

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizer Ingenieur und Architekt
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	101 (1983)
<b>Heft:</b>	6: Prof. Dr. Bruno Thürlimann zum 60. Geburtstag
<b>Artikel:</b>	Zur Berechnung und Bemessung von Fachwerkträgern mit Knotenplatten in eingeschlitzten Hölzern
<b>Autor:</b>	Gehri, Ernst
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-75063">https://doi.org/10.5169/seals-75063</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Der Vergleich mit der gemessenen Bruchlast  $q_u^*$  von 5,6 kN/m<sup>2</sup> zeigt die in der Rechnung vernachlässigte mittragende Wirkung der Betondruckzone. Aus diesem Vergleich kann die am Würfel gemessene Betonfestigkeit von 1,5 N/mm<sup>2</sup> näherungsweise bestätigt werden.

Bild 6 zeigt die Durchbiegung in der Mitte eines Versuchsbalkens in Abhängigkeit von der Belastung. Erwartungsgemäss liegen die gemessenen Durchbiegungen zwischen den Werten, die sich bei einer Berechnung nur mit dem Stahlquerschnitt und denen mit dem ungerissenen Stahlbetonquerschnitt ergeben. Dabei ist für den verwendeten Beton ein E-Modul von 5000 N/mm<sup>2</sup> angenommen worden.

Dank der optimalen Verteilung der Bewehrung und der starken Verbügelung

durch die herausgestanzten Brücken sind bis zur Bruchlast nur geringe Rissweiten beobachtet worden. Die verwendete räumliche Netzbewehrung hat auch auf den Gebrauchszustand einen sehr günstigen Einfluss.

### Schlussfolgerung

Die Versuche zeigen, dass dank der räumlichen Netzbewehrung tragende Elemente möglich werden mit Füllstoffen, die selbständig keine grosse Tragkapazität haben. Damit gelingt es, einen Verbundstoff zu schaffen, der beste Isolationseigenschaften und zudem eine grosse Tragfähigkeit besitzt. Dank dem geringen Eigengewicht können grosse Spannweiten überbrückt werden.

Für die Bemessung wird nur der Stahlquerschnitt berücksichtigt. Die spezifi-

sche Haftung des verzinkten Stahlbleches ist ausserordentlich gut. Bei mehrlagiger Blechbewehrung oder sehr starken Blechen muss allenfalls eine zusätzliche Verankerung z. B. mittels Stahlnägeln vorgesehen werden.

Die Kombination von räumlichen Bewehrungsnetzen mit Superleichtbeton oder anderen Isolierstoffen hat sich bewährt und wird in Zukunft noch viele neue Anwendungsgebiete ermöglichen. Bilder 7 und 8 zeigen ausgeführte Bauten als Beispiele für das beschriebene Bauverfahren.

Adressen der Verfasser: H.B. Fehlmann, dipl. Ing. ETH, Ingenieurbüro, Seestr. 140, 8700 Küsnacht, Abschnitt: «Tragende Plattenelemente mit geringem Eigengewicht und bester Wärmeisolation»; Dr. M. Grenacher, dipl. Ing. ETH, Ingenieurbüro, Fröhlichstr. 29, 5200 Brugg, Abschnitt: «Tragerverhalten der räumlich bewehrten Platten».

## Zur Berechnung und Bemessung von Fachwerkträgern mit Knotenplatten in eingeschlitzten Hölzern

Von Ernst Gehri, Zürich

Durch Aufgliederung des Querschnittes zu einem Fachwerkträger lässt sich der Baustoff Holz im Vergleich zum Vollquerschnitt, insbesondere für Biegeträger, besser nutzen. Das Holz wird dabei vorwiegend auf Zug und Druck parallel zur Faser beansprucht, so dass die Vorzüge des Baustoffes sowohl festigkeits- als auch steifigkeitsmässig voll zum Tragen kommen und dadurch ein wirtschaftlicher Einsatz möglich wird. Entscheidend ist allerdings die Verwendung leistungsfähiger Knotensysteme, wie sie u.a. in [1] dargestellt wurden.

Einige besondere Probleme der Berechnung und Bemessung von Fachwerkträgern wurden im Rahmen des Fortbildungskurses zur Einführung in die Holzbaunorm [2] behandelt. An der Professur für Baustatik und Stahlbau der ETH Zürich (Prof. Dr. P. Dubas) durchgeführte experimentelle und theoretische Untersuchungen konnten dabei z.T. bereits einbezogen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind kürzlich als Institutsbericht erschienen [3].

Für Fachwerkträger wurde bisher ausschliesslich Nadelholz verwendet, wobei für kleinere Abmessungen vorzugsweise Schnittholz und für grössere Abmessungen bzw. wo besseres Aussehen

und Formbeständigkeit erwünscht werden, Brettschichtholz eingesetzt wird. Angestrebgt wird aber auch, besonders für starker beanspruchte Fachwerke, die Verwendung von *Brettschichtholz aus Buche* [4].

### Tragwerksformen

Typische Tragwerksformen für Fachwerkträger sind in Bild 1 dargestellt. Grosse Diagonal- oder Strebekräfte bedeuten stärker dimensionierte Stäbe sowie entsprechend höher belastete Knotenpunkte.

Bei der Dreiecksform bilden die Gurtungen das Haupttragsystem, während die Diagonalen oder Füllungsglieder eine sekundäre Funktion (zur Ableitung der direkt auf den Gurt wirkenden Lasten) ausüben (Bild 2).

Beim parallelgurtigen Fachwerkträger haben Gurtungen und Diagonalen eine gleichwertige Funktion. Die Anschlüsse und somit auch die Knoten werden entsprechend hoch belastet. Nur bei Verwendung leistungsfähiger Knotensysteme sind bei einer derartigen Trägerform wirtschaftliche Lösungen zu erwarten.

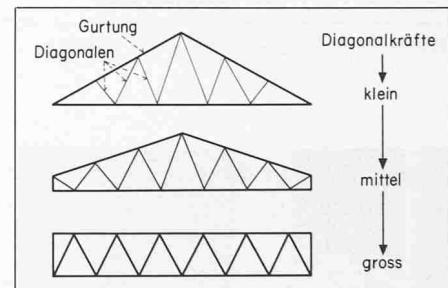


Bild 1. Häufig vorkommende Trägerformen für Dachtragwerke

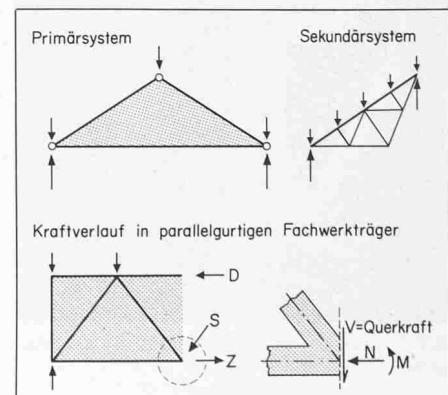


Bild 2. Beeinflussung der Tragwirkung durch die Trägerform

### Betrachtungen an einem parallelgurtigen Fachwerkträger

#### Allgemeines

Die in [3] beschriebenen Untersuchungen beschränkten sich auf parallelgurtige Fachwerkträger; die Ergebnisse sind jedoch im wesentlichen übertragbar auf

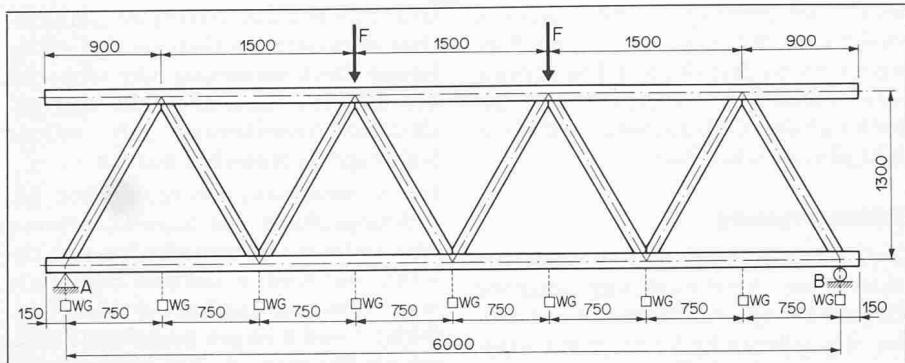


Bild 3. System, generelle Abmessungen und Krafeinleitung der untersuchten Träger

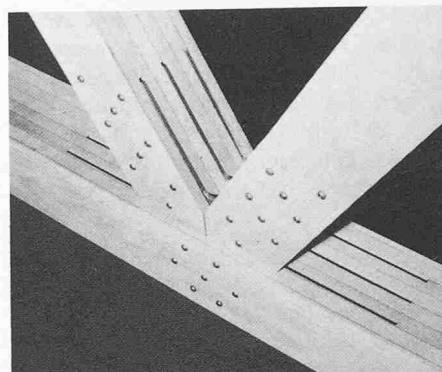


Bild 4. Typische Knotenausbildung

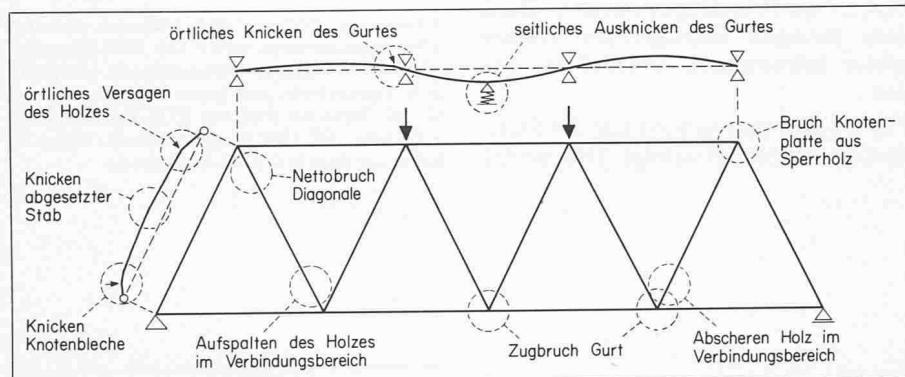


Bild 5. Im Versuch festgestellte Versagensarten

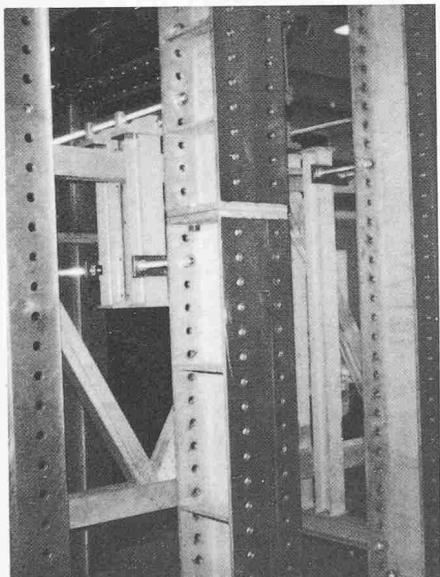


Bild 6. Zusätzliche mittlere Abstützung des Obergurtes

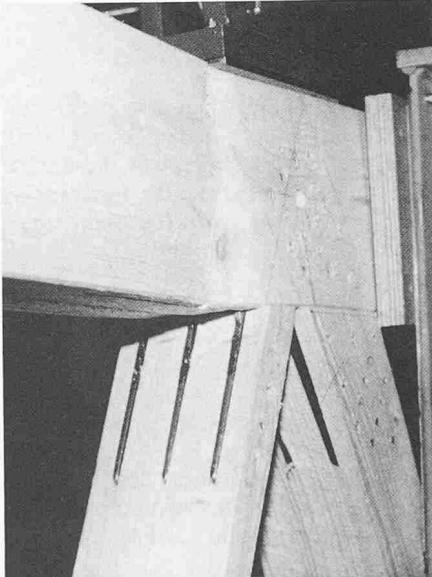


Bild 7. Örtliches Knicken des Druckgurtes im geschlitzten Knotenbereich



Bild 8. Bruch im Zuggurt aus Schnittholz

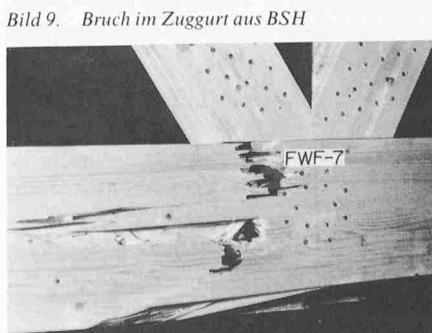


Bild 9. Bruch im Zuggurt aus BSH

andere Fachwerkformen. Entscheidend für die Wahl dieser Fachwerkform (Bild 3) war die sich in den Knoten ergebende hohe Beanspruchung.

Die Fachwerkträger wiesen durchlaufende Gurtungen auf (Normalfall in der Praxis). Die Stäbe waren gerade und praktisch zentrisch angeschlossen, wobei die Verbindung über Knotenplatten erfolgte (Bild 4). Die Lasten wurden nur in den Knoten eingeleitet.

Die Untersuchung umfasste 18 Fachwerkträger mit den gleichen Systemabmessungen, wobei jedoch sowohl die Stab- als auch die Knotenausbildung variiert wurden.

#### Stabausbildung:

- Brettschichtholz aus Buche
- Brettschichtholz aus Fichte
- Schnittholz aus Fichte

#### Knotenausbildung:

- Stahlbleche - mit Stahlstiften
- BSB-Knoten - bzw. Passbolzen
- Greim-Knoten - mit Nägeln
- Furnierplatte - mit Hartholzstiften

Der grosse Umfang an Versuchsträgern und die unterschiedliche Ausbildung der Stabquerschnitte und der Knoten führten zu einer Vielfalt von Versagensarten. Dadurch gelang es, mit weiteren ergänzenden Untersuchungen ein umfassendes Bild über das Tragverhalten von Fachwerkträgern zu bekommen.

Die gewählte Ausbildung mit parallelen Gurtungen und die Belastungsanordnung (große Diagonalkräfte = hohe Querkräfte) ergeben extrem hohe Knotenbeanspruchungen. Ähnliche Fälle treten jedoch in der Praxis auf.

#### Versagensarten

Versuchsmässig haben sich fast alle denkbaren Versagensarten eingestellt. Schematisch ist dies in Bild 5 zusammengestellt. Nachstehend werden die einzelnen Brucharten dargestellt.

#### Gurtungen auf Druck

- Gesamtstabilität: Seitliches Ausknicken des Gurtes bei einem Fachwerk-

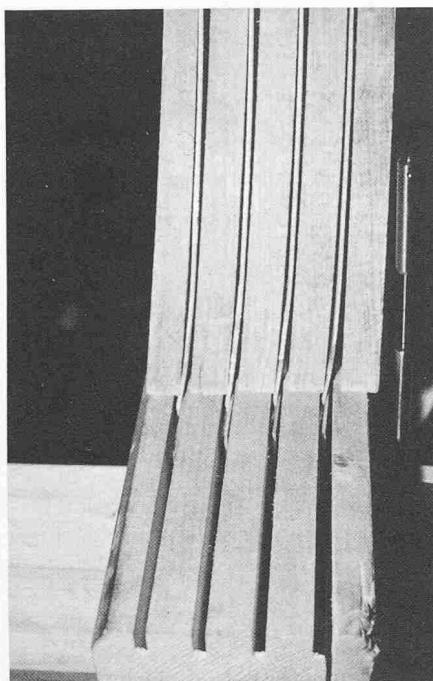


Bild 10. Ausknicken bei zweiteiligen Knotenblechen (Blumer Original)



Bild 11. Ausknicken bei dünnen Knotenblechen (Greim)

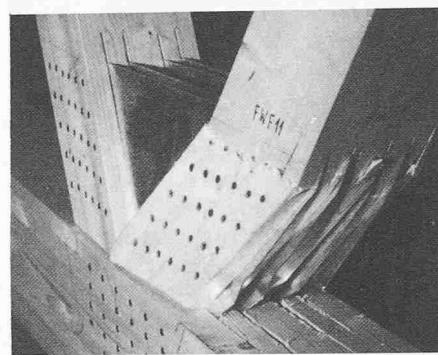


Bild 12. Versagen der Druckdiagonalen im geschwächten Anschlussbereich

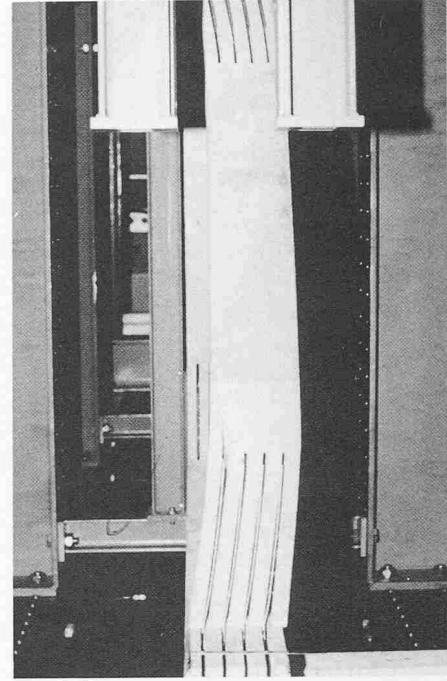


Bild 13. Knickfigur des abgesetzten Druckstabes

träger aus Buchenholz wegen ungenügender Breite des Gurtes; durch eine zusätzliche Zwischenabstützung konnte der Tragwiderstand erhöht werden (Bild 6).

- **Örtliches Knicken:** Infolge besonders breiter Schlitte im Knotenbereich und des Zusammentreffens mit einem grösseren Ast (noch innerhalb der Sortierkriterien) trat ein Versagen des Druckgurtes durch örtliches Knicken ein (Bild 7).

#### Gurtungen auf Zug

Durch das Einschlitzen der Gurtungen im Knotenbereich und durch die Bohrungen für die Verbindungsmitte wird der Gurtquerschnitt örtlich um 10 bis 20% vermindert. Die effektive Vermindeung des Tragwiderstandes ist jedoch, bedingt durch die Kerbwirkung und durch örtliche Strukturstörungen im Holz (Äste, Schrägfaserigkeit), wesentlich höher. Demzufolge ist der Abfall im allgemeinen bei Schnittholz grösser als bei Brettschichtholz (Bilder 8 und 9).

#### Diagonalen auf Druck

- **Knicken der Knotenbleche:** Infolge exzentrischer Anordnung der zweiteiligen Knotenbleche (Blumer Original) und/oder zu dünner Knotenbleche (Greim-Bauweise) trat ein frühzeitiges Ausknicken der Knotenbleche ein (Bilder 10 und 11).

- **Örtliches Versagen des Holzes:** Durch die Schlitte ergibt sich neben einer geringeren Querschnittsverminde rung eine grössere Abminderung der Biegesteifigkeit und des Biegewider-



Bild 14. Bruch der Zugdiagonalen ausgehend von einem Ast im Anschlussbereich

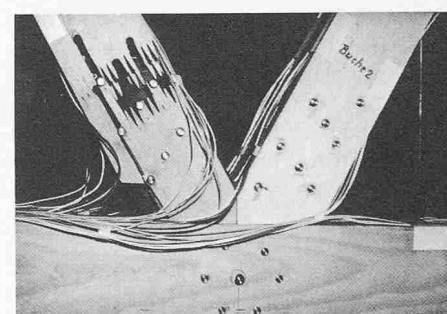


Bild 15. Bruch durch Nettoquerschnitt in einem Diagonalstab aus Buchen-BSH; beachte zufälliges Zusammentreffen zweier Keilzinkungen mit Nettoquerschnitt

standes; dadurch wird der Tragwiderstand der Druckdiagonalen vermin dert (vgl. Bild 12).

- **Knicken des abgesetzten Druckstabes:** Durch die Schlitte werden – insbesondere bei langen Schlitten und geringem Schlitzabstand – die Biegesteifigkeit und der Biegewiderstand stark vermindert, so dass dieser Steifigkeitsabfall bei der Bestimmung der Knicklast berücksichtigt werden muss; die sich dabei einstellende Knickfigur ist in Bild 13 dargestellt.

#### Diagonalen auf Zug

- **Versagen des Holzteils im geschwächten Anschlussquerschnitt:** Infolge der Querschnittsverminderung (Schlitze und Bohrungen), der daraus resultierenden Kerbwirkung kumuliert mit allfälligen Strukturstörungen oder Keilzinkungen (bei BSH-Querschnitten), tritt eine wesentliche Verminde rung des Tragwiderstandes ein; Bil-

der 14 und 15 zeigen zwei Bruchformen.

- **Versagen des Verbindungs mittels:** In der Regel tritt kein eigentlicher Bruch des Verbindungs mittels, sondern ein Versagen des Holzes auf Lochleibung und Ausscheren ein, wobei durch frühzeitige Verformung des Verbindungs mittels dieser Vorgang noch beschleunigt wird. Bei Verbindungen mit Nadelholz zeigte sich meist ein Aufspalten (Bild 16), bedingt durch die geringe Querzugfestigkeit des Nadelholzes. Bei der Buche konnten sich dagegen Scher brüche einstellen (Bild 17).

#### Knotenplatten

- **Knotenplatten aus Stahl:** Deren Be messung auf Zug und Schub und die Abstimmung der Wanddicke auf die verwendeten Verbindungs mittel (Lochleibung) bereitet im allgemeinen keine Mühe. Von Bedeutung ist

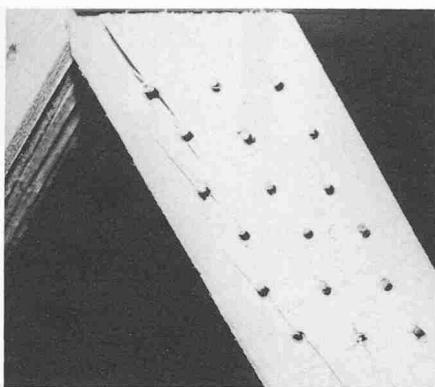


Bild 16. Aufspalten der Holzteile bei Nadelholz

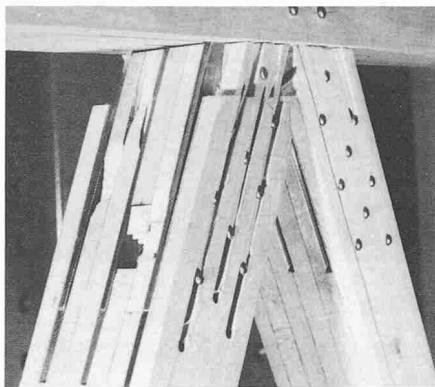


Bild 17. Bruch im Zuganschluss aus Buchen-BSH durch Abscheren des Holzes

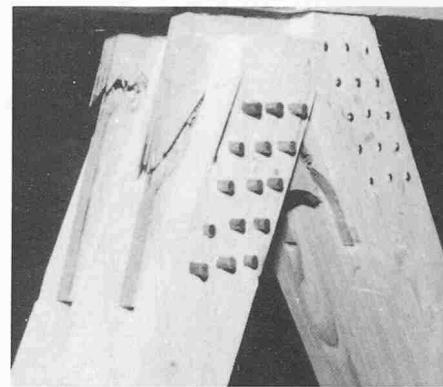


Bild 18. Bruch einer Knotenplatte aus Sperrholz (Verbindungsmitte = Hartholzstifte)

die Gewährleistung einer genügenden Tragfähigkeit auf Druck (örtliches Knicken bzw. Ausbilden eines Fliessgelenkes im ungestützten Knotenbereich beim Übergang Diagonale/Gurtung), wobei die Erfassung der effektiven Randbedingungen nur über Versuche möglich ist.

- **Knotenplatten aus Sperrholz:** Durch Orientierung der Achsen der Furnierplatte entsprechend den Richtungen höchster Beanspruchung können diese optimal genutzt werden, wobei infolge der bedeutenden Kerbwirkung der Bolzenlöcher mit auf rund zwei Drittel reduzierten Festigkeiten zu rechnen ist. In der Regel tritt ein kombinierter Zug-Scher-Bruch ein (Bild 18).

#### Bedeutung des Knotensystems

Die Versuche zeigten deutlich den Einfluss der Knotenausbildung auf die Leistungsfähigkeit des Tragwerkes. Als ungünstig erwiesen sich u.a. dünne Knotenbleche und überlappte, zweiteilige Knotenbleche. Die Verwendung dicker, einteiliger Knotenbleche entschärft wohl das Problem, führt aber nicht automatisch zu höherer Leistungsfähigkeit. Bei Verwendung von *Knotenplatten* in eingeschlitzten Hölzern muss folgendes beachtet werden:

- Dickere Knotenplatten führen zu

einer weiteren unerwünschten Querschnittsverminderung,

- ein zu enger Abstand zwischen den Knotenplatten (dadurch dünner Stife bzw. Nägel möglich) führt zu einer Verminderung der Biegesteifigkeit der geschlitzten Stabenden,
- lange Anschlüsse verlangen ebenso lange Schlitze, die wiederum zu einer Reduktion des Knickwiderstandes führen.

Höchste Leistungsfähigkeit verlangt somit eine optimale Abstimmung von Länge, Abstand und Weite der Schlitze, wobei diese ihrerseits von Stift- bzw. Nageldurchmesser, Abstand der Verbindungsmittel (unterschiedlich ob mit oder ohne Vorbohrung) sowie von den mechanischen Eigenschaften des Verbindungsmittels und der Knotenplatte abhängig sind. Dabei ist zu beachten, dass diesen Parametern bezüglich Zug und bezüglich Druck (Knicken) andere Gewichtung zukommt. Generell führen kompakte Anschlussformen zu höherer Leistungsfähigkeit.

Die Optimierung ist prinzipiell ohne Beachtung der absoluten Abmessungen (Bild 19) nicht möglich. Dies ist beim Vergleich von genormten Systemen zu beachten. Eine für die Abmessungen X optimale Auslegung kann für die Abmessung Z = 2X ungeeignet sein.

Eine systematische Untersuchung über

den Einfluss der Knotenausbildung – unter Berücksichtigung marktgängiger Systeme – auf die Leistungsfähigkeit der Fachwerkträger wurde bisher noch nicht durchgeführt. Für Knotenplatten in eingeschlitzten Hölzern gibt Bild 20 einen Einblick, wobei jedoch ein direkter Vergleich der Greim-Bauweise mit anderen Lösungen in diesem Fall (etwas andere Trägerausbildung und Lasteinleitung) nur beschränkt zulässig ist.

#### Bedeutung der Eigenschaften des Holzes

##### Nach Norm SIA 164

Die Holzeigenschaften haben eine entscheidende Bedeutung. Dabei ist zu differenzieren zwischen den *Holzarten* wie auch zwischen den *Festigkeitsklassen* innerhalb derselben Holzart. Die Norm SIA 164 legt die zulässigen Werte gemäss Tabelle 1 fest.

Generell bereitet die Anordnung ausreichender Verbindungsmittel in einem Anschluss die grösste Mühe; meist ist deshalb die *Versagensform «Verbindungsmittel»* massgebend. Da die Anzahl Verbindungsmittel nicht beliebig erhöht werden kann (geometrische Bedingungen), wird die Festigkeit des Holzes ungenügend ausgeschöpft.

Bei Verwendung von Nadelholz und massgebendem *Versagenskriterium*

Bild 19. Bedeutung des Massstabes auf die Anzahl Knotenbleche und Grösse der Verbindungsmittel

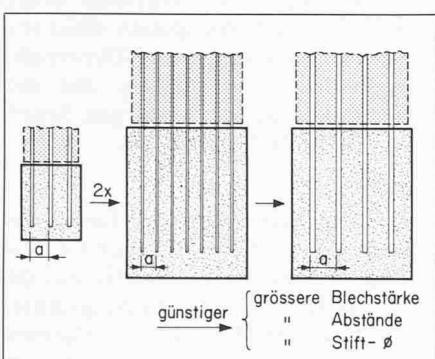
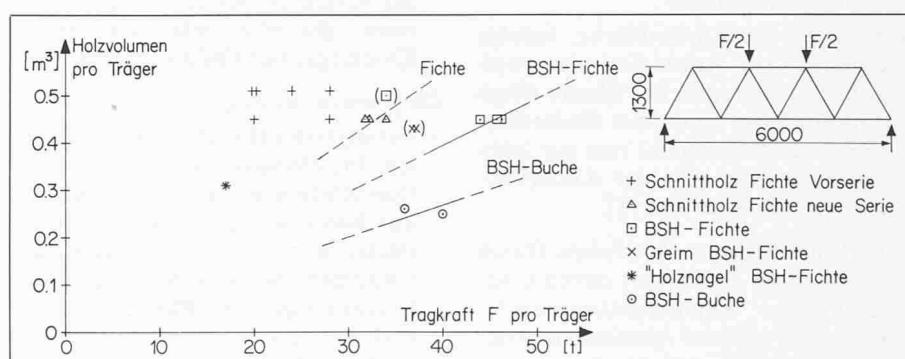


Bild 20. Tragkraft pro m³ Holzvolumen



«Verbindungsmittel» kann – gemäss Tabelle 1 – durch die Verwendung von Schnittholz FK I oder von BSH keine Steigerung der Tragfähigkeit erwartet werden. Einzig falls überdimensionierte Anschlüsse vorliegen, lassen sich bessere Holzeigenschaften nutzen.

#### Versuchsergebnisse

In Bild 20 sind die Ergebnisse der 18 Trägerversuche zusammengestellt, wobei als Parameter die Tragkraft, bezogen auf das eingesetzte Holzvolumen, benutzt wurde.

Die Überlegenheit des Buchenholzes gegenüber dem Nadelholz wird daraus klar ersichtlich. Zugleich bestätigt sich auch die innerhalb der Fichte höhere Leistungsfähigkeit des BSH gegenüber Schnittholz. Dies ist – zumindest aus der Sicht der Norm SIA 164 – nicht eindeutig, da die zulässige Belastung der Verbindungsmittel für Schnittholz und für BSH gleich angesetzt wird.

Geht man beim Nadelholz von den Grundwerten der zulässigen Spannungen aus, so ergibt sich von Schnittholz FK II auf BSH A eine Steigerung der zulässigen Normalspannungen auf  $11/8,5 = 1,29$ fache. Dies gilt für alle Versagensformen mit Ausnahme der Verbindungsmittel, bei denen eine Steigerung nur über mehr Verbindungsmittel möglich ist, was hier nicht der Fall war. Dennoch betrug die effektive Steigerung rund 40%! Eine Differenzierung der zulässigen Belastung des Verbindungsmittels unter Beachtung der Holzeigenschaften (z. B. Unterschied zwischen Schnittholz/BSH) ist somit angezeigt. Die Norm SIA 164 schliesst allerdings ein besseres Verhalten des BSH nicht aus, sie beschränkt sich jedoch auf die Festlegung der Werte für Schnittholz FK II.

Bei Verwendung von BSH aus Fichte oder Buche dürfte demnach der versuchsmässige Nachweis höherer Tragfähigkeit bezüglich «Verbindungsmittel» lohnend sein. Unter Umständen kann sich auch eine Differenzierung für den Zug- und Druckanschluss zweckmässig erweisen (Bild 21).

Die Norm SIA 164 nimmt hinsichtlich Tragfähigkeit den kleineren Wert des Zuganschlusses an. Für Druckanschlüsse ist deshalb auch eine Verminderung der Anzahl Verbindungsmittel denkbar.

#### Berechnungsmodell und Tragmodell

##### Allgemeine Betrachtungen

Berechnungsmodell, d. h. die Bestimmung der für die Bemessung massge-

Tabelle 1. Vergleich der zulässigen Werte

				Holzteile <sup>1</sup>		Verbindungsmittel
				$\sigma_{z\parallel} = \sigma_{d\parallel}$		
Fichte	Schnittholz	FK II		8,5 N/mm <sup>2</sup>	100%	100%
	Schnittholz	FK I		10 N/mm <sup>2</sup>	118%	100%
	BSH	B		10 N/mm <sup>2</sup>	118%	100%
	BSH	A		11 N/mm <sup>2</sup>	129%	100%
Buche	Schnittholz	FK II		8,5 N/mm <sup>2</sup>	100%	120%
	Schnittholz	FK I		10 N/mm <sup>2</sup>	118%	120%
	BSH	-			keine Angaben	keine Angaben

<sup>1</sup> sowie Nettoquerschnitte im Anschlussbereich

benden Kräfte, und Tragmodell, d. h. die einzuführenden Widerstandswerte, müssen auf den gleichen Voraussetzungen beruhen. Diese Forderung erscheint auf den ersten Blick trivial, wird aber – unwissentlich – häufig verletzt. Dies soll am Beispiel des *parallel-gurtigen Fachwerkträgers* aufgezeigt werden.

Der *Tragsicherheitsnachweis* kann eine der drei folgenden Formen annehmen:

- 1  $\gamma \cdot S \leq R$
- 2  $\gamma_S \cdot S \leq R/\gamma_R$  mit  $\gamma_S \cdot \gamma_R = \gamma$
- 3  $S \leq R/\gamma$

Hierin bedeuten:

- $S$  aus den Einwirkungen (z. B. Lastkombination aus Gebräuchslasten gemäss Norm SIA 160) resultierende Beanspruchung
- $\gamma_S$  Beanspruchungsfaktor (Lastfaktor)
- $R$  Grenzwiderstand des Bauteiles für den entsprechenden Beanspruchungszustand
- $\gamma_R$  Widerstandsfaktor

Betrachtet man die zweite Nachweiseform, so kann der Beanspruchungsfaktor (z. T. auch als Lastfaktor bezeichnet), der die Unsicherheiten auf Seite der Beanspruchungen abdecken soll, d. h. die Unsicherheiten bei der Annahme der am Tragwerk wirkenden Lasten sowie die vereinfachenden Voraussetzungen oder Ungenauigkeiten der Berechnung (statische Wirkungsweise des Systems), unterteilt werden in

$$\gamma_S = \gamma_L \cdot \gamma_{System}$$

wobei  $\gamma_L$  den eigentlichen Lastfaktor darstellt und  $\gamma_{System}$  zur Abdeckung von Unschärfen bei der Ermittlung von Beanspruchungen dient (vgl. Schneider [5], wo für  $\gamma_L = 1,25$  und  $\gamma_{System} = 1,1$  vorgeschlagen wird).

Werden nun die Schnittkräfte nur näherungsweise bestimmt bzw. nicht der statischen Wirkungsweise des Systems entsprechend, so kann dies allerdings nicht durch das  $\gamma_{System}$  erfasst, son-

dern muss durch ein entsprechendes Tragmodell abgedeckt werden.

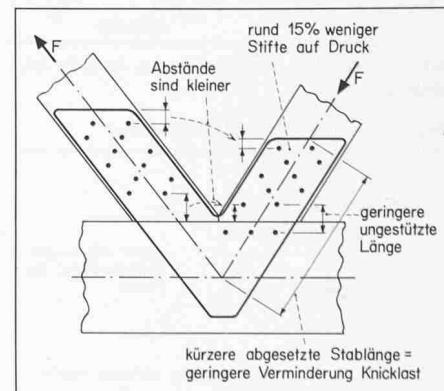
#### Näherungsverfahren für die Bemessung

Obwohl bei Fachwerkträgern aus Holz die Gurtungen im allgemeinen durchlaufend ausgebildet und die Stabschlüsse unterschiedlich biegesteif sind, können die Stabkräfte (Normalkräfte) unter der Annahme gelenkiger Knoten ermittelt werden. Die Annahme *Culmannscher Bedingungen* führt zu einfachen Berechnungen; sie führt aber auch zu geringeren nominellen Festigkeiten in den Stäben und in den Anschläüssen, da die Wirkung der Biegemomente vernachlässigt wird. Erfolgt die Auswertung von Trägerversuchen unter den gleichen Voraussetzungen, d. h. unter der Annahme, dass nur Normalkräfte in den Stäben auftreten, so erhält man ein *kohärentes Bemessungsverfahren*. Zu beachten ist einzig, dass die so erhaltenen Trag- und Widerstandsmodelle meist nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich besitzen (Extrapolation von Versuchsergebnissen!).

Die Norm SIA 164 ermöglicht unter gewissen Voraussetzungen (vgl. Art. 3 34 43) eine derartige Näherungsrechnung, beschränkt aber die nominellen Zug- und Druckbeanspruchungen in den Gurtungen auf zwei Drittel der sonst zulässigen Werte.

Bei den hier betrachteten Knotensystemen ergeben sich – bedingt durch die

Bild 21. Möglichkeit kompakterer Ausbildung auf Druck



hohe Anschlusssteifigkeit – kleinere Biegemomente in den Gurtungen. Zudem führt die geringere Nachgiebigkeit der Anschlüsse zu nicht mehr vernachlässigbaren Biegemomenten in den Diagonalstäben und deren Anschläßen.

Ausgehend von den Fachwerkversuchen wird in [3] folgendes Verfahren vorgeschlagen: In Fachwerken mit einheitlichen Stahlknotenplatten und zentrierten Anschläßen ist bei alleiniger Berücksichtigung der Normalkräfte (vereinfachte Berechnung der Stabkräfte mit gelenkigen Knoten nach Culmann) mit den Reduktionsfaktoren gemäss Tabelle 2 zu rechnen.

Für die Gurtungen kann die Reduktion der zulässigen Normalspannungen näherungsweise in Abhängigkeit des Verhältnisses Gurthöhe/Trägerhöhe festgelegt werden zu:

$$\eta_{Culmann} = 1 - \frac{7 \cdot h_{Gurt}}{4 \cdot h_{Träger}}$$

Anstelle der Reduktion der zulässigen Spannungen können auch die Stabkräfte mit dem Kehrwert von  $\eta_{Culmann}$  vergrössert werden (Benützung vorhandener Bemessungshilfen).

Tabelle 2. Reduktionsfaktoren zur Ermittlung der zulässigen, nominellen Normalspannungen für  $h_{Gurt}/h_{Träger} = 1/10$

$\eta_{Culmann}$	Fichte	Buche
Gurtungen	0,80 bis 0,85	0,80 bis 0,85
Diagonalen (inkl. Anschlüsse)	0,90	0,90 bis 0,95

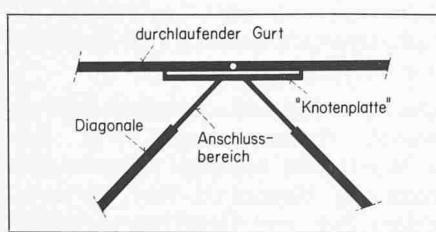


Bild 22. Schematische Modellbildung für einen Knoten

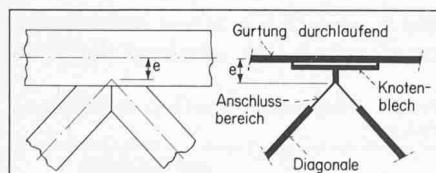
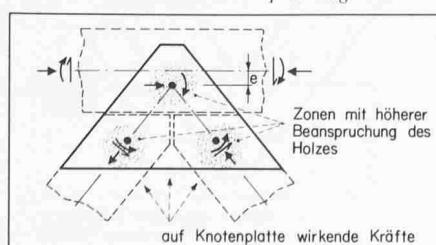


Bild 23. Fehlende Zentrierung und statische Modellbildung

Bild 24. Zonen höherer Beanspruchung



## «Genauere» Bemessungsverfahren

Für eine genauere Bestimmung der Schnittkräfte im Fachwerk sind korrekte Ansätze für die Verschiebungs- und Rotationsmodulen erforderlich. Für die Berechnung kann eine Modellierung des Knotens gemäss Bild 22 erforderlich werden.

Mit den so ermittelten Schnittkräften sind die üblichen Sicherheitsnachweise durchzuführen. Der Nachweis in den Gurtungen und in den Diagonalstäben (auf Normalkraft mit Biegung) bereitet im allgemeinen keine Schwierigkeiten. Problematisch ist der Nachweis in den Verbindungsbereichen. Die tabellierten Anschlusswerte berücksichtigen in der Regel nur Normalkräfte. Der Einfluss gleichzeitig wirkender Anschlussmomente wurde noch nicht systematisch untersucht. Vorläufig muss man sich hier mit einer Reduktion gemäss Tabelle 2 begnügen.

## Einfluss fehlender Zentrierung

Gewisse konstruktive oder herstellungsbedingte Ausbildungen führen zu exzentrischen Knotenausbildungen (Bild 23). Die Berechnung der Schnittkräfte kann mit dem dargestellten Modell durchgeführt werden.

Schwieriger zu erfassen ist die Wirkung der örtlich höheren Beanspruchung des Holzes im Verbindungsbereich auf das Tragverhalten des Fachwerkes. In Bild 24 sind schematisch die Schnittkräfte und die örtlich stärker beanspruchten Zonen dargestellt.

Bei geringer Exzentrizität, z. B. falls der Schnittpunkt der Diagonalstäbe noch innerhalb der Gurtansichtsfläche liegt, darf noch gemäss dem «Näherungsverfahren für die Bemessung» vorgegangen werden, wobei jedoch grössere Abminderungsfaktoren (sowohl bezüglich Gurtung als auch bezüglich Anschlüsse) einzuführen sind.

## Vorgehen bei genormten Systemen

### Grundgedanken

Die traditionelle Bemessung von Holzfachwerken ist nicht nur zeitaufwendig, sondern für nicht täglich mit dem Holzbau Beschäftigte recht schwierig. Für die Bemessung der Stäbe sind einerseits die Anschlüsse und andererseits konstruktive Belange, wie die maximal vorhandene Anschlussfläche, ausschlaggebend. Hinzu kommt noch die Abhängigkeit der zulässigen Belastungen von der Kraft- zur Faserrichtung.

Am Beispiel der *Blumer-Binder-Bauweise* (vgl. [6]) sollen nun mögliche, wesentliche Vereinfachungen gezeigt werden. Blumer hat im Zusammenhang mit der Einführung von *Systembindern* sowohl eine Rationalisierung der Herstellung als auch des Entwurfes angestrebt. Dies wurde durch die Typisierung der Knotenausbildung erleichtert, die folgende Merkmale aufweist:

- **Knotenbleche:** Dicke 4 mm, Abstand 35 mm
- **Stahlstifte:** Ø 6,5 mm, genormte Anordnungen
- **Holzabmessungen:** Breite und Höhe ein Mehrfaches von 40 mm
- **Kraft zur Faserrichtung:** im allgemeinen parallel zur Faser, unabhängig von Neigung der anzuschliessenden Stäbe

Durch Einführung einer auf den Bruttoquerschnitt des Stabes reduzierten zulässigen Spannung, die dem Wirkungsgrad des Stabanschlusses entspricht, gelingt es durch einen einzigen Nachweis, die Stabbemessung mitsamt Verbindung durchzuführen. Der Entwerfende benötigt einzig die Stabkräfte und kann daraus – mittels entsprechender Tabellen oder Diagramme – direkt die erforderlichen Querschnitte bestimmen.

## Wirkungsgrad des Anschlusses

Der Wirkungsgrad des Anschlusses wird ausgedrückt durch das Verhältnis der zulässigen Anschlusswerte bezogen auf die des ungestossenen Stabes. Ausgehend von der Norm SIA 164 ergeben sich die folgenden zwei Werte, wobei der kleinere massgebend ist:

- Ausgehend vom Verhältnis Netto- zu Bruttoquerschnitt, wobei zusätzlich noch die Wirkung plötzlicher Querschnittsänderung (Kerbwirkung bei Zuganschlüssen) und nicht rechnerisch erfasster Zwängungsmomente gemäss Tabelle 2 zu berücksichtigen ist,
- ausgehend vom Verhältnis Anschlusswert der Verbindungsmittel bezogen auf die Tragfähigkeit des ungestossenen Stabes.

Die Berechnung ergibt für die BSB-Reihenanschlüsse Wirkungsgrade von

- für Zugdiagonalen  $\eta = 0,55$
- für Druckdiagonalen  $\eta = 0,65$

Bei typisierter Knotenausbildung ist die versuchsmässige Bestimmung der Wirkungsgrade sinnvoll, dies insbesondere wenn einzelne Parameter (minimale Abstände, mechanische Eigenschaften der Stifte) nicht genau mit den Normansätzen übereinstimmen.

Die Auswertung der in den Fachwerkversuchen (vgl. [3]) geprüften Anschlüssen

se der Zugdiagonalen mit Querschnitten 120/130 in BSH A bzw. 120/120 in FK II zeigte, dass für die BSB-Reihenanschlüsse mit  $\eta = 0,6$  gerechnet werden darf. Bei den Druckdiagonalen trat auf demselben Niveau, d. h. für  $\eta = 0,6$ , kein Versagen der Anschlüsse ein. Die Schlankheit der Diagonalstäbe betrug dabei nur  $\lambda_K = 43$ .

Eine Übertragung auf grössere Anschlüsse ist zulässig, falls ähnliche Verhältnisse Netto- zu Bruttoquerschnitt vorliegen (massgebend war in den Versuchen die Versagensart «Holzteil» im Nettoquerschnitt). Diese betragen zwischen 0,63 und 0,68, während die untersuchten Anschlüsse Werte zwischen 0,67 und 0,69 aufwiesen.

### Bemessung auf Knicken

Bei den Fachwerkstäben wird in der Regel die Systemlänge als Knicklänge eingeführt (Ausnahme bei durchlaufenden Gurtungen, bei denen in der Fachwerkebene kleinere Werte, sowie aus der Ebene, falls nicht alle Knoten seitlich gehalten sind, grössere Werte möglich sind). Da die Knickspannung – bezogen auf den Bruttoquerschnitt – zu  $\sigma_K = \kappa_K \cdot \sigma_{d\parallel}$  angeschrieben wird, ist Knicken nur massgebend, falls  $\kappa_K < \eta_{Anschluss}$  wird.

In [7] wurde gezeigt, dass bei langen eingeschlitzten An schlüssen und vielen dünnen Lamellen ein Abfall der Knicklast eintreten kann. Dies kann durch Einführung von  $\varphi \cdot \kappa_K$  an Stelle von  $\kappa_K$  berücksichtigt werden. Für die hier betrachteten typisierten Abmessungen und für Schlankheitsgrade über 60 darf  $\varphi = 1$  angenommen werden.

### Bemessungsdiagramm für Fachwerkstäbe

Für die Bemessung von Fachwerkstäben werden somit nur benötigt:

- Zugstäbe: vorhandene Zugkraft
- Druckstäbe: vorhandene Druckkraft und massgebende Knicklängen

Die im Bild 25 dargestellten Diagramme gelten für BSH B bzw. FK I. Bei Einsatz von BSH A sind die einzuführenden Kräfte auf das 0,91fache zu reduzieren und bei Schnittholz FKII auf das 1,18fache zu erhöhen (bzw. Benutzung der Skalen rechts im Bild).

### Anwendungsbeispiele (mit $c_D = 1$ und $c_W = 1$ )

Zugstab:  $N = + 110,3 \text{ kN}$

Nadelholz FK I Querschnitt 120/160  $\rightarrow \bar{N} = 115 \text{ kN}$   
FK II Querschnitt 120/200  $\rightarrow \bar{N} = 122 \text{ kN}$

Druckstab:  $N = - 134,7 \text{ kN}$ ;  $l_K = 1,85 \text{ m}$   
Fichte BSH B Querschnitt 120/200  $\rightarrow \bar{N} = 144 \text{ kN}$   
160/160  $\rightarrow \bar{N} = 154 \text{ kN}$   
[Anschlusswert Verbindungsmitte massgebend, da  $\lambda_K < 67$ ]

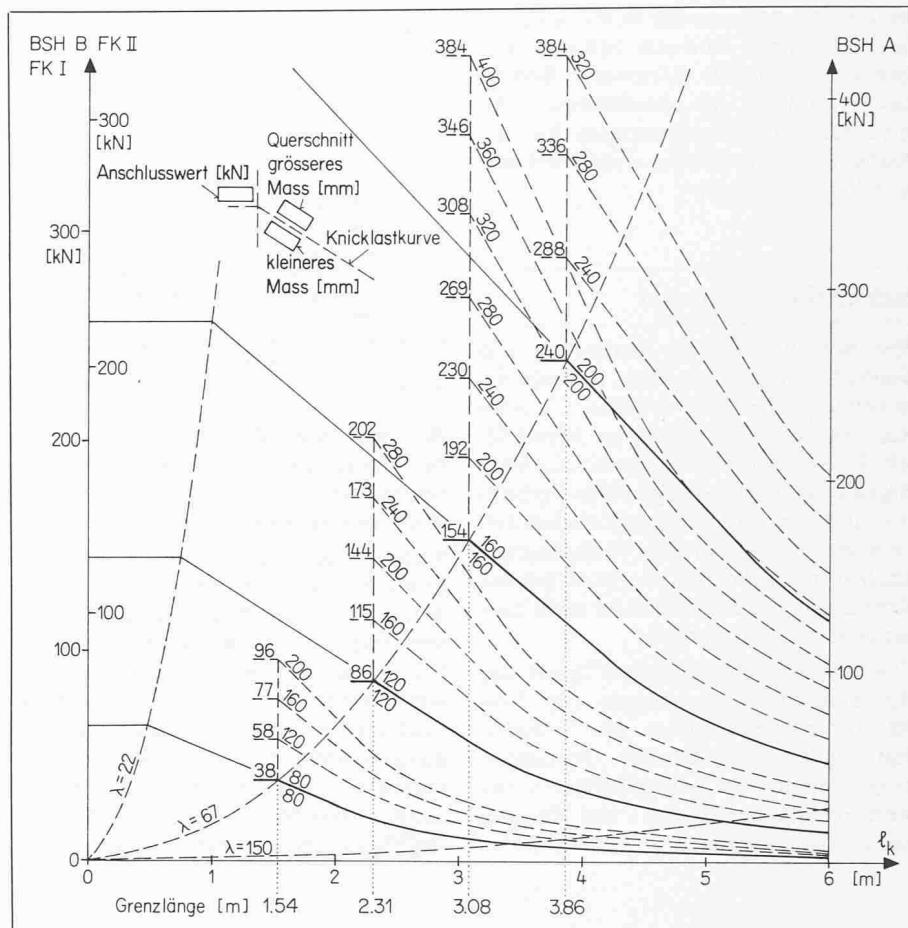


Bild 25. Bemessungsdiagramm für Druck- und Zugdiagonalen mit BSB-Reihenanschlüssen

Druckstab:  $N = - 98 \text{ kN}$ ;  $l_K = 3,10 \text{ m}$   
Fichte BSH B Querschnitt 120/240  $\rightarrow \bar{N} = 108 \text{ kN}$   
160/160  $\rightarrow \bar{N} = 154 \text{ kN}$   
[Knicken massgebend]

### Durchlaufende Gurtungen

Infolge der Durchlaufwirkung werden aus Verträglichkeitsgründen die Gurtungen zusätzlich noch durch sog. Zwängungsmomente auf Biegung in der Fachwerkebene beansprucht. Bei Berechnung der Stabkräfte nach Culmann bleibt allerdings deren Grösse unbekannt. Um deren Wirkung bei der Bemessung zu berücksichtigen, sind die Normalspannungen bzw. -kräfte in den Gurtungen in Abhängigkeit des Verhältnisses Gurthöhe/Trägerhöhe auf das  $(1/\eta_{Culmann})$ fache zu vergrössern.

$$\frac{1}{\eta_{Culmann}} = \frac{1}{1 - \frac{7 \cdot h_{Gurt}}{4 \cdot h_{Träger}}}$$

Für ein mittleres Verhältnis von  $h_{Träger}/h_{Gurt} \approx 10$  ergibt sich somit eine Vergrösserung der Normalkräfte auf rund das 1,2fache. Bei variabler Trägerhöhe ist ein mittlerer Wert einzusetzen.

Für den Knicknachweis aus der Trägerebene von durchlaufenden Gurtungen ist von einer Vergrösserung der Normalkräfte abzusehen.

Fällt der Schnittpunkt der Diagonalen nicht mit dem Schwerpunkt der Gurtung zusammen, liegt aber noch innerhalb der Ansichtsfläche der Gurtung, darf weiterhin wie oben verfahren werden, wobei jedoch als Vergrösserungsfaktor ein Wert von rund  $(\eta_{Culmann})^{-3/2}$  zu wählen ist.

### Direkt belastete Gurtungen

Bei direkter Belastung müssen in den Gurtungen Biegemomente auftreten, deren Berechnung näherungsweise wie für einen Durchlaufträger auf festen Stützen erfolgen kann. Die Sicherheitsnachweise der Gurtung (in Fachwerkebene) sind dann wie folgt durchzuführen:

Spannungsnachweis (in den massgebenden Schnitten):

$$\frac{\sigma_{d\parallel, eff}}{\eta_{Culmann} \cdot \bar{\sigma}_{\parallel}} + \frac{\sigma_{b, eff}}{\bar{\sigma}_b} \leq 1$$

Stabilitätsnachweis:

$$\frac{\sigma_{d\parallel, eff}}{\eta_{Culmann} \cdot \bar{\sigma}_K} + \frac{\sigma_{b, eff}}{\bar{\sigma}_b} \leq 0,9$$

### Überprüfung der Bemessung

Bei grösserer, fehlender Stabzentrierung und/oder bei starker direkter Belastung der Gurtung ist eine abschlies-

sende Überprüfung der Bemessung angebracht. Hier sind die Schnittkräfte gemäss Abschnitt «Genauere Bemessungsverfahren» zu bestimmen. Die erforderlichen Berechnungen können heute auf den meisten Tischrechnern durchgeführt werden.

## Schlussbemerkungen

Die Berechnung und Bemessung von Fachwerkträgern aus Holz ist recht arbeitsaufwendig und erfordert grosses konstruktives und statisches Verständnis. Infolge der relativ grossen Nachgiebigkeit der Verbindungen (im Verhältnis zu den Stabdehnungen) dürfen diese insbesondere bei den Verformungsnachweisen, zum Teil aber auch bei der Ermittlung der Schnittkräfte nicht ausser acht gelassen werden.

Die relativ grosse Biegesteifigkeit der durchlaufenden Gurtungen (im Verhältnis zur Steifigkeit des Trägers) führt zudem dazu, dass die Gurtungen zusätzlich zu den Normalkräften – aus Verträglichkeitsgründen – auf Biegung beansprucht werden.

## Literatur

- [1] Entwurf und Bemessung von Schnittholz-Konstruktionen mit neuzeitlichen Verbindungen (1979). SAH-Fortbildungskurs XI, Weinfelden
- [2] Einführung in die Norm SIA 164 (1981) – Holzbau (1981). Baustatik und Stahlbau, Publikation Nr. 81-1, ETH Zürich.
- [3] Gehri, E. (1982): «Fachwerkträger aus Buche und Fichte mit Stahlknotenplatten in eingeschlitzten Hölzern». Baustatik und Stahlbau, Publikation Nr. 82-1, ETH Zürich
- [4] Gehri, E. (1980): «Möglichkeiten des Einsatzes von Buchenholz für Tragkonstruk-
- tionen». Schweizer Bauwirtschaft, Nr. 56
- [5] Schneider, J. (1971): «Überlegungen zu einem konkreten Sicherheitsbegriff für die Bemessung von Bauwerken». Schweiz. Bauzeitung, S. 731–736
- [6] Blumer, H. (1982): «Entwicklung einer normierten Holzverbindung und gemachte Erfahrungen». In «Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis», K. Möhler gewidmet, Bruderverlag Karlsruhe
- [7] Gehri, E. (1980): «Betrachtungen zum Tragverhalten von Bolzenverbindungen im Holzbau». Schweizer Ing. und Architekt, H. 51/52

Bei fehlender Zentrierung und/oder bei Querbelastung der Gurtungen treten zudem aus Gleichgewichtsgründen noch weitere Biegemomente auf.

Selbst für den Idealfall zentrischer Ausbildung und Lasteinleitung nur in den Knoten ist in der Regel eine direkte Bemessung der Stäbe nicht möglich. Einen Ausweg bieten genormte Fachwerksysteme an, bei denen – infolge typisierter Anschlüsse – wesentliche Voraussetzungen für eine Vereinheitlichung und Vereinfachung der Bemessung vorhanden sind. Ausgehend vom BSB-Systembinder wird ein derartiges,

äusserst anwenderfreundliches Vorgehen – das auf andere Systeme übertragbar ist – aufgezeigt. Die Bemessungsarbeit wird dadurch nicht nur auf ein Bruchteil reduziert, sondern weist auch eine wesentlich geringere Fehleranfälligkeit auf.

Adresse des Verfassers: E. Gehri, dipl. Ing. ETH, Baustatik und Stahlbau, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich.

## Hängeleitung Felskinn in Saas-Fee

Von Josef Grob, Arlesheim

### Allgemeines

Grösstes und wichtigstes Bauvorhaben der Luftseilbahnen Saas-Fee AG ist gegenwärtig die unterirdische Standseilbahn «Metro-Alpin», die einen zusätzlichen Teil des weitläufigen Gletschergebietes oberhalb Saas-Fee erschliessen soll und an der seit dem 1. Sept. 1981 ge-

arbeitet wird. Die projektierte Standseilbahn, die aus Gründen des Betriebes, der Wartung und des Umweltschutzes einer Luftseilbahn vorgezogen wurde, fährt auf ihrer gesamten Bahnlänge von 1447 m in einem Schrägschacht. Sie führt vom *Felskinn*, das seit dem Jahre 1969 durch eine Luftseilbahn erschlossen ist, auf die Krete des Mittellallalin in 3456 m ü.M.

Der Schrägschacht für die Standseilbahn «Metro-Alpin» unterfährt Gletscherpartien in einem minimalen Abstand von nur 10 m bis 15 m zur Gletschersohle. Da die Gletschernähe einen schonenden Felsabbau erfordert, wurde das mechanische Auffahren des Schrägschachtes trotz der grösseren logistischen Probleme dem Sprengvortrieb vorgezogen. Das 420 cm grosse Kreisprofil wird mit einer Tunnelbohrmaschine vom Typ Robbins 136-204 aufgefahren, die, in Einzelteile von maximal 12 t Gewicht zerlegt, mit der bestehenden Luftseilbahn zur Startröhre auf 2980 m ü.M. gebracht wurde.

Die Hängeleitung Felskinn (Bild 1) ist Teil einer Pumpförderanlage, die zur Versorgung der Baustelle «Metro-Alpin» Wasser von 1830 m ü.M. nach Felskinn auf 2987 m ü.M. transportiert. Um die *Versorgung der Baustelle mit Industriewasser* zu gewährleisten, stellt die Bauherrschaft der Unternehmung auf Felskinn eine Wassermenge von 100 m<sup>3</sup> je Tag zur Verfügung. Die Unternehmung muss den *Mehrverbrauch* durch ein *geeignetes Recycling*, d.h. Auffangen, Reinigen und Wiederverwenden des vorhandenen Industriewassers, abdecken. Entsprechend der festgelegten Wassermenge von 100 m<sup>3</sup> je Tag wurde die Pumpförderanlage auf eine Leistung von 1,25 l/s ausgelegt.

Bild 1. Fertige Hängeleitung

