (Druckseite) Materialverhaltens erfasst. Die dabei verwendeten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen machen keinen Unterschied bezüglich Elastizitätsmodul bei Zug- oder bei Druck-



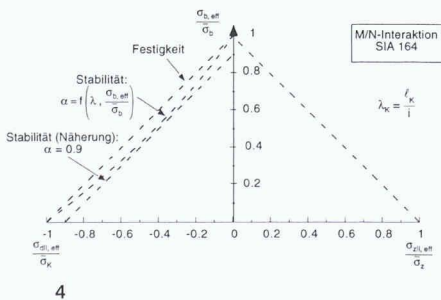
6  
Vergleich der M/N-Interaktionsversuche von Buchanan mit den Ansätzen der Norm SIA 164

belastung. Eine noch bessere Übereinstimmung zwischen Rechen- und Versuchswerten erhält Buchanan durch Berücksichtigung des Volumeneinflusses (sprödes Versagen auf Zug). Bild 6 stellt seine Versuchsresultate im Vergleich zu den Bemessungsansätzen der Norm SIA 164 dar. Die Kurve für schlanke Stäbe mit  $\lambda_k = 70$  ist dabei besonders hervorgehoben, da die geprüften Stäbe diese Schlankheit aufwiesen. Man kann erkennen, dass nur geringe Abweichungen zum Graph der Bemessungsbeziehung 2. Ordnung der Norm SIA 164 bestehen. Auch die Verwendung des vereinfachten (linearen) Bemessungsansatzes der Norm SIA 164 führt zu akzeptablen Resultaten.

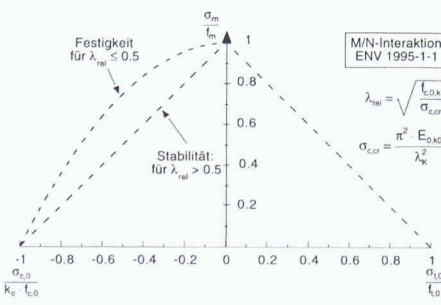
Die Bemessungsformel der ENV 1995-1-1 beruht auf Betrachtungen von Blass [14]. Er entwickelte ein Rechenmodell zur Ermittlung der charakteristischen Werte der Tragfähigkeit druckbeanspruchter Brettschichtholzstäbe, das Traglastberechnungen nach der Plastizitätstheorie 2. Ordnung im Rahmen von Monte-Carlo-Simulationen ermöglicht. Das zugrundeliegende stochastische Modell umfasst die statistischen Verteilungsfunktionen der Basisvariablen (Strukturmerkmale des Holzes, charakteristische Grössen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung und geometrische Imperfektionen) als Grundlage für die Simulation des Stützenaufbaus. Weitere, die Thematik M/N-Interaktion betreffende Forschungsarbeiten sind in [15] erwähnt.

Das Biegemoment kann beispielsweise durch eine exzentrisch angreifende Normalkraft erzeugt werden. Dieses Verfahren eignet sich vorab zur versuchsmässigen Überprüfung des Tragverhaltens von Stützen, da einerseits die in der Praxis auftretende Beanspruchung realitätsnah simuliert werden kann und andererseits die Lasteinleitung einfach ist. Ein wesentlicher Vorteil bei dieser Art der Versuchsdurchführung liegt neben ihrem direkten Praxisbezug darin, dass durch Variation der Exzentrizität der Normalkraft auf sehr einfache Weise verschiedene Momentenwerte erzeugt werden können. Das zugrundeliegende statische System ist klar definiert und die Schnittkräfte können ohne die Berücksichtigung von Korrekturgössen direkt bestimmt werden. Falls es sich bei den aufzubringenden Normalkräften um Druckkräfte (geringer Exzentrizität) handelt, ist die Einleitung derselben in den Probekörper einfach möglich. Das Aufbringen von Zugkräften ist jedoch mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet.

Die Einleitung von Biegemomenten an den Stabenden ist eine weitere Variante zur Durchführung von M/N-Interaktionsversuchen. In der Praxis tritt diese Form der Beanspruchung beispielsweise bei Fachwerken auf. In der Regel führt man die statische Berechnung an einem idealisierten Fachwerk durch. Man geht also u. a. davon aus, dass die Stäbe gelenkig verbunden sind und die Stabachsen sich in den Knotenpunkten schneiden. In Wirklichkeit haben die Anschlüsse jedoch eine gewisse Biegesteifigkeit, wodurch Momente in die Füllglieder eingeleitet werden. Gerade im Holzbau kann man sehr oft aus konstruktiven Gründen (die Abmessungen der Anschlüsse richten sich nach der Leistung der Verbindungsmittel) eine optimale Zentrierung der Stabachsen nicht realisieren. Dies führt zu mehr oder weniger grossen sekundären Biegemomenten in den Füllgliedern. Versuchstechnisch ist diese Form der M/N-Interaktion bei Holz nur sehr schwer zu realisieren. Die einzuleitenden Momente erzeugen lokal eine dermassen grosse Beanspruchung,



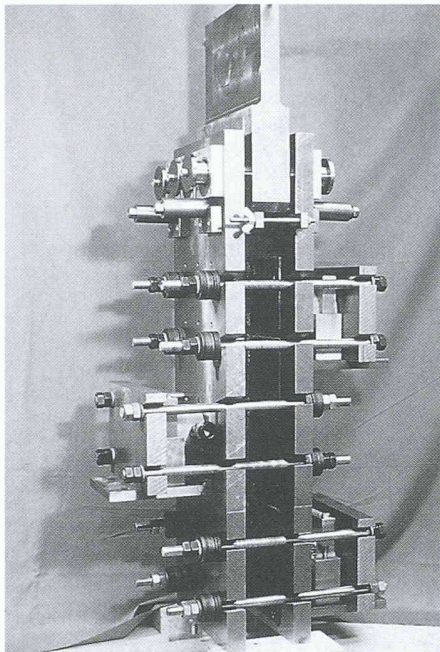
4  
Norm SIA 164 – Bruchkriterium für kombinierte Beanspruchung Biegemoment/Normalkraft



5  
ENV 1995-1-1 – Bruchkriterium für kombinierte Beanspruchung Biegemoment/Normalkraft

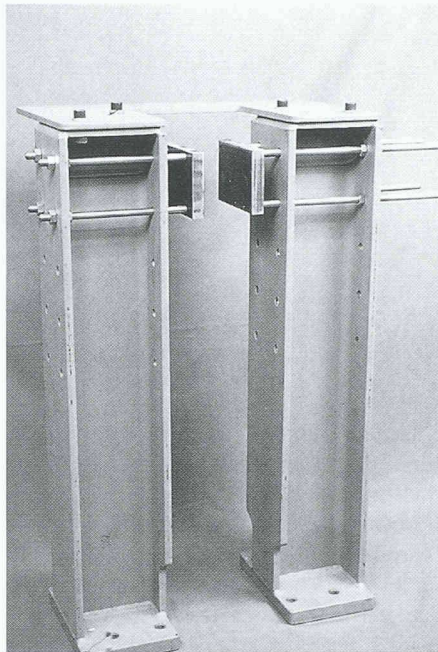
### Versuchsmässige Simulation der M/N-Beanspruchung

In den eingangs erwähnten Fällen kombinierter Beanspruchungen aus Biegemoment und Normalkraft kann das Biegemoment durch eine Exzentrizität der Normalkraft, lateralen Kraftangriff in einem Zug- oder Druckglied oder durch eine Momentenbeanspruchung an den Stabenden bedingt sein. Daraus ist ersichtlich, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, eine Biegemoment-Normalkraft-Beanspruchung versuchstechnisch zu realisieren.



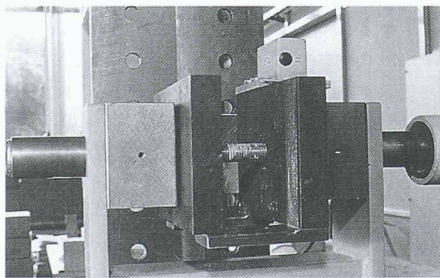
7

Einspannvorrichtung für Zugversuche an Holzproben grösseren Querschnitts



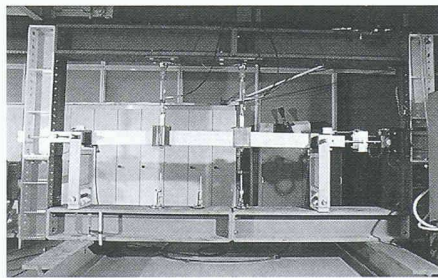
9

Stützvorrichtung zur Durchführung von Druckversuchen an Stäben



8

Konstruktion zur Einleitung der Normalkraft, bestehend aus zwei profilierten Klemmplatten, Vorspannpresse und -stange



10

Versuchsaufbau zur Durchführung von M/N-Interaktionsversuchen an Kantholz

dass die Festigkeit des Holzes im Lasteinleitungsbereich nicht genügt. Das Holz versagt aufgrund von zu grossen Schub- und Querkraften, bevor sich ein Bruch in der eigentlichen Prüfzone einstellt. Dieses Verfahren kann also nur bei geringen Momentenbeanspruchungen erfolgreich angewandt werden. Es ist dann angezeigt, wenn man nicht den Stab prüfen will, sondern den Anschluss.

Das Biegemoment kann auch durch seitlich angreifende Kräfte erzeugt werden. Dieser Fall tritt häufig bei Fachwerken auf, wenn die Lasteinleitung nicht durch an den Knotenpunkten konzentrierte Einzelkräfte, sondern durch verteilte Lasten erfolgt, was zu Biegemomenten in den Gurtungen führt. Solche Momente entstehen beispielsweise bei der Auflagerung von Pfetten auf dem Obergurt oder der Aufhängung von Lasten am Untergurt zwischen den Fachwerkknoten. Stützen können ebenfalls gleichzeitig durch eine

Druckkraft und seitliche Kräfte (z. B. infolge Wind) belastet werden. Aufgrund seiner Einfachheit ist dieses Verfahren der Krafteinleitung bei M/N-Interaktionsversuchen bereits mehrfach angewandt worden. Mindestens bei der Einleitung von Druckkräften, die in der Regel stirnseitig auf Kontakt erfolgt, entstehen klar definierte statische Systeme, falls man den Angriffspunkt der Druckkraft genau lokalisieren kann. Das Biegemoment setzt sich aus zwei Anteilen zusammen: Die Lateral-lasten bilden den Hauptanteil und die exzentrische Normalkraft erzeugt ein Sekundärmoment. Wird als seitliche Belastung ein Einzellast-Paar angesetzt, so ergibt sich ausserdem unter reiner Biegung in Balkenmitte ein Bereich ohne Schubbeanspruchung, was die Bestimmung des Biege-E-Moduls wesentlich vereinfacht. Die Einleitung von Zugkräften ist insofern schwieriger, als es gilt, Einspannbrüche möglichst zu vermeiden. Dies führt zu auf-

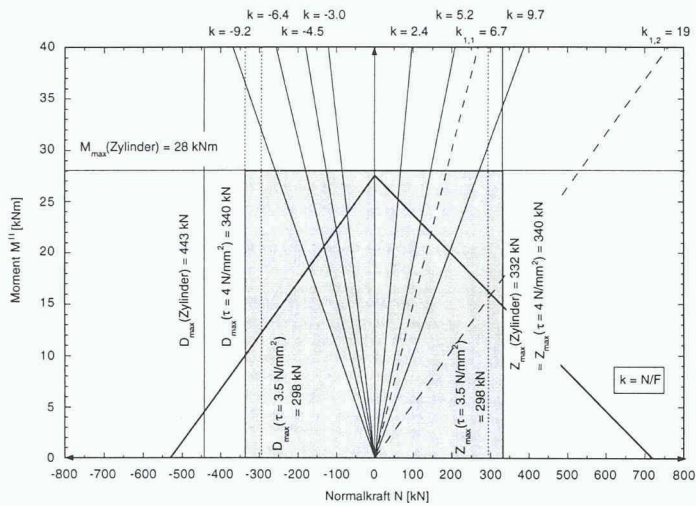
wendigen Lasteinleitungs-konstruktionen und, je nach Art der Lasteinleitung, zu unklaren statischen Systemen.

Bei Interaktionsversuchen an Kanthölzern sind die Momente derart gross, dass sie nur mittels Laterallasten erzeugt werden können. Eine Einleitung als Stab-Endmomente würde zwangsläufig zu einer Häufung von Brüchen in der Einspannstelle führen. Ausserdem ergäben sich eine komplexe Konstruktion zur gleichzeitigen Einleitung der Normalkraft und des Moments sowie Unklarheiten im statischen System und damit bei der Ermittlung der Schnittkräfte. Die hier beschriebenen Versuche wurden daher nach dem zuletzt erwähnten Verfahren durchgeführt: Das primäre Biegemoment wurde durch ein seitlich angreifendes Lastpaar erzeugt. Zur Einleitung der Normalkraft entwickelte man, basierend auf Erfahrungen mit einer Einspannvorrichtung für Zugversuche an Kanthölzern (Bild 7) [16], spezielle Klemmbacken (Bild 8). Die Normalkraft wird über zwei profilierte Stahlplatten, die in die Aussenseiten der Probekörper gepresst werden, eingeleitet. Die Richtung der Profilierung wird durch die Richtung der Normalkraft (Zug oder Druck) bestimmt. Die Vorspannung der Klemmplatten erfolgt mittels eines Hohlkolbenzylinders und einer zentrisch angeordneten Gewindestange. Die Wirkungslinie der Normalkraft liegt somit in der Stabachse und schneidet sich mit den Wirkungslinien der Auflagerreaktion und der Klemmkraft in einem Punkt.

Sowohl die Zug- als auch die Druckversuche wurden auf der 1600 kN-Universalprüfmaschine der ETH Zürich durchgeführt. Zur Verhinderung eines vorzeitigen Knickversagens der Druckstäbe wurde eine Stützvorrichtung (Bild 9) verwendet [17], die die seitliche Stützung des Probekörpers auf halber Höhe erlaubte. Für die Interaktions- und die Biegeversuche wurde ein spezieller Prüfaufbau entwickelt (Bild 10).

Die Probekörper, Fichtenkanthölzer der Länge 3030 mm mit den Querschnittsabmessungen 8/16, wurden durch Laterallasten in den Drittelpunkten und durch eine gleichzeitig wirkende Normalkraft belastet. Die Spannweite betrug 2760 mm, was einen Lastabstand von 920 mm ergab. Bei Einleitung von Druckkräften wurden die Balken in den Drittelpunkten seitlich gestützt, um ein Knicken aus der Ebene zu verhindern. Die Auflager waren so ausgebildet, dass sich eine reibungsfreie Rotation einstellen konnte. Die Knicklänge für Knicken in der Ebene entsprach damit der Balkenlänge.

Der Versuchsablauf gliederte sich in drei Teile. Vorerst wurden die Balkenab-



11 Biegemoment-Normalkraftverhältnisse k zur Ermittlung des Interaktionsdiagramms

messungen, das Gewicht, die Holzfeuchte und, als Mass für die Holzqualität, die Ultraschallgeschwindigkeit bestimmt. Anschliessend ermittelte man jeweils für die Zustände «Reine Biegung» und «Reine axiale Beanspruchung» die entsprechenden Verformungsmasse. Den Abschluss bildete der eigentliche Interaktionsversuch: Die Laterallasten und die Normalkraft wurden in einem konstant gehaltenen Verhältnis so lange gesteigert, bis sich ein Bruch einstellte.

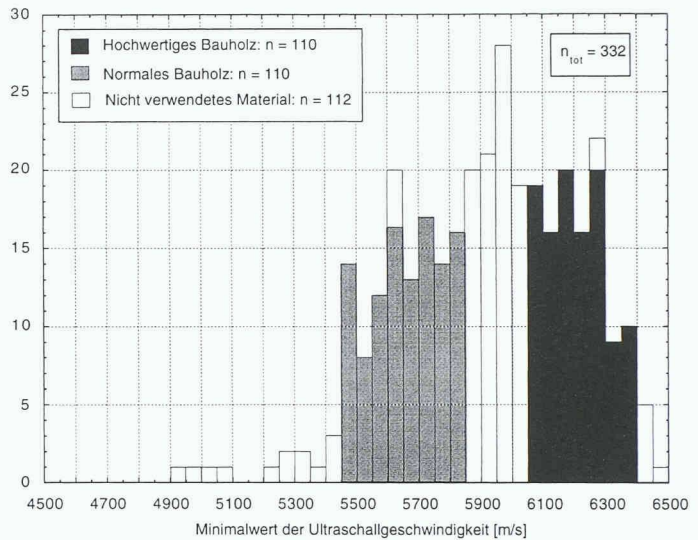
Die Ermittlung des M/N-Interaktionsdiagramms basiert darauf, dass für verschiedene Kombinationen zwischen Biegemoment M und Normalkraft N zehn Versuche gemacht wurden. Die statistische Auswertung der Resultate konzentrierte sich auf die kennzeichnenden Fraktilewerte (5%- und 50%-Fraktile). Sämtliche Werte einer 10er-Gruppe liegen auf einer Geraden, die durch den Ursprung geht. Die Steigung der Geraden wird durch das vorgegebene Verhältnis der Biegekraft zur Normalkraft (= Gruppenparameter) bestimmt.

Bild 11 zeigt in einem schematischen Interaktionsdiagramm den beschriebenen Sachverhalt auf. Eingezeichnet sind die aus technischen Gründen (Zylinderkraft, Klemmplattenreibung) maximal erreichbaren Kräfte. Die Verhältnisse M/N wurden so festgelegt, dass der durch die technische Ausrüstung limitierte Bereich des Interaktionsdiagramms (grau gerasterte Fläche) erfasst wurde. Dabei hat man sich prioritär auf die Bereiche mit grossem Biegemoment und kleiner Normalkraft konzentriert, da vor allem dort Abweichungen von der linearen Interaktion zu erwarten waren (Bild 6). Es ergaben sich bei elf verschiedenen Verhältnissen zwischen Normal- und Biegekraft  $k = N/F$  insgesamt 110

Interaktionsversuche. Die Proportionalität der Kräfte wurde mittels einer Serschaltung von Hydraulikzylindern erzeugt. Aufgrund der unterschiedlichen Kolbenflächen (Zug/Druck) konnte man eine hydraulische Über- bzw. Untersetzung realisieren.

**Stichprobenbildung mittels Ultraschall**

Um den Einfluss der Holzqualität auf das Verhalten bei gleichzeitig wirkenden Normalkräften und Biegemomenten zu erfassen, wurden die M/N-Interaktionsversuche an zwei qualitativ deutlich unterschiedlichen Holzklassen (Normales Bauholz und Hochwertiges Bauholz) durchgeführt. Aus Gründen der geringen Trennschärfe und Treffsicherheit der visuellen Sortierung kam die Methode der Ultraschall-Sortierung, die in [15] ausführlich beschrieben ist, bei der Auswahl des Rohmaterials und der Probekörper zum Einsatz. Die Zuteilung zu den zwei Gruppen erfolgte gemäss dem Minimalwert der Ultraschallgeschwindigkeit im konditionierten Zustand  $v_{12min}$ . Bild 12 zeigt das Histogramm der Schallgeschwindigkeiten sämtlicher sortierter Balken mit bereits vollzogener Gruppierung. Die rechteck-



12 Histogramm der Schallgeschwindigkeiten im konditionierten Zustand  $v_{12min}$

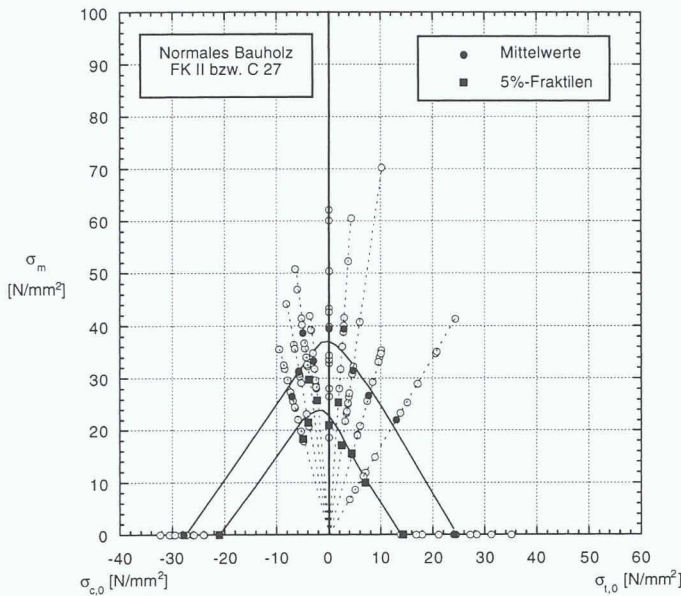
förmige Verteilung der 332 Balken ist auf die Art der Sortierung zurückzuführen. Die Trennschärfe der Ultraschallsortierung ergibt eine deutliche Abweichung von der bei einer visuellen Sortierung zu erwartenden Normalverteilung. Bei der Bildung der zwei Versuchsgruppen mit je 110 Probekörpern (Normales und Hochwertiges Bauholz) achtete man daher darauf, ebenfalls eine Rechteckverteilung zu erzeugen, wobei die Streubreiten  $\Delta v$  der zwei Gruppen bewusst unterschiedlich gewählt wurden. Die Grenzwerte für die Gruppenbildung wurden wie folgt festgelegt:

- Normales Bauholz  
5450 m/s  $\leq v_{12min} \leq$  5850 m/s  
(Streubreite:  $\Delta v =$  400 m/s)
- Hochwertiges Bauholz  
6050 m/s  $\leq v_{12min} \leq$  6400 m/s  
(Streubreite:  $\Delta v =$  350 m/s)

Der Zwischenbereich (d.h. 5850 m/s  $< v_{12min} <$  6050 m/s) umfasste 90 Probekörper. Durch Entnahme derselben aus der Stichprobe erreichte man eine deutliche Trennung zwischen den zwei Hauptgruppen. In beiden Hauptgruppen wurden elf Stichproben zu zehn Probekörpern gebildet. Die Zuteilung zu den 10er-Gruppen erfolgte entsprechend der minimalen Schallgeschwindigkeit im konditionierten Zustand  $v_{12min}$ . Da die Geschwindigkeitsver-

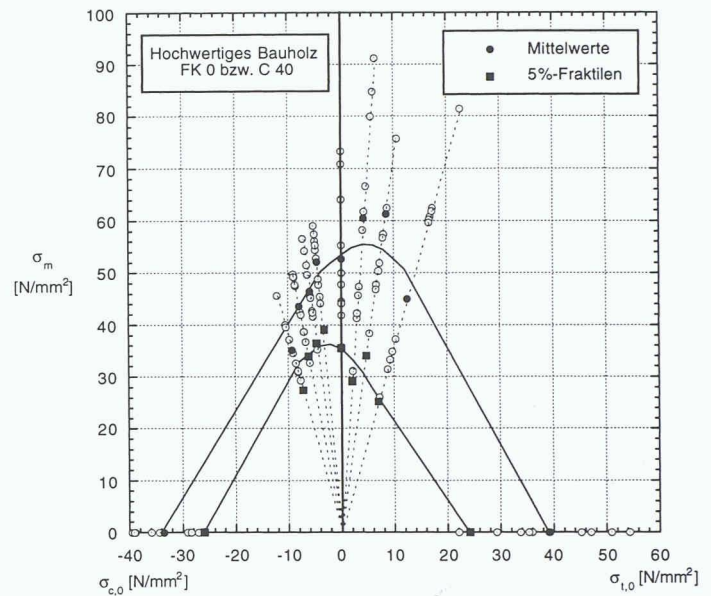
13 Biege-E-Moduli der Gruppen Normales und Hochwertiges Bauholz

Versuchsgruppe	Schallgeschwindigkeit [m/s] $v_{12min}$	Biege-E-Modul $E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]			
		Mittelwert	Standardabw.	Variation	5%-Fraktile
Normales Holz	5450-5850	11 100	1700	15,3%	8 300
Hochwertiges Holz	6050-6400	15 300	2100	13,7%	11 800



14

M/N-Interaktion Normales Bauholz: Versuchswerte mit 5%- und 50%-Fraktile



15

M/N-Interaktion Hochwertiges Bauholz: Versuchswerte mit 5%- und 50%-Fraktile

teilung in jeder 10er-Gruppe der Verteilung der gesamten Hauptgruppe entsprach, konnte man davon ausgehen, dass die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften in sämtlichen 10er-Gruppen ähnlich verteilt waren.

**Effektivität der Ultraschallsortierung**

Die Effektivität der Ultraschallsortierung kann anhand der bei der mechanischen Prüfung ermittelten Biege-E-Moduli beurteilt werden. Die in Bild 13 aufgelisteten statistischen Kennwerte zeigen, dass sich durch die Ultraschallsortierung eine deutliche Trennung zwischen den Versuchsgruppen realisieren liess.

Aufgrund der resultierenden Fraktilewerte kann man das Versuchsmaterial gemäss SIA 164 und gemäss Euronorm EN 338 wie folgt klassieren [15] (Mit FK 0 wird eine bis anhin durch die Norm SIA 164 nicht vorgesehene Festigkeitsklasse zur Einstufung von Holz mit besseren Eigenschaften als FK I bezeichnet.):

	EN 338	SIA 164
Norm. Bauholz	C24 bis C 27	FK II
Hochw. Bauholz	C40	FK 0

Die Ultraschallgeschwindigkeit gewinnt dank Zerstörungsfreiheit und geringem versuchstechnischem Aufwand als Masszahl für die mechanischen Holzeigenschaften in der Holzforschung zunehmend an Bedeutung. Sie hat eine ebenso grosse Aussagekraft wie die klassischen Kennwerte «Darrdichte» und «Holzfeuchte».

Neben der hier beschriebenen Anwendung zur deutlichen Trennung von Stichproben kann es auch vorkommen, dass man bewusst einheitliche Stichproben erzeugen will. Die Anwendung der Ultraschallsortierung führt in diesem Fall zu einer Verringerung der Streuung der Versuchsergebnisse und damit zu einem deutlich kleineren Versuchsaufwand.

**Einfluss der Holzqualität auf das Tragverhalten bei M/N-Interaktion**

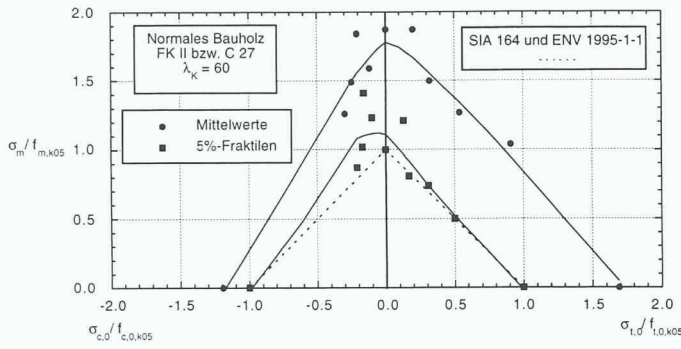
Die Holzqualität, repräsentiert durch die Festigkeitsklasse, hat je nach Verhältnis der angreifenden Kräfte einen mittleren bis grossen Einfluss auf das generelle Tragverhalten bei M/N-Interaktion. Bilder 14 und 15 zeigen die Versuchsergebnisse (Bruchspannungen  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{c,0}$ ,  $\sigma_{c,0}$ ) in Form von Interaktionsdiagrammen. Dabei wird von unvergrösserten Momenten 1. Ordnung ausgegangen. Im Biege-Zug-Quadranten des Interaktionsdiagramms bestehen sowohl auf dem Mittelwert- als auch auf dem 5%-Niveau deutliche Unterschiede zwischen der Klasse C 27 und der Klasse C 40. Im Bereich der Druckelemente sind die Streuungen weitaus geringer. Bei reinem Druck kann gar kein Unterschied zwischen den C 27- und den C 40-Werten festgestellt werden. Dies könnte allerdings auch dadurch begründet sein, dass die Klassierung der Probekörper mittels Ultraschall und nicht gemäss der Dichte erfolgte.

Aufgrund der Schlankheit der Probekörper von  $\lambda_K = 60$  (bzw.  $\lambda_{rel} = 1,0$ ) muss man im Druckbereich von einem Stabi-

litäts- und nicht von einem Festigkeitsversagen ausgehen. Da die Versuche verformungsgesteuert durchgeführt wurden, waren vor allem bei den praktisch strukturstörungsfreien Probekörpern der Klasse C 40 trotzdem deutliche Stauchungen der Druckzone erkennbar.

**M/N-Interaktion in den Normen SIA 164 und ENV 1995-1-1**

Zur Beurteilung der Bemessungsansätze der Norm SIA 164 und der ENV 1995-1-1 werden dieselben, zusammen mit den Versuchsergebnissen (repräsentiert durch 5%-Fraktile- und Mittelwerte), in Interaktionsdiagrammen mit dimensionslosen Achsen dargestellt. Man kann diese Diagramme für verschiedene Querschnittsmasse verwenden. Allerdings gelten sie nur für die zur Normierung verwendeten Verhältnisse von Biege-, Zug- und Druckfestigkeit. Die Grundlage zur Normierung der Achsen in den Bildern 16 und 17 bilden die Festigkeitskennwerte des Versuchsmaterials. Die 5%-Fraktilewerte der Biegefestigkeit  $f_{m,k05}$ , der Zugfestigkeit  $f_{t,0,k05}$  und der Druckfestigkeit  $f_{c,0,k05}$  wurden unter Annahme einer unendlich grossen Stichprobe mittels einer Log-Normalverteilung berechnet. Die Probekörper weisen eine Schlankheit von  $\lambda_K = 60$ , bzw. eine bezogene Schlankheit von  $\lambda_{rel} = 1,0$  auf. Stabilitätsversagen ist daher zu erwarten und entsprechend sind die (linearen) Bemessungsmodelle der Norm SIA 164 und der ENV 1995-1-1 in die Bilder 16 und 17 eingetragen. Letztere lassen folgende Schlüsse zu:



16

M/N-Interaktion Normales Bauholz: Versuchswerte und Normansätze

Die Form des Interaktionsdiagramms ist offensichtlich abhängig von der Festigkeit des Holzes. Der Scheitelpunkt der Kurve verschiebt sich mit besser werdender Materialqualität mehr und mehr in den Biege-Zug-Quadranten. Dieses Phänomen ist deutlich auf dem Mittelwertniveau erkennbar und steht in Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen von Buchanan [12]. Die Ursache liegt in der durch die Sortierung erreichten geringeren Streuung der Festigkeiten im (Biege-) Zugbereich.

Die Annahme eines linearen Modells in der Biege-Zugzone erscheint sowohl für Holz der Klasse C 40 als auch für Normales Bauholz als gerechtfertigt. Einzelne 5%-Fraktile liegen allerdings auf der unsicheren Seite. Ursache dafür sind die relativ grossen Streuungen, die zu einer starken Reduktion des 5%-Werts führen.

Im Biege-Druckbereich weichen die Versuchswerte sowohl auf dem Mittelwert- als auch auf dem Niveau der 5%-Fraktile global gesehen nur geringfügig von einem linearen Verlauf ab. Im Bereich grosser Biegemomente und kleiner Druckkräfte liegen die 5%-Fraktile der Versuchsergebnisse trotz der Schlankheit von 60 deut-

lich ausserhalb des durch ein lineares Modell abgedeckten Bereichs, was auch bei den Versuchen von Buchanan [10] der Fall war (Bild 6).

**Betrachtungen zum Einfluss 2. Ordnung**

Die Vergrößerung des Biegemoments durch die exzentrisch angreifende Normalkraft wird in der Stabilitätstheorie üblicherweise als Einfluss 2. Ordnung bezeichnet. Die exakte Lösung der Differentialgleichung des Knickstabs führt zu einer geometrischen Reihe und zur Beziehung (6) für den Vergrößerungsfaktor. Versuche [12] zeigen allerdings, dass die Momentenvergrößerung infolge der Stauungen in der Druckzone bedeutend grösser werden kann, als man dies durch den erwähnten Faktor abschätzt. In [12] wird daher ein empirischer Ansatz für den Vergrößerungsfaktor angegeben, der Resultate auf der sicheren Seite liefert. Gemäss diesem Vorschlag wäre Formel (7) anstelle von (6) zu verwenden. Timoshenko zeigt in [18], dass man für querbelastete Zugstäbe analog zum Vergrößerungsfaktor bei Knickproblemen einen

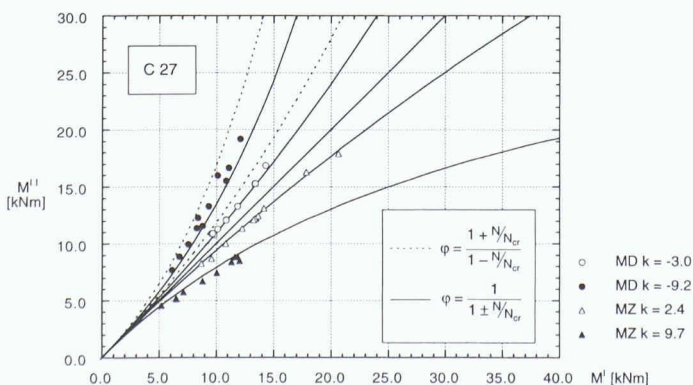
Momentenverkleinerungsfaktor (Beziehung (8)) ansetzen kann.

$$\varphi = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \tag{6}$$

$$\varphi = \frac{1 + \frac{N}{N_{cr}}}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \tag{7}$$

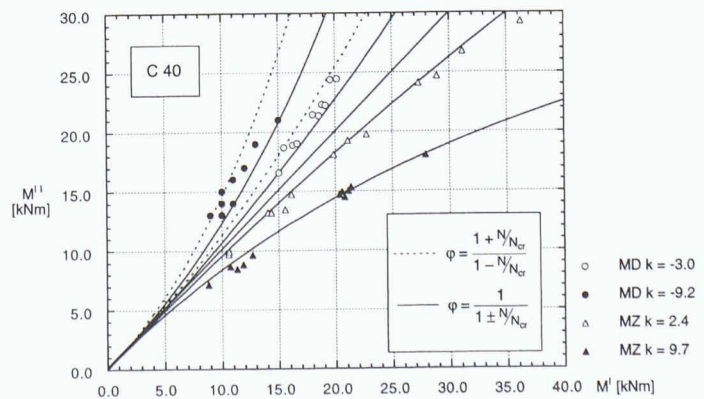
$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{N}{N_{cr}}} \tag{8}$$

In den Bildern 18 (Klasse C 27) und 19 (Klasse C 40) sind die Momente 1. und 2. Ordnung zusammen mit den Ansätzen (6) bzw. (8) und (7) dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, wurden jeweils nur zwei Versuchsreihen pro M/N-Quadrant mit unterschiedlichem Verhältnis k zwischen Normal- und Biegekraft (siehe Bild 11) erfasst. Bei der Berechnung der Euler-Last  $N_{cr}$  gemäss Beziehung (9) ging man zunächst von den E-Modul-Mittelwerten aus. Im unelastischen Knickbereich darf man anstelle des E-Moduls auch



18

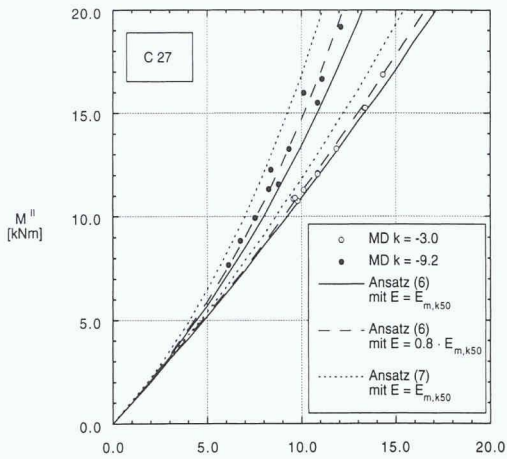
Einfluss zweiter Ordnung für die Klasse C 27



19

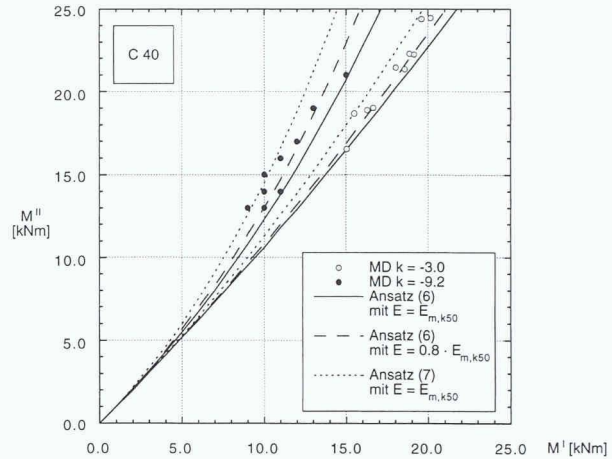
Einfluss zweiter Ordnung für die Klasse C 40





20

Versuchswerte (C 27) und verschiedene Ansätze für den Vergrößerungsfaktor



21

Versuchswerte (C 40) und verschiedene Ansätze für den Vergrößerungsfaktor

den Tangentenmodul  $T$ , gegeben durch die für die Norm SIA 164 gültige Beziehung (10) verwenden [19]. Im vorliegenden Fall ergibt sich bei einer Knicklänge von 2760 mm für den Querschnitt 8/16 ein Tangentenmodul von  $T = 0,76 \cdot E \approx 0,8 \cdot E$ .

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_K^2} \quad (9)$$

$$T = E \cdot \frac{\kappa_K \cdot \lambda_K^2}{3100} \quad (10)$$

In [19] wird vorgeschlagen, den E-Modul bei Knickbemessungen auf 80% des Mittelwerts abzumindern, um den aus Kriechverformungen resultierenden Steifigkeitsabfall zu erfassen. Bilder 20 und 21 zeigen die Ansätze (6) und (7) für den Vergrößerungsfaktor zusammen mit den Versuchsergebnissen. Dabei wurde bei der Berechnung der Euler-Last  $N_{cr}$  im Ansatz (7) der Mittelwert aus den Versuchsergebnissen  $E_{m,k50}$  eingesetzt. Der Ansatz (6) wurde mit  $E = E_{m,k50}$  und mit  $E = 0,8 \cdot E_{m,k50}$  ausgewertet.

## Folgerungen

Die Bemessung von gleichzeitig durch ein Biegemoment und durch eine Zugkraft beanspruchten Kanthölzern kann mittels einer linearen Überlagerung der entsprechenden Spannungsanteile erfolgen. Da das Bruchverhalten in diesen Fällen spröde ist, muss man die Abhängigkeit der Festigkeit vom Volumen berücksichtigen. Die Verringerung des Biegemoments durch die Normalkraft kann mittels des Faktors (8) erfasst werden.

## Literatur

- [1] SIA: Norm 164: Holzbau (1981/1992), Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1992
- [2] Gebri E., Fontana M., Gemperle C., Colombo P.: Holzbautabellen 1, Lignum, Zürich, 2. Auflage 1991
- [3] SIA: ENV 1995-1-1: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten (1993), Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1994
- [4] Zakic B.D.: Inelastic Bending of Wood Beams, ASCE Journal of the Structural Division Vol. 99, p. 2079-2095, 1973
- [5] Schneider M.H., Phillips J.G.: Elasticity of wood and wood polymer composites in tension, compression and bending, Wood Science and Technology Vol. 25, p. 361-364, 1991
- [6] Beer F.P., Johnston E.R.: Mechanics of Materials, SI Metric Edition, Mc Graw-Hill Ryerson Ltd., Toronto 1992
- [7] Kollmann F.P., Côté W.A.: Principles of Wood Science and Technology 1, Solid Wood, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York, 1975
- [8] Senft J.F., Suddarth S.K.: Strength of Structural Lumber under Combined Bending and Tension Loading, Forest Products Journal Vol. 20, p. 17-21, 1970
- [9] Senft J.F.: Further Studies in Combined Bending and Tension Strength of Structural 2 by 4 Lumber, Forest Products Journal Vol. 23, p. 36-41, 1973
- [10] Buchanan A.H.: Combined Bending and Axial Loading in Lumber, ASCE Journal of Structural Engineering Vol. 112, p. 2592-2609, 1984
- [11] Buchanan A.H., Johns K.C., Madsen B.: Column Design Methods for Timber Engineering, Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 12, p. 731-744, 1985
- [12] Buchanan A.H., Johns K.C., Madsen B.: Column Design Methods for Timber Engineering, CIB-W18A-Paper 18-2-1, Meeting 18, Beit Oren, Israel, June 1985
- [13] Johns K.J., Buchanan A.H.: Strength of Timber Members in combined Bending and Axial Loading, Proceedings of the IUFRO Timber Engineering Group Meeting, Sweden, paper 24, 1982
- [14] Blass H.J.: Traglastberechnung von Druckstäben aus Brettschichtholz, Bauingenieur Nr. 63, S. 245-251, 1988
- [15] Steiger R.: Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung - Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall, Forschungsbericht Nr. 204, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich 1996, Birkhäuser Verlag, Basel 1996
- [16] Steiger R., Gebri E., Arm H.P.: Einspannvorrichtung für Zugversuche an Holzproben grösseren Querschnitts, Forschungsbericht Nr. 204, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich 1994, Birkhäuser Verlag, Basel 1994
- [17] Steiger R.: Biege-, Zug-, und Druckversuche an Schweizer Fichtenholz, Forschungsbericht Nr. 207, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich 1995, Birkhäuser Verlag, Basel 1995
- [18] Timoshenko S., Lessels I.M.: Festigkeitslehre, Springer Verlag, Berlin 1928
- [19] Dubas P., Gebri E., Steurer A.: Einführung in die Norm SIA 164 (1981) Holzbau, Publikation Nr. 81-1, Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich 1981 (vergriffen)

Die Erfassung der Interaktion zwischen einem Biegemoment und einer Druckkraft hat sich nach der Schlankheit des zu bemessenden Elementes zu richten:

Bei schlanken Stäben tritt Stabilitätsversagen ein. Da eine exakt zentrische Belastung in der Praxis nicht vorkommt, sind solche Probleme stets unter Berücksichtigung der Normalkraft und eines Biegemoments zu betrachten. Die Überlagerung der Spannungsanteile erfolgt linear. Bei der Bestimmung des Normalkraftanteils ist dem vorzeitigen Knickversagen des Stabs durch Reduktion der Bemessungs-Normalspannung Rechnung zu tragen. Während der elastische Ansatz (8) im Biege-Zugbereich verlässliche Annahmen für den Einfluss 2. Ordnung liefert, unterschätzt man mit dem analogen Ansatz (6) im Druckbereich diesen Effekt, sofern man für den E-Modul einen Mittelwert einsetzt. Auf der sicheren Seite liegende Resultate für die Momentenvergrößerung infolge von Druckkräften erhält man durch Verwendung des empirischen Ansatzes (7) [12]. Die Reduktion des E-Moduls auf 80%

des Mittelwerts oder der Ersatz des E-Moduls durch den Tangentenmodul gemäss Formel (10) bei der Berechnung des Vergrößerungsfaktors 2. Ordnung nach Ansatz (6) führt ebenfalls zu einer guten Übereinstimmung der Bemessungskurve mit dem mittleren Verlauf der Versuchsergebnisse.

Die in der Norm SIA 164 praktizierte Annahme eines von der Festigkeitsklasse unabhängigen, vorsichtig geschätzten mittleren E-Moduls genügt bei visueller Sortierung des Holzes. Die optimierte Holznutzung verlangt den Einsatz maschineller Sortiermethoden und die Angabe von nach Festigkeitsklassen differenzierten Kennwerten der mechanischen Eigenschaften, wobei nicht nur die Festigkeiten variieren sondern auch die Verformungsmasse. Während bei der Berechnung von Durchbiegungen ein E-Modul-Mittelwert genügt, muss zur Abschätzung des Ein-

flusses zweiter Ordnung ein reduzierter E-Modul (z. B. 5%-Fraktilwert) angesetzt werden.

Bei der Bemessung von gedrunenen Stäben auf Druck mit Biegung stellt sich ein reines Festigkeitsproblem. Versuche haben gezeigt, dass sich im Bereich von grossen Biegemomenten und kleinen Druckkräften grössere Abweichungen von einer linearen Interaktion ergeben, indem die Interaktionskurven vom Ursprung her gesehen konvex verlaufen. Wirtschaftliche Bemessungsmodelle haben diese Ausbauchungen zu erfassen. Neben komplizierteren Ansätzen aus diversen Forschungsarbeiten bietet die ENV 1995-1-1 mit der Quadrierung des Normalkraftanteils in der Interaktionsformel einen adäquaten und einfach zu handhabenden Bemessungsansatz.

Adresse des Verfassers:

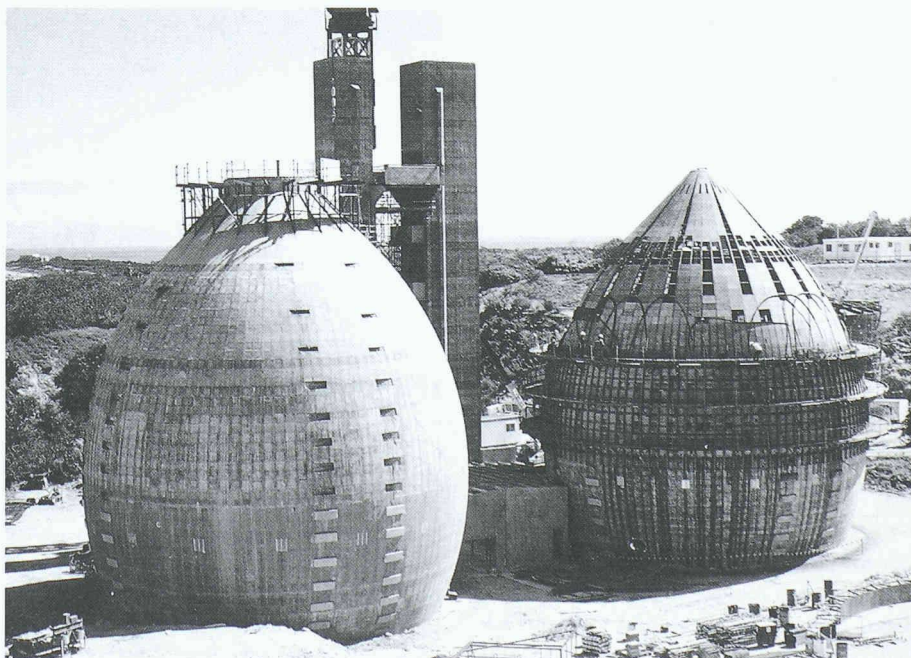
René Steiger, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH, Dobler, Schällibaum und Partner AG, Stationsstrasse 20, 8606 Greifensee

Peter Jäger, Basel

## Faulbehälter für Australien

**Zurzeit wird in Perth (Australien) die erste Kläranlage mit eiförmigen vorgespannten Faulbehältern dem Betrieb übergeben. Das Verfahren stammt aus Deutschland, die Schalung aus Österreich und die Behälterstatik aus der Schweiz.**

Der westaustralische Wasserwirtschaftsverband hatte im Herbst 1994 in einer Generalunternehmer-Submission die Kläranlagenenergieausweitung ausgeschrieben und vier Konsortien zur Offertstellung eingeladen. Nicht die billigste Offerte, sondern die technisch überzeugendste Lösung erhielt letztlich den Zuschlag. Der Gewinner, ein lokaler Bauunternehmer, hatte im Vorfeld der Offerteingabe bereits mit einer deutschen Firma für Verfahrenstechnik und einer österreichischen Stahlbaufirma Kontakt aufgenommen. Da zwei Drittel der Kosten einer solchen Anlage in den Behälterbau fließen, war es notwendig, die Ausmasse der Armierung, der Vorspannung und des Betons auf 5% Genauigkeit zu kennen. Diese Aufgabe hatte ein Schweizer Ingenieurbüro bereits vor der Auftragserteilung im Rahmen einer Vorstudie gelöst.



### Statisches Konzept der Behälter

Die Behälterform war bei Auftragserteilung bereits vorgegeben. Verlässliche statische Vordimensionierungen der Fundamente und der Behälterschalen waren die Voraussetzung für eine termingerechte Herstellung und Lieferung der Scha-

lung, die in Österreich produziert und in Containern nach Perth verschifft wurde. Die beiden identischen Behälter von je 8000 m<sup>3</sup> Inhalt wurden gemäss der Resultate der Vorstudie allseitig vorgespannt. Die in der Schale angeordneten Kabel sind in Polyethylen-Hüllrohre eingelegt, die