Herrn Prof. Dipl.-Ing. Joachim Eichstädt zum 60. Geburtstag gewidmet.

Vorspannung von Holzträgern

Dr.-Ing. Wolfgang Rug, KDT,
Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau,
Dipl.-Ing. Wilfried Pötke, KDT,
Bauakademie der DDR, Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik

1. Einleitung

Das Prinzip der Vorspannung wurde von den Menschen schon in den frühen Phasen ihrer Existenz, als Holz der wichtigste Baustoff war, aus der Erfahrung heraus bei Holzkonstruktionen angewendet. Zu den ältesten Anwendungsbeispielen zählen ägyptische Seeschiffe, die durch Quer- und Längsseile, sowie Holzfässer und Wagenräder, die durch aufgezwängte Leder- bzw. Eisenringe vorgespannt wurden. Der große Bedarf an leistungsfähigeren Holzkonstruktionen während der industriellen Revolution besonders im Brückenbau des 19. Jahrhunderts förderte die Anwendung von vorgespannten Ingenieurkonstruktionen aus Holz, wie den verzahnten Holzbalken oder das vorgespannte Holzfachwerk nach dem System *Howe/Zuravski* (Bild 1). Mit der industriellen Herstellung des Eisens entstanden die ersten unterspannten Holzbalken. Später wurde das Prinzip der Vorspannung im Zusammenhang mit der besseren Nutzung neuer Baustoffe, wie Stahl und Beton, auch bei diesen angewendet. Seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts beschäftigt sich die Bauforschung und -praxis mit der Nutzung der technisch-ökonomischen Vorteile der Vorspannung von Holzkonstruktionen [1].

Herausragende Beispiele sind die 1976 in Österreich errichteten vorgespannten Brettschichtkonstruktionen (Bild 2), die Fußgängerbrücke im Oberammergau in der BRD und die Vorspannung von Brückenbelägen in Kanada und der Schweiz. Diese Beispiele belegen gleichzeitig die Effektivität der Anwendung des Vorspannprinzips im Holzbau (weitere Beispiele s. [2]).

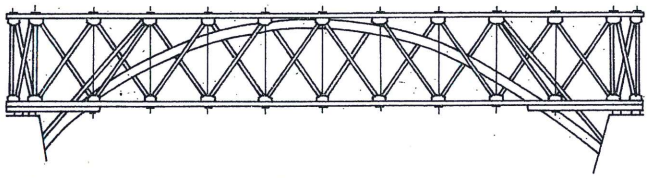
Die seit den 60er Jahren durchgeführten Forschungsarbeiten (Tabelle 1 und [2]) zeigen, daß in Abhängigkeit von der Größe des erzeugten Vorspannmomentes selbst bei Verwendung von Holz minderer Güte eine Erhöhung des Bruchmomentes erreicht wird. Vorgespannte Träger ohne Verbund verhalten sich elastisch bis zum Bruch. Bei Ausnutzung des Prinzips der Vorspannung mit Verbund zwischen Holz und Spannglied vergrößert sich die Tragfähigkeit entsprechend den ideellen Querschnittswerten.

Nachdem das Prinzip der Vorspannung bei der Errichtung eines Fachwerkturms aus Holz in der DDR erfolgreich erprobt worden war [3] [4], sollten durch weitere Untersuchungen wesentliche Grundlagen für die effektive Anwendung des Vorspannprinzips im Holzbau der DDR erarbeitet werden, und der Kenntnisstand auf diesem Gebiet sollte vertieft werden.

In einem Forschungsprojekt wurden vorgespannte Holzträger experimentell untersucht.

2. Tragverhalten vorgespannter Holzbalken ohne Verbund zwischen Spannglied und Holz

Die Untersuchung betraf das Trag- und Bruchverhalten vorgespannter Träger unter kurzzeitiger Biegebelastung im Vergleich



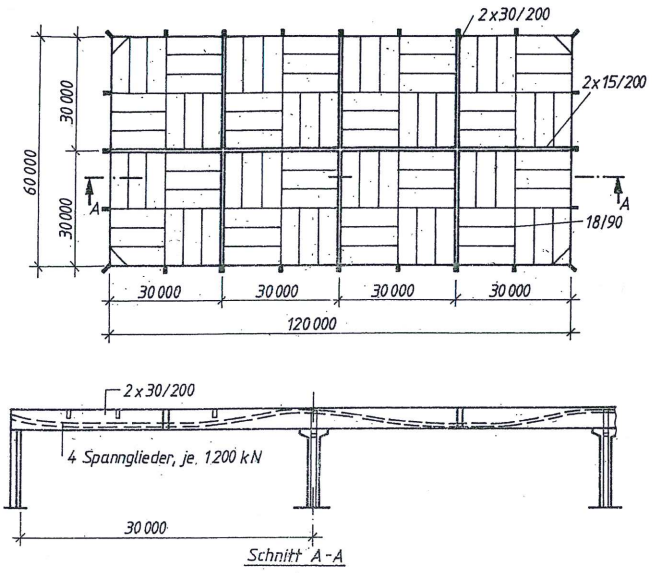
1 Zeichnung zum Patent Howe (1846)

Tabelle 1 Überblick über bisher durchgeführte Forschungsarbeiten

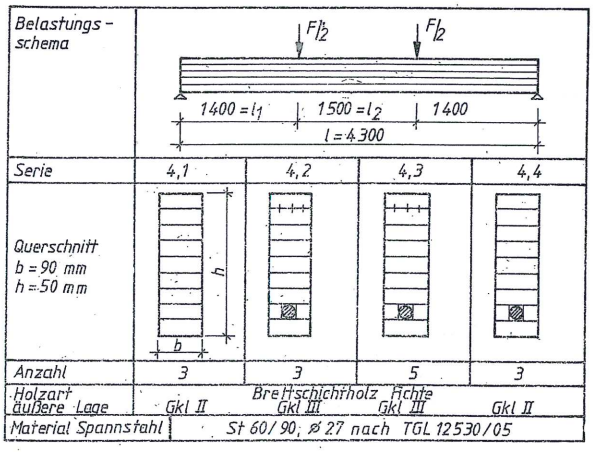
		Jahr	1955	1962	1964/66	1965	1965	1976	1978	1978/82	1980	1980	1980/81
		Autor/Land	Laskus BRD	Bohannan USA	Lantos GB	Bond GB	Peterson USA	Ganowiz VR Polen	Ganowiz VR Polen	Riedlbauer Österreich	Ganowiz u. a. VR Polen	Clifilan; Taylor GB	Genähr BRD
Ziel der Untersuchungen	Experimentelle Untersuchungen	Biegefestigkeit vorgespannter Träger (i. allg. aus Brettschichtholz)		▲	▲	▲[2]	▲[1]	▲	▲		▲	▲[2]	
		Einfluß der Reibung auf die Größe der Vorspannkraft							◐			◐	
		Einfluß zeitabhängiger Formänderungen auf die Größe der Vorspannkraft				○			◐				
		Dauerstandverhalten											
		äußere Einflüsse (Feuchte, Temperatur, dynamische Belastung)											
	Theoretische Untersuchungen	theoretische Analyse der experimentellen Ergebnisse		◐	○	◐	◐	◐	◐		◐	◐	
		Theorie vorgespannter Konstruktionen	▲[3]										▲
Untersuchte Materialien	Spannbewehrung	Stahl		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		GFK											
	Träger	Holz normaler Güte		■	■			■	■		■		
		Holz minderer Güte											
	Klebstoff	Epoxidharz[1]											
		Resorzinharz[1]											

[1] bei Vorspannung mit Verbund
[2] Versuche an Holzwerkstoffträgern
[3] vorgespannte Fachwerkträger

▲ Hauptthema
● umfangreiche Informationen
◐ wesentliche Informationen
○ nur am Rande erwähnt
■ untersuchtes Material



2 Messehalle in Klagenfurth/Österreich, 1976 errichtet



3 Querschnitt der Versuchsbalken und Belastungsschema

zum nicht vorgespannten Träger. Die Querschnitte der untersuchten Serien und das Lastschema für die Versuche zeigt Bild 3. Die Querschnittsgröße entsprach den Versuchsbalken, die bei gleichartigen Untersuchungen an bewehrten Balken gewählt wurde.

Während der Versuche wurden die Last-Durchbiegungs-Kurve, die Dehnungsverteilung über die Trägerhöhe sowie die Dehnungen und damit Spannungen des Spannstahls erfaßt. Untersucht wurden insgesamt 4 Serien mit jeweils 3 Balken (bei Serie 4.3. jedoch 5 Balken).

Die Träger erhielten ein Vorspannmoment, das 25 % des zulässigen Momentes eines nicht vorgespannten Balkens betrug (M_{V0} = 5,85 kNm). Vorgespannte Biegeträger ohne Verbund sind innerlich einfach statisch unbestimmte Tragwerke. Die mit der Kraftgrößenmethode ermittelbaren theoretischen Werte wurden den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt.

Ergebnis der Untersuchungen

1. Die Biegefestigkeit vorgespannter Träger (ohne Verbund) ist abhängig von der Größe des Vorspannmomentes. Sind die vorgespannten Balken zusätzlich bewehrt, so wird die Biegefestigkeit des weiteren beeinflußt von der Art des Bewehrungsmaterials und vom Bewehrungsanteil. Gegenüber nicht vorgespannten Trägern wurden die in Tabelle 2 angegebenen Festigkeiten erreicht.

Bei den vorgespannten Balken mit Bewehrung wurde die maximale Tragfähigkeit nicht erreicht, da 75 % aller Balken infolge Schubversagens der Klebefuge im Bereich der schlaffen Bewehrung zerbrachen.

Die zweithäufigste Bruchursache war das Versagen der Keilzinkenverbindung an der Zugseite. Obwohl die Zugspannung nur geringfügig den zulässigen Wert überschritt, versagte die Keilzinkenverbindung an der Zugseite. Die Druckspannungen hatten zu diesem Zeitpunkt die Proportionalitätsgrenze überschritten und lagen im Anfangsbereich des nicht mehr elastischen Teiles der Spannungs-Dehnungs-Kurve für Holz (vgl. Bild 4 mit Bild 5).

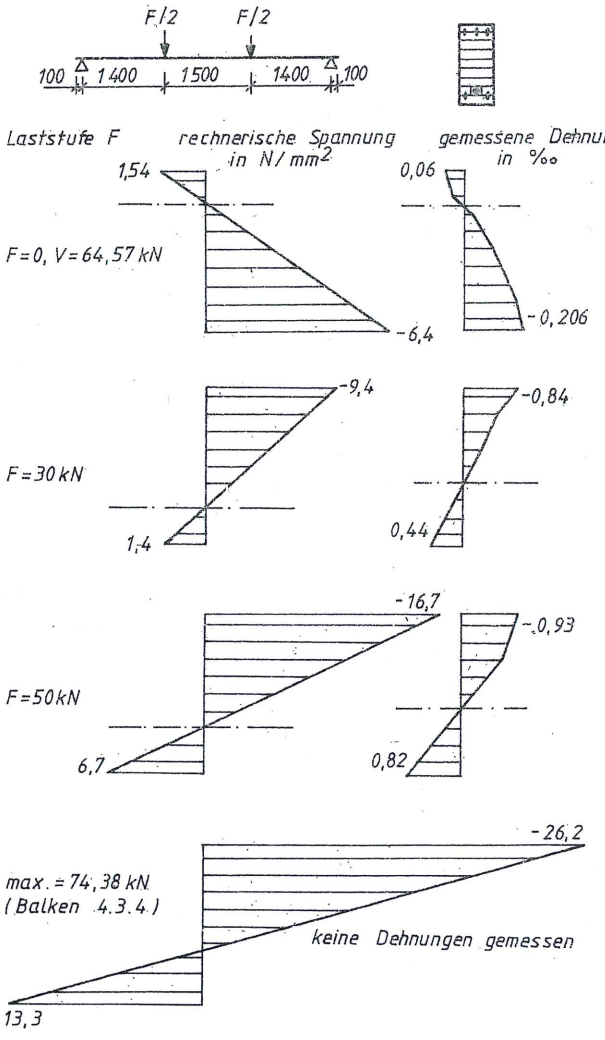
2. Die Last-Durchbiegungs-Kurven verlaufen linear bis zum Bruch. Die theoretischen Werte für die Durchbiegung und die Stahlspannungen liegen im allgemeinen höher als die gemessenen Werte. Die Abweichungen zwischen den theoretischen und experimentellen Werten für die Stahlspannung betragen 3 bis 7 %. Größere Abweichungen ergaben sich zwischen den theoretischen

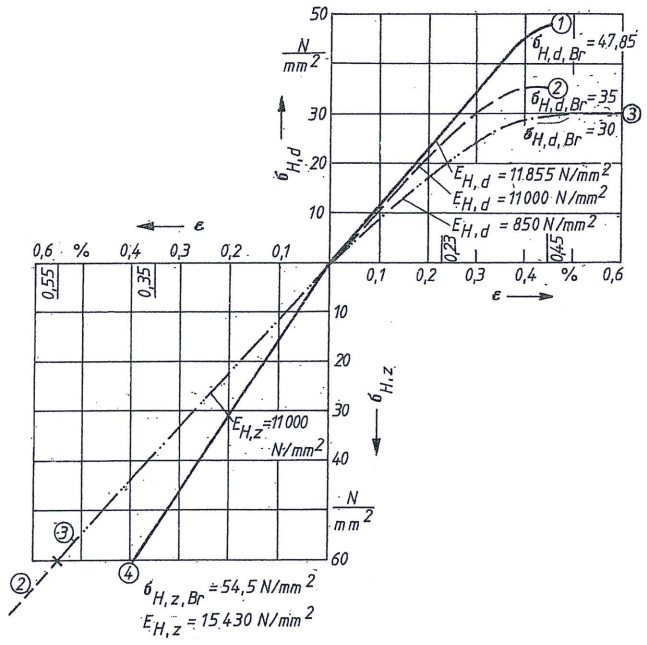
Tabelle 2 Vergleich der Tragfähigkeit vorgespannter Träger mit nicht vorgespannten Trägern

Balken	Spannstahl	Bewehrung	Bewehrungsanteil %	Festigkeit vorgespannter Träger im Vergleich zur Festigkeit der nicht vorgespannten Träger %
nicht vorgespannt		—	—	100
vorgespannt, bewehrte Druckseite	St 60/90	3 × F 40 St 140/160	0,46	115,3
vorgespannt, bewehrte Druck- und Zugseite	St 60/90	5 × F 40 St 140/160	0,77	*)
vorgespannt, ohne Bewehrung	St 60/90	—	—	120,1

*) Durch Fertigungsmängel beim Einkleben der schlaffen Bewehrung wurden nur geringe Festigkeitswerte erreicht.

4 Vergleich rechnerischer Spannungen mit gemessenen Dehnungen (Dehnungen = Mittelwerte aus 5 Balken in Serie 4.3.)





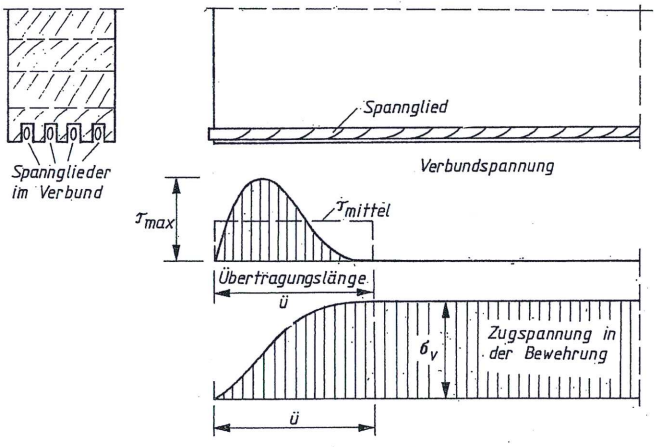
5 Spannungs-Dehnungs-Linien für Bau- und Brettschichtholz nach verschiedenen Versuchen

1 Spannungs-Dehnungs-Linie für Brettschichtholz nach Versuchen von Rug (Fichte, 35 Proben 90 × 90 × 300, Prüfbericht 82/249; Holzfeuchte u = 9,4 bis 10,7 %)

2 Spannungs-Dehnungs-Linie für Brettschichtholz nach Riedlbauer (idealisiert nach Versuchen von B. Hugh)

3 Spannungs-Dehnungs-Linie für Bauholz Gkl. II nach Versuchen von B. Hugh an 167 Prüfkörpern aus ausgesuchtem, fehlerfreiem österreichischem und jugoslawischem Fichtenholz (u = 13 bis 14 %)

4 Spannungs-Dehnungs-Linie für Brettschichtholz nach Versuchen von Rug (Fichte, 72 Proben, Prüfkörper nach DIN 52 188)



6 Spannungsverlauf nach Verbundverankerung (Spannbettvorspannung)

und experimentellen Werten für die Durchbiegungen, die darauf zurückzuführen sind, daß das Verhältnis E_H/G_H aus den Werten des gültigen Standards TGL 33 135 nicht den tatsächlichen Werten entspricht.

3. Die Festigkeitsstreuung liegt bei den vorgespannten Trägern mit Bewehrung über dem Wert für die nicht vorgespannten Balken ($v = 29\,\%$ und $27\,\%$ gegenüber $24{,}4\,\%$). Die Ursache hierfür bilden die häufigen Brüche infolge Schubversagens der Klebefuge. Bei den vorgespannten Trägern ohne Bewehrung ist im Vergleich zu den nicht vorgespannten Balken eine kleinere Festigkeitsstreuung feststellbar ($v = 20{,}2\,\%$ gegenüber $24{,}4\,\%$).

3. Tragverhalten vorgespannter Holzbalken mit Verbund zwischen Spannglied und Holz

Es wurden ebenfalls Brettschichtträger untersucht, deren Querschnittsabmessungen mit denen der bewehrten Versuchsträger ohne Verbund übereinstimmten.

In erster Variante sind als Spannglieder zwei aus Glasfaserroving gewickelte und mit Polyesterharz getränkte Stränge in gefräste Balkenelemente eingelegt worden. Bis zur Verbundherstellung durch Verguß mit gefülltem Polyesterharz wurden die Stränge gegen die Balkenenden gespannt. Nachteilig bei dieser Methode ist die aus der außermittigen Druckbelastung entstehende Balkenkrümmung, wodurch sich das gerade gespannte Bewehrungsbündel aus der Nut herausheben will. Diese Aufwölbung des Balkens kann durch Spannbettvorspannung vermieden werden, da der Balken bis zur Verbundherstellung spannungslos bleibt. Man erzielt aber nach dem Lösen der Spannverankerung infolge der dann erst einsetzenden Balkenverkürzung eine insgesamt geringere Vorspannung.

Weiterhin bereitet es Schwierigkeiten, die nackten Rovingstränge an den Bündelenden über Rollen zu verankern. Trotz der hohen Festigkeit der Einzelfaser besteht beim Spannen die Gefahr des unkontrollierten vorzeitigen Reißens einzelner Fäden, Rovingstränge oder dann sogar des ganzen Bündels.

Ein Spannbündel bestand aus 60 Einzelsträngen mit einem Glasgehalt von 144 g/m. Durch einen Drall von 3 bis 5/m wurde ein runder Strang von rd. 11 mm Durchmesser gebildet, der kurzzeitig (2 min) bis zu 25 kN belastbar war. Da aber bis zur Aushärtung und damit Verbundherstellung die Spannkraft über mehrere Stunden zu halten war, konnten nur 15 kN Spannkraft je Bündel realisiert werden.

Nach Entfernen der Spannvorrichtung sorgen Schubkräfte zwischen Spannglied und Holz für die Verankerung. Dabei entstehen an den Spanngliedenden in der Einleitungsstrecke hohe Spitzenwerte der Scherbeanspruchung, die sehr leicht zu einer örtlichen Überschreitung der Bruchgrenze führen. Dort sinkt dann die Scherspannung auf nahe Null ab, und der Spitzenwert verlagert sich weiter zur Balkenmitte (Bild 6). Im ungünstigen Fall kann es so fortschreitend zur totalen Verbundzerstörung und damit nicht nur zum Ausfall der Vorspannung führen, sondern auch zum Verlust der einfachen Bewehrung. Ähnliche Probleme kennt man auch im Spannbetonbau bei der Spannbettvorspannung.

Die Höhe des Verbundspannungsspitzenwertes hängt von den Elastizitätsmoduln der Fügeteile ab und wird beeinflußt von der Höhe der Vorspannkraft in Verbindung mit Spannungsüberlagerungen aus Verkehrslasten. Mit diesem Vorspannprinzip für Holzbalken gelingt es kaum, die erwünschten Vorspannkräfte bei guter Spannungsauslastung des Bewehrungsmaterials zu erzeugen. Die angestrebte Anwendung hochfesten Fasermaterials [5] ist also erst nach Lösung des Verbundproblems denkbar. Da der z. Z. noch extrem hohe Preis und das geringe Angebot des Materials den Einsatz nichtmetallischer Fasern als Spannbewehrung für Holzbalken vorerst ausschließen, konzentrieren sich die weiteren Untersuchungen auf den Einsatz hochfester Stähle.

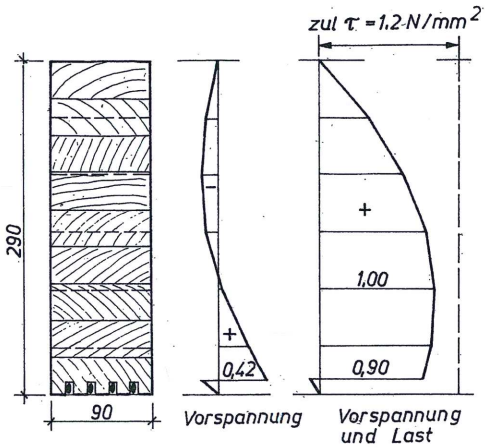
Die Anwendung von Spannstahl im Verbund mit Holz ohne besondere Endverankerungselemente ist bei Holzbalken nur möglich, wenn die aus der hohen Stahlvorspannkraft resultierenden Verbundspannungen in den Spanngliedern gezielt reduziert werden können. Durch eine vorgegebene stetige Spannkraftabnahme an den Spanngliedern erhält man eine größere Einleitungslänge und damit einen Ausgleich der Spannungsspitze.

Mit geraden Spanngliedern ist nach dem Spannbettverfahren oder durch Spannen gegen den Balken eine über die Spanngliedlänge veränderliche Spannkraft nicht zu erreichen.

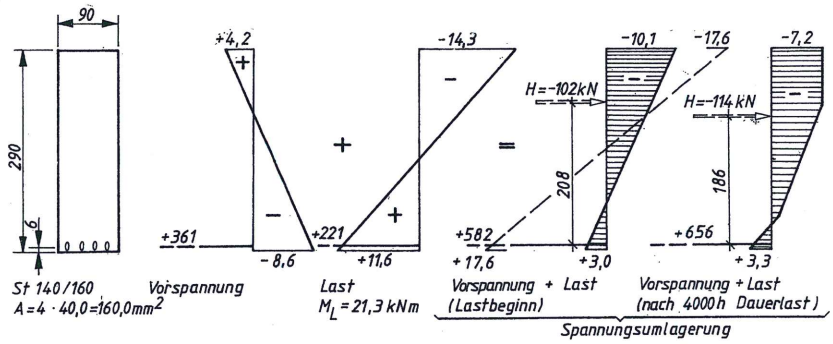
Innerhalb des Forschungsprojektes wurde ein Spannverfahren entwickelt, das mittels Querlasten vorzugsweise bei Holzbalken über die elastische Zug- und Druckstauchung die Vorspannung eines zunächst spannungslos eingelegten Bewehrungsstabes durch starren Verbund herbeiführt. Die Länge der Spannkrafteinleitungsstrecke kann dabei in Anpassung an die aufnehmbare oder gewünschte Scherspannung des Verbundes vorgewählt werden [6]. Da keine mechanischen Elemente zum Spannen oder Endverankern am Spannglied angreifen, können alle Arten vorgefertigter Bewehrungsstäbe, auch Stahlbleche oder bandförmige Rovinglaminate, als Spannbewehrung eingesetzt werden. Nach dieser Methode wurden im Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik vorgespannte Versuchsbalken mit 4,5 m und 6,5 m Länge gefertigt. Der Brettschichtquerschnitt 90 mm × 290 mm war mit 4 Spannstählen St 140/160, oval quergerippt, Einzelfläche 40,0 mm², bewehrt (Bild 7).

In Nuten der durch Querlasten vorgestauchten Zugzone des Balkens wurden die Stähle mit dem Verbundharz eingedrückt.

Zur Verbundherstellung kam bei den Versuchsbalken Kunstharz Epilox T 20-20 mit Härter DPTA (Härter 3) zur Anwendung. Als



7 Vorgespannter Brettschichtträger — Schubspannungsverteilung



8 Einfluß der Vorspannung auf die Spannungsverteilung im Querschnitt bei Dauerbelastung, Werte in N/mm²

Füllstoff wurden zu 100 g Harz jeweils 200 g Füllstoff in Form von Schiefermehl oder Quarzmehl gegeben (Verbrauch für 4 Stähle 150 g/m Balkenlänge). Nach Aushärtung entfernte man die Querlasten, so daß sich die Träger infolge ihrer Rückverformung selbst vorspannten.

Die Belastung der Träger erfolgte unter Kurzzeit- und Dauerlast. Zur Ermittlung des Langzeitverhaltens wurden zwei vorgespannte Brettschichtträger ($l = 6{,}5$ m) in einem überdachten Freibewitterungsstand eingesetzt und über je zwei Punkte mit angehängten Stahlbetongewichten (Belastungsmoment $M_{V0} = 21{,}28$ kN/m) belastet.

Ergebnis der Untersuchungen

1. Die an den Trägern gemessenen Spannungen, Dehnungen und Durchbiegungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den voraus berechneten Werten. Während des Spannvorganges wurden am unbewehrten Träger in Faserrichtung eine Holzstauchung bzw. Dehnung auf $\varepsilon = 3{,}0$ ‰ erzeugt. Aus Vorversuchen mit Brettschichtholz war bekannt, daß Bruchversagen erst oberhalb $\varepsilon = 4{,}0$ ‰ zu erwarten ist. Den nach der Verbundherstellung entstandenen Vorspannzustand zeigt Bild 8. Unter Belastung erreicht die Holzspannung in der Druckzone den zulässigen Grenzwert, wobei die Stahlspannung auf ≈ 630 N/mm² ansteigt und die Spanngliedkraft im Brettschichtträger $V \approx 100$ kN beträgt.

2. Die Verbundspannung in der Verbindung Spannstahl—Holz erreicht bei einer vorgegebenen 1,4 bis 1,9 m langen Einleitungszone, bezogen auf eine Vorspannkraft von $V = 100$ kN, nur $\tau = 0{,}7$ N/mm² bis 0,6 N/mm². Die Spannung liegt damit unter der für Holz in Faserrichtung zulässigen Scherspannung von $\tau = 0{,}9$ N/mm². Die durch Vorspannung im Holzquerschnitt entstehende Schubspannungsverteilung ist in Bild 7 dargestellt. Man erkennt, daß sich durch Vorspannung und erhöhte Last die Schubfläche, jedoch nicht der Spitzenwert der Schubspannung, vergrößert. Schwind- und Trockenrisse in Balkenlängsrichtung können aber bei vorgespannten Balken eine erhöhte Gefahr darstellen.

3. Bei einer Zwischenauswertung der Dauerstandversuche nach 5000 Laststunden zeigten die Träger keine Schädigung. Es wurden fortlaufend Spannungsmessungen an den Spannstählen und Durchbiegungsmessungen vorgenommen.

Besonders in der Anfangsphase der Dauerlast waren Durchbiegungszunahmen festzustellen, die auf Kriechumlagerungen im Holz hindeuten. Nach rd. 800 Laststunden ist eine relative Stabilisierung der Durchbiegung erkennbar. Danach entstehen sogar Hebungen der Balken offensichtlich durch Feuchtigkeitsaufnahme und Abkühlung der Träger in den Spätherbstmonaten (Bild 9).

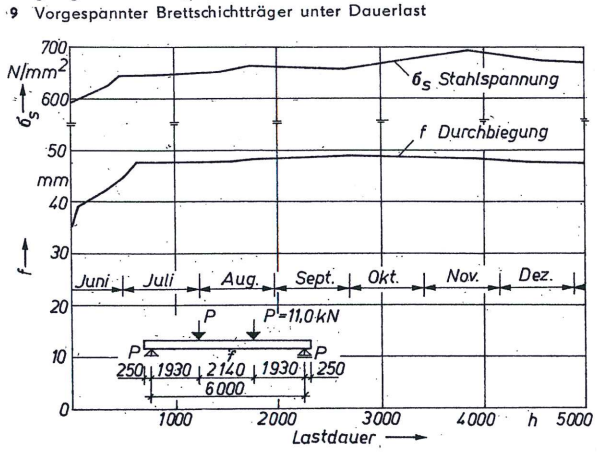
4. Unter Einwirkung der Dauerlast wurde insgesamt ein Anstieg der Stahlspannungen gemessen. Ähnlich wie bei der Durchbiegung erfolgte die stärkste Zunahme innerhalb der ersten 500 Laststunden. Bei konstantem Lastmoment ist diese nur mit einer Spannungsumlagerung im Holz erklärbar. Durch Abbau der Druckspannungsspitze in der Randfaser verlagert sich die Druckresultierende zum Stahlquerschnitt hin. Der somit kleiner gewordene Hebelarm der inneren Kräfte erfordert höhere Kräfte zur Aufnahme des äußeren Moments. Die in Bild 8 dargestellte Spannungsumlagerung nach 4000 h Lasteinwirkung zeigt trotz der Zunahme der resultierenden Holzdruckkraft bei tiefer liegendem Angriffspunkt eine deutliche Verringerung der Spannungsspitze. Dieser Spannungsausgleich über eine größere Querschnittshöhe führt zur Beruhigung der Kriechumlagerung, was auch die zur Ruhe kommenden Durchbiegungszunahmen des Tragsystems zeigen. Die in den Durchbiegungskurven beobachteten Hebungen während der Herbstmonate Oktober bis Dezember 1987 sind auf Feuchtigkeitsaufnahme und Abkühlung der Balken zurückzuführen. So errechnet sich für Dezember bei einer Abkühlung des Balkens um $\Delta t = 15$ °C aus der Differenz der Temperaturkoeffizienten eine relative Spanngliedverkürzung von $\varepsilon_{\perp t} = 0{,}06$ ‰ woraus sich eine Hebung in der Mitte des Tragsystems von $\approx 1{,}7$ mm ableiten läßt. Gemessen wurden aber nur 1,3 mm, da die Nebeneinflüsse infolge Kriechens und Feuchte nicht isoliert erfaßt werden können.

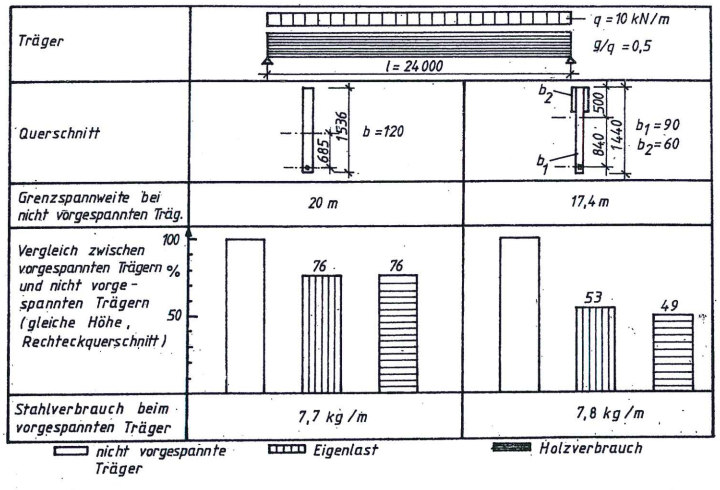
4. Ökonomie vorgespannter Holzträger

Durch die Vorspannung wird in den Trägern ein Eigenspannungszustand erzeugt, der in entscheidenden Bereichen den spä-

10 Vergleich der Eigenlast und des Holzverbrauches eines vorgespannten Brettschichtträgers gegenüber einem nicht vorgespannten Träger gleicher Höhe, Spannweite 24 m, q = 10 kN/m ▶

9 Vorgespannter Brettschichtträger unter Dauerlast





teren Spannungen aus den Verkehrslasten entgegengesetzt ist.

Damit wird der Arbeitsbereich der beanspruchten Querschnitte vergrößert, wodurch das Tragsystem in die Lage versetzt wird, bei gleichen Querschnittsabmessungen höhere Beanspruchungen aufzunehmen. Infolge der Vorspannung werden bei allen Belastungszuständen im Trägerquerschnitt vorwiegend Druckspannungen erzeugt, wobei große Querschnittsflächen in die Aufnahme der Druckspannungen einbezogen werden.

In diesem Sinne wirken sich auch noch die Spannungsumlagerungen bei Langzeitbelastung aus. Maßgebend für die Grenzlast sind bei vorgespannten Holzträgern nicht mehr die zulässigen Zugspannungen, sondern die Druckspannungen. Damit ergibt sich die Möglichkeit für den ökonomischen Einsatz von Brettschichtholz, das aus kurzen Brettlängen mit Keilzinkenstößen oder aus Holz geringerer Güte oder Festigkeit gefertigt ist. In der sonst kritischen Zugzone werden die Zugbelastungen im Holz gering gehalten, da die Bewehrung fast die gesamte Zugkraft übernimmt.

Auch die Schubbeanspruchung verteilt sich durch die Vorspannung gleichmäßiger über die Querschnittshöhe, so daß die Klebefugen der einzelnen Brettschichten durch die Schubspannungen gleichmäßiger beansprucht werden.

Der Holzverbrauch kann in Abhängigkeit von der Belastung und Querschnittsgestaltung zum Teil beträchtlich gesenkt werden (20 bis 50 %, s. Bild 10).

Der ökonomische Wirkungsgrad der Vorspannung von Holzkonstruktionen wird jedoch durch einen höheren Aufwand (zusätzliche hochfeste Materialien, Arbeitsaufwand bei der Herstellung) beeinflußt.

Berücksichtigt man beim ökonomischen Vergleich von speziellen Anwendungsfällen die zusätzlichen Aufwendungen, so liegt die Kosteneinsparung zwischen 10 bis 30 % gegenüber nicht vorgespannten Holzkonstruktionen.

Die Vorspannung ohne Verbund, die man auch als eine Variante der Unterspannung betrachten kann, erfordert Vorrichtungen zur Endverankerung der gedehnten Spannglieder. Für diese Vorspannmethode können Einstab- und Bündelspannglieder verwendet werden. Im Einleitungsbereich der Vorspannung sind zur Verhinderung von Querzugrissen im Holz i. allg. Verstärkungen notwendig.

Als Anwendungsgebiet für die Vorspannung ohne Verbund kann die Verstärkung bestehender Konstruktionen oder neuer Konstruktionen mit einer Spannweite $\geqq 18$ m gesehen werden.

Das Vorspannverfahren mit sofortigem Verbund ist besonders für die Vorfertigung von Spannbalken geeignet. Die Spannvorrichtung zur Querlasteinleitung ist einfach herstellbar und für alle Balkenlängen und Profile einsetzbar. Es ist auch die Formvorspannung nach vorgewählter Biegelinie in einer Pressenanlage möglich, wie sie bereits zur Verleimung der Brettschichtträger verwendet wird. Da keine Endverankerungselemente benötigt werden, können die verschiedensten hochfesten Materialien von Drähten bis zu Blechbändern und bandartigem Rovingmaterial als Spannglieder zur Anwendung kommen.

Anzustreben sind Materialien mit großem Elastizitätsmodul und hoher Zugfestigkeit.

Die hochtragfähigen Kohlenstoffasern und die Aramidfasern können z. Z. aus Kostengründen für Holzkonstruktionen nicht verwendet werden. Der Einsatz von Rovingmaterial auf Glasfaserbasis zur Vorspannung ist möglich. Da der praktisch nutzbare Elastizitätsmodul nur das rd. 4fache gegenüber Holz beträgt, ergeben sich nur geringe Vorspannwirkungen (17 bis 25 % Traglasterhöhung). Ein Einsatz ist gegebenenfalls im Bereich aggressiver Medien vorteilhaft.

Vergüteter Spannstahl, wie St 140/160 oval gerippt, hat die geforderten Eigenschaften, steht zur Verfügung und kann in gefräste Balkennute mit Kunstharzmörtel gut eingeklebt werden. Durch eine nachträglich aufgeklebte Decklage können der Korrosionsschutz, die Feuersicherheit und auch das ästhetische Bild der Konstruktion verbessert werden.

Die Zusammensetzung der Füllstoffe und deren Menge ist bisher nicht optimiert worden. Es könnte mit größerem Kornzuschlag noch eine weitere Abmagerung des Mörtels erreicht werden.

(Fortsetzung auf Seite 257)

Kraftkissen – eine Alternative zum hydraulischen Heber

Bauing. Wilfried Rössing,
Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau

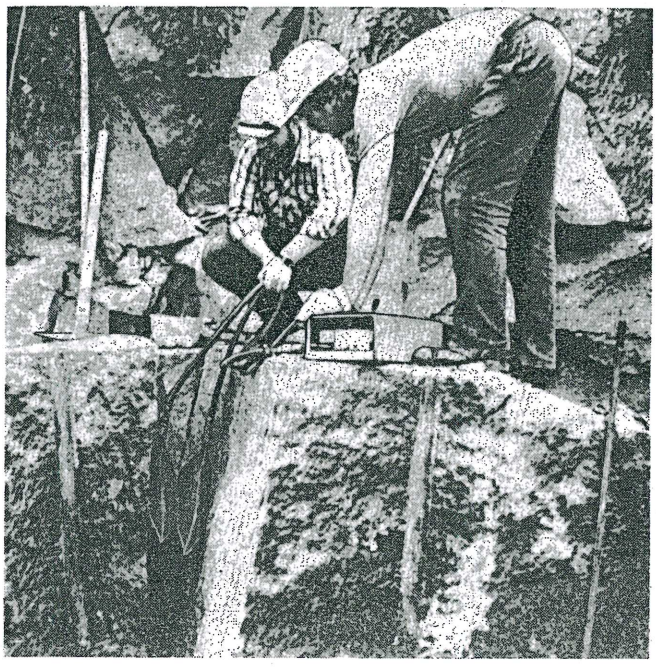
Allgemeines

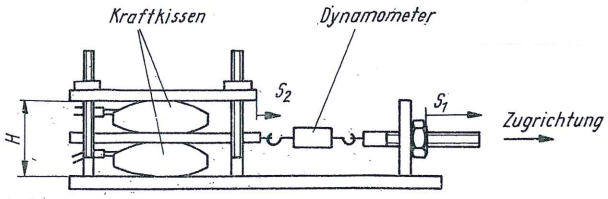
Wird eine Membran, also eine biegeweiche lediglich auf Zug beanspruchte Haut, durch die Druckdifferenz gasförmiger Medien, im Normalfall Luft, gespannt, so entsteht ein pneumatisches Gebilde. Die Membran krümmt sich in Richtung des weniger dichten Mediums und wird dadurch flächig in ihrer Lage und Form stabilisiert. Jede pneumatisch gespannte Membrane ist in der Lage, äußere Kräfte aufzunehmen. Bei Inanspruchnahme dieser Fähigkeit wird das sich spannende Medium zum Stützmedium und damit zum Konstruktionselement [1]. Dieses Prinzip wurde bei der Entwicklung von Kraftkissen zum Heben, Pressen, Klemmen und Drücken ausgenutzt.
Kraftkissen sind mit Druckluft aufblasbare Körper aus äußerst widerstandsfähigen Membranmaterialien der Reifenindustrie. Der Einsatz von Kraftkissen reduziert den technischen Aufwand durch Verzicht auf Krane oder hydraulische Hubtechnik bzw. bei geringer Bewegungsfreiheit wesentlich.

Einsatzgebiete

Kraftkissen können z. B. für Aufgaben im Bauwesen, im Bergbau, in der Industrie und im Zivilschutz angewendet werden. Von der Lebensrettung bis zu täglichen Wartungsproblemen sind Kraftkissen die Lösung bei schwierigen Hebeproblemen, wenn andere

1 Abdrücken von Felsblöcken im Steintagebau





2 Schema Versuchsaufbau
S_1, S_2 Verschiebungsgrößen
H Plattenabstand

Tabelle 1 Technische Daten

Kraftkissentyp		I	II	III	IV	V
Maximale Hubkraft	kN	96	140	180	270	670
Größe	mm	370×370	370×520	520×520	370×1020	950×950
Maximale Hubhöhe	mm	200	230	280	230	520
Zulässiger Betriebsdruck	MPa	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Tabelle 2 Thermische Beanspruchung eines Kraftkissens

Versuchs-Nr.	Oberflächentemperatur °C	Einwirkzeit s	Ergebnis
1	≈300	330	keine Veränderung der Oberfläche und des Arbeitsdruckes
2	≧330	420	Oberfläche des Kraftkissens zersetzt sich; sonst keine Veränderungen
3	330 bis 356	600	obere Gummischicht hat sich abgehoben; Arbeitsdruck bleibt konstant

Hebegeräte versagen. In Bild 1 ist der Einsatz von Kraftkissen im Steintagebau zum Abdrücken von Felsblöcken dargestellt. Die technischen Daten verschiedener Kraftkissentypen enthält Tabelle 1.

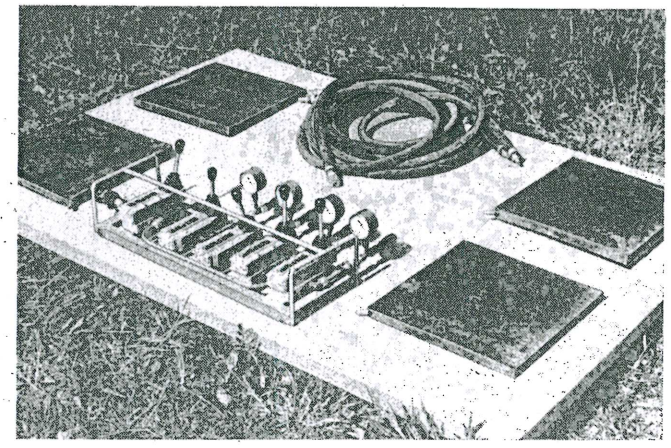
Vorteile

Kraftkissen arbeiten mit Druckluft aus unterschiedlichen Druckluftquellen, z. B. Baustellenkompressor, Druckluftflasche u. a. Sie sind extrem flach und benötigen nur eine Einschubhöhe von 25 mm. Lasten können in wenigen Sekunden gehoben werden. Kraftkissen erzeugen nur eine geringe Bodenbelastung von 0,8 N/mm². Sie heben sowohl auf unebenem Untergrund als auch in Schräglagen und sind unempfindlich gegen Schmutz und Staub. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der leichten Arbeitsweise und der geringen Masse.

Thermische Beanspruchung

Um die Beständigkeit des Kissenmaterials gegenüber thermischer Beanspruchung zu testen, wurden Erwärmungsversuche durchgeführt. Dazu drückte man Probestücke des Materials auf eine Stahlplatte mit in Stufen variierbarer Oberflächentemperatur. Ein Kraftkissen wurde zusammen mit der heißen Stahlplatte in die Prüfvorrichtung eingelegt und mit dem Betriebsdruck beaufschlagt. Die Ergebnisse dieses Versuches enthält Tabelle 2. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß unter Einwirkung von Temperaturen bis + 300 °C und kurzen Belastungszeiten keine Veränderungen oder Beschädigungen des Materials auftraten. Oberhalb dieser Temperatur wurde eine starke Verringerung der Haftreibung zwischen Kraftkissen und heißen Anlegeflächen infolge Zersetzung des Gummis beobachtet, ohne daß es zu Druckänderungen kam.

3 System Kraftkissen



Formstabilität bei Einwirkung von Tangentialkräften

Bild 2 zeigt den Versuchsaufbau zur Ermittlung der Formstabilität bei Einwirkung von Tangentialkräften an zwei Kraftkissen des Typs I. Beide Kraftkissen befanden sich zwischen zwei Stahlplatten, deren Abstand H auf die Werte 400 mm, 350 mm, 300 mm, 250 mm und 200 mm eingestellt wurde. Die Aufblashöhe der einzelnen Kissen betrug also rd. $H/2$. Die Tangentialkraft wurde über eine zwischen den Kraftkissen liegende Stahlplatte eingeleitet und mit Hilfe eines Dynamometers gemessen.
Der Arbeitsdruck betrug 0,6 MPa. Gemessen wurde bei eingeleiteten Tangentialkräften (Zugkraft) von 0,5 kN bis 3 kN. Die Auswertung der Versuche brachte folgende Ergebnisse:
Je geringer die Aufblashöhe der Kraftkissen, desto größer ist ihre Formstabilität gegenüber Seitenkräften. Eine Drehung der Kraftkissen war erst bei einem Plattenabstand > 350 mm (Kraftkissenhöhe rd. 170 mm) und Tangentialkräften > 2 kN zu erkennen. Mechanische Zerstörungen konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Liefermöglichkeiten

Kraftkissen sind einzeln oder in kompletten Sätzen (Bild 3) erhältlich. Der komplette Satz besteht aus einem System Kraftkissen (Typ I, II, III, IV oder V) mit pneumatischer Steuereinheit, Druckluftschläuchen und Pneumatikschnellschlußkupplungen. Weitergehende Informationen erhalten sie bei:
Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau, Bereich Rekonstruktion, Plauener Straße 163–165, Berlin, 1092, Telefon 2 23 94 76.

Literatur

[1] *Herzog, Th.:* Pneumatische Konstruktionen; Bauten aus Membranen und Luft. Verlag Gerd Hatje, Stuttgart 1976.

(Fortsetzung von Seite 256)

5. Ausblick

Nach Abschluß der Grundlagenforschung konzentrieren sich die weiteren Arbeiten auf folgende Schwerpunkte:
- Vorbereitung der praktischen Anwendung der Erkenntnisse durch Bereitstellung der ingenieurtheoretischen Grundlagen, einschließlich der Einarbeitung in den künftigen Holzbaustandard
- technologisch-konstruktive Untersuchungen im Hinblick auf die Herausarbeitung ökonomisch sinnvoller Anwendungsbereiche
- weitere Erprobung des Vorspannprinzips bei neuen Konstruktionen und bei der Verstärkung alter Holzkonstruktionen.

Literatur

[1] *Rug, W.:* Höherveredlung von Holzkonstruktionen durch Anwendung neuer Erkenntnisse der Grundlagenforschung. Bauplanung – Bautechnik 40 (1986) 2, S. 68–71.
[2] *Rug, W.:* Bewehrte und vorgespannte Holzkonstruktionen – Ein Beitrag zur höheren Veredlung des Baustoffes Holz und zur Weiterentwicklung des Ingenieurholzbaus. Bauakademie der DDR, Dissertation A, Berlin 1986.
[3] *Kreißig, W.; Rug, W.:* Errichtung einer Förderbrücke in Holzklebebauweise. Bauplanung – Bautechnik (1984) 3, S. 115–117 und S. 120.
[4] *Rug, W.:* Die Anwendung des Vorspannprinzips im Ingenieurholzbau. In: Rekonstruktion im VEB Chemiekombinat Bitterfeld, Bitterfeld/Berlin 1984. Bauinformation, Berlin 1984.
[5] *Gropper, H.; Gabrich, K.:* Zur Verankerung von Faserbündeln und Stahldrahtseilen in Stahlhülsen mit Kunstharzverguß. Bauingenieur, Berlin [West] 62 (1987) 7, S. 293–304.
[6] Patentschrift: Vorspannverfahren für Tragelemente aus elastischen Baumaterialien, WT E 04 C/300 1855.