

Die Anwendung des Vorspannprinzips im Ingenieurholzbau

1. Vorbemerkungen

International hat die Anwendung von Ingenieurholzkonstruktionen ein beachtliches Niveau erreicht /1/. Aufgrund der relativ großen Freizügigkeit bei der Gestaltung und Dimensionierung der Holzbauteile können selbst für individuelle Baulösungen oder bei kleinen Serien wirtschaftliche Konstruktionen hergestellt werden.

Besonders Holzkonstruktionen erfüllen die Forderungen des Industriebaues nach Wirtschaftlichkeit, Zweckmäßigkeit, Lebensdauer und konstruktiver Variabilität im Hinblick auf neue bzw. sich verändernde nutzertechnologische Forderungen /2/.

National sind der relativ großen Freizügigkeit bei der Gestaltung und Dimensionierung der Holzklebekonstruktionen durch die fertigungstechnologischen Möglichkeiten enge Grenzen gesetzt. Gleichzeitig entstehen aber aus den veränderten Reproduktionsbedingungen der 80er Jahre (drastische Erhöhung der Rekonstruktion in der Volkswirtschaft bei stark eingeschränktem Stahlverbrauch) kurzfristig erhöhte Anforderungen an den Holzbau in der DDR, so daß Forderungen nach einer vermehrten Anwendung von Holzkonstruktionen in allen Bereichen nicht ausbleiben werden. Aus dieser Situation ergeben sich differenzierte Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Holzbaues in der DDR.

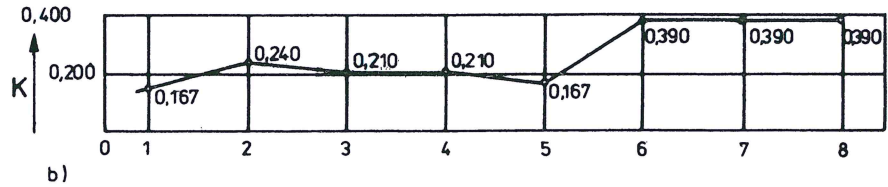
Eine stärkere Anwendung von Holzkonstruktionen unter den Bedingungen der 80er Jahre in der DDR kann nur realisiert werden, wenn alle Möglichkeiten der rationellen Baustoffausnutzung bzw. der Höherveredlung ausgeschöpft werden. Dabei geht es im Industriebau um den Erhalt der spezifischen Eigenschaften des Holzes, wie hohe Korrosions- und Brandstabilität.

Bei der Untersuchung der Möglichkeiten einer rationellen Baustoffausnutzung bzw. Höherveredlung, kristallisieren sich drei Wege heraus:

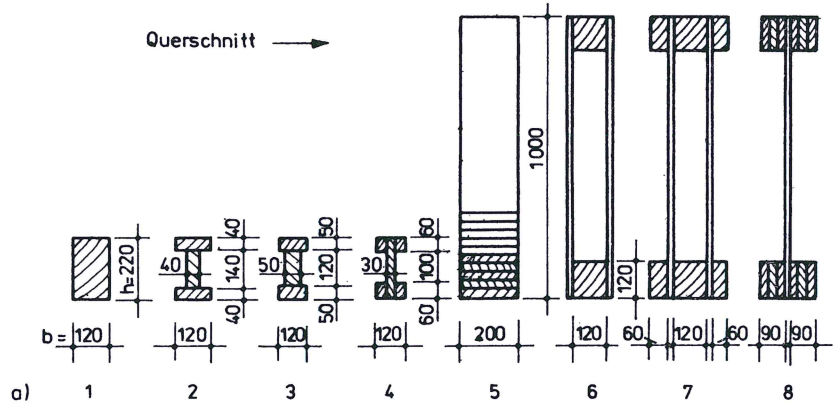
1. Verbundquerschnitte aus Brettschichtholz mit Stegen aus Holzwerkstoffen. Mit zunehmender Höhe wächst das Verhältnis Widerstandsmoment zur Fläche. Dabei sind der Querschnittshöhe Grenzen gesetzt, die durch den Stabilitätsfall Kippen (durch Ausweichen des Druckgurtes) begrenzt wird (s. Abb. 1).
2. Verbundquerschnitte mit Bewehrung. Derartige Querschnitte besitzen eine höhere Tragfähigkeit und Steifigkeit. Gleichzeitig können Festigkeitsstreuungen des Holzes ausgeglichen werden (s. Abb. 2).
3. Vorgespannte Holzkonstruktionen (s. Abb. 3).

Es soll im weiteren auf die 3. Möglichkeit eingegangen werden.

$$\frac{W}{F} = K \cdot h$$



b)



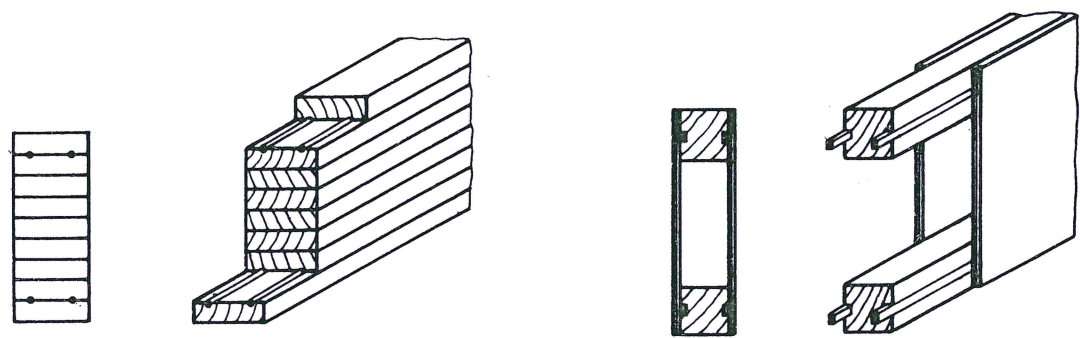
a)

Holzverbrauch	100	57,5	68,2	50	100	24,4	38,8	26,6
---------------	-----	------	------	----	-----	------	------	------

a) Querschnittswerte

b) Auswertung - Darstellung der K-Werte

Abb. 1 Querschnitte von Biegestäben und deren Wirtschaftlichkeitsvergleich



Brettschichtträger mit eingeklebtem Rundstahl an der ersten Klebefuge

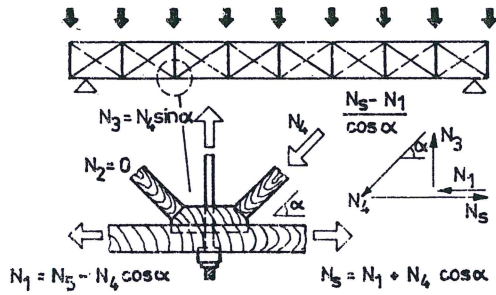
Hohlkastenträger mit Vollholzgurten und seitlich eingeklebten Flachstählen



Hohlkastenträger mit Furnierholzstegen aus zwei Teilen mit eingeklebtem Rundstahl

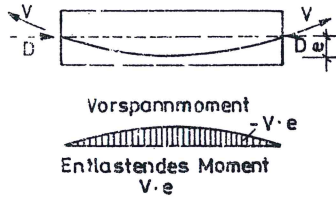
Bewehrter Vollholzträger aus zwei hochkant stehenden Bohlen mit eingeleimter Bewehrung

Abb. 2 Bewehrte Holzträger

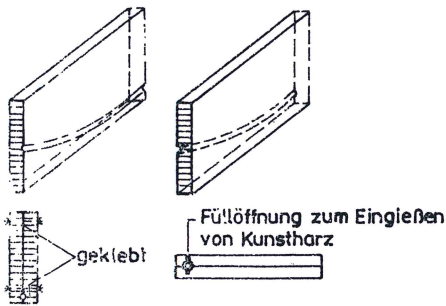


Ein Beispiel aus den Anfängen der modernen Bau-
technik: der Howe-Zuravskis-Fachwerkträger

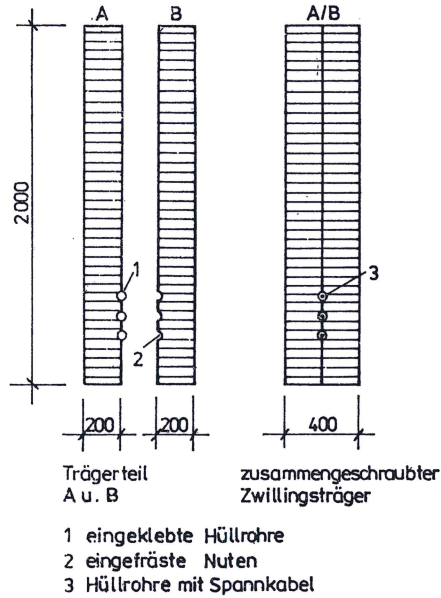
Vorgespannter Brettschichtträger



Spanngliedführung parabelförmig



Spanngliedführung in den halbierten
Brettschichtträgern



Träger teil
A u. B

zusammengeschräubter
Zwillingsträger

- 1 eingeklebte Hüllrohre
- 2 eingefräste Nuten
- 3 Hüllrohre mit Spannkabel

Abb. 3 Vorgespannte Holzträger

2. Geschichtliches

Während das Prinzip der Vorspannung vor etwa 40 Jahren erstmalig beim Beton und vor etwa 140 Jahren erstmalig beim Stahl angewendet wurde, kennt man es beim Holz seit altersher.

Die ältesten bekannten vorgespannten Konstruktionen sind ägyptische Seeschiffe, die etwa 2700 v.u.Z. gebaut wurden. Sie waren durch ein System von Hanfseilen, ein Hauptseil in Längsrichtung und mehrere Querseile vorgespannt. Es folgten Holzfaß und Wagenrad, die durch aufgezwängte Leder- bzw. Eisenringe vorgespannt werden.

Den Höhepunkt im ingenieurmäßigen Brückenbau bildeten im 19. Jahrhundert die vorgespannten Fachwerke, die der Amerikaner Howe (1803 - 1852) und der Russe Zuravski (1821 - 1891) entwickelten. Howe hatte erstmals 1840 ein Tragsystem patentieren lassen, bei dem sämtliche Diagonalen auf Druck beansprucht wurden, während die eisernen vertikalen Zugstangen vorgespannt wurden (s. Abb. 4).

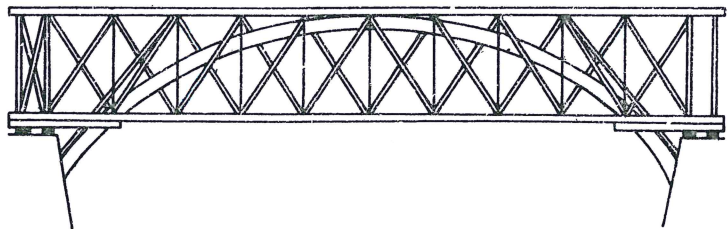


Abb. 4 "Zeichnung zum Patent von Howe (1846)"

Bis 1891 wurden mit der Entstehung des amerikanischen Eisenbahnnetzes Holzbrücken in einer Gesamtlänge von 4240 km errichtet. Davon waren ca. 200 km Brücken mit Spannweiten über 30 m, die hauptsächlich als Howescher Träger ausgebildet wurden. Mit dieser Bauweise konnten Brücken errichtet werden, die aus wenigen vorgefertigten Teilen schnell zusammengebaut werden konnten. Der Anteil an örtlich zu leistender qualifizierter Zimmermannsarbeit war außerdem gering. Das waren Eigenschaften, die den großen Bedarf an Brücken zu dieser Zeit entsprachen.

Dieses Tragsystem wurde auch im Holzbrückenbau in Europa verwendet. Gehri machte auf die Unterschiede in der Knotenpunktausbildung zwischen europäischen und amerikanischen Fachwerkbrücken dieser Art aufmerksam /3/ .

Wie aus der Abb. 5 zu ersehen ist, wurde bei den amerikanischen Knotenpunkten der Einfluß der großen Verformungen bei Querdrukbeanspruchung auf die Vorspannkraft der Zugstangen ausgeschaltet. Eine wesentliche Verbesserung, die den Aufwand für das Nachspannen reduzierte.

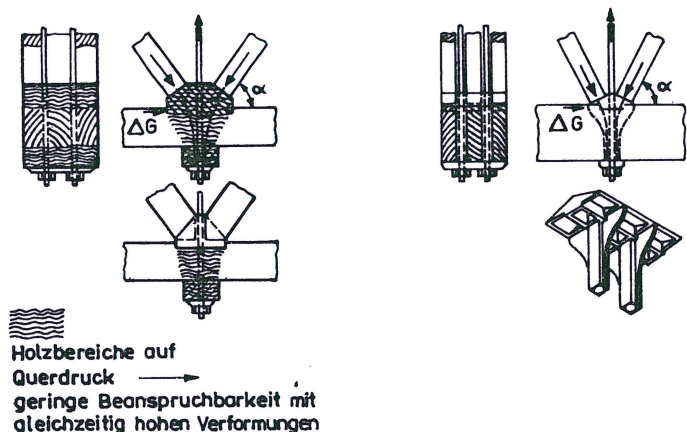
Bei Holzträgern aus Brettschichtholz wurde das Prinzip der Vorspannung bisher einmalig 1976 erfolgreich beim Bau einer Messehalle auf dem Gelände der österreichischen Holzmesse in Klagenfurth angewendet. Die Dachkonstruktion des Flachdaches wurde als vorgespannter Trägerrost ausgebildet. Gegenüber einer nicht vorgespannten Lösung wurde eine Holzeinsparung von 42 % realisiert. Weitere Beispiele sind in /4/ und /5/ angeführt.

Für die Anwendung der Vorspannung bei Holzkonstruktionen wurden in /4/ und /5/ Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Als Hauptvorteil der dort aufgezeigten Lösungen können genannt werden:

1. Bei vorgespannten Vollwandträgern liegt die Holzeinsparung bei 30...50 % gegenüber nicht vorgespannten Konstruktionen. Der Einsatz minderer Holzgüte ist möglich. Durch das Vorspannen von mehreren Einfeldträgern lassen sich statisch günstigere Mehrfeldträger oder Trägerroste herstellen. Für die Herstellung von biegesteifen Stößen bei Mehrfeldträgern oder Trägerrosten kann der Stahlaufwand aufgrund der Vorspannung des Querschnittes in Grenzen gehalten werden.

2. Bei vorgespannten Fachwerken liegt die Senkung des Holzverbrauches bei 40...60 %.

Das Einsatzgebiet vorgespannter Holztragwerke liegt vor allem im Industrie- und Gesellschaftsbau im Spannweitenbereich zwischen 20...60 m.



Kraftfluß im Knoten einer europäischen Howeschens Konstruktion

Kraftfluß in einem Knoten amerikanischer Bauweise (um 1850 eingeführt)

Abb. 5

3. Untersuchungen an vorgespannten Holztragwerken in der DDR

Das im Abschnitt 2. beschriebene Vorspannprinzip bei Fachwerkträgern wurde 1981 beim Bau eines Umlenkturmes für eine Förderbrücke angewandt /6/ .

Die einzelnen Fachwerkscheiben wurden so vorgespannt, daß die Diagonalen unter Gebrauchslast keine Zugkräfte erhalten. Damit kann an den Anschlußpunkten der Diagonalen zum Gurt die statisch erforderliche Anschlußfläche reduziert werden, was zu einer Holzeinsparung von ca. 30 % führte.

Die im Zusammenhang mit der Errichtung des Fachwerkturnes erforderlichen Untersuchungen ergaben sich aus folgenden Gründen:

- Der Übergabeturm gewährleistet die Standsicherheit der gesamten zu errichtenden Bandanlage.
- Für die Berechnung und Konstruktion vorgespannter Holzkonstruktionen liegen keine Vorschriften vor.
- Praktische Erfahrungen über das Trag- und Langzeitverhalten solcher Konstruktionen sind nicht bekannt.

Obwohl die Auswertung der experimentellen Untersuchungen erst 1985/86 abgeschlossen wird, sollen nachfolgend erste Ergebnisse vorgestellt werden:

3.1. Laboruntersuchungen

3.1.1. Ziel der experimentellen Untersuchungen

Im Rahmen von Versuchen an vorgespannten Fachwerken im Maßstab 1 : 2 sollte noch vor der Errichtung des Fachwerkturnes im GKB folgendes untersucht werden:

- a) Ermittlung des tatsächlichen Kräfteverlaufes im Tragwerk und der Einfluß von Paßungenauigkeiten, insbesondere der Diagonalstäbe, auf die Größe der erzeugten Vorspannung
- b) Die Abnahme der Vorspannkräfte infolge örtlicher zeitabhängiger Verformungen
- c) Der Einfluß wiederholter Belastung auf die Größe der Vorspannkräfte
- d) Die Abnahme der Vorspannkräfte bei konstanter Last infolge örtlicher Verformungen
- e) Tragverhalten des Trägers unter stetig steigender Last bis zum Versagen.

3.1.2. Versuchsaufbau und Durchführung

Es wurden zwei Fachwerkscheiben nebeneinander in den Versuchsstand gestellt und gegeneinander im Bereich der Auflager stabilisiert. In der Mitte der Träger wird die Einzellast für beide Träger gleichzeitig wirkend eingetragen. Um die Last über einen längeren Zeitraum konstant zu halten, wurde die Einzellast mittels einer hydraulischen Presse SK 40, 400 kN, Fabrikat des VEB Madix Dresden, über Handbedienung eingetragen. Die Messung der eingetragenen Last erfolgte mittels Druckmeßdose (Genauigkeit $\pm 3\%$). Insgesamt betrug das Gewicht der Vorrichtung für die Lasteintragung 0,50 kN (s. Abb. 6).

Die Vorspannkräfte an den Spannstählen wurden über jeweils zwei Dehnmessstreifen an den Enden der Spannstähle gemessen. Die Kräfte in den Diagonalen ermittelte man über Dehnmessstreifen (Typ WG 30/2 bzw. WG 30/4. Die Dehnmessstreifen sind an den Außenseiten der Stahlteile aufgeklebt, die nur für die Messung der Kräfte angeordnet wurden.

(Die Meßpunkte befinden sich in einer Trägerhälfte.)

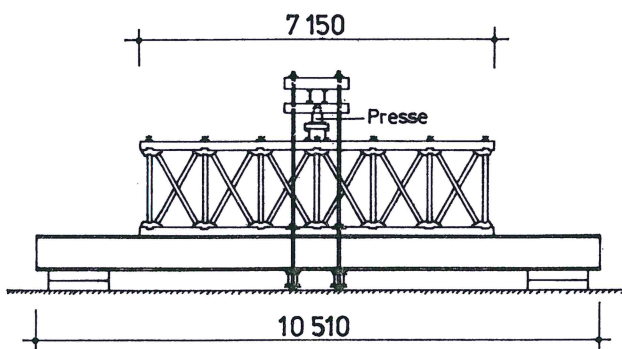


Abb. 6 . Versuchsaufbau

An der Vorderseite eines Trägers befinden sich Meßbilder für die photogrammetrische Erfassung der örtlichen Verformungen (ebenfalls nur eine Binderhälfte). Hierbei geht es um die Erprobung der Industriephotogrammetrie für die Erfassung zeitabhängiger örtlicher Verformungen.

An der Rückseite des Trägers, an dem die Meßpunkte für die photogrammetrischen Messungen angebracht sind, wurden an zwei Knoten mittels Meßuhren über verschiedene Meßlängen die örtlichen Verformungen gemessen (s. Abb. 7).

An beiden Trägern wurde die Durchbiegung mittels Nivelliergerät gemessen.

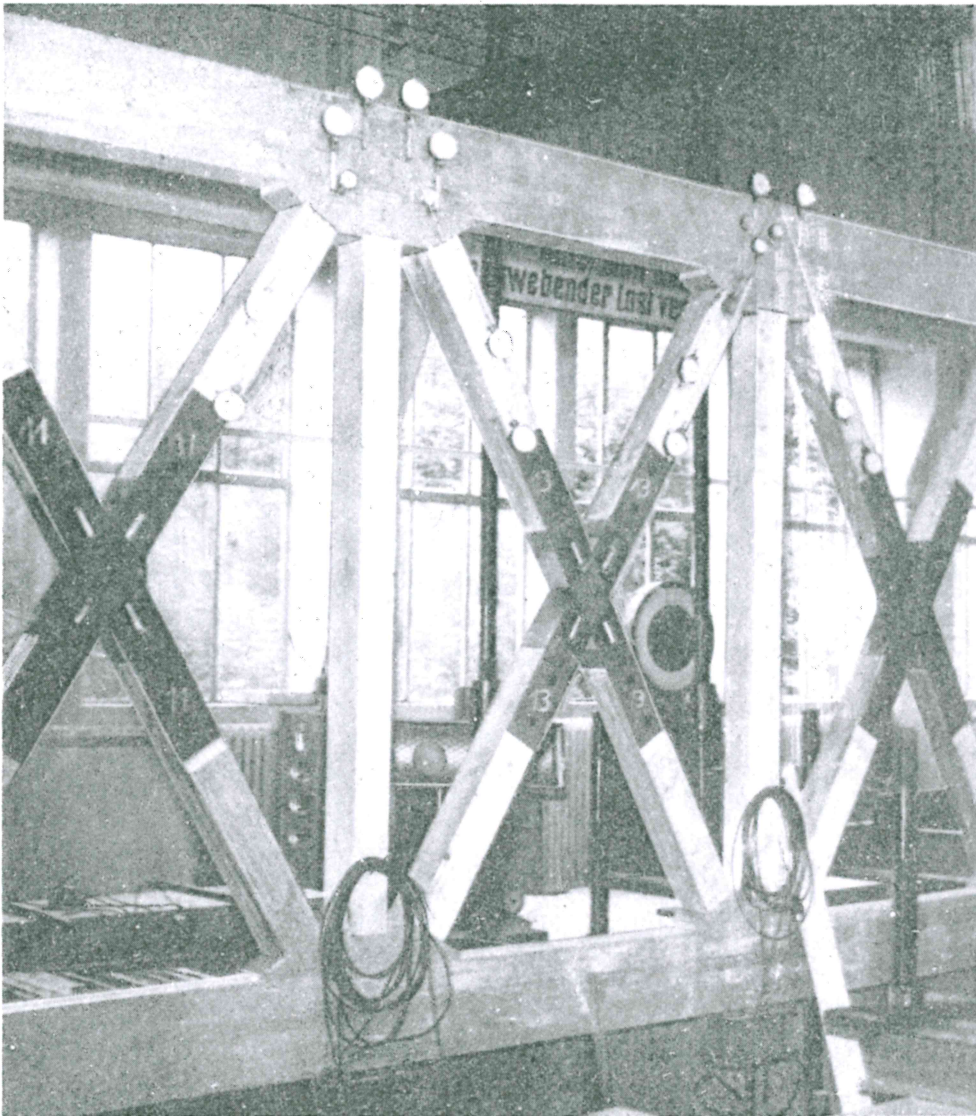


Abb. 7 Versuchsträger mit Meßöhren zur Ermittlung örtlicher Formänderungen

3.1.3. Auswertung der Versuche

Die bisherige Auswertung der Untersuchungen ergab folgendes Ergebnis:

1. Der Kräfteverlauf im Tragwerk wird durch Paßungenauigkeiten beeinflusst. Über elastische und zeitabhängige Formänderungen wird der Einfluß der Paßungenauigkeiten teilweise ausgeglichen. Die rechnerisch ermittelten Stabkräfte des Näherungsverfahrens nach /7/ liegen im allgemeinen auf der sicheren Seite.

2. Für die Abnahme der erzeugten Vorspannkräfte innerhalb einer bestimmten Zeitdauer sind zeitabhängige Formänderungen verantwortlich. Diese Abnahme verläuft i.a. im Gebrauchslastbereich asymptotisch.

Die Größe der Asymptote ist abhängig von den äußeren physikalischen Einflüssen, wie Temperatur und Feuchtigkeit, der Art der Beanspruchung (Größe und Richtung zum Faserverlauf), der Dauer der Beanspruchung und der Struktur des Holzes.

Bei den vorliegenden Versuchen, unter Berücksichtigung der gemessenen klimatischen Verhältnisse, nähern sich die Stabkräfte asymptotisch bestimmten Grenzwerten:

- im Lastfall Vorspannung i.M. 80 % des Anfangswertes
- im Lastfall Vorspannung und mehrmals be- und entlastet i.M. 90 % des Anfangswertes
- im Lastfall Vorspannung und konstanter Einzellast (50 kN) - i.M. 75 % der Anfangswerte (s. Abb. 8 - Zeitraum ca. 140 h).

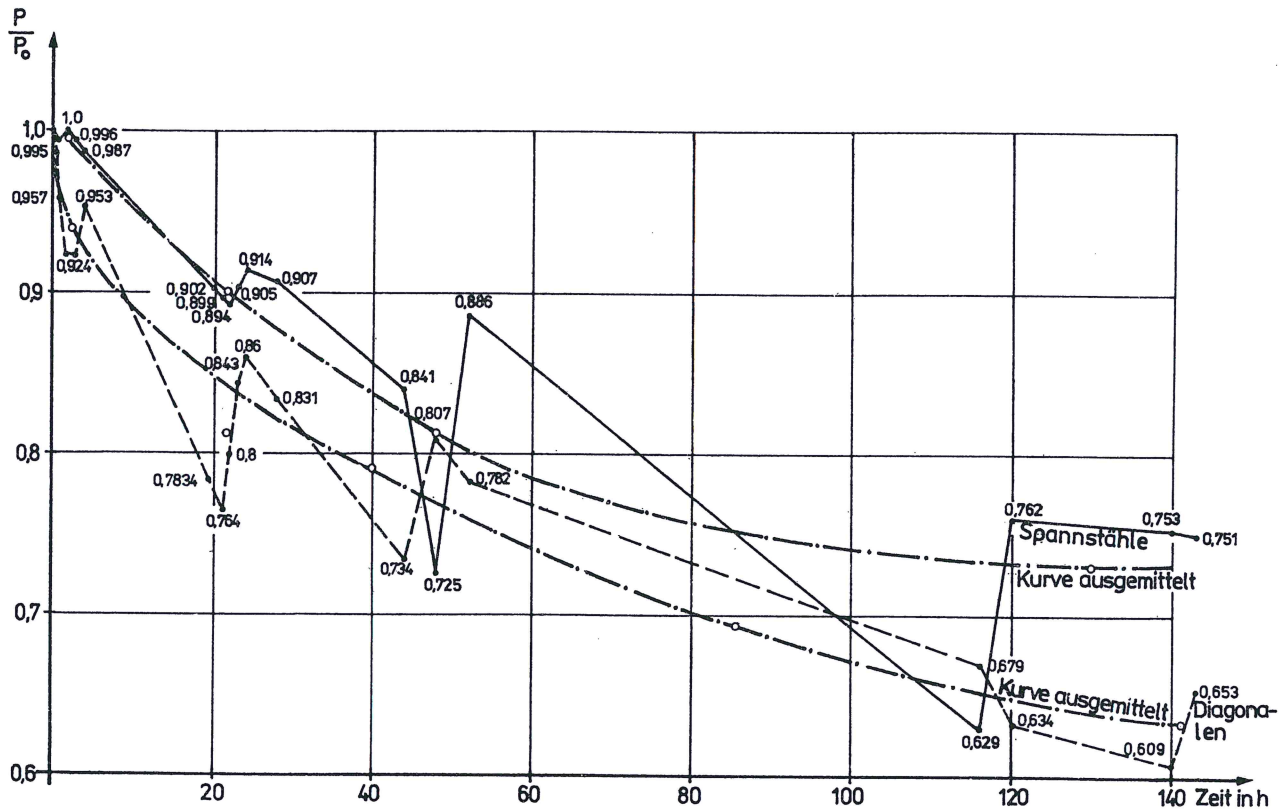


Abb. 8 Gemittelte Verhältniswerte P/P_0 Versuch 5 über einen Zeitraum von 143 h

In Abb. 9 wurde der prozentuale Abfall der Stabkräfte, bezogen auf den Versuch Nr. 3, dargestellt, da ja ab dem Versuch 3 nur noch nachgespannt wurde. Man sieht, daß die Nachspannwerte der Versuche 4, 5 und 6 etwas unter den Vorspannwerten des Versuches Nr. 3 liegen und größere Stabkräfte als beim Versuch 3 erzeugen. Dies ist auf den vollständigen Ausgleich der Toleranzen zurückzuführen (bessere Kraftschlüssigkeit).

Abb. 9 bestätigt noch einmal die vorherige Aussage. Im Lastfall Vorspannung nähern sich die Werte der 80%igen Grenze (Versuch 3). Bei höherer konstanter Belastung nähern sich die Werte nach dem Entlasten der 70 %-Grenze. Man stellt fest, daß bei dem kürzeren Versuch von 18 h (Versuch 4) schon die Grenzwerte erreicht werden. Über 143 h (Versuch 5) sinken die Werte nur noch um 2 bis 8 %. Über ca. 100 h sinken die Werte nur noch um 6...12 %.

Der Versuch 6 macht den Einfluß mehrmaliger wiederholter (kurzzeitig wirkender) Belastung deutlich.

3. Unter konstanter Last (Zeit ca. 1000 h) kann die Durchbiegung, wie Abb. 10 vom Versuch 5 zeigt, dann auf das 1,7fache gegenüber dem Zeitpunkt $t = 0$ ansteigen. Nach der Entlastung verbleibt eine restliche Durchbiegung von maximal 2 mm (Durchbiegung, die infolge plastischer zeitabhängiger Verformungen und durch die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel entstand).

3.2. Untersuchungen am Bauwerk

3.2.1. Ziel der experimentellen Untersuchungen

Bisher liegen wenig Versuchsergebnisse über das Dauerstandverhalten von vorgespannten Holzkonstruktionen vor; vorgespannte Fachwerkscheiben aus Holz wurden bisher in der DDR noch nicht angewendet und untersucht.

Aus diesem Grund sollen Aufschlüsse über das Dauerstandverhalten von vorgespannten Fachwerkscheiben unter freier Bewitterung und aggressiver Umwelt ermittelt werden. In diesem Zusammenhang werden im wesentlichen folgende Fragen untersucht:

1. Verlauf der Vorspannkraft in den Spanngliedern einer ausgewählten Fachwerkscheibe und Ermittlung der notwendigen Häufigkeit des Nachspannens.
2. Einfluß auf die Standsicherheit des Bauwerkes.
3. Kriechverhalten in ausgewählten Knotenpunkten der ausgewählten Fachwerkscheibe.
4. Ermittlung der Ursachen für die Formänderungserscheinungen die einen Spannungsabfall bewirken.

3.2.2. Versuchsbeschreibung

Am Funktionsmuster Fachwerkurm aus vorgespannten Fachwerkscheiben als Festpunktstütze einer Bandbrücken-Konstruktion (vgl. /6/) wurden im wesentlichen folgende Messungen durchgeführt:

1. Verlauf der Vorspannkraft in 4 Spannstählen der am meisten belasteten Fachwerkscheibe. In Abb. 11, einer Ansicht dieser Prüfscheibe, ist die Lage der Meßstrecken an den Spanngliedern ersichtlich. Die Vorspannkraften wurden durch zwei Methoden gemessen:

1. Am Drehmomentenschlüssel

Der Drehmomentenschlüssel wurde in einem Versuch geeicht und eine Kurve der Beziehungen Drehmoment - Vorspannkraft aufgestellt.

2. Mittels Setzdehnungsmesser
(Basislänge 300 mm)

Die Angriffspunkte für den Setzdehnungsmesser wurden durch Kerben im Spannstahl hergestellt. Es wurden an zwei gegenüberliegenden Seiten des Spannstahles Meßstrecken angebracht und jeweils der Mittelwert daraus gebildet. Die Messung erfolgte sowohl vor dem Spannen als auch nach dem Spannen der Spannglieder.

2. Formänderungen an ausgewählten Meßpunkten der Fachwerkscheibe. Dabei kam der Setzdehnungsmesser mit der Basislänge 300 mm und 100 mm zur Anwendung. Abb. 12 zeigt die Verteilung der Meßstrecken für einen Knotenpunkt. Die Angriffspunkte für die Setzdehnungsmesser wurden durch eingeklebte Schrauben hergestellt, deren Schraubenköpfe mit entsprechenden Kerben versehen wurden.
3. Integrale Feuchtigkeitsbestimmungen an Wägebalken mit Querschnitten analog zur Konstruktion. Zur Ermittlung des Darrgewichtes wurden vorher Proben entnommen und die Wägebalken auf einer stationären Waage gewogen.
4. Messung der klimatischen Verhältnisse

Mit Hilfe von Thermohygrographen wurden unmittelbar am Versuchsobjekt Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen.

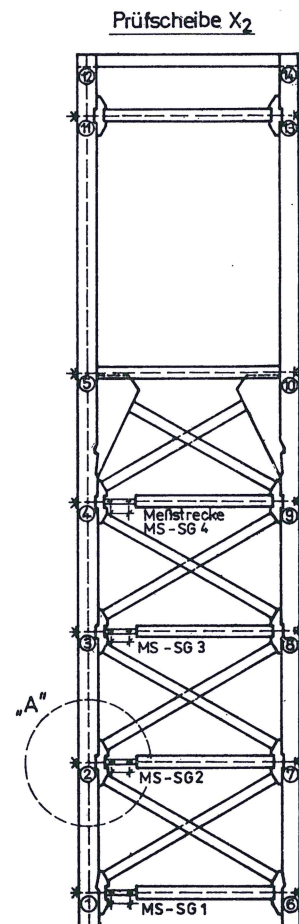


Abb. 11 Ansicht der Prüfscheibe

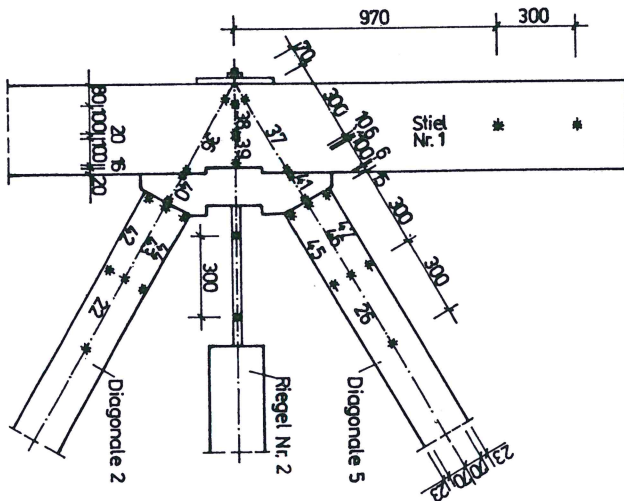


Abb. 12 Detail A - Knoten 2

3.2.3. Erste Ergebnisse der Untersuchungen

Beim Originalbauwerk, unter dem Einfluß der freien Bewitterung, bewirkten mehrere Einflußfaktoren, wie z.B. Luftfeuchte, Temperatur und Holzfeuchte, eine Veränderung der Vorspannkraft. Messungen an einer Fachwerkscheibe zeigten, daß die Vorspannkraft unregelmäßig schwankt. Durch regelmäßiges Nachspannen der Fachwerkscheiben konnte die Vorspannkraft auf dem erforderlichen Niveau gehalten werden.

Die Abnahme der Vorspannkraft ist nach 3 Monaten viel geringer, als zu Beginn der Messungen.

An einigen Knoten ergab die Glättung der Kurven einen asymptotischen Verlauf der Kriechformänderungen, d.h. der Verformungszuwachs kommt zum Stillstand.

Da die Untersuchungen voraussichtlich 1985/86 abgeschlossen werden, liegen erst zu diesem Zeitpunkt verallgemeinerungswürdige Ergebnisse vor.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß durch ein regelmäßiges Nachspannen die Vorspannkraft konstant gehalten werden kann. Dadurch ist die Standsicherheit des Turmbauwerkes gewährleistet. Nach 3 Monaten ist der Abfall der Vorspannkraft bzw. des Vorspannmomentes viel geringer als zu Beginn der Messungen. Nach den ersten drei Monaten wurde nur noch monatlich nachgespannt, im zweiten Jahr nur noch quartalsweise und im dritten Jahr nur noch halbjährlich.

Literatur

- /1/ Rug, W.
Stand und Entwicklungstendenzen im Holzbau
Teil 1; Holztechnologie 25 (1984) 4, S. 171-175
Teil 2; Holztechnologie 25 (1984) 5, (in Vorbereitung)
- /2/ Rug, W.; Kreisig, W.
Anwendung von Ingenieurholzkonstruktionen im Industriebau
Bauplanung Bautechnik 37 (1983) 9, S. 408-411
- /3/ Gehri, E.
Entwicklung des ingenieurmäßigen Holzbaus seit Grubenmann
Teil I: 18. und 19. Jahrhundert
Schweizer Ing. und Architekt (1983) 25, S. 691-695
- /4/ Vorspannung im Ingenieurholzbau
Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau
Forschungsbericht, Juni 1983

REKONSTRUKTION

im VEB Chemiekombinat Bitterfeld

Ergebnisse
und Erfahrungen
aus der
Zusammenarbeit
der Partner



Bauakademie
der Deutschen Demokratischen
Republik



Technische Hochschule Leipzig



VEB
Bau- und Montagekombinat
Chemie



VEB
Chemieanlagenbaukombinat
Leipzig-Grimma



VEB
Metalleichtbaukombinat



VEB
Chemiekombinat
Bitterfeld

REKONSTRUKTION

im VEB Chemiekombinat Bitterfeld

Bitterfeld/Berlin · Dezember 1984

Mitwirkung:

Technische Hochschule Leipzig
Ingenieurhochschule Köthen
VEB Bau- und Montagekombinat Chemie
VEB Chemiekombinat Bitterfeld

Bauakademie der DDR:

Institut für Baustoffe
Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen
der Bautechnik
Zentrallaboratorium für Korrosionsschutz
Institut für Ingenieur- und Tiefbau
Institut für Technologie und Mechanisierung
Institut für Industriebau

Herausgeber:

VEB Chemiekombinat Bitterfeld
Bauakademie der DDR

Druck:

Druckerei "Osthavelland" Velten
Ag 513/507/84/0.2