

Reduzierung der Rißbildung bei
Knoten-Anschlüssen im Holzbau durch
aufgeleimte Baufurnierplatten

T 2280

T 2280

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

REDUZIERUNG DER RISSBILDUNG BEI KNOTEN-ANSCHLÜSSEN
IM HOLZBAU DURCH AUFGELEIMTE BAUFURNIERPLATTEN

FORSCHUNGSVORHABEN

14-36011

DURCHGEFÜHRT IM AUFTRAG DER ENTWICKLUNGSGEMEINSCHAFT HOLZ-
BAU (EGH) IN DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR HOLZFOR-
SCHUNG E.V. (DGFH) E-84/28

FÖRDERUNG: INSTITUT FÜR BAUTECHNIK, BERLIN

VON

SIMON AICHER

FORSCHUNGS- UND MATERIALPRÜFUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG
ABTEILUNG I - BAUSTOFFE
REFERAT 14 - HOLZ, HOLZWERKSTOFFE, HOLZBAU, HOLZSCHUTZ
STUTT GART

Dez. 1990

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	2
3. Rechnerische Untersuchungen	4
3.1 Vorbemerkungen	4
3.2 Elastizitätsbeziehungen feuchtebeanspruchter 2-, 3-dimensional orthotroper Körper	6
3.3 Zugrundegelegte Elastizitätswerte	8
3.3.1 Brettschichtholz (BSH-)Träger	8
3.3.2 Bau-Furniersperrholz (BFU-BU-)Bepankung	9
3.3.3 Leimfuge BSH/BFU	10
3.4 Feuchtedehnungskoeffizienten	12
3.4.1 Brettschichtholz (BSH-)Träger	12
3.4.2 Bau-Furniersperrholz (BFU-BU-) Bepankung	13
3.5 Annahmen zur Feuchteverteilung	13
3.6 FE-berechnete Spannungs-, Dehnungsverläufe	15
3.6.1 Allgemeines	15
3.6.2 Einfluß des BSH-Querschnittsverhältnisses η	16
3.6.3 Spannungen σ_y	17
3.6.3.1 Spannungsverläufe über die Querschnittsbreite	17
3.6.3.2 Spannungsverläufe über die Trägerhöhe	18
3.6.3.3 Spannungsverläufe in Trägerlängsrichtung	19
3.6.4 Dehnungen ϵ_y	19
3.6.4.1 Dehnungsverläufe über die Trägerhöhe	19
3.6.4.2 Dehnungsverläufe in Trägerlängsrichtung	20

	Seite	
3.7	Einfluß der Beplankungs- und Brettschicht- holzparameter b , t , E_y , η auf die mittleren Dehnungs- und Spannungswerte	21
3.7.1	BSH-Randdehnungen ε_y ; Bestimmungsgleichung für die beplankungsbedingte Dehnungsreduktion	21
3.7.2	BFU-Spannungen σ_y ; Bestimmungsgleichung für die Beplankungsspannungen	24
3.7.3	BSH-Randspannungen σ_y	28
4.	Experimentelle Untersuchungen	29
4.1	Versuchsmaterial	29
4.1.1	Brettschichtholz	29
4.1.2	Bau-Furniersperrholz aus Buche	29
4.2	Prüfkörper	30
4.3	Allgemeines zu den Dehnungs- und Feuchte- messungen	32
4.4	Klimastufen, Versuchsablauf	33
4.5	Versuchsergebnisse	34
4.5.1	Feuchteverteilungen	34
4.5.2	Dehnungsverteilungen	38
4.5.3	Rißverteilungen	41
4.5.3.1	Allgemeines	41
4.5.3.2	Unbeplankter Prüfkörper III	42
4.5.3.3	Beplankter Prüfkörper Ia	44
4.5.3.4	Beplankter Prüfkörper Ib	45
4.5.3.5	Beplankter Prüfkörper II	46
5.	Zusammenfassung	47
6.	Literatur	51

1. Einleitung

Das seitliche Aufkleben von Bau-Furniersperrholz(BFU)-Platten aus Buche (BU) auf Brettschichtholz(BSH)-Träger mittels Nagelpreßleimung für eine Reihe planmäßiger Verstärkungsmaßnahmen und für Sanierungen ist heute Stand der Technik. Im Vordergrund der planmäßigen Verstärkungsmaßnahmen stehen Aufdopplungen von BSH-Trägern im Bereich von Auflagerausklinkungen und Durchbrüchen, bei Rahmenecken und keilgezinkten abgewinkelten Stoßbereichen. Bei Sanierungen mit aufgeklebten Bau-Furniersperrholz-Platten handelt es sich i.d.R. um die Wiederherstellung der Tragfähigkeit von Konstruktionen mit schub- oder querszugbedingten Rissen, die häufig durch klimatische Einwirkungen verstärkt oder ausgelöst werden.

Im Bereich von Holzbaustößen bieten sich aufgeklebte BFU-Platten zur Kompensation von Fehlflächen und zur Erhöhung der Lochleibungsfestigkeiten bei Verwendung mechanischer Verbindungsmittel an. Darüberhinaus läßt sich durch derartige Knotenverstärkungen die Rißentwicklung, ausgehend von den Verbindungsmittelbohrungen - infolge der starken Behinderung von Schwind-, Quellbewegungen - deutlich vermindern. Die Problematik der Behinderung klimabedingter Verformungen und dadurch verursachter Rißentwicklung ergibt sich ebenso bei Anschlüssen mit innenliegenden eingeklebten Blechen, die z.Z. an der FMPA unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimabeanspruchung untersucht werden.

Bei einer Reihe der genannten Anwendungsfälle mit seitlich aufgeklebten BFU-Platten wurde das Tragverhalten der Verstärkungen und der Leimflächen bei Einwirkungen schwergewichtsbedingter Lasten eingehend untersucht und ist für BFU- BU-verstärkte Ausklinkungen und Durchbrüche verbindlich in DIN 1052 geregelt.

Einschränkend ist zum heutigen Kenntnisstand bezüglich des Aufklebens von Bau-Furniersperrholz-Platten auf Brettschichtholzträger anzumerken, daß die Auswirkungen der aufgeklebten Platten auf das Spannungs-, Verformungs- und Rißverhalten der verstärkten Träger und deren Beplankungen bei Klimabeanspruchung weitgehend unbekannt sind. Desgleichen gibt die Literatur nur unzureichend Aufschluß darüber, in welchem Maß aufgeklebte BFU-BU-Platten die Schwind-, Quellbewegungen klimabeanspruchter BSH-Träger reduzieren und welche Plattenabmessungen und -eigenschaften für bestimmte Dehnungsbehinderungen klimatisch hoch beanspruchter Trägerabschnitte erforderlich sind. Das Schrifttum beinhaltet auch nahezu keine Angaben darüber, in wie weit aufgeklebte Bau-Furniersperrholz-Platten das Weiterreißen trockenungsbedingter Risse in Trägerlängsrichtung unterbinden und welches Abklingverhalten der Aufdopplungszwängungen zu den benachbarten unbeplankten Bereichen vorliegt.

In Anbetracht der generell weitgehend ungeklärten Verhältnisse bei Klimabeanspruchung sperrholzbeplankter Brettschichtholz-Konstruktionen wurden die theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur Schwind-, Quell- und Rißbehinderung vor BSH-Trägern durch aufgeklebte BFU-BU-Platten in Abstimmung mit der begleitenden Arbeitsgruppe unter Ausklammerung spezifischer Stoßausbildungen und Trägerstirnflächeneinflüsse durchgeführt.

2. Literaturübersicht

Gehäuft aufgetretene Schadensfälle an Brettschichtholz-Konstruktionen in Form faserparalleler, schwindbedingter Risse infolge Trocknung gaben Anlaß zu einer grundlegenden theoretischen Arbeit über rißverursachende Eigenspannungszustände bei stark klimabeanspruchten unbeplankten Brettschichtholzträgern (Krabbe, 1976). Grundlegend für die

Thematik - Rißbildung in Brettschichtholz infolge Klimabeanspruchung - waren desweiteren die theoretischen und umfangreichen experimentellen Arbeiten von Möhler und Steck (1980). Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde geklärt, welche Querschnittsfeuchteverteilungen bzw. welche hiermit verbundenen Spannungsdifferenzen zu Oberflächenrissen bei unbeplankten BSH-Querschnitten führen und ebenso, in wieweit Feuchteschutzanstriche die Rißbildung vermindern oder ganz verhindern können.

Wünsche und Erfordernisse der Baupraxis dahingehend, Verstärkungsmaßnahmen an durchbrochenen und ausgeklinkten Brettschichtholzträgern mittels Bau-Furniersperrholz-Platten aus Buche vorzunehmen, führten zu Untersuchungen von Kolb und Frech (1979) über das Festigkeitsverhalten von Leimverbindungen zwischen Bau-furnierplatten und Brettschichtholz. Ein Großteil der Versuche wurde mit einer extremen, zyklisch wiederholten Wechselbeanspruchung - 3 Tage Wasserlagerung und anschließende 4tägige Trocknung bei 40°C - durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben u.a. eine hohe Zuverlässigkeit einer sachgemäß ausgeführten Sperrholz-Brettschichtholzverleimung, eine deutliche Dehnungs- und Rißbehinderung der beplankten Bereiche und Vorteile einer faserparallelen Verklebung zwischen Sperrholzdeckfurnier und Brettschichtholz. Quantitative Schlußfolgerungen betreffend Dehnungsreduzierungen und Beplankungsspannungen bei realistischen Klimabedingungen gehörten nicht zur Zielsetzung des Forschungsvorhabens.

Die Eignung seitlich mittels Nagelpreßleimung aufgeklebter Bau-Furniersperrholz-Platten zur Verstärkung bzw. Sanierung infolge Schub oder Querkraft gerissener Brettschichtholzträger wurde erstmalig eingehend von Möhler und Rathfelder (1979) untersucht. In dem Forschungsvorhaben wurden Details der konstruktiven Ausführung und Bemessungsgleichungen für die erforderlichen Furnierplatten- und Leimflächenabmessungen erarbeitet. Einen weiteren Beitrag zur universellen Leistungsfähigkeit seitlich mittels Nagelpreßleimung

aufgeklebter Bau-Furniersperrholz-Platten für eine sichere Verstärkung querzugbeanspruchter BSH-Träger lieferte die Arbeit von Möhler u. Siebert (1984) über abgeknickte, keilgezinkte Stoßbereiche mit positivem Biegemoment an der einspringenden Ecke. Die durchgeführten Versuche zeigten, daß beidseitig aufgeleimte BFU-Platten gegenüber eingeleimten Gewindestangen eine wesentlich zuverlässigere Verstärkungsmaßnahme darstellen.

Im Zusammenhang mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben sind auch die Untersuchungen von Steck (1985) über den Abbau von Eigenspannungen aus Feuchteänderungen bei Brettschichtholz durch Sägeschnitte, zum Relaxationsverhalten sowie zur Wirksamkeit unterschiedlicher Feuchteschutzmittel zu nennen. Die im experimentellen Teil der genannten Arbeit vorgenommenen Versuche ergaben bei Prüfkörpern mit seitlich 1,5 cm tief und ca. 4 mm breit, faserparallel eingesägten Schlitzen im Vergleich zu ungeschlitzten Prüfkörpern durchweg geringere Rißbildungen bei Trockenklimabeanspruchung.

3. Rechnerische Untersuchungen

3.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen der rechnerischen, schwerpunktmäßig unter Verwendung der Finite Element Methode durchgeführten Arbeiten wurde versucht, die Spannungs-Verzerrungsverhältnisse sperrholzbeplankter Brettschichtträger bei Klimabeanspruchung in Abhängigkeit von einigen wesentlichen Parametern aufzuzeigen und formelmäßige Beziehungen für die beplankungsbedingten Dehnungsbehinderungen sowie die Beplankungsspannungen herzuleiten.

Um Überschaubarkeit und Praxisrelevanz der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden für die Elastizitätseigenschaften des Brettschichtholzes und des Bau-Furniersperrholzes aus Buche - soweit genormt - die in DIN 1052 festgelegten Werte angesetzt; die Auswirkungen hiervon abweichender Werte werden diskutiert. Die variierten Berechnungsparameter sind auf der Brettschichtholzseite das Trägerquerschnittsverhältnis und auf der Beplankungsseite der Schichtaufbau der Sperrholzplatten und damit die E-Moduln in Plattenebene, die Plattendicke und die Breite der Beplankung in Trägerlängsrichtung. Es wurden beidseitige, über die gesamte Trägerhöhe reichende Beplankungen mit Deckfurnierfaserverlauf parallel zur Trägerachse angenommen.

Unter Klimabeanspruchung wurden ausschließlich Änderungen des Feuchtegehalts unterschiedlicher Querschnittsbereiche verstanden. Die textlichen Ausführungen und die Vorzeichen der hergeleiteten Gleichungen gehen durchweg von einer für die Rißbildung relevanten Trockenklimateanspruchung mit niedrigeren Holzfeuchten in den Querschnittsrandbereichen im Vergleich zum Querschnittsinneren aus. Mit umgekehrten Vorzeichen beschreiben die hergeleiteten Ergebnisse den Fall der Feuchtklimateanspruchung.

In den FE-Berechnungen wurden für alle Materialien - Brettschichtholz, Leimfuge, Buchensperrholz - stark vereinfachend, linear elastische Werkstoffgesetze unterstellt. Für wirklichkeitsnähere Berechnungen der Spannungsverteilungen zufolge der zeitabhängigen Feuchteänderungen über den Querschnitt wäre vor allem eine zutreffendere Berücksichtigung des Materialkriech - und insbesondere Relaxationsverhaltens erforderlich, was den vorgegebenen Rahmen der Untersuchungen deutlich überstieg. Das Relaxationsverhalten wurde näherungsweise durch den Ansatz des pauschalen Abminderungsfaktors 0,5 bei den Feuchtedehnungskoeffizienten berücksichtigt, womit jedoch nicht der gesamte Spannungsabbau erfaßt wird (Steck, 1985; Möhler u. Maier, 1970). Für wünschenswerte bruchmechanische Berechnungen zur Rißentwicklung bzw. zum Rißfortschritt galten ebenfalls die genannten Einschränkungen.

Ungeachtet einer Reihe vereinfachender Berechnungsannahmen wurden die Ergebnisse durch die experimentellen Untersuchungen qualitativ und quantitativ weitgehend bestätigt.

3.2 Elastizitätsbeziehungen feuchtebeanspruchter 2-, 3-dimensional orthotroper Körper

BSH-Träger und Sperrholzplatten sind als rhombisch orthotrope Körper anzusehen. Der Verzerrungstensor derartiger Kontinua mit konstanten Feuchtedehnungskoeffizienten α_i , die außer durch äußere Lasten auch durch Änderungen des Feuchtezustandes Δu beansprucht sind, lautet (bei doppelten Schubwinkeln entsprechend technischer Notation)

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{xz}}{E_z} \sigma_z + \alpha_x \Delta u$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{yz}}{E_z} \sigma_z + \alpha_y \Delta u$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\nu_{zx}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{zy}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z + \alpha_z \Delta u \quad (1 a - f)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\tau_{xz}}{G_{xz}}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\tau_{yz}}{G_{yz}}$$

Geschlossene Lösungen für die (Eigen-)Spannungen σ_{ij} ($i, j = x, y, z, \sigma_{ij} = \sigma_j$) ausgehend von den Gleichungen (1) sind im räumlichen Fall im allgemeinen kaum möglich. Diese sind auch für ebene Probleme noch sehr aufwendig, obgleich das Elastizitätsgesetz (1) dann durch eine einzige Differentialgleichung beschreibbar ist.

Für das ebene Problem in der x, y -Ebene ($\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = \alpha_z = 0$) erhält man durch Einsetzen der Gleichungen (1a, b, d) in die Kompatibilitätsbedingung

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (2)$$

und mittels der Spannungsfunktion $F = F(x, y)$, die den Beziehungen

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \sigma_y, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \sigma_x, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\tau_{xy} \quad (3)$$

genügt, die inhomogene DGL. 4ter Ord. (vgl. Krabbe 1976)

$$\frac{1}{E_x} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} + 2 \left(\frac{1}{2G_{xy}} - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \right) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_y} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} = - \left(\alpha_x \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial y^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial x^2} \right). \quad (4)$$

Die Elastizitätsbeziehungen (1) und (4) wurden hier mittels der FEM gelöst.

3.3 Zugrundegelegte Elastizitätswerte

3.3.1 Brettschichtholz (BSH-)Träger

Eine Differenzierung zwischen radialen und tangentialen Elastizitätseigenschaften in der xy-Hirnholzebene (vgl. Bild 1, Beilage 1) ist im Hinblick auf allgemein gültige Aussagen nicht sinnvoll. In diesem Sinne wurde für die Elastizitätsgrößen $E_x = E_y$, E_z , $G_{xz} = G_{yz}$ DIN 1052 zugrundegelegt. Der Schubmodul der Hirnholzebene und die Querkontraktionszahlen wurden nach Hörig (1935), Krabbe (1960) und Neuhaus (1981) für den Holzfeuchtebereich $u \sim 9... 13\%$ zu $G_{xy} = 40 \text{ N/mm}^2$, $\nu_{xy} = \nu_{yx} = (\nu_{rt} + \nu_{tr})/2 = 0,38$, $\nu_{xz} = \nu_{yz} = (\nu_{tl} + \nu_{rl})/2 = 0,45$ angenommen (bzgl. $\nu_{zx} = \nu_{zy}$ vgl. nachfolgend). Mit den vorstehenden Festlegungen erhält man entsprechend den Gleichungen (1) die den Berechnungen zugrundegelegte Elastizitätskoeffizientenmatrix (5); die "kleineren" Querkontraktionszahlen $\nu_{zx} = \nu_{zy} = (\nu_{lt} + \nu_{lr})/2 = 0,01$ sind durch die Matrixsymmetrie festgelegt.

$$\begin{bmatrix}
 \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & & & \\
 -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_z} & & & \\
 -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & -\frac{\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & & & \\
 & & & \frac{1}{G_{xy}} & & \\
 & & & & \frac{1}{G_{xz}} & \\
 & & & & & \frac{1}{G_{yz}}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \frac{1}{300} & -\frac{0,38}{300} & -\frac{0,45}{11000} & & & \\
 \frac{0,38}{300} & \frac{1}{300} & -\frac{0,45}{11000} & & & \\
 \frac{0,01}{300} & -\frac{0,01}{300} & \frac{1}{11000} & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & &
 \end{bmatrix}
 \quad (5)$$

Vergleichsrechnungen zeigten, daß sich Änderungen bei Größen mit den Indices x bzw. z nur unwesentlich auf die Ergebnisse auswirken, während Änderungen des E_y -Moduls von erheblichem Einfluß sind (Steck 1985). Der E_y -Wert geht etwa linear in die Eigenspannungsgrößen des unbeplankten und beplankten Querschnitts ein. Die Feuchteabhängigkeit aller Elastizitätsgrößen, insbesondere des E_y -Moduls, entsprechend dem angenommenen Feuchteprofil wurde nicht berücksichtigt. Die hiermit verbundenen Zwängungseinflüsse sind zum einen eher gering, und andererseits wäre hiermit zu Lasten der Allgemeingültigkeit die Festlegung absoluter Feuchtedifferenzen notwendig.

3.3.2 Bau-Furniersperrholz (BFU-BU-)Beplankung

Die Elastizitätsmoduln in der yz-Plattenebene, vgl. Bild 1, wurden entsprechend Beiblatt 1 zu DIN 68705 Teil 5 abhängig vom Aufbaufaktor δ_m zu $E_y = \bar{E} (1 - \delta_m)$, $E_z = \bar{E} \delta_m$ mit $\bar{E} = 11000 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Für die Schubmoduln, den Elastizitätsmodul E_z und die Querkontraktionszahlen gilt nach Albers (1970), Plath (1974)

$$G_{xy} = 300, G_{xz} = 550, G_{yz} = 800, E_x = 800 \text{ (Einh.: N/mm}^2\text{)},$$

$$\nu_{xy} = 0,3, \nu_{xz} = 0,4, \nu_{yz} = 0,1.$$

Mit den obigen Werten erhält man für die Elastizitätskoeffizientenmatrix die Beziehung (6), wobei die "kleineren" Querkontraktionszahlen ν_{yx} , ν_{zx} und ν_{zy} durch die Matrixsymmetrie festgelegt sind. Bezüglich des Mindestbasiswertes \bar{E} sei angemerkt, daß dieser durch DIN 68705 sehr konservativ geregelt wird.

Vergleichbar den BSH-Elastizitätskoeffizienten wirken sich Änderungen bei Größen mit den Indices x, z unwesentlich aus; der erhebliche Einfluß von E_y wird im weiteren ausführlich behandelt.

$$\begin{bmatrix}
 \frac{1}{E_x} & \frac{\nu_{xy}}{E_y} & \frac{\nu_{xz}}{E_z} & & & \\
 \frac{\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{\nu_{yz}}{E_z} & & & \\
 \frac{\nu_{zx}}{E_x} & \frac{\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & & & \\
 & & & \frac{1}{G_{xy}} & & \\
 & & & & \frac{1}{G_{xz}} & \\
 & & & & & \frac{1}{G_{yz}}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \frac{1}{800} & \frac{0,3}{\bar{E}(1-\delta_m)} & \frac{0,4}{\bar{E} \delta_m} & & & \\
 \frac{\nu_{yx}}{800} & \frac{1}{\bar{E}(1-\delta_m)} & \frac{0,1}{\bar{E} \delta_m} & & & \\
 \frac{\nu_{zx}}{800} & \frac{\nu_{zy}}{\bar{E}(1-\delta_m)} & \frac{1}{\bar{E} \delta_m} & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & & \\
 & & & & &
 \end{bmatrix}
 \quad (6)$$

3.3.3 Leimfuge BSH/BFU

Als Klebstoffe für das Verstärken von Brettschichtholz mit Bau-Furniersperrholz-Platten sind heute ausschließlich Phenol-Resorcinharz- bzw. Melamin-Harnstoffharzleime zugelassen. Bei Leimfugen aus den genannten Klebstoffen kann näherungsweise linear-elastisches, räumlich isotropes Materialverhalten unterstellt werden. Für den Klebstoffschubmodul wurde nach Clad (1964) ein mittlerer Wert von $G = 1200 \text{ N/mm}^2$ und für die Querkontraktionszahl $\nu = 0,4$ angesetzt. Änderungen der Schubmoduln in realistischem Ausmaß $600 \leq G \text{ [N/mm}^2] \leq 1800$ wirken sich nur unwesentlich auf die Berechnungsergebnisse aus.

Die Annahme rein linear-elastischer Werkstoffgesetze für Leimfugen aus sprödharten Polykondensationsharzen bedingt für die Spannungsverteilungen der Füge-teile im überwiegenden beplankten Bereich

keine starke Realitätsverzerrung. Die Spannungen in den äußersten Leimfugen- und Fügeteilrandbereichen - mit den von der FE-Idealisierung abhängigen Spannungsspitzen - sind jedoch nur grobe Näherungen, weshalb von einer Interpretation der Leimfugenspannungen und einer Fugengbemessung abgesehen wurde¹⁾. Realistische Bemessungen von Polykondensations-Leimfugen sind nach heutigem Kenntnisstand nur mit bislang fehlenden bruchmechanischen Kennwerten für Klebstoff-Holzgrenzflächen oder durch Kalibrierung an Versuchsergebnissen entsprechend der Vorgehensweise von Glos u. Horstmann (1990) möglich.

Für die Verklebung von Sperrholz mit Brettschichtholz dürften in Zukunft eine Reihe heute noch nicht bauaufsichtlich zugelassener Polyadditionsklebstoffe, insbesondere Polyurethane, infrage kommen. Die Anwendung von Polyurethanen im Holzbau, die zur Zeit an verschiedenen Stellen eingehend untersucht werden, verspricht insbesondere bei erhöhten Feuchten große Vorteile, da hiermit u.a. bislang unzulässige Baustellenklebungen und Sanierungen bei Feuchtegehalten $u > 15 \%$ möglich scheinen. Starke Schwind-, Quellbewegungen der Fügeteile wie im vorliegenden Anwendungsfall, sind für Polyurethanharze, die gegenüber den weitgehend linear-elastischen Polykondensationsharzen ein ausgeprägt nichtlineares und Plastifizierungsverhalten aufweisen, unproblematischer.

1) Mit Ausnahme der äußersten Randbereiche der Klebfugenlänge H gilt für den Fugenschubfluß und die Beplankungsnormalkraft die Dübelformel $T = dN/dy$

3.4 Feuchtedehnungskoeffizienten

Für das Brettschichtholz und für die Sperrholzbeplankung wurde behindertes Schwinden (Quellen) unterstellt, was nach Keylwerth (1962) sowohl bei äußerer Behinderung wie bei Behinderung durch Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Querschnittsfeuchten anzunehmen ist. Entsprechend DIN 1052 wurden die Feuchtedehnungskoeffizienten für freies Schwinden und Quellen mit dem Faktor 2 abgemindert. Mit der pauschalen Abminderung der Ausdehnungskoeffizienten wird implizit auch ein Teil des Spannungsrelaxationsverhaltens im Rahmen der in mehrtägigen Anpassungszeiträumen verlaufenden Feuchteänderungen erfaßt. Für eine exakte nicht-lineare Simulation des Spannungsrelaxationsverhaltens wären eingehendere Untersuchungen, aufbauend auf den Arbeiten von Möhler u. Maier (1970) sowie Steck (1980), erforderlich.

Die Feuchtedehnungskoeffizienten der Leimfuge wurden mit Null angenommen; aufgrund der geringen Schichtdicke der Leimfuge, die durchweg mit einer Dicke von 0,2 mm idealisiert wurde, ergeben sich auch bei deutlich anderen Werten keine Ergebnisveränderungen.

3.4.1 Brettschichtholz (BSH-)Träger

Analog den Elastizitätsgrößen wurde für die Ausdehnungskoeffizienten in der Trägerquerschnittsebene der gemittelte Wert für tangentielle und radiale Richtung nach DIN 1052 $\alpha_x = \alpha_y = 0,0024/2$ [1/%] angesetzt. Im Vergleich hierzu ergaben Berechnungen mit den von Steck (1985) angegebenen unterschiedlichen α_x -, α_y -Verläufen über die Querschnittsbreite, mit in Breitenrichtung zu den Rändern hin

zunehmend größeren bzw. kleineren Dehnungskoeffizienten infolge Änderung der Jahrringlage der Lamellen, nur geringfügig andere Ergebnisse. Für den Dehnungskoeffizienten in Trägerlängsrichtung wurde $\alpha_z = 0,0001/2$ [1/%] angenommen.

3.4.2 Bau-Furniersperrholz (BFU-BU-)Beplankung

Für die Feuchtedehnungskoeffizienten der BFU-BU-Platten in der yz-Plattenebene wurde nach DIN 1052 $\alpha_y = \alpha_z = 0,0002/2$ [1/%] angesetzt. Da die Dehnung normal zur Plattenebene nahezu unbehindert ist, wurde für α_x der mittlere DIN 1052-Wert für freies Schwinden von Buchenholz in radialer und tangentialer Richtung $\alpha_x = 0,003$ [1/%] angenommen. Änderungen des α_x -Wertes beeinflussen die Berechnungsergebnisse nicht.

3.5 Annahmen zur Feuchteverteilung

Die Feuchteverteilung über den Querschnitt ist neben den Steifigkeitsverhältnissen maßgeblich für die Verteilung und Größe der Eigenspannungen. Untersuchungen von Sonnleithner (1932) ergaben näherungsweise parabolische Feuchteverteilungen über den Querschnitt von trocknendem Kantholz, vgl. Kollmann (1982). Ähnliche Verteilungen über die Querschnittsbreite von BSH-Trägern wurden von Möhler u. Steck (1977; 1980) festgestellt.

Für ebene FE-Eigenspannungsberechnungen an unbeplankten, trocken-klimabeanspruchten BSH-Trägern unterstellte Krabbe (1976) die in Bild 2a, Beilage 2, gezeigte konstante parabelförmige Feuchteverteilung über die Querschnittsbreite im überwiegenden Bereich der

Trägerhöhe H_m , die sodann in den Randbereichen $H_{u,0} = B/2$ auch mit der Trägerhöhe parabolisch veränderlich ist. Formelmäßig gilt für die Feuchteverteilung nach Bild 2a im Bereich H_m

$$\Delta u(x,y) = \Delta u(x) = \max \Delta u \frac{4x^2}{B^2} \quad (7a)$$

und in den Randbereichen $H_{u,0}$

$$\Delta u(x,y) = \max \Delta u \left[\frac{4x^2}{B^2} - \frac{16x^2(y-H_m)^2}{B^4} + \frac{4(y-H_m)^2}{B^2} \right] \quad (7b)$$

Es läßt sich zeigen, daß die Annahme eines vereinfachten Feuchteprofils entsprechend Bild 2b, Beilage 2 und Gleichung (7a), mit gleichbleibend parabolischer Verteilung über die gesamte Querschnittshöhe bei den baupraktisch wichtigen ϵ_y, σ_y -Werten nur in den Randbereichen $H_{u,0}$ deutlichere Abweichungen ergibt. Erhebliche Abweichungen ergeben sich in den Randbereichen $H_{u,0}$ bei den baupraktisch weniger bedeutsamen Größen ϵ_x, σ_x , wobei auch hier im Abstand $H_{u,0} = B/2$ übereinstimmende Werte für beide Feuchteverteilungsannahmen vorliegen.

Angaben über Feuchteprofile klimabeanspruchter sperrholzbeplankter BSH-Querschnitte sind im Schrifttum nicht zu finden. Erste Aussagen dazu sind auf Grundlage der hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen möglich; für abgesichertere quantitative Aussagen, insbesondere betreffend die Feuchtegradienten im Übergangsbereich Brettschichtholz-Bepplankung und in der Bepplankung, sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich. Grundsätzlich hat zufolge der beschriebenen experimentellen Untersuchungen die Bepplankung einen, mit ansteigender Bepplankungsdicke zunehmenden, diffusionsbehindernden Einfluß auf das innenliegende Brettschichtholz. Die BSH/BFU-Klebfuge hat gemäß hier nicht wiedergegebener Begleituntersuchungen in Anlehnung an DIN 52615 und DIN 53122 (Bestimmung der

Wasserdampfdurchlässigkeit ...) keine diffusionsbehindernde Wirkung.

In den FE-Berechnungen des Abschnitts 3 blieben Sorptionsbehinderungen durch die Beplankungen und Feuchtegefälle über die Beplankungsdicke unberücksichtigt. Zur Darlegung der grundsätzlichen Verhältnisse bei feuchtebeanspruchten, abschnittsweise beplankten Trägern wurde das vereinfachte Feuchteprofil gemäß Bild 2c, Beilage 2, mit einer parabolischen Verteilung im Brettschichtholz gemäß Gleichung (7a) und konstanten, mit den BSH-Oberflächen übereinstimmenden Feuchtedifferenzen in den Beplankungen angenommen. In Abschnitt 4 sind im Zusammenhang mit experimentell gemessenen Feuchten ergänzende Berechnungsergebnisse für Feuchteverteilungen mit unterschiedlichen Gradienten in den Beplankungen angegeben. Die Vergleichsrechnungen zeigen, daß das vereinfachte Feuchteprofil Spannungen liefert, die durchweg und ansteigend mit zunehmenden Beplankungsabmessungen auf der sicheren Seite liegen.

3.6 FE-berechnete Spannungs-, Dehnungsverläufe

3.6.1 Allgemeines

Die ebenen und räumlichen, linear-elastischen Berechnungen mit dem FE-Programm ANSYS wurden weitgehend mit den in Bild 1, Beilage 1, gezeigten Idealisierungen durchgeführt; infolge doppelter Querschnitts- und Beanspruchungssymmetrie genügt es, lediglich ein Querschnitts- bzw. Trägerabschnittsviertel zu untersuchen. Die ebenen und räumlichen Berechnungen ergeben für den unbeplankten und für den vollbeplankten Träger weitgehend übereinstimmende

Ergebnisse. Geringe Unterschiede liegen lediglich im Bereich der Querschnittsränder $y \rightarrow \pm H/2$ infolge der programmbedingt vergleichsweise groben Idealisierung des räumlichen Modells vor. Die räumlichen Berechnungen sind im wesentlichen erforderlich, um die Auswirkungen abschnittweiser, streifenartiger Beplankungen auf die Spannungs-, Dehnungsverläufe der anschließenden unbeplankten Bereiche beurteilen zu können.

In den nachfolgenden Abschnitten 3.6.3, 3.6.4 werden die für die Problemstellung charakteristischen Spannungs- und Dehnungsverläufe in qualitativer Hinsicht vorgestellt. Hierbei liegen die konstanten Beplankungswerte $t = 8 \text{ mm}$, $E_y = 4400 \text{ N/mm}^2$ (Plattenaufbaufaktor $\delta_m = 0,6$) und ein konstantes BSH-Querschnittsverhältnis $\eta = H/B = 750 \text{ mm}/180 \text{ mm} = 4,17 \sim 4$ vor. Um den Einfluß der Beplankungsbreite b aufzuzeigen, sind in den genannten Abschnitten jeweils Kurvenverläufe für den Fall der vollen Beplankung $b = 1$ ($1 \hat{=}$ Trägerlänge), einer streifenartigen Beplankung $0 < b < 1$ mit $b = 250 \text{ mm}$ und für den unbeplankten Träger $b = 0$ angegeben. (Die Trägerlänge des räumlichen Modells beträgt $l/2 = b/2 + l_{\ddot{u}}$ mit $l_{\ddot{u}} = H/2$).

3.6.2 Einfluß des BSH-Querschnittsverhältnisses η

Über den vergleichsweise geringen Einfluß des Querschnittsverhältnisses η auf die extremalen Eigenspannungen beim unbeplankten feuchtebeanspruchten Träger wird bei Krabbe (1976) berichtet; infolge des hier gewählten, vereinfachten Feuchteprofils ist der η -Einfluß in den unbeplankten Bereichen eher noch geringer als bei Krabbe angegeben. Das Querschnittsverhältnis η wirkt sich beim unbeplankten Träger auf die Spannungen und Dehnungen σ_y , ϵ_y der langen Querschnittsränder im überwiegenden mittleren

Bereich der Trägerhöhe $2 H_m$ (vgl. Bild 2, Beilage 2) nur unwesentlich aus. In den Randbereichen $H_{u,o} = B/2$ bleiben die σ_y -, ϵ_y -Verläufe bei einer parabolischen Randfeuchteverteilung gemäß Gl. (7b) mit ansteigendem η länger konstant, als in den Bildern 4 und 5, Beilagen 4, 5 für $\eta \sim 4$ gezeigt. (Vergleichsrechnungen mit übereinstimmendem Feuchteprofil bestätigten die von Krabbe angegebenen σ_y -, τ_{xy} -Verteilungen weitgehend; infolge des bei Krabbe verwendeten SAP-IV Elementtyps sind jedoch die angegebenen σ_x -Randspannungen in den Bereichen $y \rightarrow \pm H/2$ deutlich (ca. 40 %) zu niedrig.)

Im Gegensatz zum unbeplankten Träger hat η beim beplankten Träger einen deutlichen Einfluß auf die Ergebnishöhe, vgl. Abschnitt 3.7. Die Spannungs- und Dehnungsverläufe über die Trägerhöhe werden durch η etwa wie beim unbeplankten Träger beeinflußt.

3.6.3 Spannungen σ_y

3.6.3.1 Spannungsverläufe über die Querschnittsbreite

Bild 3, Beilage 3, zeigt für den unbeplankten und den voll bzw. streifenartig beplankten Träger den Verlauf der Spannung $\sigma_y = \sigma_y(x, 0, \bar{z})$ über die Trägerbreite in halber Trägerhöhe $y = 0^1$.

Durch die von den Beplankungen ausgeübten Zwängungen verschiebt sich der σ_y -Verlauf im BSH-Querschnitt um einen etwa konstanten Betrag in den Zugbereich, wodurch sich der gesamte zugbeanspruchte Bereich vergrößert und insbesondere die Querschnittsrandspannungen anwachsen. Die Spannungserhöhung ist außer von t , E_y

1) Der Variablenwert \bar{z} kennzeichnet Bereiche konstanter Spannungen oder Dehnungen in Trägerlängsrichtung z ; für den unbeplankten und voll beplankten Träger gilt durchweg $-1/2 < \bar{z} < 1/2$, während bei streifenartiger Beplankung \bar{z} den mittleren beplankten Bereich $-b/4 \leq z \leq b/4$ charakterisiert

und η abhängig von der Beplankungsbreite b und erreicht bezüglich b das größte Ausmaß bei voller Beplankung; bei voller Beplankung liegt die Randspannung $\sigma_y (\pm B/2, 0, \bar{z})$ t -, E_y -abhängig maximal um das 1,35fache über dem Wert des unbeplankten Querschnitts.

In den Beplankungen werden bei Desorption aufgrund des im Vergleich zum BSH-Querschnitt ca. 10mal niedrigeren Feuchtedehnungskoeffizienten und des ca. 10 - 15mal höheren E_y -Moduls erhebliche Druckspannungen geweckt. Die niedrigsten Beplankungsspannungen ergeben sich für volle Beplankung; bei entsprechend schmalen Beplankungsbreiten können diese Werte um ein Vielfaches überschritten werden. Die über die Beplankungsdicke weitgehend konstanten Beplankungsspannungen erhöhen sich mit abnehmender Beplankungsdicke und zunehmendem Beplankungs- E_y -Modul.

3.6.3.2 Spannungsverläufe über die Trägerhöhe

Bild 4, Beilage 4, veranschaulicht für den voll bzw. unbeplankten Träger den Verlauf der Spannungen $\sigma_y = \sigma_y (x = \text{konst.}, y, \bar{z})$ über die Trägerhöhe längs ausgezeichneter Schnitte $x = \text{konst.}$. Für den BSH-Träger ist σ_y in den Schnitten $x = 0$ bzw. $x = \pm B/2$ angegeben und für die Beplankung im Schnitt $x = \pm (B + t)/2$.

Beim unbeplankten Träger klingen die Spannungen längs der Querschnittssymmetrieachse $x = 0$ und längs der Trägerflanken $x = \pm B/2$ in den Randbereichen der Trägerhöhe ($y \rightarrow \pm H/2$) auf Null ab. Dies trifft beim beplankten Träger nur noch für $\sigma_y (0, y, \bar{z})$ zu, während σ_y in den Trägerflanken und in der Beplankung nahezu über die gesamte Querschnittshöhe konstant ist.

3.6.3.3 Spannungsverläufe in Trägerlängsrichtung

Für den voll- bzw. unbeplankten Träger sind die σ_y -Spannungen des BSH-Trägers und der Beplankung in Trägerlängsrichtung z konstant. Bei streifenartiger Beplankung klingen die σ_y -Spannungen des BSH-Trägers wie in Bild 5, Beilage 4, für den Schnitt $x = \pm B/2$, $y = 0$ gezeigt, rasch auf den Wert des unbeplankten Querschnitts ab. Bei breiteren Streifen ($b \gtrsim 0,5$ m) beträgt die Abklinglänge ca. $H/2$.

Die Beplankungsspannungen sind in Trägerlängsrichtung bei sehr schmalen Beplankungen $b \lesssim 0,25$ m weitgehend konstant. Bei breiteren Aufdopplungen liegen in den Beplankungsrandbereichen zunehmend höhere Spannungen vor, die insbesondere mit der Beplankungsdicke ansteigen. Bei 8 - 30 mm dicken Beplankungen sind die σ_y -Werte an den Beplankungsrändern $z = \pm b/2$ bei Breiten $0,5$ m $\lesssim b \lesssim 1$ m ca. 1,2 - 1,5mal und bei Breiten $b \gtrsim 1$ m ca. 1,5 - 2,5mal höher als im mittleren Bereich \bar{z} .

3.6.4 Dehnungen ϵ_y

3.6.4.1 Dehnungsverläufe über die Trägerhöhe

Bild 6, Beilage 5, zeigt den Verlauf der Dehnung $\epsilon_y = \epsilon_y$ ($x = \text{konst.}$, y, \bar{z}) der Trägerflanken $x = \pm B/2$ über die Trägerhöhe im beplankten Bereich \bar{z} bzw. für den unbeplankten Träger. Desweiteren sind die Dehnungen der Beplankungsaußenseiten $x = \pm B/2 \pm t$ angegeben; diese stimmen längs des überwiegenden Teils der Querschnittshöhe ($y \lesssim \pm 0,4H$) gut mit denen der BSH-Oberflächen überein und fallen sodann im Randbereich auf deutlich niedrigere Werte ab.

Die Dehnungen des unbeplankten Trägers sind bis ca. $\pm H/4$ konstant und wachsen dann bis zu den Rändern näherungsweise exponentiell auf den ca. 3fachen Wert der unbehinderten Dehnung an.

Bei den beplankten Trägern sind die BSH-Oberflächendehnungen in den beplankten Bereichen infolge der Schwindbehinderung durch die Beplankungen b , t , E_y , n -abhängig deutlich niedriger als beim unbeplankten Träger und mit Ausnahme der Höhenrandbereiche weitgehend konstant. Bezüglich der Beplankungsbreite ergeben sich die niedrigsten Dehnungswerte bei voller Beplankung.

3.6.4.2 Dehnungsverläufe in Trägerlängsrichtung

Die Bilder 7a, b, Beilage 5, zeigen für eine streifenartige Beplankung die Dehnungsverläufe ϵ_y ($\pm B/2$, $y = \text{konst.}$, z) der BSH-Trägerseitenflächen in Trägerlängsrichtung z für zwei Schnitte in unterschiedlicher Trägerhöhe ($y = 0$ bzw. $\pm 0,4 H$). Analog den σ_y -Spannungen sind die Dehnungen bei voller Beplankung konstant in Trägerlängsrichtung. Bei streifenartiger Beplankung streben die Dehnungen in den beplankungsfreien Bereichen den Dehnungswerten des unbeplankten Trägers zu. Die Abklinglängen sind für unterschiedliche Trägerhöhenbereiche $y = \text{konst.}$ unterschiedlich, wobei gilt, daß sich die Dehnungsanpassung mit zunehmend höherem Dehnungsniveau des unbeplankten Bereiches umso schneller vollzieht. Bei breiteren Streifen ($b \gtrsim 0,5 \text{ m}$) beträgt die mittlere Abklinglänge vergleichbar der σ_y -Abklinglänge ca. $H/8$ - $H/4$.

3.7 Einfluß der Beplankungs- und Brettschichtholzparameter
b, t, E_y, η auf die mittleren Dehnungs- und Spannungswerte

3.7.1 BSH-Randdehnungen ε_y; Bestimmungsgleichung für die be-
plankungsbedingte Dehnungsreduktion

Bild 8, Beilage 6, zeigt für ein konstantes Querschnittsverhältnis η die Brettschichtholz-Randdehnungen ε_y = ε_y(± B/2, \bar{y} , \bar{z}) im mittleren Bereich der Beplankungsbreite und Trägerhöhe \bar{z} , (vgl. Fußn. 1, S. 17) bzw. - H/4 \lesssim \bar{y} \lesssim H/4. Dargestellt ist die Abhängigkeit von b, t, E_y bzw. von der Beplankungssteifigkeit S = t E_y (MN/m).

Die Kurvenverläufe veranschaulichen die zunehmende Dehnungsverringering mit ansteigender Beplankungsbreite und -steifigkeit; eine Vergrößerung der Beplankungsbreite wirkt sich nur bis ca. 1 m aus.

Bezieht man die BSH-Randdehnungen des beplankten Querschnitts auf die Dehnungen des unbeplankten Querschnitts, so läßt sich für das mit r_ε bezeichnete Verhältnis durch multiple Regression mit einer Fehlergenauigkeit von ≤ 3 % die Beziehung

$$r_{\epsilon} = \frac{\epsilon_y \text{ ohne Bepl.}}{\epsilon_y \text{ mit Bepl.}} = 10 f_1(S, \eta)$$

mit

$$f_1(S, \eta) = a_0 + a_1 \eta + a_2 \lg S + a_3 \eta \lg S$$

und

$$a_0 = 0,422, \quad a_1 = - 0,0434, \quad a_2 = - 0,378, \quad a_3 = 0,0137$$

} (8)

herleiten. Die Steifigkeit S in Gl. (8) ist in MN/m anzusetzen.

Gleichung (8) gilt für den Steifigkeitsbereich $30 \leq S$ (MN/m) ≤ 165 , der Beplankungsdicken $t \sim 8 \dots 30$ mm und Aufbaufaktoren $\delta_m \sim 0,4 \dots 0,75$ umfaßt, sowie für Querschnittsverhältnisse $4 \leq \eta \leq 10$; die aufgeführte Parameterbandbreite von S , t , δ_m , b und η gilt nachfolgend auch für Gleichung (9) in Abschn. 3.7.2 sowie für r_σ in Abschn. 3.7.3. Für die genannten Beplankungs- und BSH-Werte liegt die Dehnungsreduzierung im Bereich von $0,3 \leq r_\epsilon \leq 0,6$. Die angegebene Fehlergenauigkeit gilt streng für Beplankungsbreiten $b \gtrsim 1$ m; in guter Näherung wird auch der Bereich von ca. 0,5 - 1 m erfaßt.

Bild 9, Beilage 6, zeigt eine Auswertung von Gleichung (8) in Abhängigkeit von der Variablen S für unterschiedliche Parameterwerte $\eta = 4, 6, 8$ und 10 . Wie ersichtlich, nimmt die Dehnungsreduktion bei gleichbleibender Beplankungsteifigkeit mit zunehmender Trägerhöhe bzw. zunehmendem Querschnittsverhältnis zu.

Für baupraktische Belange läßt sich r_ϵ zufolge Gleichung (8) bzw. Bild 9 noch weiter eingrenzen, wenn man davon ausgeht, daß die Deckfurnierfaserrichtung durchweg parallel zur Trägerachse verläuft und die Beplankungsdicken im Bereich von ca. 10 - 15 mm liegen. Die Zweckmäßigkeit der erstgenannten Annahme ergibt sich aus den Untersuchungen von Kolb u. Frech (1979). Die Festlegung der unteren Grenze der Beplankungsdicken mit ca. 10 mm resultiert aus dem Umstand, daß bei Dicken < 10 mm die rechnerischen Beplankungs- und Leimfugenrandspannungen überproportional anwachsen, verbunden mit einer überproportionalen Abnahme der Dehnungsreduktion. Darüberhinaus wird die Übertragbarkeit der durchgeführten experimentellen Untersuchungen auf t -Werte < 10 mm zunehmend fragwürdiger. Beplankungsdicken > 15 mm bringen bei entsprechender Auswahl des Furniersperrholztyps und -aufbaus nur unverhältnismäßig geringe Steigerungen bei der Schwind-, Quellreduzierung.

Bei vorgegebener Plattendicke wird die maßgebliche Plattensteifigkeit $S = t \cdot E_y$ vom Platten-E-Modul in Faserrichtung des Absperrfurniers bestimmt. Für eine ausreichend hohe Absperrwirkung scheidet gewöhnliches Bau-Furniersperrholz nach DIN 68705, Teil 3 aus, da bei diesem Werkstoff gemäß DIN 1052 maximal $E_y = E_{Z,D} = 2500 \text{ N/mm}^2$ ansetzbar ist, sofern nicht durch Prüfzeugnisse fremdüberwachender Stellen höhere Werte nachgewiesen werden. Zur Erzielung höchstmöglicher Steifigkeiten sollte der Aufbaufaktor δ_m des zu verwendenden Bau-Furniersperrholzes aus Buche (DIN 68705, Teil 5) der Beziehung $\delta_m \leq 0,5$ genügen, womit $E_y \geq 5500 \text{ N/mm}^2$ gilt. Derartige Werte sind bei gleich dicken Furnieren, wie i.d.R. üblich, mit BFU-BU-Platten unterschiedlicher Festigkeitsklassen und Schichtaufbauten zu erreichen, so nach Beiblatt 1 zu Teil 5 mit den Aufbaunummern 2 u. 6 der Festigkeitsklasse 1, mit Nr. 12/Kl. 2 und mit Nr. 18/Kl. 3. Die für den vorliegenden Verwendungszweck günstigsten Plattenwerte $\delta_m = 0,4$, $E_y = 6600 \text{ N/mm}^2$ sind nur mit Aufbaunummer 4 der Festigkeitsklasse 1 möglich.

Tabelle 1 enthält basierend auf Gleichung (8) die Dehnungsreduktionen, die mittels 10 und 15 mm dicker mit $\delta_m = 0,4$ bzw. $0,5$ aufgebauter BFU-BU-Platten der Breiten $b \geq 0,5 \text{ m}$ im mittleren Bereich der Trägerhöhe bei BSH-Querschnittsverhältnissen von $\eta = 5$ und 10 realisierbar sind. In den Höhenrandbereichen beträgt die Dehnungsreduktion ein Vielfaches der angegebenen Werte, bei denen eine über die gesamte Trägerhöhe reichende Bepankung unterstellt ist. Zwischenwerte in Tabelle 1 können näherungsweise linear interpoliert werden.

BSH-Querschnittsverhältnis η	BFU-BU-Plattenaufbau-faktor δ_m	Dehnungsreduzierung r_ϵ	
		Beplankungsdicke $t = 10 \text{ mm}$	Beplankungsdicke $t = 15 \text{ mm}$
5	0,5	0,46	0,41
	0,4	0,44	0,39
10	0,5	0,37	0,34
	0,4	0,35	0,32

Tabelle 1: Dehnungsreduzierung $r_\epsilon = \epsilon_y$ mit Bepl./ ϵ_y ohne Bepl. bei baupraktisch zweckmäßigen Parametern t, δ_m von BFU-BU-Beplankungen bei BSH-Querschnittsverhältnissen $\eta = H/B = 5$ bzw. 10

3.7.2 BFU-Spannungen σ_y ; Bestimmungsgleichung für die Beplankungsspannungen

Bild 10, Beilage 7, zeigt für ein konstantes Querschnittsverhältnis η die BFU-Spannungen $\sigma_y = \sigma_y(\pm (B + t)/2, \bar{y}, \bar{z})$ abhängig von b, t, E_y bzw. S bei Vorliegen einer Feuchtedifferenz $\max \Delta u = -1 \%$ zwischen dem Trägerinneren und den Querschnittsaußenflächen.

Die Beplankungsspannungen verringern sich mit zunehmender Beplankungsdicke und -breite und mit abnehmendem Beplankungs-E-Modul. Analog zu den Dehnungen und Spannungen der BSH-Oberflächen wirkt sich b nur bis zu einer Breite von ca. 1 m aus. Im Bereich $b \lesssim 0,25 \text{ m}$ bewirkt eine abnehmende Beplankungsbreite einen steilen Spannungsanstieg, da für $b \rightarrow 0$ die Spannungen $\sigma_y \rightarrow \infty$ gehen. Höhere Querschnittsverhältnisse weisen deutlich niedrigere Spannungen auf, vgl. nachfolgend.

Durch multiple Regression lassen sich die BFU-Spannungen für die Einheitsfeuchtebeanspruchung $\max \Delta u = 1 \%$ mit einer Fehlergenauigkeit $\leq 5 \%$ durch die Beziehung

$$\sigma_y = 10^{f_2(S, E_y, \eta)}$$

mit

$$f_2(S, E_y, \eta) = a_0 + a_1 \eta + a_2 \lg S + a_3 E_y + a_4 \eta \lg S + a_5 \eta E_y + a_6 E_y \lg S + a_7 \eta E_y \lg S \quad (9)$$

und

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,1797, & a_1 &= 0,0028, & a_2 &= -0,4395, & a_3 &= 1,8191 \cdot 10^{-4}, \\ a_4 &= -0,0303, & a_5 &= -4,7273 \cdot 10^{-6}, & a_6 &= -4,9364 \cdot 10^{-5}, \\ a_7 &= 2,3636 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

festlegen. Die Parameter S und E_y in Gl. (9) sind in MN/m bzw. MN/m^2 anzusetzen. Bei Trockenklimabeanspruchung, d.h. $\max \Delta u = -1 \%$ sind die Beplankungsspannungen Druckspannungen, umgekehrt ergeben sich bei Feuchteklimabeanspruchung Zugspannungen. Infolge der angenommenen linearen Beziehungen lassen sich die für die Einheitsbeanspruchung berechneten Spannungen linear auf vielfache maximale Feuchtedifferenzen zwischen Trägerinneren und Querschnittsaußenflächen übertragen.

Bild 11, Beilage 7, zeigt eine Auswertung von Gleichung (9) bei angenommener konstanter Beplankungsdicke $t = 15 \text{ mm}$ in Abhängigkeit vom Beplankungs- E_y -Modul für unterschiedliche Querschnittsverhältnisse $\eta = 4, 6, 8$ und 10 . Die Kurvenverläufe gelten mit der genannten Fehlergenauigkeit für Beplankungsbreiten $b \gtrsim 1 \text{ m}$ und als vertretbare Näherung auch für den Bereich $0,5 - 1 \text{ m}$.

Für die in Abschn. 3.7.1 als baupraktisch zweckmäßig angenommenen - ausreichende Dehnungsreduzierungen bewirkenden - Beplankungswerte t , δ_m erhält man bei BSH-Querschnittsverhältnissen von $\eta = 5$ und 10 mittels Gl. (9) die in Tabelle 2 für die Einheitsfeuchtebeanspruchung $|\max \Delta u| = 1 \%$ angegebenen Beplankungsspannungen. Die Werte der Tabelle 2 korrespondieren mit den in Tabelle 1 angegebenen Dehnungsreduktionen r_ϵ .

BSH-Querschnittsverhältnis η	BFU-BU Plattenaufbau- faktor δ_m	Beplankungsspannungen $ \sigma_y $ [MN/m ²]	
		Beplankungsdicke $t = 10$ mm	Beplankungsdicke $t = 15$ mm
5	0,5	0,47	0,34
	0,4	0,52	0,37
10	0,5	0,26	0,18
	0,4	0,27	0,19

Tabelle 2: Beplankungsspannungen $|\sigma_y|$ bei baupraktisch zweckmäßigen Beplankungsparametern t , δ_m von BFU-BU-Beplankungen bei BSH-Querschnittsverhältnissen $\eta = H/B = 5$ bzw. 10; Einheitsfeuchtebeanspruchung $|\max \Delta u| = 1 \%$

Zu den in Tabelle 2 aufgeführten Beplankungsspannungen ist unter Bezug auf Abschn. 3.6.3.1 anzumerken, daß es sich hierbei um die Spannungen des ca. 50 % der Beplankungsbreite ausmachenden, mittleren Bereiches von Beplankungen mit einer Mindestbreite von ca. 0,5 m handelt. Da die Spannungen an den Beplankungsrändern $\pm b/2$ bei Beplankungsbreiten $b \gtrsim 1$ m um den Faktor 1,5 - 2,5 höher liegen, werden für den Spannungsnachweis die 2fachen Werte der Tabelle 2 verwendet, womit für die ungünstigste δ_m -, t -, η -Konfiguration die

Beplankungsspannung 1 MN/m^2 bei Einheitsfeuchtebeanspruchung beträgt. Dieser Wert deckt auch die Verhältnisse bei schmalen Beplankungstreifen $0,25 \leq b \leq 0,5$ ab, bei denen zufolge Abschn. 3.6.3.1 im Vergleich zu breiteren Beplankungen nur geringfügig erhöhte Randspannungen vorliegen.

Tabelle 3 enthält für die baupraktisch zweckmäßig errichteten BFU-BU-Plattentypen (Abschn. 3.7.1) die zulässigen Druck- und Zugspannungen in Plattenebene senkrecht zum Deckfurnierfaserverlauf, vgl. DIN 1052, DIN 68705, Teil 5 mit Beiblatt 1 sowie Steck (1988). Die 50 % der zulässigen Zugspannungen ausmachenden Druckspannungen bedingen, daß eine Trockenklimabeanspruchung nicht nur wegen der in den Brettschichtholzflanken hervorgerufenen, rißinduzierenden Querspannungen, sondern auch wegen der Druckspannungsreaktion in den Beplankungen kritischer als eine Feuchteklimateanspruchung ist.

BFU-BU- Plattenauf- baufaktor δ_m	Platten- Klasse		zulässige Spannungen in Plattenebene (MN/m^2)	
		Aufbaunr.	Druck \perp	Zug \perp
0,5	1	2	8,5	16,5
		6		
	2	12		
	3	18		
0,4	1	4	10	20

Tabelle 3: Zulässige Druck-, Zugspannungen in Plattenebene (senkrecht zum Deckfurnierfaserverlauf) spezieller BFU-BU-Platten nach DIN 68705, Teil 5 mit Beiblatt 1, die für hohe Dehnungsreduktionen zweckmäßig sind

Wie die experimentellen Untersuchungen (Abschn. 3.8) zeigten, verursachen solche Klimaänderungen, die als Grenzfälle baupraktischer Gegebenheiten zu betrachten sind, Feuchtedifferenzen $|\max \Delta u|$ von ca. 8 - 10 % zwischen den Außenflächen und dem Querschnittsinneren von (un)beplankten Brettschichtholzträgern. Gemäß den aufgeführten zulässigen Druckspannungen liegen somit bei einer extremen Trockenklimabeanspruchung, die eine ca. 8 - 10fache Einheitsfeuchtedifferenz verursacht, die Beplankungsspannungen an der oberen Grenze des zulässigen Bereiches.

Die in Rede stehenden Dehnungsreduzierungen von $r_\epsilon \sim 0,3 - 0,4$ im mittleren beplankten Bereich können zufolge den vorliegenden Untersuchungen auch bei extremen Trockenklimabeanspruchungen im Rahmen zulässiger Beplankungsspannungen bzw. vertretbarer Überschreitungen mit den vorgeschlagenen Beplankungstypen realisiert werden.

3.7.3 BSH-Randspannungen σ_y

Die Bilder 12, 13, Beilage 8, zeigen den Einfluß der Beplankung auf die Spannungen $\sigma_y (\pm B/2, \bar{y}, \bar{z})$ der Brettschichtholz-Flanken. Bild 12 veranschaulicht für ein konstantes Querschnittsverhältnis η den Anstieg der Querzug-Spannungen in den BSH-Oberflächen mit zunehmender Beplankungsbreite und -steifigkeit. Analog zu den Dehnungen haben Beplankungsbreiten $b \gtrsim 1$ m keinen Einfluß auf die Spannungswerte.

Bild 12 gibt für Beplankungsbreiten $b \gtrsim 1$ m die relative Zunahme der BSH-Randspannungen infolge Beplankung, bezogen auf den unbeplankten Träger wieder. Wie ersichtlich, sind die Spannungserhöhungen S -, η -abhängig mit 20 - 35 % vergleichsweise gering. Zunehmende S -, η -Werte wirken sich geringfügig spannungserhöhend aus.

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1 Versuchsmaterial

4.1.1 Brettschichtholz

Als Brettschichtholz-Versuchsmaterial standen phenol-resorcinharzverleimte BSH-Trägerabschnitte der Abmessungen H/B/l = 750/180/2200 mm zur Verfügung. Die Dicke der Güteklasse I entsprechenden Lamellen mit einer mittleren Rohdichte von 427 kg/m^3 bei 12 % Holzfeuchte betrug einheitlich 31 mm. Die Trägerabschnitte lagerten vor Versuchsbeginn, d.h. dem Auftrennen in kleinere Prüfkörper in einer geheizten Halle, wobei sich ein mittlerer Feuchtegehalt von ca. 10,8 % einstellte.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit wichtigste Festigkeit und Elastizitätsgröße des Brettschichtholzes - die Zugfestigkeit und der Zug-E-Modul rechtwinklig zur Faser - wurden in Anlehnung an Möhler und Steck (1977; 1980) an prismatischen Prüfkörpern der Abmessungen 30 x 30 x 220 mm bestimmt. Die Zugprüfungen an 17 normal-klimagelagerten Proben ($u = 11,4 \%$) lieferten für die Festigkeit die Werte $\beta_{Z\perp} = 1,76 \pm 0,32 \text{ MN/m}^2$ und für den E-Modul quer zur Faser $E_{Z\perp} = 253,1 \pm 80,4 \text{ MN/m}^2$. Die erhaltenen Mittelwerte und Standardabweichungen sind vergleichbar mit den Werten von Möhler u. Steck und entsprechen einer durchschnittlichen Güte mitteleuropäischen Fichtenholzes.

4.1.2 Bau-Furniersperrholz aus Buche

Als Beplankungsmaterial wurde 7schichtiges Bau-Furniersperrholz aus Buche (BFU 100) mit einer Nenndicke von 15 mm und einer mittleren Rohdichte von 723 kg/m^3 bei 12 % Feuchte verwendet.

Der Furnierschichtaufbau betrug D/C/B/A/B/C/E mit Lagendicken von $A = C = 2,5 \text{ mm}$, $B = E = 2 \text{ mm}$, $D = 1,5 \text{ mm}$, womit sich ein Plattenaufbaufaktor $\delta_m = 0,5$ ergibt. Der Plattenfeuchtegehalt lag vor Versuchsbeginn im Mittel bei $7,4 \%$.

Die für den untersuchten Verwendungszweck wichtigsten mechanischen Beplankungseigenschaften - die Druckfestigkeit und der Druck-E-Modul in Plattenebene quer zur Faserrichtung der Deckfurniere - wurden entsprechend DIN 52376 an prismatischen Proben mit Querschnittsflächen von $15 \times 50 \text{ mm}$ und einer Höhe von 60 mm bestimmt; ergänzend wurden auch die Eigenschaften parallel zur Deckfurnierfaserrichtung ermittelt. Die Druckprüfungen an jeweils 15 normalklimatisierten Proben ($u = 11,9 \%$) ergaben für die Festigkeiten $\beta_{D\perp} = 31,7 \pm 1,1 \text{ MN/m}^2$, $\beta_{D\parallel} = 34,9 \pm 2,5 \text{ MN/m}^2$ und für die E-Moduln $E_{D\perp} = 5590 \pm 940 \text{ MN/m}^2$ bzw. $E_{D\parallel} = 5920 \pm 1010 \text{ MN/m}^2$. Die festgestellten Druckfestigkeiten entsprechen den Anforderungen der Festigkeitsklassen 1, 2 u. 3 nach DIN 68705, Teil 5.

4.2 Prüfkörper

Es wurden insgesamt 6 größerformatige beplankte und unbeplankte Prüfkörper mit insgesamt 294 Setzdehnungsmeßstellen und 90 elektrischen Feuchtemeßstellen hergestellt.

Bild 14, Beilage 9, zeigt die Abmessungen sowie die Meßstellenanordnung und -bezeichnung der beplankten Prüfkörper Ia, Ib, II mit unterschiedlich breiten, beidseitig gleichen Beplankungen; mit angegeben ist der unbeplankte Prüfkörper III. Die Prüfkörper I - III dienten der Ermittlung des Dehnungs- und Reißverhaltens bei Klimabeanspruchung, wobei mittels Einschlagelektroden auch eine laufende elektrische Feuchtemessung beabsichtigt war. Ansichten der Prüfkörper I - III sind den Bildern 16 - 19, Beilagen 11 - 14, zu entnehmen.

Zur Bestimmung der Feuchten mittels Darrproben wurden die beplankten bzw. unbeplankten Feuchteprüfkörper FI, FII entsprechend Bild 15, Beilage 10, verwendet (der in Bild 15 nicht dargestellte Prüfkörper FII gleicht bis auf die nicht vorhandene Beplankung Probe FI).

Die Prüfkörper Ia und II, IIB und III sowie FI und FII stammten aus jeweils einem Trägerabschnitt der Länge 2200 mm. Die Feuchten des nicht verklebten Beplankungsmaterials wurden an jeweils 8 Darrproben der Abmessungen 40 x 40 x 15 mm bestimmt, die sukzessive aus einem Plattenstreifen der Abmessung 250 x 750 mm entnommen wurden.

Für die Verklebung der Brettschichtholz-Abschnitte mit den BFU-Beplankungen durch Nagelpreßleimung wurde kalthärtender Phenol-Resorcinklebstoff (Dynosol S-199/H-6281, Fa. Dyno Industries, Norwegen) verwendet. Der mit Zahnpachteln beidseitig vorgenommene Leimauftrag auf die leicht angeschliffenen Oberflächen betrug insgesamt ca. 500 g/m^2 . Als Nägel wurden die zufolge der Untersuchungen von Möhler u. Rathgeber (1979) bestgeeigneten Drahtstifte 31 x 65 (DIN 1151) verwendet; alle Nagellöcher wurden in den Sperrholzplatten mit 85 % des Nageldurchmessers vorgebohrt. Die mittlere Nageldichte aller Prüfkörper betrug $61 \text{ cm}^2/\text{Nagel}$ und lag damit im Rahmen des nach DIN 1052 erforderlichen Wertes von $65 \text{ cm}^2/\text{Nagel}$. Bild 20, Beilage 15, zeigt die Nagelpläne der Prüfkörper Ia, Ib.

Infolge der im Vergleich zum Trägerquerschnitt sehr kurzen Versuchskörper hat die Sorption über die Stirnflächen einen erheblichen Einfluß auf die Feuchteverteilung und deren zeitliche Änderung. Da die Berücksichtigung von Randeinflüssen, wie in der Einleitung ausgeführt, von den Untersuchungen ausgeklammert war, wurden zur Verhinderung der Wasserdampfsorption über die Versuchskörperstirnflächen selbige mit einem 2maligen, weitgehend diffusionsdichtem, gefülltem Epoxidharzanstrich (Pefalon 115-Z, Fa. Teleplast, Wolfenbüttel) abgedichtet, vgl. Bild 29, Beilage 26. Der Abdichtung der Stirnflächen zufolge sind die gemessenen Feuchteverteilungen übertragbar auf Trägerbereiche, die hinreichend weit, ca. 2 - 3 m, von ungeschützten Trägerenden entfernt sind sowie auf Trägerenden mit vergleichbar versiegelten Stirnflächen.

4.3 Allgemeines zu den Dehnungs- und Feuchtemessungen

Die Dehnungsmessungen auf den Brettschichtholz- und Sperrholzoberflächen wurden mittels Setzdehnungsmessern mit Bezugslängen von 50 und 200 mm vorgenommen. Die Lage und die Bezeichnung der auf beiden Prüfkörperseitenflächen jeweils in gleicher Weise angeordneten Meßstellen ist in Bild 14, Beilage 9, angegeben. Zur Fixierung der Bezugsmeßlängen wurden mittels Klebstoff (X 60, HBM, Darmstadt) befestigte Kupfer-Meßmarken verwendet. Da die Dehnungen im mittleren Bereich der Trägerhöhe entsprechend den rechnerischen Untersuchungen nahezu konstant sind, wurde hier (Meßreihen ③, Bild 14) überwiegend mit der Bezugslänge 200 mm gemessen. Vergleichsmessungen mit Bezugslängen von 50 und 200 mm ergaben im mittleren Höhenbereich übereinstimmende Werte (Prüfkörper III, Meßreihen ③ u. ⑥, Bild 14). In den näher an den Querschnittsrändern befindlichen Meßzeilen ①, ②, ④, ⑤ wurde zur Erfassung der nach außen hin zunehmend größeren Dehnungsgradienten durchweg mit der 50 mm-Bezugslänge gemessen.

In Anlehnung an Möhler u. Steck (1977; 1980) wurde aus den Feuchteprüfkörpern FI, FII zu jedem Feuchtezeitpunkt, d.h. in Meßabständen von jeweils einer Woche, eine 20 mm dicke Querschnittscheibe in 50 mm Entfernung vom Randquerschnitt entnommen (Bild 15, Beilage 10). Unmittelbar nach dem Abtrennen der Darrscheibe erhielt die neue Stirnholz-Schnittfläche des verkürzten Feuchteprüfkörpers einen Diffusionsschutzanstrich. Die Darrscheiben wurden gemäß Bild 15 in einzelne Darrproben aufgetrennt (Darrzeit: 24 h). Der Darrprobenschnittplan ermöglichte eine gute Beurteilung des Feuchteverlaufes über die Querschnittsbreite und -höhe des unbeplankten Brettschichtholzes. Dies trifft auch zu für die Beurteilung des Feuchteverlaufes über die Querschnittshöhe des beplankten Brettschichtholzes. Zur genaueren Erfassung des Feuchteverlaufes über die Querschnittsbreite des beplankten Brettschichtholzes, insbesondere im Übergangsbereich Brettschichtholz - Beplankung sowie im Sperrholz, ist eine Verringerung der gewählten Darrprobenabmessungen erforderlich, wobei das Auftrennen dann herstellungstechnisch durch Spalten vorzunehmen ist.

Neben der Holzfeuchtebestimmung mittels Darrproben wurde die Feuchteverteilung über die Querschnittsbreite zusätzlich elektrisch, mittels unterschiedlich langer (10^1), 15, 25, 40 u. 70 mm), bis auf die Meßspitze isolierter Einschlag-Elektroden (Fa. Gann, Stuttgart) gemessen. Die Anordnung der Elektroden, die in knapp vorgebohrte Löcher (0,9 x Durchmesser Elektrode) eingeschlagen wurden, ist Bild 14 zu entnehmen.

4.4 Klimastufen, Versuchsablauf

Für die Klimatisierungen stand ein Umlufttrockner mit zusätzlicher Kondensationsanlage (Fa. Kiefer, Stuttgart) zur Verfügung. Die Prüfkörper wurden zunächst über einen Zeitraum von 5 Wochen einem Feuchtklima $20^{\circ}\text{C}/95\% \text{ rel.F.}$ und anschließend 5 Wochen einem Trockenklima von $30^{\circ}\text{C}/25\% \text{ rel.F.}$ ausgesetzt. Die gewählten Klimastufen sind gegenüber "Klima II" der Antragstellung leicht modifiziert und entsprechen dem von Möhler u. Steck (1977; 1980) verwendeten "Feucht- bzw. Trockenklima" sowie der Wechselklimalagerung bei Steck (1980).

Nach jeweils einer Woche wurden die Dehnungen und Feuchten aller Prüfkörpermeßstellen und die Darrprobenfeuchten gemessen. Während der Trockenklimalagerung wurden die Prüfkörper zudem sorgfältig auf entstandene Risse hin untersucht; allfällige Risse wurden lagemäßig festgehalten, nummeriert und vermessen. Die Rißtiefe wurde bei größeren Rissen durchweg mit einer konstanten Fühlmeßlehrendicke von 0,05 mm gemessen.

1) Meßspitze nicht isoliert

4.5 Versuchsergebnisse

4.5.1 Feuchteverteilungen

Die Bilder 21 und 22, Beilagen 16, 17, veranschaulichen am Beispiel des unbeplankten Feuchteprüfkörpers FII die Verteilung der Feuchteänderungen Δu , basierend auf den Darrfeuchtemessungen, nach 3 Wochen Feucht- bzw. Trockenklimalagerung. Die Zuwächse beziehen sich bei Feuchtklimalagerung auf die Brettschichtholz-Ausgangsfeuchte $u_{0, BSH} = 10,8 \%$ und bei Trockenklimalagerung auf das Feuchteprofil nach 5 Wochen Feuchtklimalagerung. Die über dem Querschnittsviertel aufgetragenen Feuchten repräsentieren die Mittelwerte der jeweils 4 bezüglich der beiden Querschnittssymmetrieachsen symmetrisch gelegenen Darrproben, vgl. Bild 15, Beilage 10. Wie aus den Bildern 21, 22 hervorgeht, ist das Feuchteprofil über die Querschnittsbreite längs des überwiegenden Bereiches der Trägerhöhe weitgehend konstant, während in den jeweils äußeren ca. 5 - 10 % der Trägerhöhe (Darrproben E, F, G, H) neben dem Feuchtegefälle in Querschnittsbreitenrichtung erwartungsgemäß auch in Richtung der Querschnittshöhe ein ausgeprägtes Feuchtegefälle existiert.

Die Bilder 23 und 24, Beilagen 18, 19 zeigen für den unbeplankten und den beplankten Feuchteprüfkörper FII, FI die Feuchteverteilungen für die Zeitpunkte 1, 3 und 5 Wochen Feuchtklimalagerung sowie für dieselben Zeitpunkte bei Trockenklimalagerung. Die Kurvenverläufe gelten für den überwiegenden, ca. 80 % der Trägerhöhe ausmachenden Querschnittsbereich; die angegebenen Meßwerte sind die Mittelwerte der Darrproben(zeilen) A, B, C, D. Wie aus den Bildern 23, 24 ersichtlich, ergeben sich die verlaufs- und betragsmäßig größten Veränderungen der Feuchteverteilungen im Laufe der 1ten Woche nach einem Klimawechsel. Während zwischen der 1ten und 3ten Klimatisierungswoche noch deutliche Veränderungen zu registrieren sind, finden zwischen der 3ten und 5ten Woche nur noch geringe Feuchteschiebungen statt. Der geschilderte zeitliche Verlauf trifft

prinzipiell für Feucht- und Trockenklimalagerung zu. Die Tatsache, daß die dargestellten Feuchtemessungen der skizzierten zeitlichen Veränderung bei Feuchtklimabeanspruchung nach der 1ten Woche nur bedingt entsprechen, ist auf Unregelmäßigkeiten bei der Trocknungskammersteuerung zurückzuführen. Während der beiden 1ten Klimatisierungswochen wurden die Prüfkörperoberflächen teilweise mit Wasser benetzt; hiermit erklärt sich, daß die Oberflächenfeuchten mit zunehmender Klimatisierungszeit im Feuchtklima um rd. 3 % abnahmen.

Tabelle 4 enthält eine, den Bildern 23, 24 entnehmbare Zusammenstellung der Feuchteänderungen ausgewählter Querschnittsstellen.

Klimatisierungs-Zeitraum ----- Bezugsfeuchte	Querschnittsstelle	Feuchteänderungen Δu [%]		
		unbeplankter Feuchteprüfkörper FII BSH	beplankter Feuchteprüfkörper FI BSH BFU	
5 Wochen Feuchtklima 20°C/95 % rel. Feuchte ----- Δu bezogen auf $u_{0,BSH} = 10,8$ % $u_{0,BFU} = 7,8$ %	Meßstellen 1,1 am BSH-Querschnittsrand vgl. Bild 15	5,2	1,8	-
	BSH-Querschnittsrand $\pm B/2$	9,0	2,3	-
	BFU-Querschnittsrand $\pm (B/2 + t)$	-	-	9,4
5 Wochen Trockenklima 30°C/25 % rel. Feuchte ----- Δu bezogen auf u nach 5 Wochen Feuchtklima	Meßstellen 1,1 am BSH-Querschnittsrand	6,8	1,9	-
	BSH-Querschnittsrand $\pm B/2$	13,5	2,9	-
	BFU-Querschnittsrand $\pm (B/2 + t)$	-	-	12,0

Tabelle 4: Feuchteänderungen Δu zufolge Darrprobenmessungen der Feuchteprüfkörper FI, FII nach 5 Wochen Feuchtklimalagerung 20°C/95 % rel. Feuchte und nach 5 Wochen Trockenklimalagerung 30°C/25 % rel. Feuchte an ausgewählten Querschnittsstellen

Die gemessenen Feuchten des unbeplankten und beplankten Querschnitts waren verlaufs- und betragsmäßig unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Querschnittsbreiten sehr ähnlich. Der Feuchtezuwachs Δu des Querschnittsrandes des unbeplankten Prüfkörpers FII betrug nach 5 Wochen Feuchtklimalagerung 9,0 % bezogen auf die BSH-Ausgangsfeuchte $u_{0,BSH}$. Im Vergleich hierzu ergab sich für die Feuchteänderung des Querschnittsrandes des beplankten Prüfkörpers FI der Wert $\Delta u = 9,4$ % (bezogen auf $u_{0,BFU}$). Nach 5 Wochen Trockenklimalagerung lagen die Änderungen der Randfeuchten des unbeplankten und beplankten Prüfkörpers - bezogen auf das Feuchte-niveau nach 5 Wochen Feuchtklimalagerung - bei 13,5 bzw. 12,0 %.

Die bei Feuchtklimalagerung registrierten Feuchteverläufe lassen sich nur in sehr grober Näherung durch eine Parabel entsprechend Gl. (7a), Abschn. 3.5 beschreiben. Bessere Näherungen erhält man bei Beschränkung auf einfache Approximationsfunktionen durch Potenzfunktionen 5ten bis 7ten Grades, die dem hohen Feuchtegradienten in den Querschnittsrandbereichen und dem geringen Feuchteanstieg im Querschnittsinneren besser Rechnung tragen. Die Feuchteverläufe bei Trockenklimalagerung sind - bedingt durch die Ausgangslage im Feuchtklima - auch durch höhere Potenzfunktionen nur näherungsweise darstellbar. Die Trockenklima-Feuchteverläufe sind im überwiegenden mittleren Querschnittsbereich (ca. 2B/3) weitgehend konstant und wachsen dann in den beidseitigen Randbereichen von ca. 1/6 der Querschnittsbreite etwa exponentiell an.

Infolge des hohen Feuchtegradienten im Querschnittsrandbereich werden im Falle des beplankten Querschnitts die Feuchteänderungen des Brettschichtholzes - abhängig von der BSH-Querschnittsbreite und der Beplankungsdicke - deutlich reduziert. Die Feuchteänderungen des BSH-Querschnittsrandes des Feuchteprüfkörpers FI betragen bei Feucht- und Trockenklimabeanspruchung gerade 25 bzw. 20 % der Werte des unbeplankten Prüfkörpers FII.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die rechnerisch angenommene Feuchteverteilung über den beplankten Querschnitt mit konstanten Feuchten in den Beplankungen nur bei sehr dünnen Aufdopplungen ($t \lesssim 5 \text{ mm}$) gut zutrifft. Der Einfluß der bei dickeren Beplankungen (5 - 15 mm) auftretenden, zunehmend ausgeprägteren Feuchtedifferenz in den Beplankungen auf die Beplankungs- und Brettschichtholzspannungen σ_y ist beispielhaft in Tabelle 5 dargestellt.

	Feuchteverteilung über die Querschnittsbreite max $\Delta u = -1 \%$	Feuchten u %		Spannungen σ_y (MN/m ²) im mittleren Bereich der Querschnittshöhe		
		$x = \pm B/2$	$x = \pm (B+t)/2$	BSH $x = \pm B/2$	BFU $x = \pm B/2$	BFU $x = \pm (B/2+t)$
zunehmende Klimatisierungszeit ↓	cx^7	- 0,34	- 0,60	0,10	- 0,15	0,23
	cx^5	- 0,46	- 0,69	0,14	- 0,17	0,14
	cx^2	- 0,74	- 0,86	0,22	- 0,33	- 0,18
	cx^2 im BSH - 1 im BFU	- 1,0	- 1,0	0,31	- 0,37	- 0,37

Tabelle 5: Spannungen σ_y eines BFU-beplankten BSH-Querschnitts ($B = 180$, $H \neq 750$, $t = 15 \text{ mm}$) im mittleren Bereich der Querschnittshöhe infolge unterschiedlicher Feuchteverteilungen über die Querschnittsbreite

Tabelle 5 beinhaltet für unterschiedliche, realistische Feuchteverteilungen¹⁾ eines über 5 Wochen hinausgehenden Klimatisierungszeitraumes bei einer maximalen Feuchtedifferenz von max $\Delta u = -1 \%$ u.a.

1) Die Potenzfunktionen 5ten und 7ten Grades für die Feuchteverteilungen sind pauschale Näherungen für die Feuchten nach 3 und 5wöchiger Klimatisierung im Feucht- und Trockenklima

die Brettschichtholz-Randfeuchten und -Randspannungen sowie die Extremwerte der Beplankungsspannungen. Dem Beispiel liegt ein voll beplankter Querschnitt mit den Querschnittsabmessungen der Versuchsprüfkörper zugrunde. Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, wachsen die Beplankungs- und Brettschichtholzspannungen σ_y mit zunehmender Klimatisierungszeit auf die oberen Schrankenwerte der vereinfachten parabolischen Feuchteverteilung an.

Die Ergebnisse der elektrischen Holzfeuchtemessungen stimmten während der beiden ersten Klimatisierungswochen im Feuchtklima gut mit den Darrfeuchtemessungen überein. In der Folgezeit waren jedoch zunehmend größere und uneinheitliche Abweichungen festzustellen, so daß von einer Wiedergabe der elektrisch gemessenen Holzfeuchten abgesehen wird; ähnliche Erfahrungen wurden von Möhler und Steck (1977) gemacht.

4.5.2 Dehnungsverteilungen

Die Dehnungsmessungen an symmetrisch gelegenen Meßstellen ergaben häufig sehr große Streuungen ($V > 100 \%$), die bei Feuchtklimalagerung infolge der unplanmäßigen Prüfkörperbefeuchtung ausgeprägter waren als bei Trockenklimalagerung. Die Streuungen der Dehnungswerte in den Randbereichen der Trägerhöhe waren durchweg geringer als diejenigen der absolut rd. 3- bis 6fach kleineren Dehnungen im mittleren Bereich der Querschnittshöhe.

Die Bilder 25 und 26, Beilagen 20, 21, zeigen die typischen Dehnungsverteilungen ϵ_y in den seitlichen Oberflächen eines Brettschichtholzträgers mit beplankungsfreien und beplankten Bereichen nach einer gravierenden Änderung des Umgebungsklimas. Dargestellt - am Beispiel des beplankten Prüfkörpers Ib - ist das Dehnungsprofil nach 3 Wochen Feuchtklimalagerung $20^{\circ}\text{C}/95 \%$ rel. F. bzw. nach 3 Wochen Trockenklimalagerung $30^{\circ}\text{C}/25 \%$ rel. F. jeweils aufgetragen

über dem Prüfkörpervierviertel. Die in den Bildern 25, 26 angegebenen Meßwerte sind die Mittelwerte aller bezüglich der 3 Prüfkörpersymmetrieachsen symmetrisch gelegenen Meßstellen¹⁾.

Die für den Prüfkörper Ib angegebenen, gut mit den berechneten Verteilungen übereinstimmenden Dehnungsprofile unterscheiden sich verlaufsmäßig nur unwesentlich von denen der anderen beplankten Prüfkörper; in den beplankungsfreien Bereichen liegt in geringer Entfernung (100 - 150 mm) von den Beplankungsrändern eine gute Übereinstimmung mit den Dehnungsverteilungen des unbeplankten Prüfkörpers III vor.

Die Tabellen 6 und 7, Beilagen 22, 23, beinhalten eine Zusammenstellung der an den Prüfkörpern Ia, Ib, III gemessenen Dehnungen für die Meßzeitpunkte 1, 3 und 5 Wochen Lagerung im Feuchtklima 20°C/95 % rel. F. bzw. im Trockenklima 30°C/25 % rel. F.. Angegeben sind die mittleren Dehnungen des ca. 0,8 H umfassenden inneren Querschnittshöhenbereichs (Meßzeilen ②, ③, ④) sowie die Mittelwerte des Querschnittsrandbereiches (Meßzeilen ①, ⑤) in beiden Fällen getrennt für die beplankten und unbeplankten Trägerabschnitte²⁾.

Tabelle 8 enthält, basierend auf den Tabellen 6, 7 zum einen die mittleren Dehnungen der beplankungsfreien Bereiche aller Prüfkörper, getrennt für den inneren Querschnittshöhenbereich und für den Querschnittsrandbereich. Desweiteren sind in Tabelle 6 die mittleren Dehnungen der beplankten Bereiche der Prüfkörper Ia, Ib - zusammengefaßt zu einem Wertepaar für den Mitten- und Randbereich des Querschnittshöhe - angegeben.

-
- 1) Z.B. setzt sich in Bild 25 der Meßwert $\epsilon_y = 11,81 \text{ }^{\circ}/\text{oo}$ in den unbeplankten Ecken des Prüfkörpers aus 8 Werten zusammen, deren geometrischer Ort in den Schnittpunkten der Meßzeilen ① und ⑤ mit den Meßspalten I und XI jeweils auf der linken und rechten Prüfkörperseite liegt, vgl. Bild 14, Beilage 9
 - 2) Bei den mittleren Dehnungen der unbeplankten Bereiche der beplankten Prüfkörper wurden die beplankungsnächstgelegenen Meßwerte (Meßspalten IV, XIII) nicht berücksichtigt

Wie aus den Tabellen 6 - 8 ersichtlich, erfolgten die größten Dehnungsänderungen der Trägerseitenflächen übereinstimmend mit den beschriebenen Feuchteänderungen in der 1ten Klimatisierungswoche. Nach der 5ten Woche Klimatisierung im Trockenklima lagen alle Dehnungen, mit Ausnahme derjenigen in den Beplankungsrandbereichen, die nahezu konstant blieben, im Mittel beim 2fachen der Werte nach 1ner Woche. Bei Feuchtklimalagerung waren die Dehnungszunahmen nach der 1ten Woche infolge der anfänglichen Oberflächenbefeuchtung etwas niedriger; nach der 5ten Woche lagen die Dehnungen im mittleren Querschnittshöhenbereich beim 1,2 - 1,5fachen der 1Wochen-Werte. Vergleichbar der Trockenklimabeanspruchung blieben die Dehnungen der Beplankungsrandbereiche nahezu konstant.

Klimabedingungen	Meßzeitpunkte	Dehnungen $\bar{\epsilon}_y$ [°/oo] des mittleren Querschnittshöhenbereiches (ca. 0,8 H)		Dehnungen $\bar{\epsilon}_y$ [°/oo] der Querschnittshöhenrandbereiche	
		unbeplankt	beplankt	unbeplankt	beplankt
Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.	1. Woche	2,22	1,27	8,59	- 4,05
	3. Woche	2,58	1,41	11,31	- 3,68
	5. Woche	3,46	1,55	12,51	- 3,42
Trockenklima 30°C/25 % rel.F.	1. Woche	- 1,48	- 0,86	- 6,73	1,79
	3. Woche	- 2,29	- 1,56	- 10,86	1,91
	5. Woche	- 2,92	- 1,77	- 12,35	1,93

Tabelle 8: Durchschnittliche Dehnungen beplankter und unbeplankter Trägerabschnitte in den mittleren und äußeren Querschnittshöhenbereichen nach 1, 3 und 5 Wochen Lagerung im Feuchtklima 20°C/95 % rel.F. bzw. im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.

Die Dehnungen der unbeplankten Querschnittshöhenränder lagen zu allen Klimatisierungszeitpunkten bei Feucht- und Trockenklimalagerung um das rd. 4fache über den Werten im mittleren Querschnittshöhenbereich. Bei den Dehnungen der beplankten Randbereiche ergab sich durchweg ein Vorzeichenwechsel, d.h. bei Feuchtklimalagerung wurden negative Dehnungen und bei Trockenklimalagerung positive Dehnungen gemessen. Absolut waren die Dehnungen der Beplankungsränder bei Trockenklimalagerung 1 - 2fach und bei Feuchtklimalagerung im Mittel 2,5fach höher als die Werte der mittleren Bereiche.

Die Dehnungsreduktion r_{ϵ} , der Verhältniswert der Dehnungen des beplankten Querschnitts bezogen auf die Dehnungen des unbeplankten Querschnitts, betrug im mittleren Bereich der Querschnittshöhe - zu allen Klimatisierungszeitpunkten etwa gleich - bei Feuchtklimabeanspruchung $r_{\epsilon} \sim 0,5$ und bei Trockenklimabeanspruchung $r_{\epsilon} \sim 0,6$. In den Beplankungsrandbereichen lagen die Dehnungen absolut um ein Mehrfaches unter den Dehnungen der unbeplankten Randbereiche; bei Feuchtklimalagerung betrug der Unterschied das 3 - 6fache und bei Trockenklimalagerung das 2 - 3fache. Die gemessene rd. 50 %ige Dehnungsreduktion im überwiegenden Querschnittshöhenbereich stimmt unter Berücksichtigung aller vereinfachend festgelegten Rechenannahmen gut mit den berechneten r_{ϵ} -Werten überein.

4.5.3 Rißverteilungen

4.5.3.1 Allgemeines

Bei allen Prüfkörpern lagen nach der 1ten Woche Lagerung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F. in den unbeplankten Brettschichtholz-Seitenflächen, unterschiedlich ausgeprägt, faserparallele Trocknungsrisse vor. Das Auftreten der Risse infolge Überschreitens der Holz-Quersugfestigkeit ist zwangsläufig.

Wie dem rechnerischen Teil der Arbeit (Abschn. 3.7.3) zu entnehmen, erhält man bei einer Feuchtedifferenz von $\max \Delta u = 1 \%$ im Querschnitt und parabolischer Feuchteverteilung - ausgehend von einem eigenspannungsfreien Zustand - bei einem BSH-Querschnittsverhältnis von $\eta \sim 4,2$ eine Querschnittsrandspannung von $\sigma_y = 0,24 \text{ MN/m}^2$. Vergleichbare Spannungswerte ergeben sich auch, wenn die Feuchtedifferenz im wesentlichen auf die beidseitigen Querschnittsrandbereiche von ca. $1/6$ der Querschnittsbreite beschränkt ist. Eine unterschiedliche Form der Feuchteverteilungen in den Randstreifen (die etwa zwischen einem linearen Verlauf und einer Potenzfunktion 3ten Grades liegen kann) hat einen begrenzten Einfluß auf die Ausdehnung des querzugbeanspruchten Bereiches und die Höhe der maximalen Querzugspannungen ($0,24 \lesssim \sigma_y [\text{MN/m}^2] \lesssim 0,3$). Für die in Bild 23, Beilage 18, angegebene Feuchteverteilung nach 1ten Woche Trockenklimalagerung beträgt die Querzugspannung pro 1 % Änderung des Maximalwertes $0,28 \text{ MN/m}^2$.

Der gemessene maximale Querschnittsfeuchteunterschied $\max \Delta u$ betrug beim Feuchteprüfkörper FII nach der 1ten Woche Trockenklimaanspruchung $4,6 \%$ (vgl. Bild 23). Bei Zugrundelegung des gemessenen Feuchteverlaufes ist hiermit eine rechnerische Querzugspannung von $1,29 \text{ MN/m}^2$ verbunden; im Vergleich dazu ergibt sich bei parabolischer Feuchteverteilung $1,11 \text{ MN/m}^2$. Beide Spannungswerte liegen in Höhe des 5 %-Fraktilewertes $5 \% \beta_{Z\perp} = 1,20 \text{ MN/m}^2$ des verwendeten Brettschichtholzes. Der 5 %-Fraktilewert kann nach den Untersuchungen von Möhler und Steck (1977; 1980) als rißauslösendes Spannungsniveau bei Klimabeanspruchung angesehen werden.

4.5.3.2 Unbeplankter Prüfkörper III

Nach der 1ten Woche Trockenklimalagerung waren insgesamt 43 Risse, davon 11 auf der "rechten" Seite und 32 auf der "linken" Seite des Prüfkörpers zu verzeichnen. Bild 27, Beilage 24, zeigt die

Verteilung und Größe der Risse auf der "rechten" Seite nach der 1ten Woche; zu diesem Zeitpunkt betrug die mittleren Rißlängen und -öffnungen 18,8 mm bzw. 0,18 mm. Die Rißtiefen lagen überwiegend bei 2 - 4 mm, lediglich zwei 14 bzw. 35 mm lange Risse hatten eine Rißtiefe von ca. 10 mm. Etwa 80 % aller Rißlängen und -öffnungen waren < 20 mm bzw. < 0,2 mm. Circa 10 % aller Risse waren mit rd. 40 - 140 mm Länge weit überdurchschnittlich lang, ebenso lag der Anteil weit überdurchschnittlicher Rißöffnungen mit rd. 0,5 - 1 mm bei ca. 10 %. Alle überdurchschnittlich langen Risse der 1ten Trockenklimawoche waren in 2 Lamellen - in Lamelle 4 auf der "linken" Seite und in Lamelle 5 auf der "rechten" Seite - des Prüfkörpers (Bild 27) konzentriert.

In den folgenden 4 Wochen Trockenklimalagerung entstanden lediglich 2 völlig neue Risse, während bei einigen vorhandenen Rissen - insbesondere im Verlauf der 2ten und 3ten Woche - ausgeprägte Rißfortschritte und -aufweitungen sowie Vereinigungen von Rissen durch Rißfortschritt zu beobachten waren. Bezüglich des Weiterreißen wurden mit einer Ausnahme nur die Risse kritisch, die nach der 1ten Woche weit überdurchschnittlich lang waren oder/und weit überdurchschnittliche Rißöffnungen aufwiesen. So riß die genannte Lamelle 5 nach 3 Wochen Trockenklimalagerung infolge Vereinigung einiger überdurchschnittlich großer Risse einseitig "rechts" über die gesamte Prüfkörperlänge durch, wobei sich eine mittlere Rißtiefe von ca. 35 mm einstellte. Bild 28, Beilage 25, zeigt die "rechte" Seite des Prüfkörpers III nach 5 Wochen Trockenklimalagerung. Ein Vergleich der Bilder 27 und 28 veranschaulicht die Rißentwicklung von der 1ten zur 5ten Woche. Bild 29, Beilage 26, zeigt für den Zeitpunkt 5 Wochen Trockenklimalagerung die "rechte" Stirnseite des Prüfkörpers III mit den tief eingerissenen Lamellen 4 und 5 im Querschnittsrandbereich.

3.5.3.3 Bepankter Prüfkörper Ia

Nach der 1ten Woche Lagerung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F. lagen in den unbepankten Brettschichtholz-Abschnitten des Prüfkörpers Ia insgesamt 39 Risse vor, davon 13 auf der "rechten" Seite und 26 auf der "linken" Prüfkörperseite. Die Bilder 30 und 31, Beilagen 27, 28, zeigen die Verteilung und Größe der Risse nach der 1ten Woche.

Hinsichtlich der Rißgrößen und der zeitlichen Rißentwicklung in den unbepankten Brettschichtholzbereichen ergaben sich ähnliche Verhältnisse wie bei Prüfkörper III. Die Werte der mittleren Rißlänge und -öffnung lagen am Ende der 1ten Woche bei 14,4 mm bzw. 0,26 mm; die Rißtiefen betragen mit Ausnahme eines 20 mm tiefen Risses durchweg 2 - 4 mm. Circa 10 % aller Risse waren mit 30 - 50 mm überdurchschnittlich lang. Der Anteil überdurchschnittlich großer Rißöffnungen von ~ 0,5 - 1 mm lag bei rd. 30 %.

In den Folgewochen entstanden lediglich 5 völlig neue Risse, davon 4 sehr große. Alle neu entstandenen großen Risse entwickelten sich in den Lamellen 4 und 5, die bereits nach der ersten Woche überdurchschnittlich große Risse auswiesen. Die Konzentration von Rissen in Lamellen mit niedrigen Querszugfestigkeiten ist angesichts der geringen Möglichkeit von Spannungsumlagerungen zwingend. Das Weiterreißen von Rissen der 1ten Woche erfolgte wie bei Prüfkörper III ausschließlich bei überdurchschnittlich langen und/oder geöffneten Rissen. So rissen im Zeitraum vom Ende der 1ten zum Ende der 2ten Woche die Risse ⑨ und ② auf der "linken" bzw. "rechten" Seite weiter und bis zum Ende der 3ten Woche rissen auf der "linken" Seite, insbesondere der in der 2ten Woche entstandene Riß ① und der Riß ⑨ der 1ten Woche weiter, vgl. Bilder 30, 31.

Die Bilder 32 und 33, Beilagen 29, 30, zeigen die beiden Seitenansichten des Prüfkörpers Ia nach 5 Wochen Trockenklimalagerung. Deutlich sichtbar sind die gravierenden 20 - 50 mm tiefen Risse in der 4ten und 5ten Lamelle auf der "linken" bzw. "rechten" Prüfkörperseite.

Die Beplankungen wiesen keine nennenswerte Risse auf; lediglich die außenliegenden Deckfurniere hatten dicht benachbart liegend - infolge der Wechselklimalagerung - aufgegangene ca. 0,5 - 1 mm tiefe Schälrisse parallel zum Deckfurnierfaserverlauf.

4.5.3.4 Beplankter Prüfkörper Ib

Die Rißbildung des beplankten Prüfkörpers Ib mit einer beidseitig 500 mm breiten Beplankung ist vergleichbar derjenigen des Prüfkörpers Ia. Nach der 1ten Woche Lagerung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F. lagen in den unbeplankten Brettschichtholzabschnitten insg. 64 Risse vor, davon 24 auf der "rechten" Seite und 40 auf der "linken" Seite. Die mittlere Rißlänge und -öffnung betragen am Ende der 1ten Woche 17,1 mm bzw. 0,24 mm; die mittlere Rißtiefe zählte 3 mm. Der Anteil überdurchschnittlich langer Risse mit 30 - 115 mm lag bei rd. 10 %, überdurchschnittliche Rißöffnungen von 0,5 - 1 mm waren zu 15 % vorhanden. In den Folgewochen entstanden lediglich 6 neue Risse. Das durch Weiterreißen bzw. vereinzelte Rißvereinigungen bestimmte Rißbild nach 5wöchiger Trockenklimabeanspruchung ist ähnlich wie bei Prüfkörper Ib, jedoch ohne vergleichbare Rißanhäufungen wie dort für die Lamellen 4 und 5 beschrieben.

Die Beplankungen wiesen - abgesehen von feinen aufgegangenen Schälrisen in den äußeren Deckfurnieren - keine nennenswerten Risse auf.

Nach Beendigung der Trockenklimalagerung wurde der Prüfkörper Ib parallel zur Stirnseite durch mehrere Schnitte am Beplankungsrand und im mittleren Bereich der Beplankung aufgetrennt. Die freigelegten beplankten Querschnittsflächen hatten durchweg keine makroskopisch sichtbaren Innenrisse neben der Beplankung.

Grundsätzlich sind jedoch derartige, von der Grenzfläche Beplankung/Brettschichtholz in das Querschnittsinnere verlaufende Risse bei ausreichend hohen Eigenspannungen nicht völlig ausgeschlossen, was an befeuchteten und sodann rückgetrockneten Querschnittsscheiben nachgewiesen wurde.

4.5.3.5 Beplankter Prüfkörper II

Die Rißbildung des beplankten Prüfkörpers II mit beidseitig je 2 parallel im Abstand von 250 mm angeordneten Beplankungsstreifen à 250 mm Breite ist in den Bildern 34 und 35, Beilagen 31, 32, exemplarisch für die "linke" Prüfkörperseite angegeben. Die Anzahl der Risse und die Rißabmessungen in den von den Beplankungen beidseitig begrenzten Bereichen sind nach der 1ten Woche Trockenklimalagerung vergleichbar den unbeplankten Bereichen der Prüfkörper Ia, Ib. Auch nach 5 Wochen Trockenklimalagerung waren in den genannten Bereichen keine vergleichbar ausgeprägten Rißvereinigungen und großen Rißtiefen wie beim unbeplankten Prüfkörper III festzustellen. Von Interesse ist auch, daß die an beiden Prüfkörperenden jeweils 50 mm über die Beplankungen hinausreichenden, unbeplankten Brettschichtholzbereiche nach 5wöchiger Trockenklimalagerung keinen einzigen Riß aufwiesen.

Die Feststellungen am abschnittsweise beplankten Prüfkörper II legen im Vergleich zu den beplankten Prüfkörpern Ia, Ib, dem unbeplankten Prüfkörper III sowie den durchgeführten Berechnungen den Schluß nahe, daß abschnittsweise angebrachte, streifenartige Beplankungen ausreichend hohe Rißbehinderungen im Vergleich zu vollflächigen Beplankungen bei hohen Klimabeanspruchungen erbringen. Die Beplankungsstreifen sollten eine Breite von 250 mm nicht unterschreiten und Mittenabstände von max. 0,5 m haben.

5. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Dehnungs- und Reißreduzierung klimatisch hoch beanspruchten Brettschichtholzes durch aufgeklebte Bau-Furniersperrholz-Platten aus Buche. Zielsetzung war es, das Spannungs-Verzerrungsverhalten des Verbundquerschnitts bei Feuchteänderung quantitativ zu erfassen und Vorschläge für geeignete Ausführungen derartiger Sperrholz-Armierungen zu erarbeiten. In Übereinstimmung mit der begleitenden Arbeitsgruppe wurden die Einflüsse spezifischer Stoßausbildungen und ungeschützter Trägerstirnflächen ausgeklammert.

Die durchgeführte Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen experimentellen Teil. Im rechnerischen Abschnitt des Forschungsvorhabens wurde mittels Finite Element Rechnungen das Spannungs-Verzerrungsverhalten beidseitig symmetrisch sperrholzbeplankter Brettschichträger bei Feuchtebeanspruchung untersucht. Die variierten Parameter waren zum einen das Querschnittsverhältnis der Brettschichträger und zum anderen die Dicke, Breite und furnieraufbaubedingten Elastizitätswerte der über die gesamte Trägerhöhe reichenden Beplankungen. Der Deckfurnierfaserverlauf wurde, gestützt auf frühere Untersuchungen, durchweg parallel zur Trägerachse angesetzt.

Für die Feuchteverteilung wurde ein parabolischer Verlauf über die Breite des Brettschichtholzquerschnitts und Unveränderlichkeit über die Trägerhöhe angenommen. Den Beplankungen wurde eine über die Dicke konstante mit dem unbeplankten BSH-Querschnittsrand übereinstimmende Feuchte zugeordnet.

Die Berechnungen mit linear-elastischen Stoffgesetzen ergaben für die Behinderung der Schwind-, Quelldehnungen, insbesondere der Brettschichtholz-Querschnittsränder, folgende Ergebnisse: Die Dehnungsbehinderung nimmt mit zunehmender Beplankungssteifigkeit und -breite $S = t \cdot E_{\perp}$, b und anwachsendem BSH-Querschnittsverhältnis $\eta = H/B$ zu, wobei sich eine Vergrößerung der Beplankungsbreite

nur bis ca. 1 m auswirkt. Bei Beplankungsdicken und E-Moduln von $t = 8 \dots 30 \text{ mm}$, $E_{\perp} = 4000 \dots 6000 \text{ MN/m}^2$ bewirken Beplankungen mit Breiten $b \gtrsim 1 \text{ m}$ abhängig von S, η Reduzierungen der BSH-Dehnungen um 40 - 70 % im überwiegenden mittleren Bereich der Trägerhöhe von ca. 0,8 H.

Im Vergleich zu den deutlich reduzierten Dehnungen ändern sich die BSH-Eigenstressungen gegenüber dem unbeplankten Träger geringer. Bei Trockenklimabeanspruchung erhöhen sich die Querspannungen am Querschnittsrand abhängig von S, η um maximal 35 %.

Die durch die Beplankungen bewirkte Dehnungsbehinderung des Brett-schichtholzes führt bei Feuchtklimabeanspruchung zu Zugspannungen in den Beplankungen und umgekehrt bei Trockenklimabeanspruchung zu Druckspannungen. Die Beplankungsspannungen verringern sich mit zunehmender Beplankungsdicke und -breite, abnehmendem Beplankungs- E_{\perp} -Modul und zunehmendem BSH-Querschnittsverhältnis. Beplankungs-breiten $< 0,2 \text{ m}$ bewirken einen steilen Anstieg der Beplankungsspannungen und sind daher auch im Hinblick auf die hohe Leimfugenbeanspruchung zu vermeiden.

Basierend auf den FE-Berechnungen wurden Regressionsgleichungen zur Berechnung der Dehnungsreduzierung und der Beplankungsspannungen für realistische Träger-Beplankungskonfigurationen hergeleitet.

Zufolge der theoretischen Untersuchungen sind ca. 10 mm dicke BFU-BU-Sperrholzplatten mit einem Aufbaufaktor $\delta_m = 0,4$ (Beiblatt 5 zu DIN 68705, Teil 5) ökonomisch-technisch am geeignetsten für eine wirkungsvolle Dehnungsreduzierung. Bei BSH-Querschnittsverhältnissen von 5 - 10 werden hierbei die Dehnungen auf das rd. 0,4fache reduziert. Die entsprechenden Beplankungsspannungen die bei parabolischer Einheitsfeuchtebeanspruchung maximal 1 MN/m^2 betragen, liegen bei einer extremen Trockenklimabeanspruchung mit rd. 8 - 10 % Feuchteunterschied zwischen den Beplankungsschwerlinien und dem Querschnittsinnenbereich noch im Rahmen zulässiger Werte.

Im experimentellen Teil der Forschungsaufgabe wurden Messungen an insgesamt 6 größerformatigen Brettschichtholzabschnitten mit den Querschnittsabmessungen 180 x 750 mm und Längen von 600 - 1500 mm durchgeführt. Vier der Prüfkörper waren beidseitig gleich, unterschiedlich breit beplankt und 2 Prüfkörper waren unbeplankt. Die verwendeten 15 mm dicken BFU-BU-Bepunktungen wurden mittels Nagelpreßleimung mit dem Brettschichtholz verklebt. Vier Prüfkörper, drei beplankte und ein unbeplankter dienten zur Messung der Dehnungen und zur Beurteilung des Reißverhaltens; für die Dehnungsmessungen wurden insgesamt rd. 300 Setzdehnungsmeßstellen auf den Prüfkörpern appliziert. Zwei Prüfkörper, ein unbeplankter und ein vollflächig beplankter dienten der laufenden Feuchtemessung mittels Darrproben, wozu den Feuchteprüfkörpern wöchentlicher Querschnittsscheiben zur anschließenden Aufteilung in Darrproben entnommen wurden. Zur Verhinderung eines Feuchtetransports über die Trägerstirnflächen waren alle Prüfkörperenden mit einem diffusionsdichten Epoxidharzanstrich versehen.

Alle Prüfkörper wurden zunächst über einen Zeitraum von 5 Wochen in einem Feuchtklima von 20°C/95 % rel.F. und im Anschluß daran 5 Wochen im Trockenklima 30°C/25 % rel.F. gelagert.

Die gemessenen Feuchten des unbeplankten und beplankten Querschnitts waren verlaufs- und betragsmäßig unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Querschnittsbreiten ähnlich. Die geringe Feuchteänderung im Querschnittsinneren und der hohe Feuchtegradient in den Querschnittsrandbereichen wird bei beiden Querschnittstypen durch Potenzfunktionen höherer Ordnung deutlich besser approximiert als durch Parabeln. Infolge des hohen Feuchtegradienten betrugen die Feuchteänderungen der beplankten Brettschichtholzränder nur rd. 25 % der Werte des unbeplankten Prüfkörpers.

Die gemessenen Dehnungen wiesen erwartungsgemäß teilweise sehr hohe Streuungen auf ($V > 100$ %); die mittleren Dehnungsverteilungen bestätigten die rechnerischen Verläufe hinreichend. Die beplankungsbedingte Dehnungsreduzierung im überwiegenden Querschnittshöhenbereich

lag, gut übereinstimmend mit den theoretischen Untersuchungen, im Mittel aller beplankten Prüfkörper bei rd. 0,5. Das gemessene rasche Abklingen der Dehnungsbehinderungen in den in Trägerlängsrichtung seitlich an die Beplankungen anschließenden, unbeplankten Brettschichtholzbereichen entspricht den Berechnungen.

Nach einwöchiger Lagerung im Trockenklima wiesen alle Versuchskörper in den beplankungsfreien Bereichen anzahl- und größenmäßig vergleichbare Risse parallel zur Faserrichtung auf. Das Auftreten der Risse ist rechnerisch plausibel, da bei der gemessenen maximalen Querschnittsfeuchtedifferenz von rd. 4,5 % Querszugspannungen in Höhe des 5 %-Fraktilenwertes ($1,2 \text{ MN/m}^2$) der Querszugfestigkeit des verwendeten Brettschichtholzes vorliegen. In den Folgewochen entwickelten sich nur noch vereinzelt völlig neue Risse, während bei den im Laufe der 1ten Woche entstandenen Rissen deutliche Rißvergrößerungen und häufig Rißvereinigungen festzustellen waren. Die Risse in den unbeplankten Brettschichtholzbereichen der beplankten Prüfkörper endeten durchweg - durch Auftrennen der Prüfkörper nachgewiesen - am Übergang zu den beplankten Bereichen. Alle Beplankungen waren abgesehen von dicht benachbart liegenden, ca. 0,5 - 1 mm tiefen, aufgegangenen faserparallelen Schälrisse der beidseitig außenliegenden Deckfurniere völlig rißfrei.

Die Versuchsergebnisse eines abschnittsweise, streifenartig beplankten Prüfkörpers legen in Verbindung mit den Berechnungen den Schluß nahe, daß abschnittsweise angebrachte Beplankungen bei extremer Trockenklimabeanspruchung ähnlich hohe Dehnungs- und Rißbehinderungen bewirken wie vollflächige Beplankungen. Die Mittenabstände der mindestens 250 mm breiten, über die gesamte Trägerhöhe reichenden und auf beiden Trägerseiten gleich anzubringenden Beplankungsstreifen sollten 0,5 m nicht überschreiten.

6. Literatur

- Aicher, S. 1990: Berechnungen zum Spannungs-Verzerrungsverhalten von Brettschichträgern mit aufgeklebten Bau-Furniersperrholz-Platten bei Klimabeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 48: 53 - 59
- Albers, K. 1970: Querdehnungs- und Gleitzahlen sowie Schub- und Scherfestigkeit von Holzwerkstoffen. Forschungsinstitut für Holzwerkstoffe und Holzleime, Karlsruhe
- Clad, W. 1964: Über das Wesen einer Verklebung und die Fugenelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen. Diss. TH. Stuttgart
- Glos, P.; Horstmann, H. 1990: Rechnerische Ermittlung des Spannungsverlaufs in Leimfugen großflächig geklebter Holzverbindungen nach der Methode der finiten Elemente. Abschlußbericht 88506, Institut für Holzforschung, Uni München
- Hörig, H. 1935: Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz. Ing.-Archiv 6: 8 - 14
- Kolb, H.; Frech, P. 1979: Festigkeitsverhalten von Leimverbindungen zwischen Baufurnierplatten und Brettschichtholz. Forschungsbericht 1.4 H 33031, FMPA Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut
- Krabbe, E. 1960: Messungen von Gleit- und Dehnungszahlen an Holzstäbchen mit rechteckigen Querschnitten. Diss. TH. Hannover
- Krabbe, E. 1976: Über den Spannungszustand in Brettschichträgern infolge Feuchtigkeitsänderung des Holzes. In: Konstruktiver Ingenieurbau in Forschung und Praxis (Festschrift Wolfgang Zerna und Institut KIB), Werner-Verlag Düsseldorf
- Kollmann, K. 1982: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Zweite Auflage/Erster Band Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

- Möhler, K.; Maier, G. 1970: Kriech- und Relaxationsverhalten von Lufttrockenem und nassem Fichtenholz bei Querdruckbeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 28: 14 - 20
- Möhler, K.; Steck, G. 1977: Rißbildung in Brettschichtträgern durch Trocknung oder durch Trocknung nach vorheriger Feuchtigkeitszunahme.
Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH)
- Möhler, K.; Rathfelder, M. 1979: Konstruktive Möglichkeiten zu Aufnahme von Schub- und Querkzugspannungen bei Brettschichtträgern. Bauen mit Holz 81: 460 - 465
- Möhler, K.; Steck, G. 1980: Untersuchungen über die Rißbildung in Brettschichtholz infolge Klimbeanspruchung. Bauen mit Holz 82: 194 - 200
- Möhler, K.; Siebert, W. 1984: Untersuchungen zur Erhöhung der Querkzugfestigkeit in gefährdeten Bereichen. Bauen mit Holz 86: 388 - 393
- Neuhaus, F.H. 1981: Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Mitteilung Nr. 81-8 Inst. f. konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Uni Bochum
- Plath, E. 1974: Holzwerkstoffe in: Holzbautaschenbuch 7. Auflage, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf
- Sonnleithner, E. 1932: Verlauf der Feuchtigkeit innerhalb des Holzes während der Trocknung. Diss. TH Stuttgart
- Steck, G. 1985: Abbau von Eigenspannungen aus Feuchteänderungen bei Brettschichtholz durch Sägeschnitte. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH)

Steck, G. 1988: Bau-Furniersperrholz aus Buche. Informationsdienst Holz, herausgegeben von EGH und CMA

Szabó, I. 1977: Höhere technische Mechanik. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

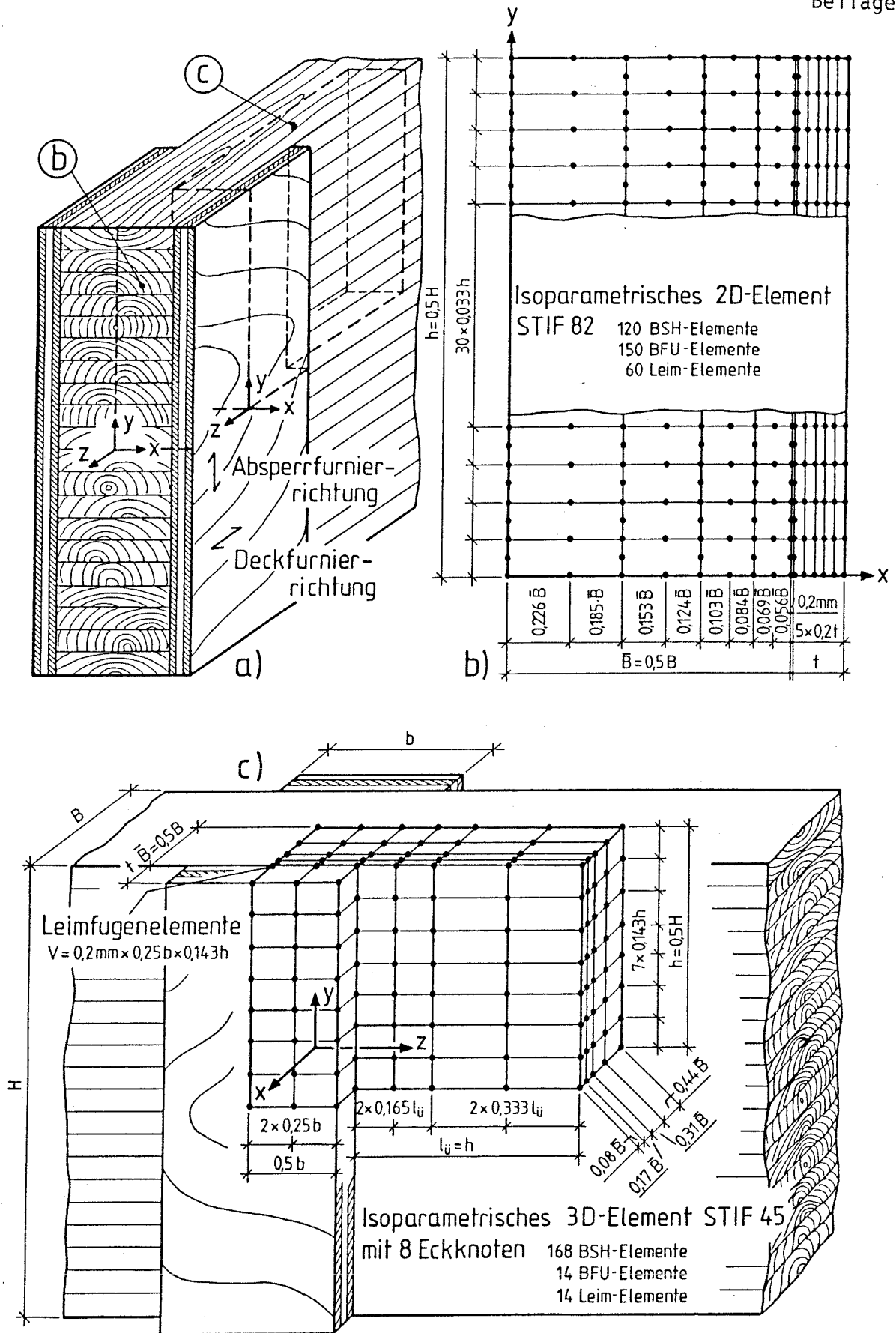


Bild 1a - c: Brettschichtholz(BSH-)Träger mit aufgeklebten Bau-Furniersperrholz(BFU-)Beplankungen
 a) Ansicht, Lage der Werkstoff-Orthotropieachsen
 b) FE-Idealisierung der 2D-Berechnungen
 c) FE-Idealisierung der 3D-Berechnungen

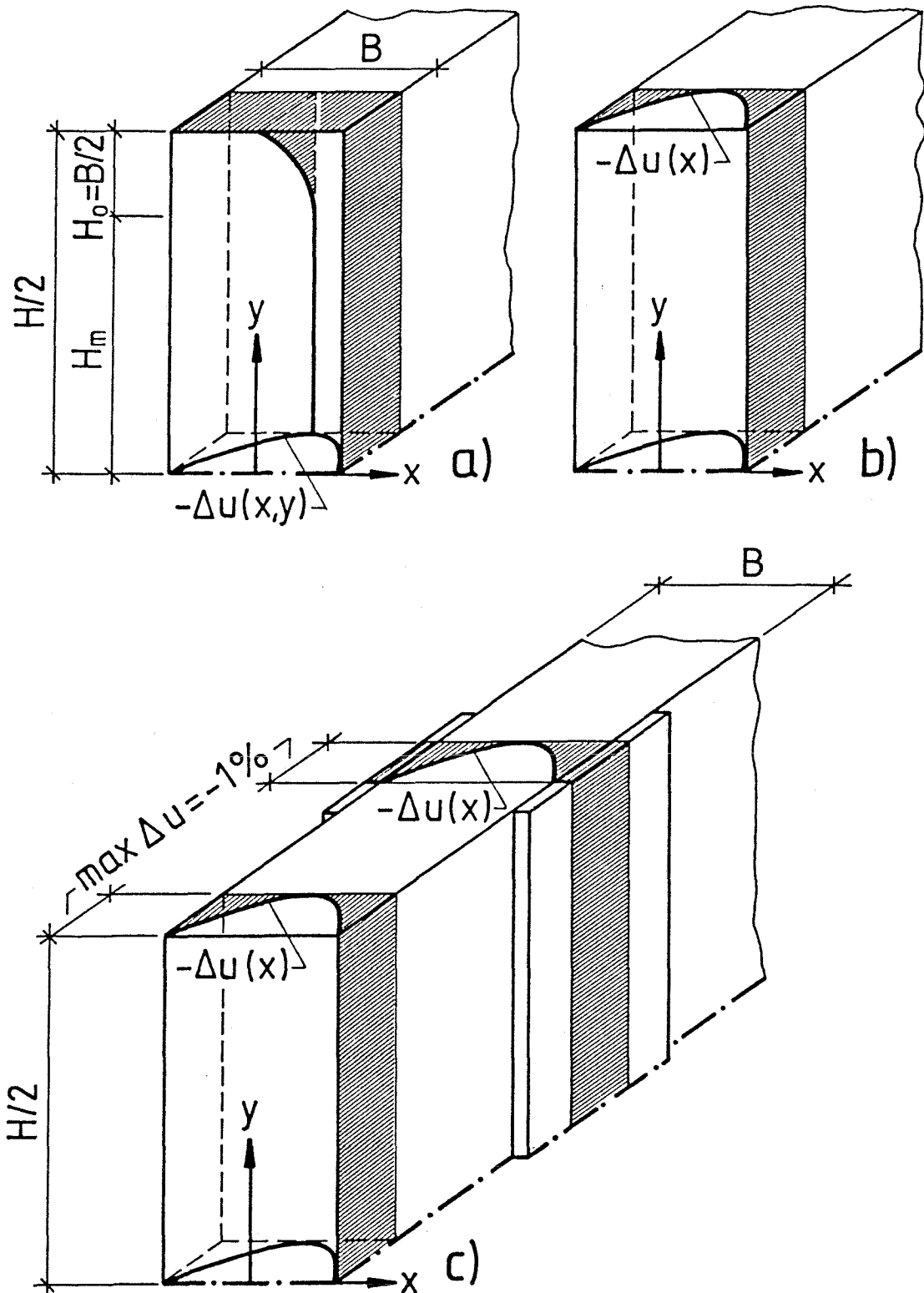


Bild 2a - c: Feuchteverteilung infolge eines Trockenklimas über den Querschnitt unbeplankter und sperrholzbeplankter Brettschichtholz-Träger
 a) BSH-Feuchteprofil nach Krabbe (1976)
 b) vereinfachtes BSH-Feuchteprofil
 c) angenommene Feuchteverteilungen für die (un)beplankten Bereiche

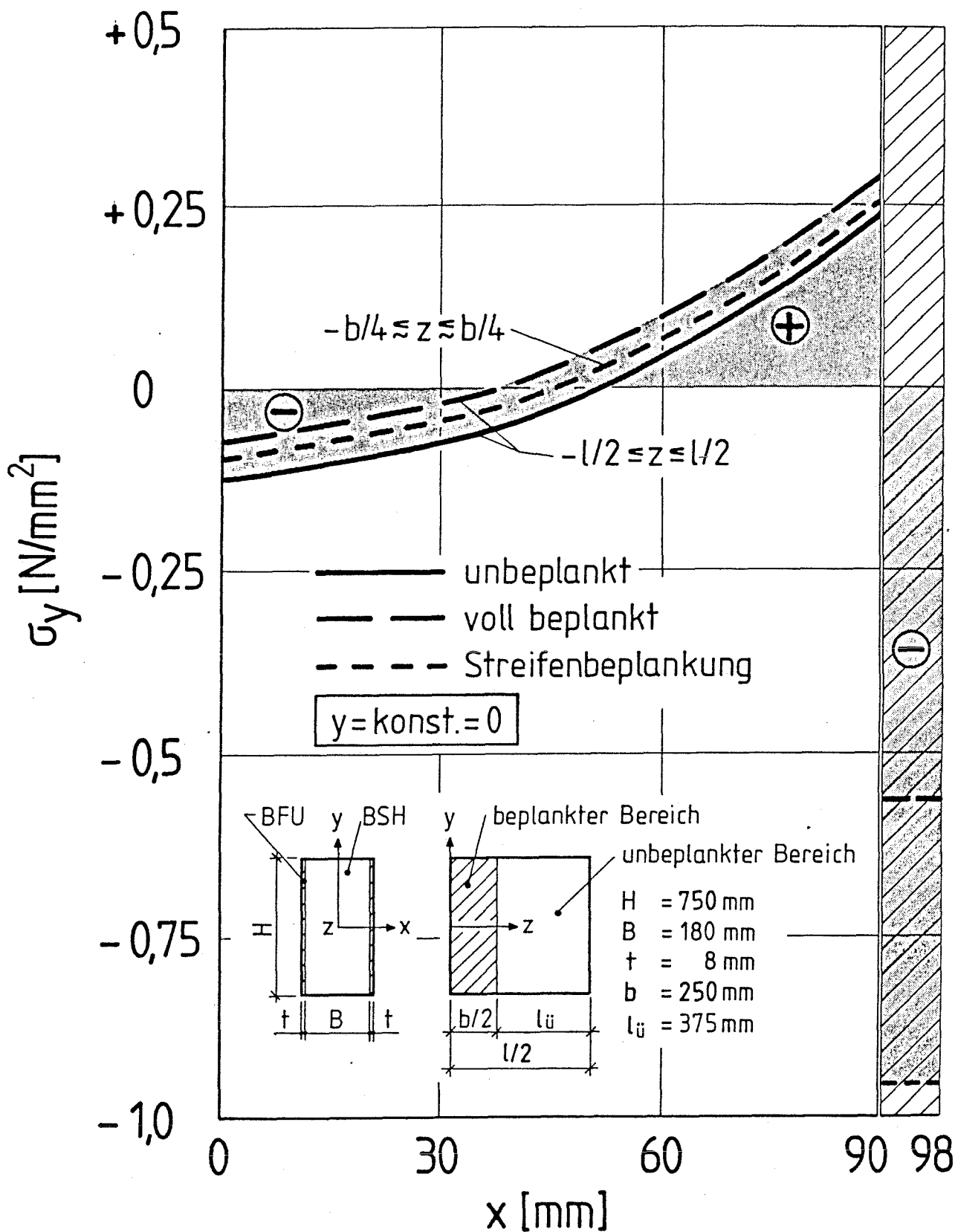


Bild 3: Spannungsverlauf σ_y über die Breite des (un)beplankten Trägers in Querschnittshöhenmitte infolge einer parabolischen Feuchteverteilung mit $\max \Delta u = -1 \%$ entsprechend Bild 2b und c

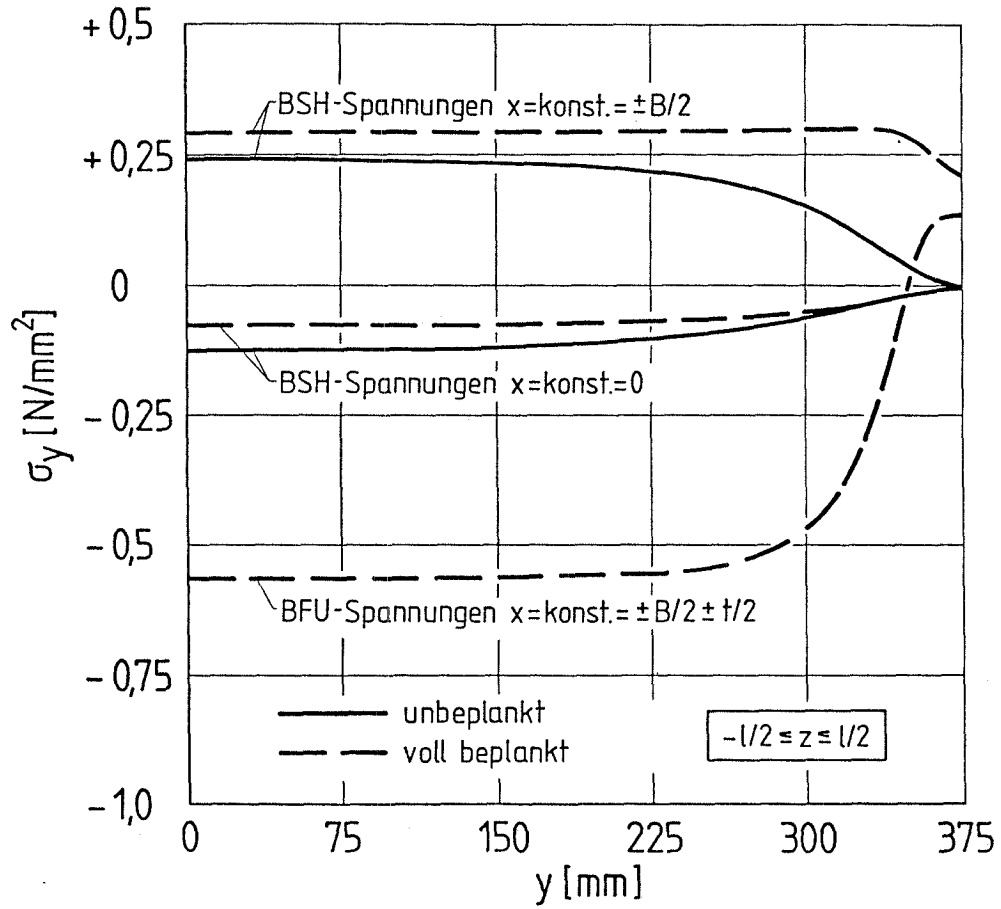


Bild 4: Spannungsverlauf σ_y über die Höhe des (un)beplankten Trägers längs der BSH-Querschnittsränder bzw. in der Beplankung infolge $\max \Delta u = -1 \%$

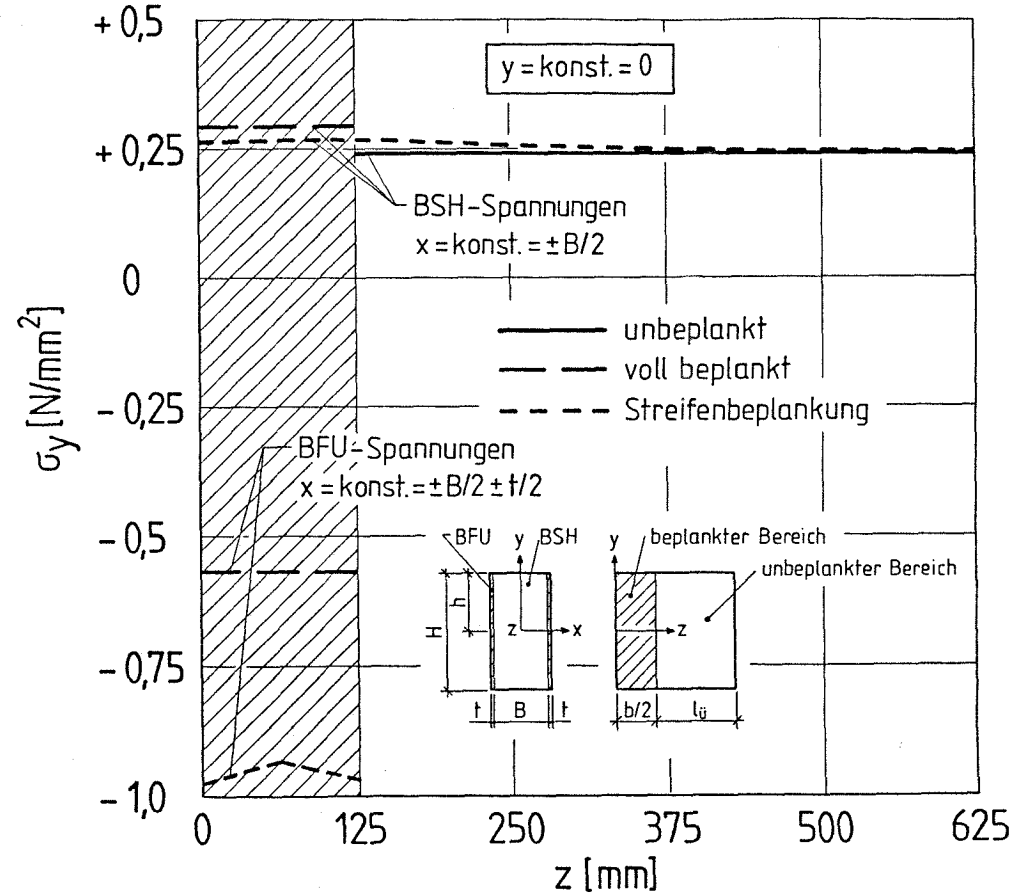


Bild 5: Spannungsverlauf σ_y in Längsrichtung des (un)beplankten Trägers auf den BSH-Oberflächen bzw. in der Beplankung infolge $\max \Delta u = -1 \%$

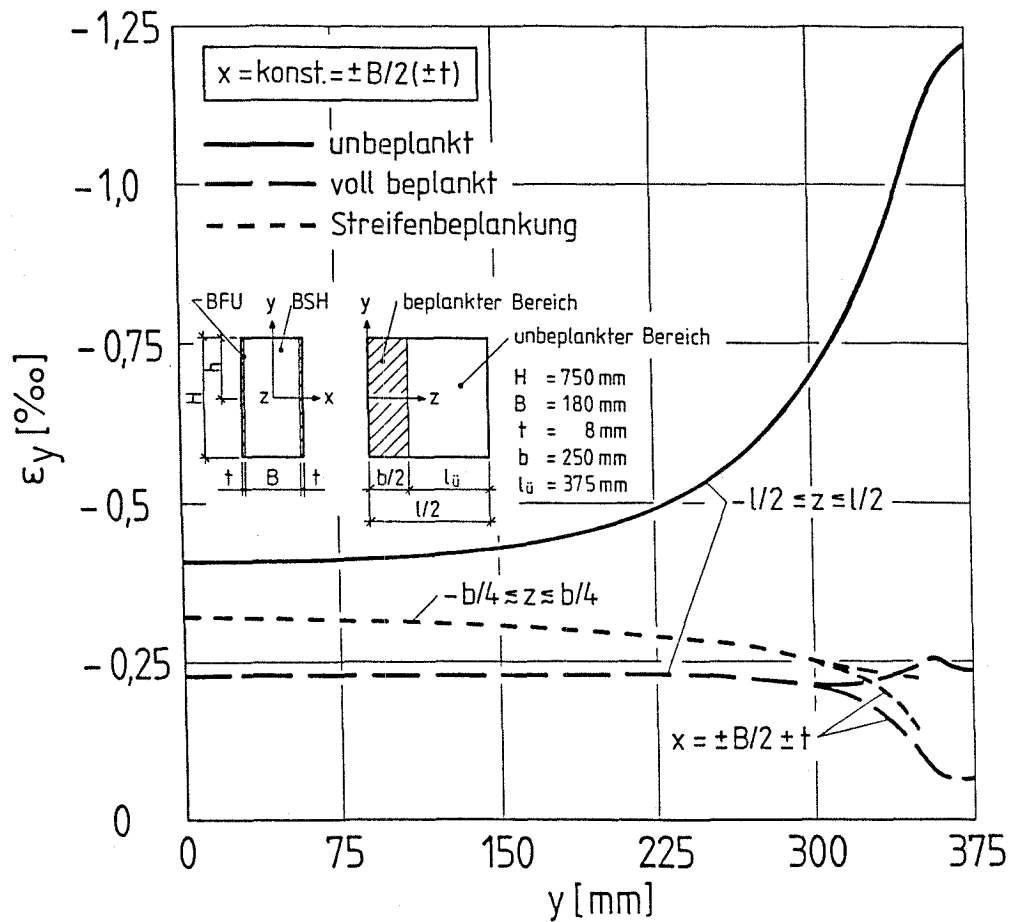


Bild 6: Dehnungsverlauf ϵ_y über die Höhe des (un)beplankten Trägers längs der BSH- und BFU-Querschnittsränder infolge $\max \Delta u = -1 \%$

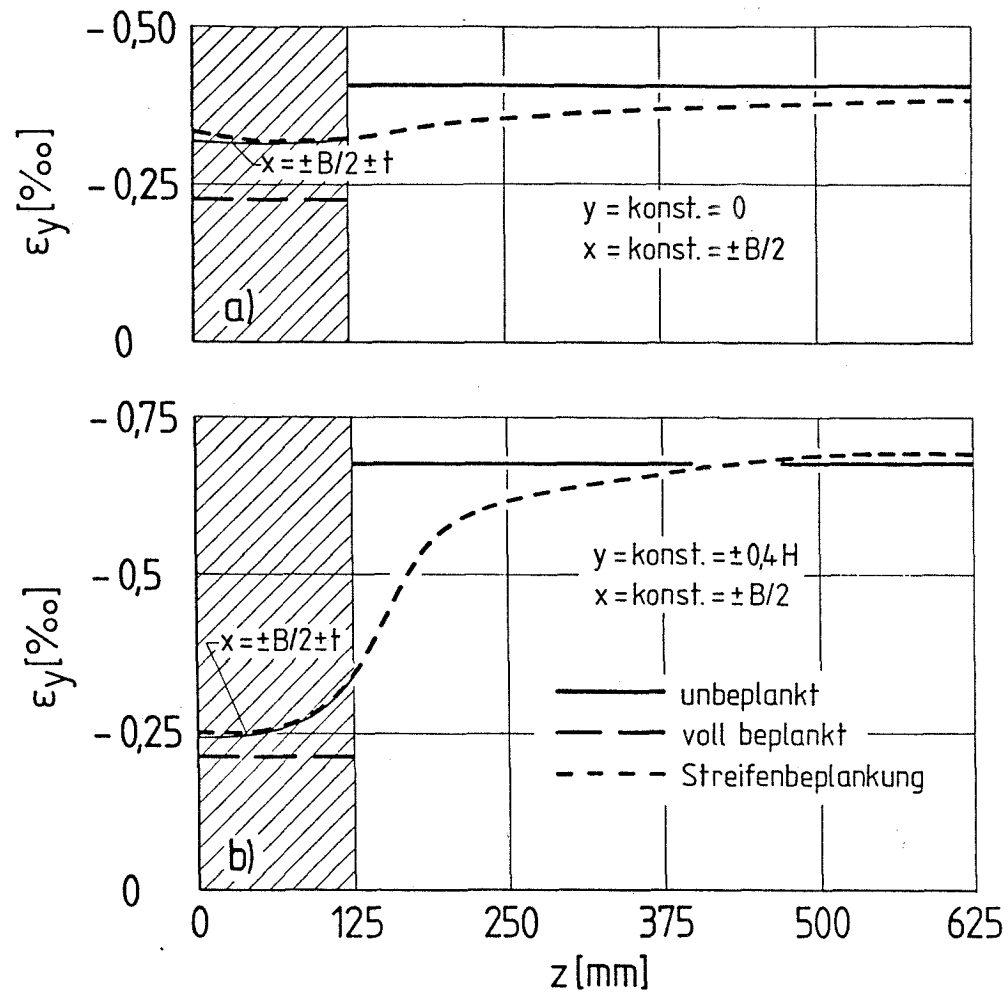


Bild 7a, b: Dehnungsverlauf ϵ_y in Längsrichtung des (un)beplankten Trägers in den BSH-Flanken bzw. in der Beplankung längs ausgezeichneter Höhenschnitte $y = \text{konst.}$ infolge $\max \Delta u = -1 \%$

a) $y = \text{konst.} = 0$
 b) $y = \text{konst.} = \pm 0,4 H$

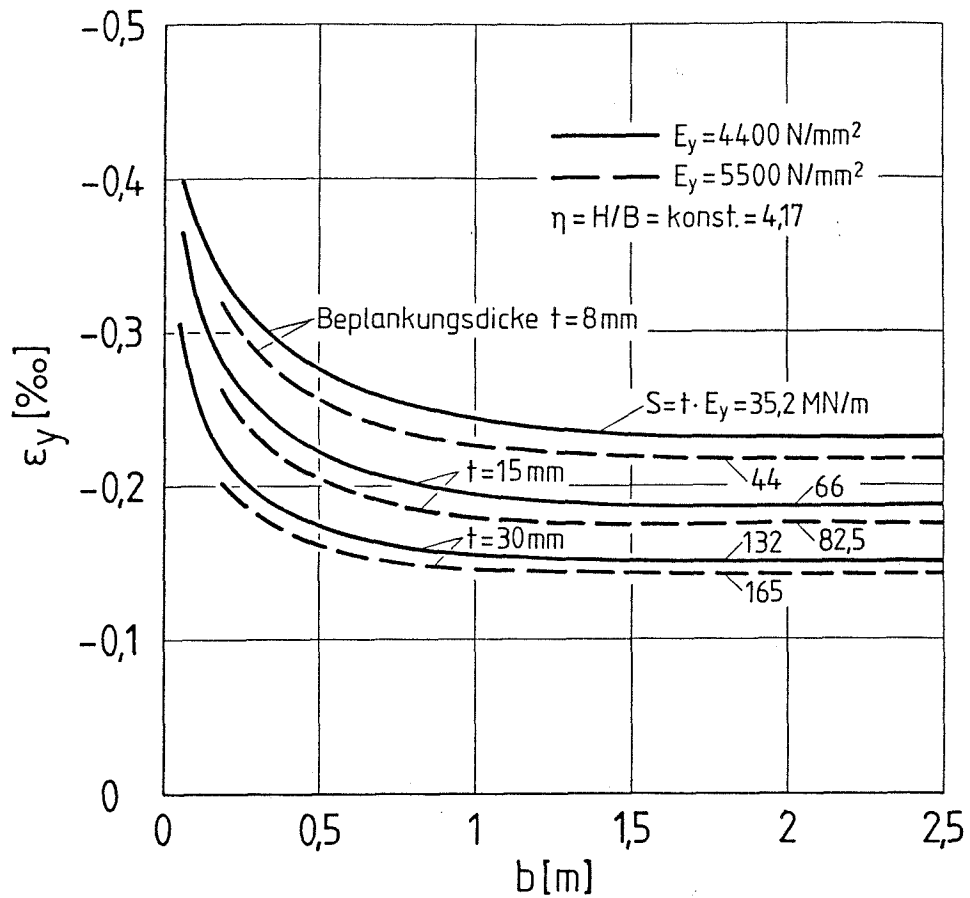


Bild 8: Dehnung ϵ_y der BSH-Querschnittsflanken im mittleren Bereich der Trägerhöhe infolge $\max \Delta u = -1\%$ in Abhängigkeit von der Beplankungsbreite und -dicke b, t und vom Beplankungs-E-Modul; BSH-Querschnittsverhältnis $\eta = \text{konst.} = 4$

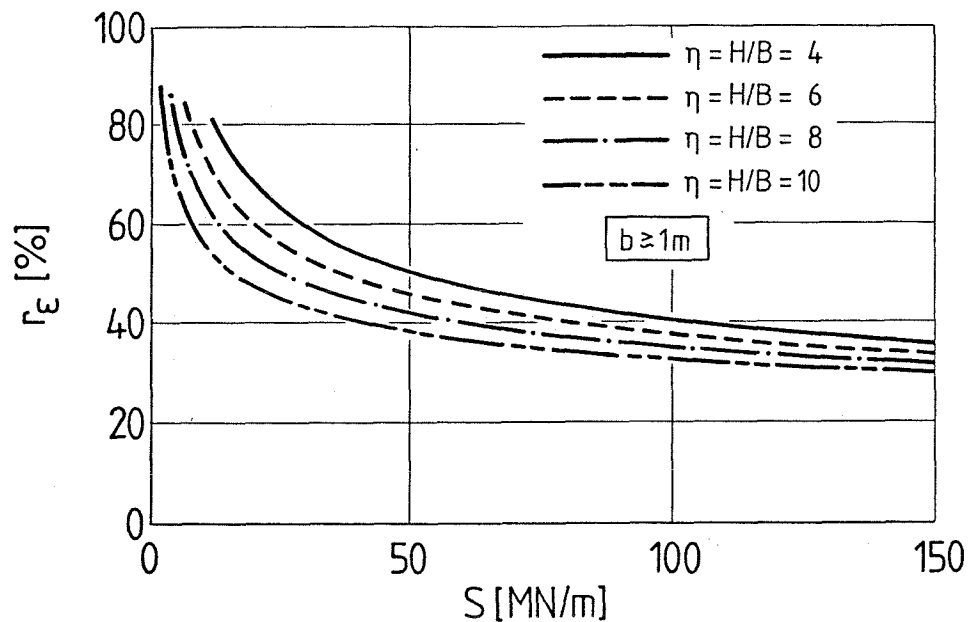


Bild 9: Dehnungsreduktion r_ϵ (%) zufolge Gl. (8) in Abhängigkeit von der Beplankungssteifigkeit S und dem Parameter η (Querschnittsverhältnis)

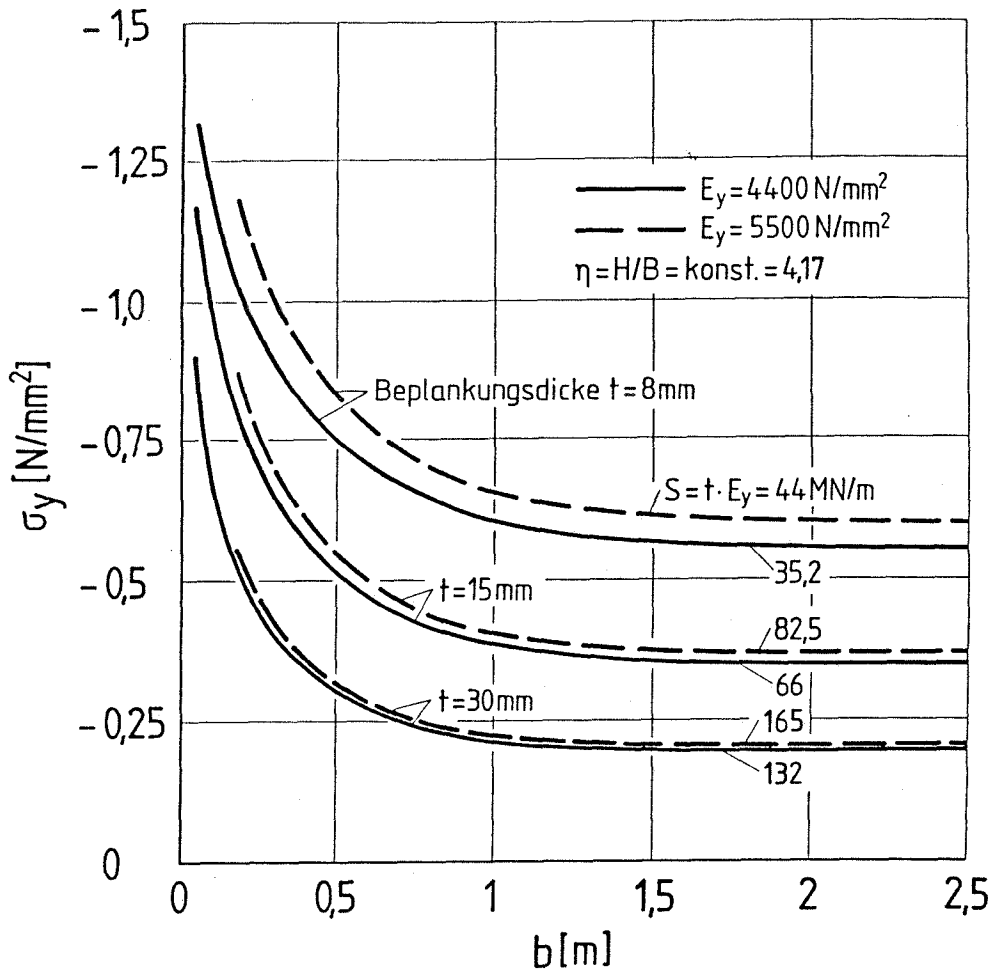


Bild 10: Beplankungsspannung σ_y im mittleren Bereich der Beplankungsbreite und -höhe infolge $\max \Delta u = -1\%$, in Abhängigkeit von der Beplankungsbreite und -dicke b, t und vom Beplankungs-E-Modul; BSH-Querschnittsverhältnis $\eta = \text{konst.} = 4$

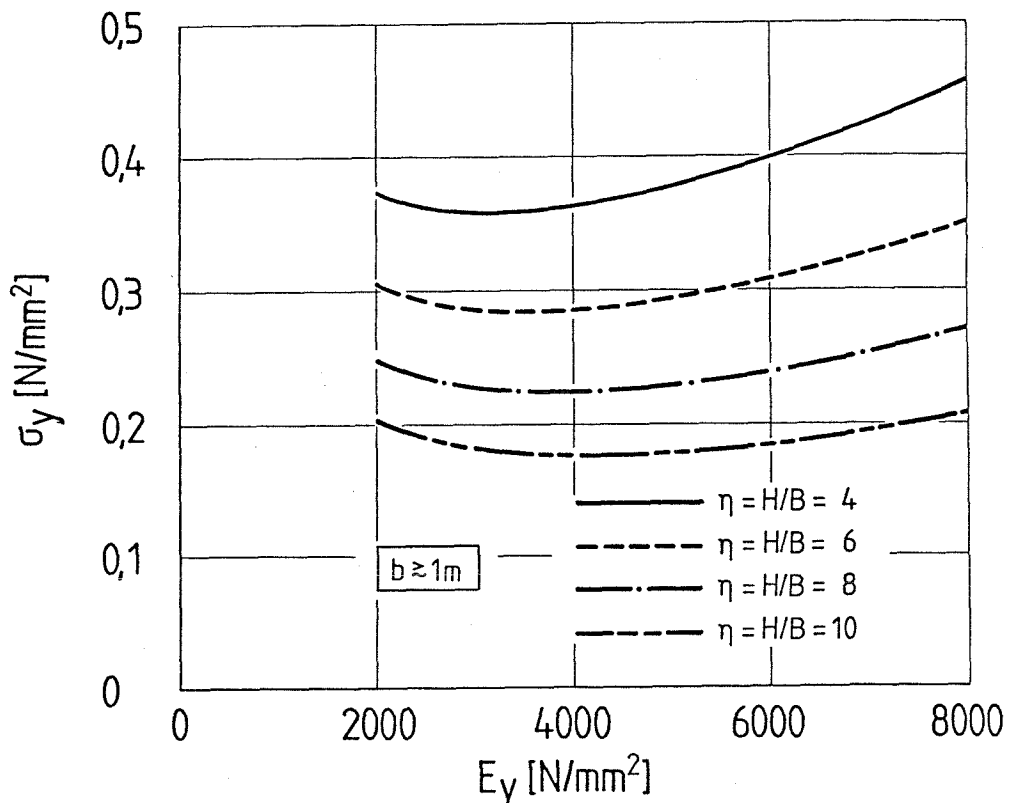


Bild 11: Beplankungsspannung σ_y infolge Einheitsfeuchtebeanspruchung $|\max \Delta u| = 1\%$ in Abhängigkeit vom Beplankungs-E-Modul und dem Parameter η (Querschnittsverhältnis) bei konstanter Querschnittsdicke $t = 15$ mm entspr. Gl. (9)

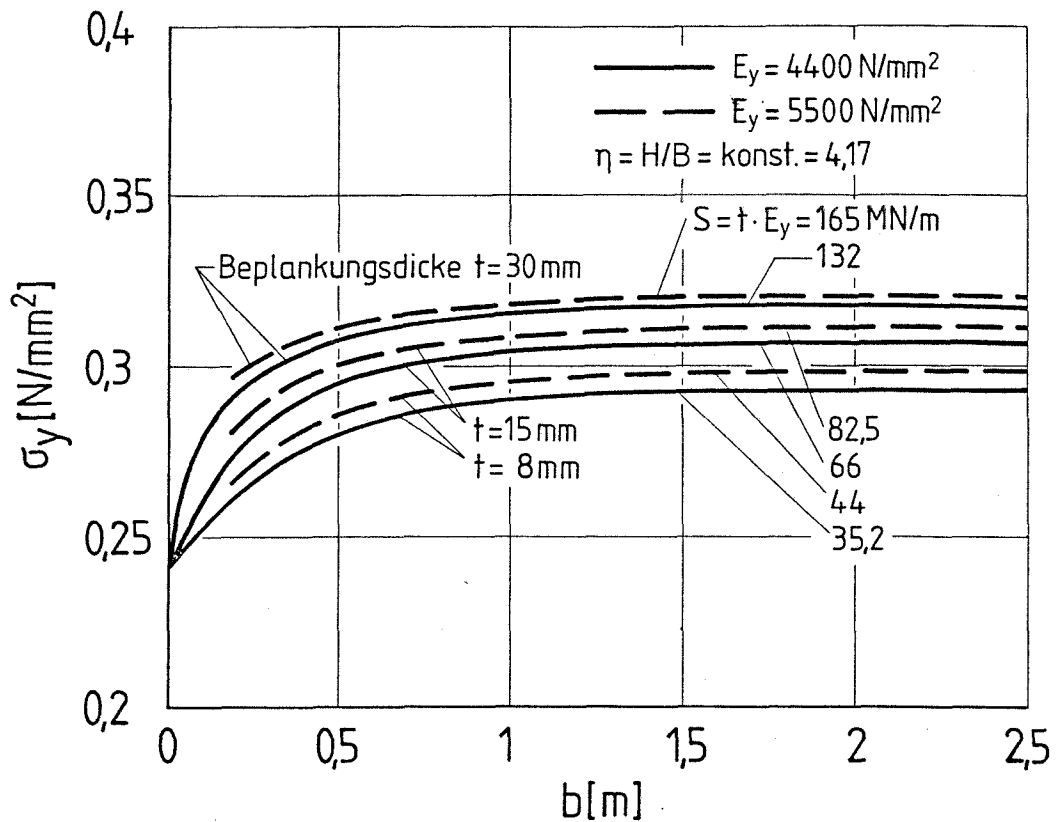


Bild 12: Spannung σ_y der BSH-Querschnittsflanken im mittleren Bereich der Trägerhöhe infolge $\max \Delta u = -1\%$ in Abhängigkeit von der Beplankungsbreite und -dicke b, t und vom Beplankungs-E-Modul; BSH-Querschnittsverhältnis $\eta = \text{konst.} = 4$

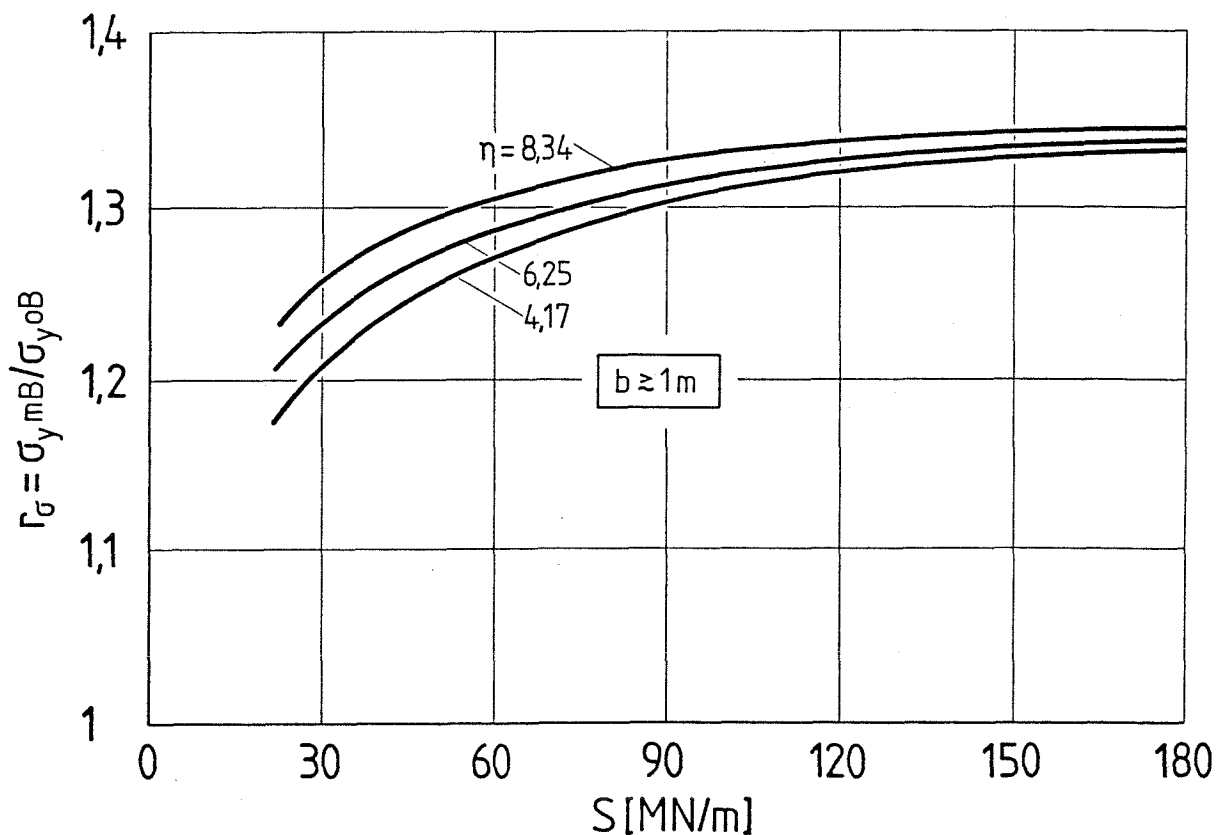


Bild 13: Zunahme der σ_y -Spannungen der BSH-Flanken im mittleren Bereich der Querschnittshöhe infolge Beplankung in Abhängigkeit von der Beplankungssteifigkeit S und vom BSH-Querschnittsverhältnis η ; Beplankungsbreite $b \geq 1 \text{ m}$

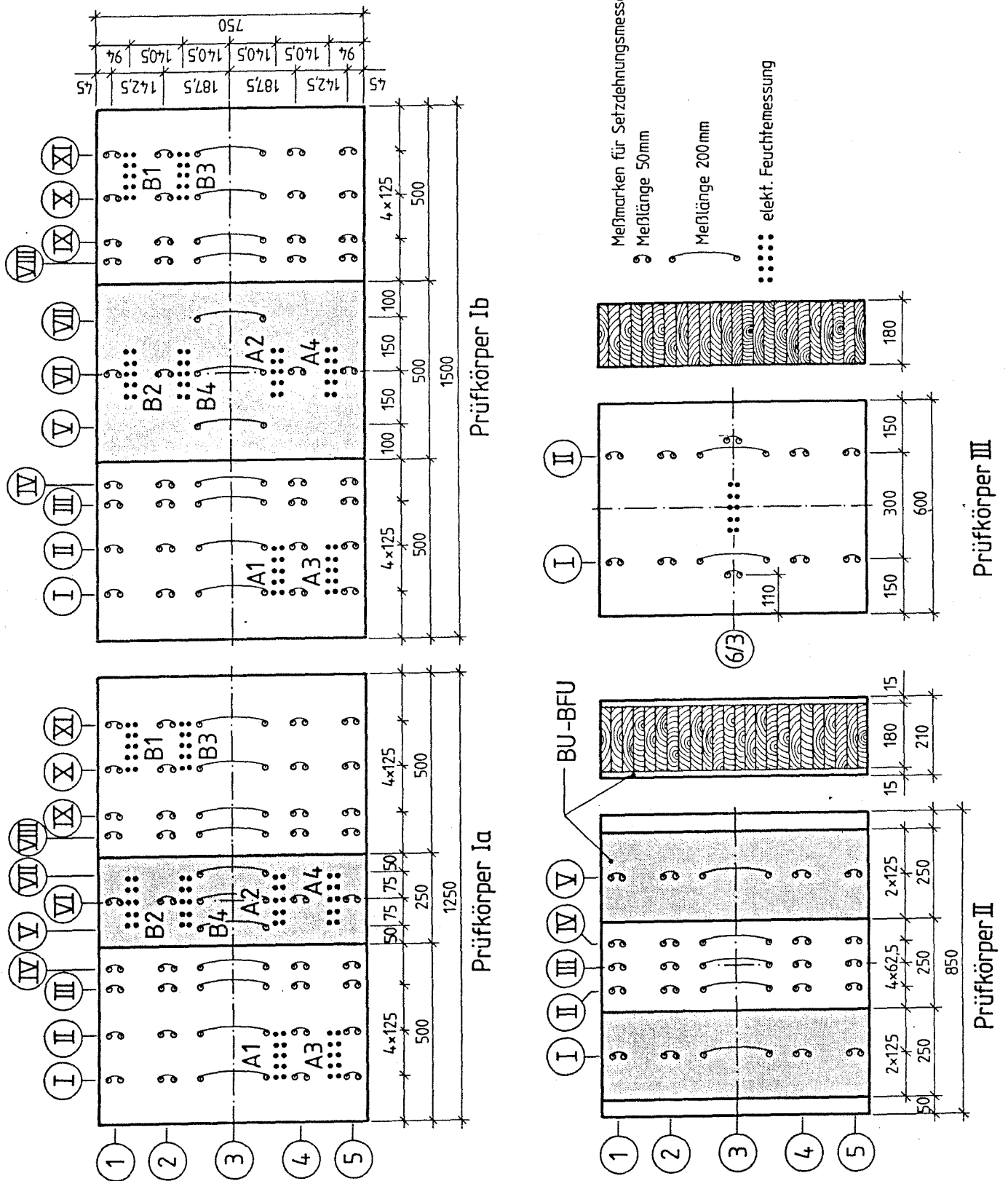


Bild 14: Abmessungen der Prüfkörper I - III mit Bemaßung und Bezeichnung der Dehnungs- und elektrischen Feuchtemeßstellen

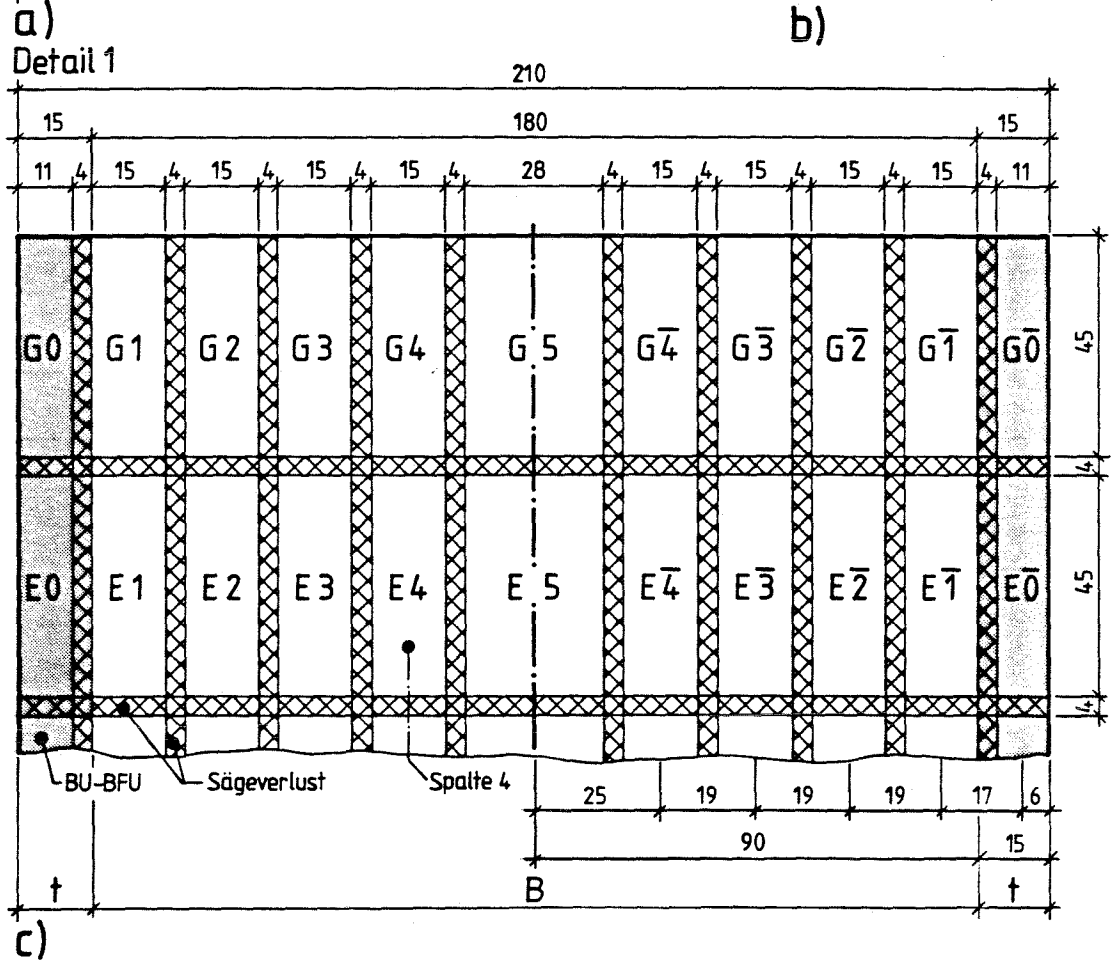
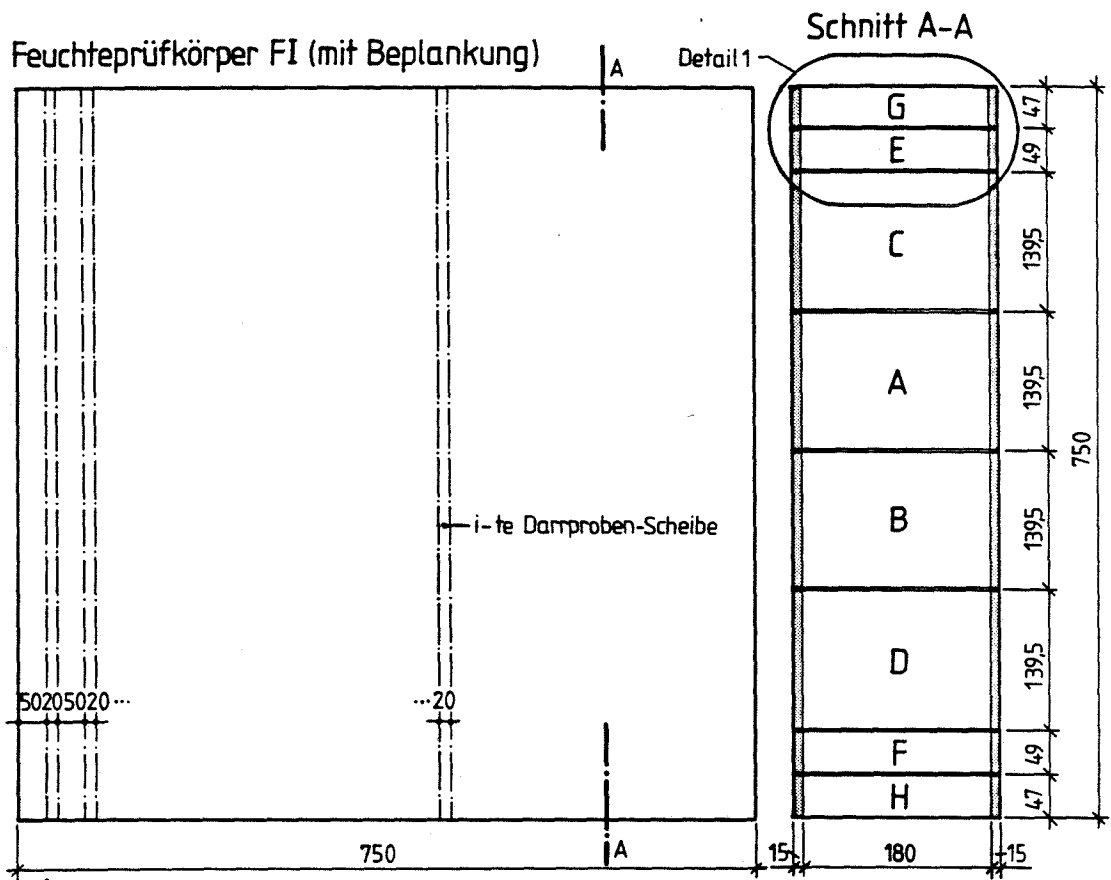


Bild 15a - c: Bepunkteter Feuchte-Prüfkörper FI
 a) Abmessungen vor Versuchsbeginn und Entnahmeschema der Darrproben-Scheiben
 b) c) Bemaßung und Bezeichnung der Darrproben



Bild 16: Vorderansicht der beplankten Prüfkörper I - III

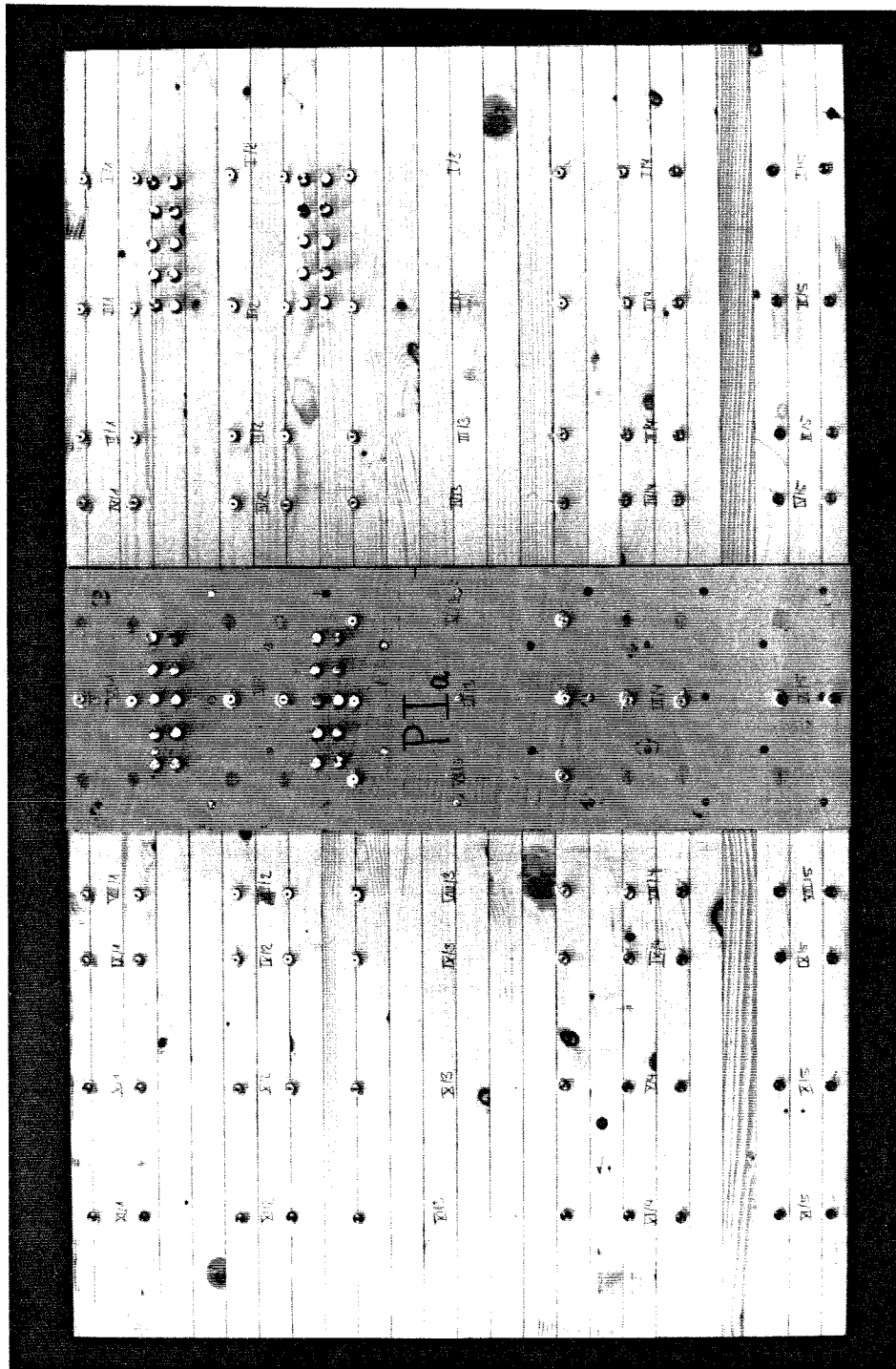


Bild 17: Seitenansicht des beplankten Prüfkörpers Ia

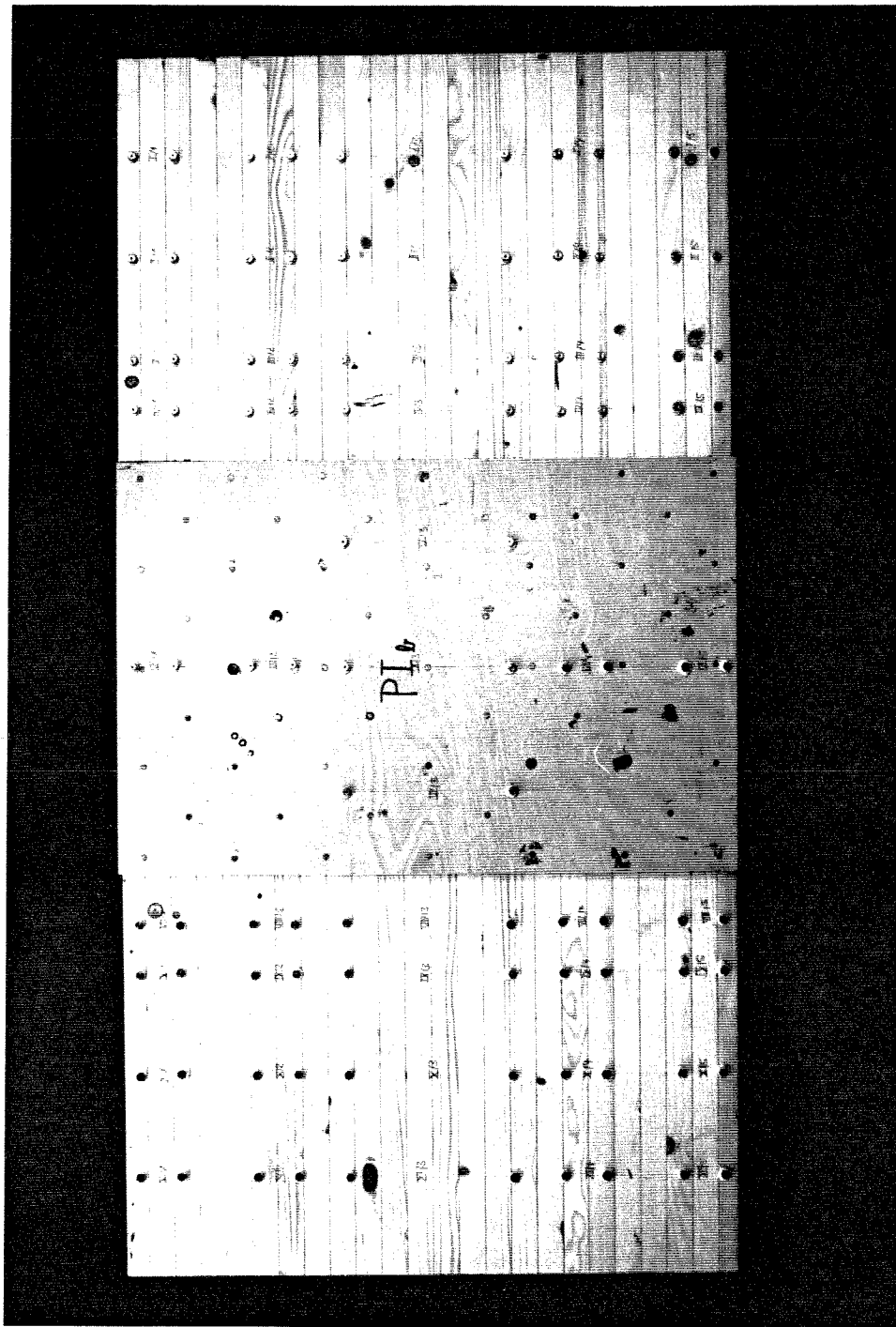


Bild 18: Seitenansicht des beplankten Prüfkörpers Ib

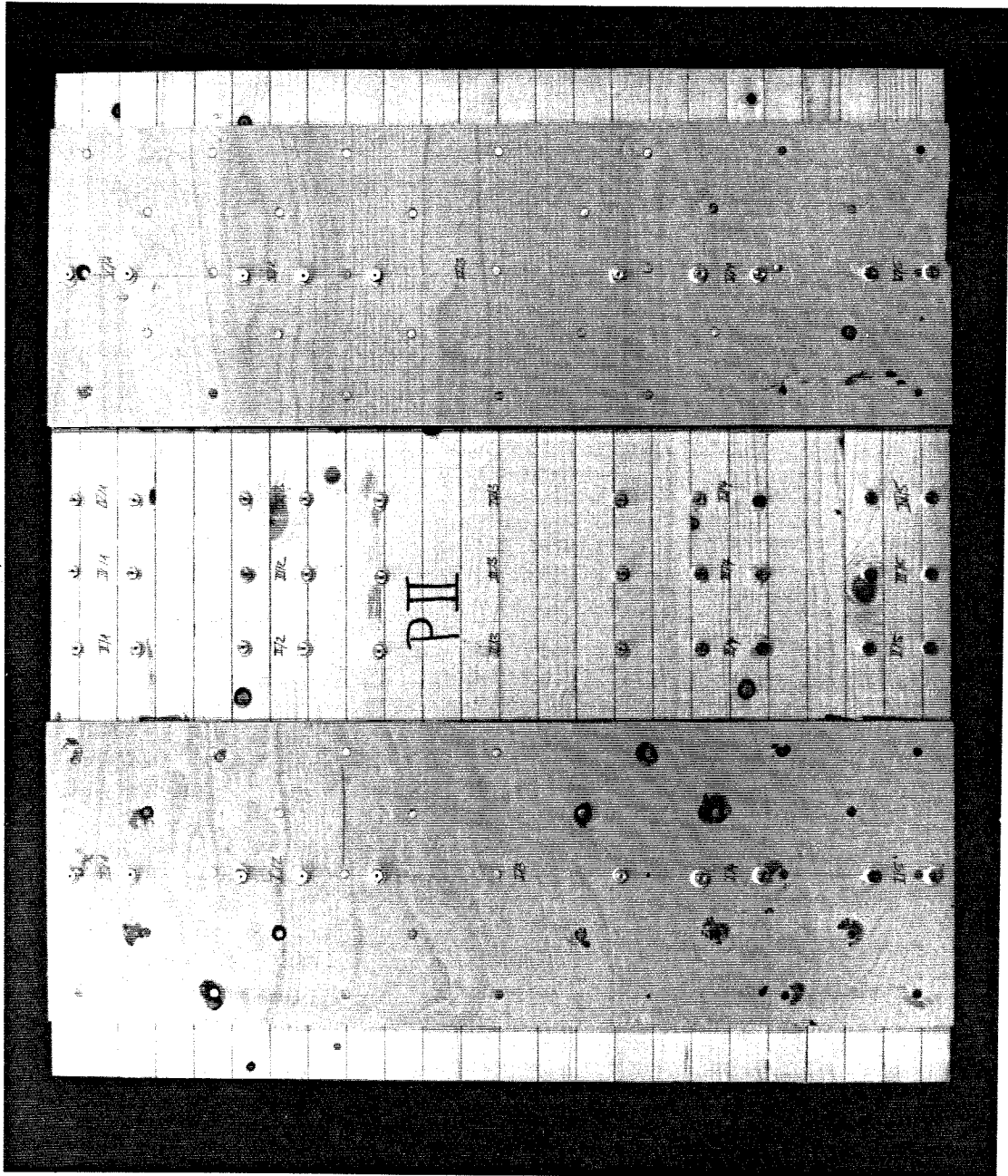
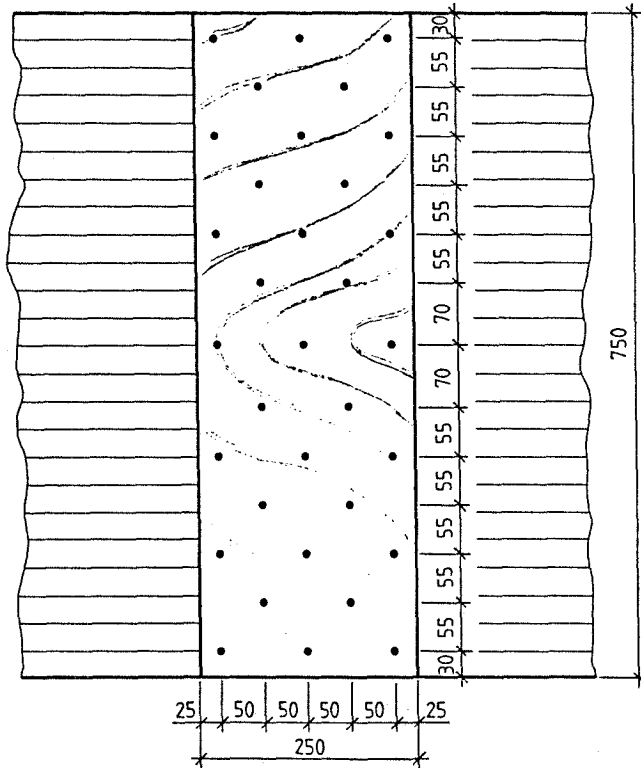


Bild 19: Seitenansicht des beplankten Prüfkörpers II

Prüfkörper Ia



Prüfkörper Ib

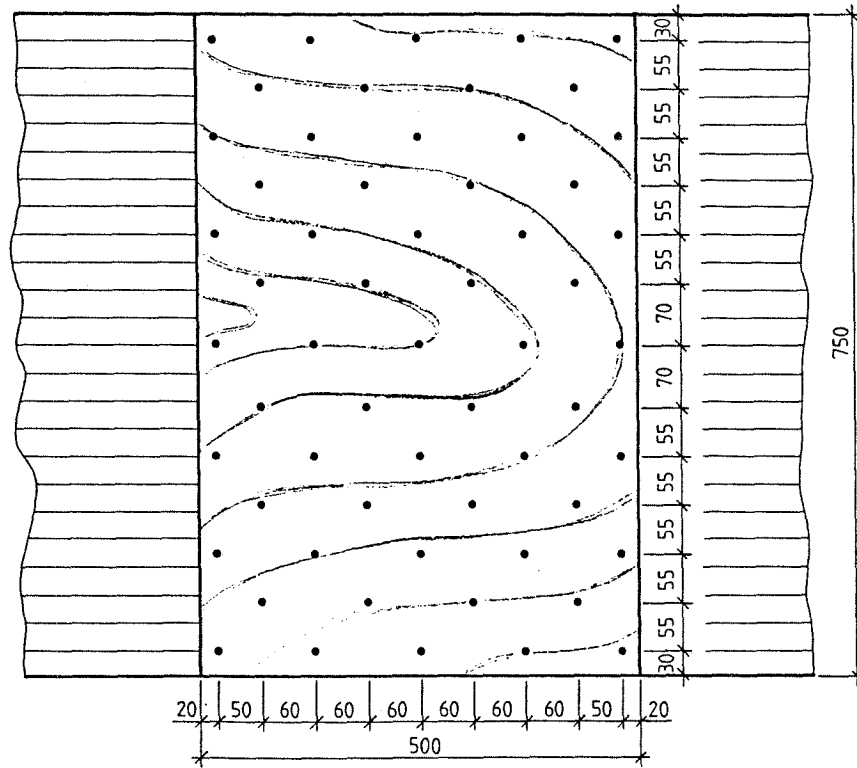


Bild 20: Nagelpläne für die Verklebung der Bepankungen auf den Prüfkörpern Ia, Ib mittels Nagelpreßleimung

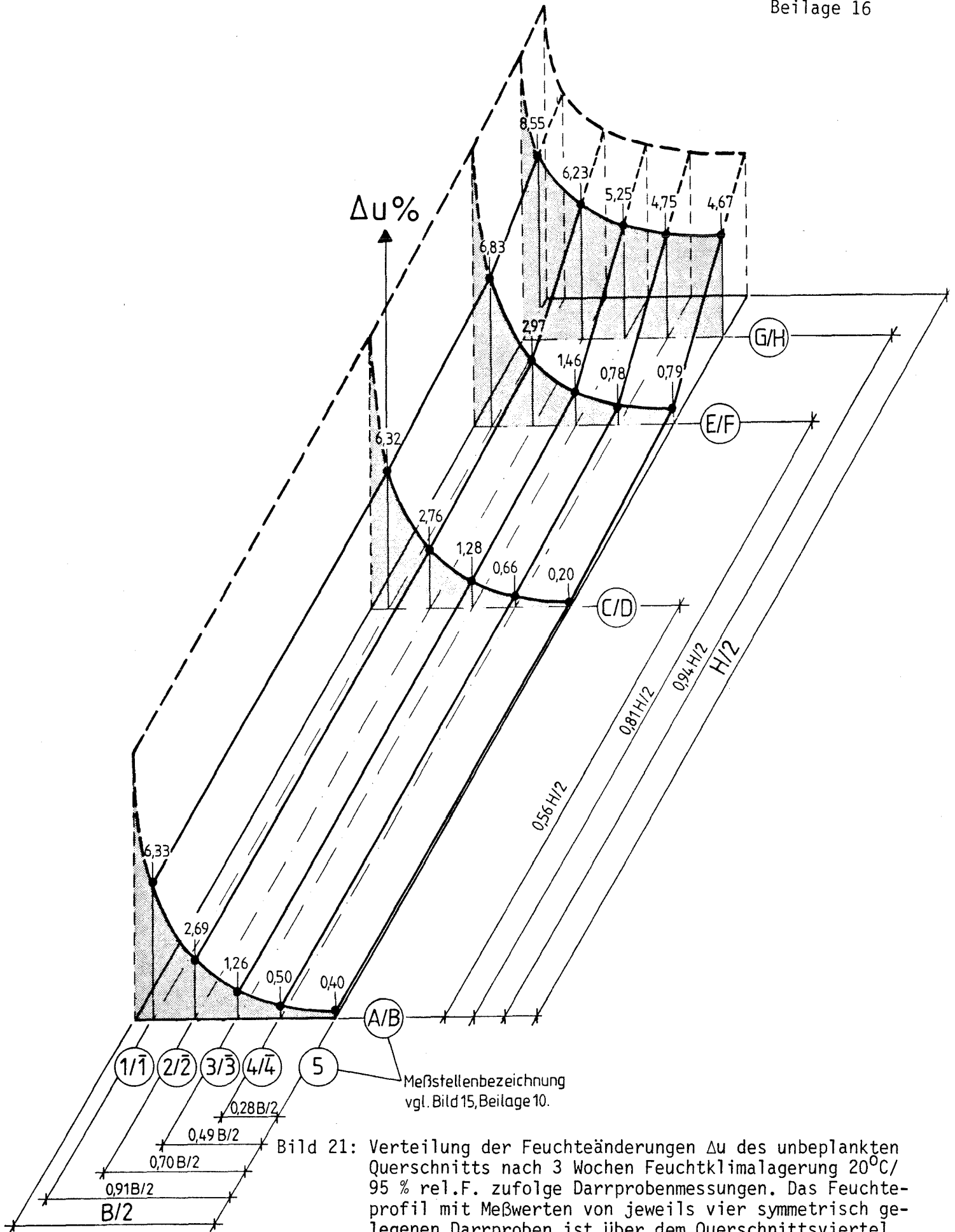


Bild 21: Verteilung der Feuchteänderungen Δu des unbelagten Querschnitts nach 3 Wochen Feuchtklimalagerung $20^{\circ}\text{C}/95\%$ rel.F. zufolge Darrprobenmessungen. Das Feuchteprofil mit Meßwerten von jeweils vier symmetrisch gelegenen Darrproben ist über dem Querschnittsviertel aufgetragen; Ausgangsfeuchte $u_{0,BSH} = 10,8\%$

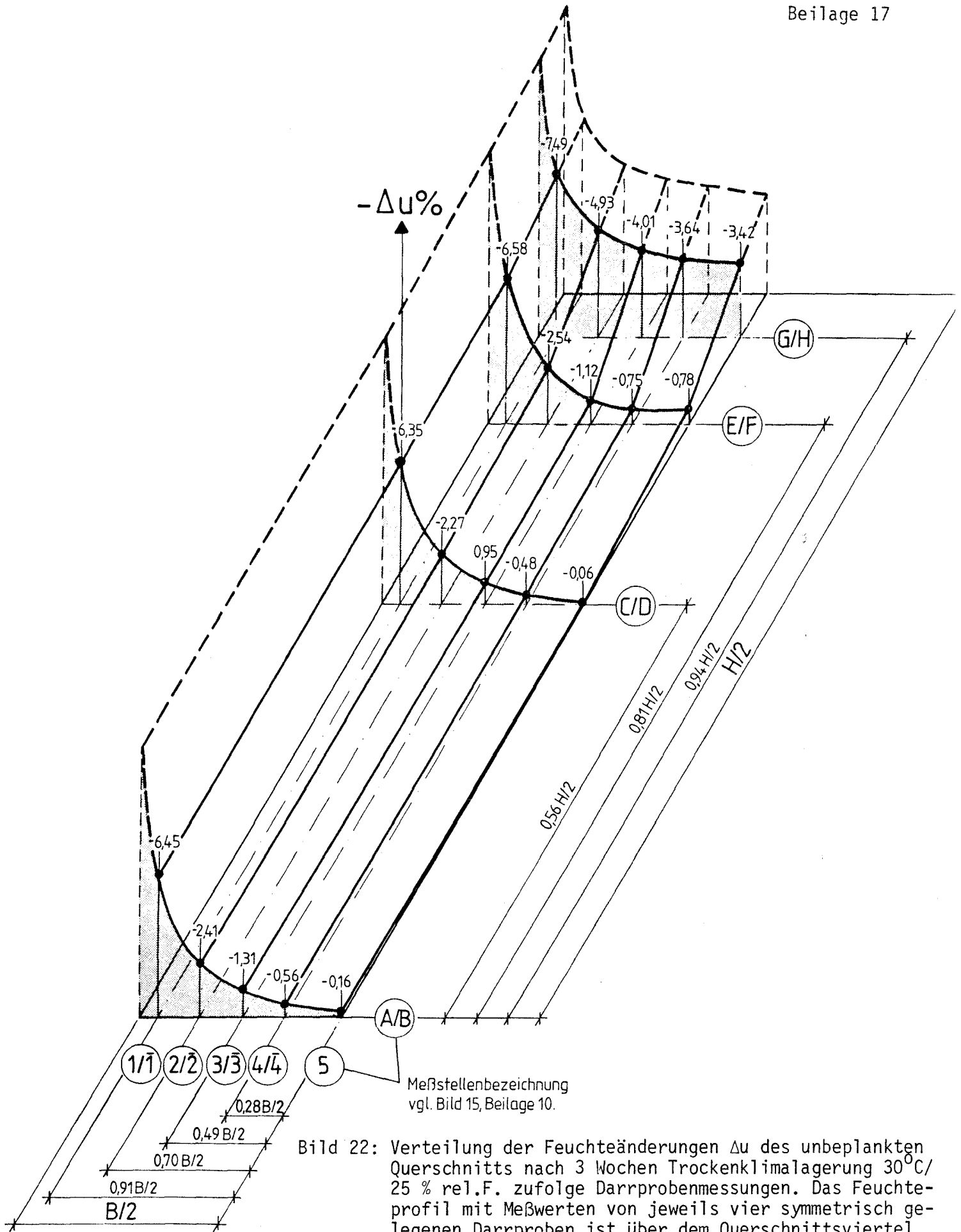


Bild 22: Verteilung der Feuchteänderungen Δu des unbelagten Querschnitts nach 3 Wochen Trockenklimalagerung $30^\circ\text{C}/25\%$ rel.F. zufolge Darrprobenmessungen. Das Feuchteprofil mit Meßwerten von jeweils vier symmetrisch gelegenen Darrproben ist über dem Querschnittsviertel aufgetragen; Ausgangsklima $20^\circ\text{C}/95\%$ rel.F.

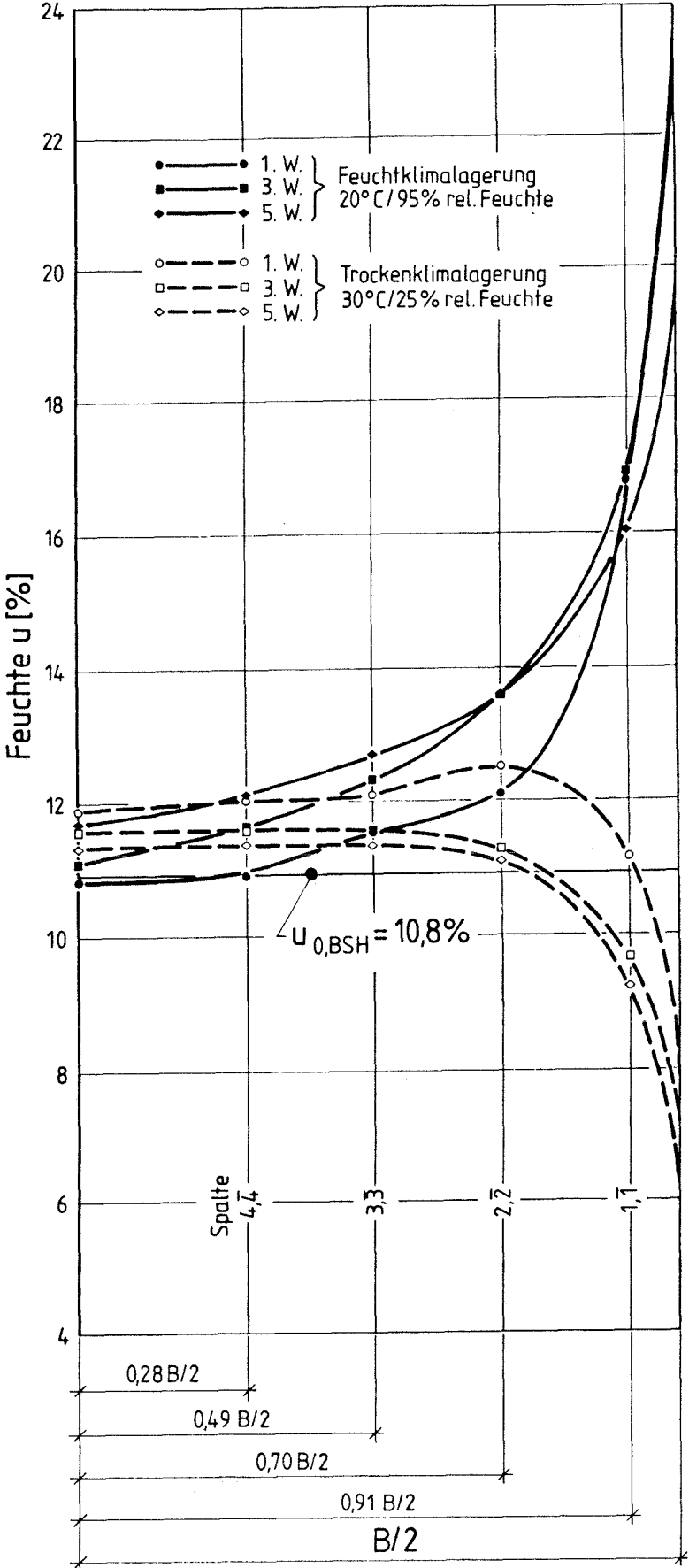


Bild 23: Feuchteverteilungen über die Querschnittsbreite des unbeplankten Feuchteprüfkörpers FII im überwiegenden mittleren Bereich der Trägerhöhe (0,8H) nach 1, 3 und 5 Wochen Feuchtklimalagerung 20°C/95 % rel.F. bzw. Trockenklimalagerung 30°C/25 % rel.F.

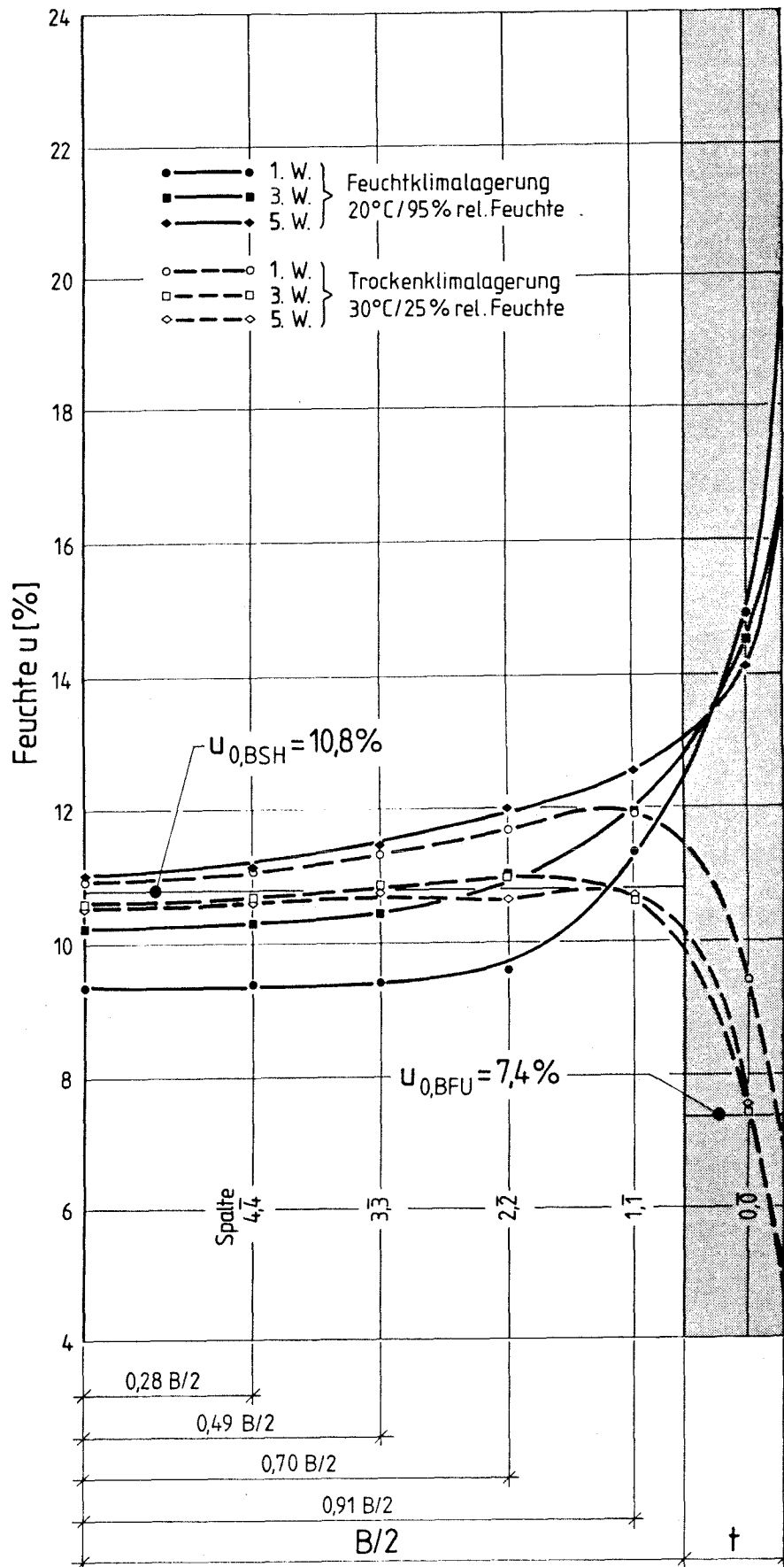


Bild 24: Feuchteverteilungen über die Querschnittsbreite des beplankten Feuchteprüfkörpers FI im überwiegenden mittleren Bereich der Trägerhöhe (0,8H) nach 1, 3 und 5 Wochen Feuchtklimalagerung 20°C/95 % rel.F. bzw. Trockenklimalagerung 30°C/25 % rel.F.

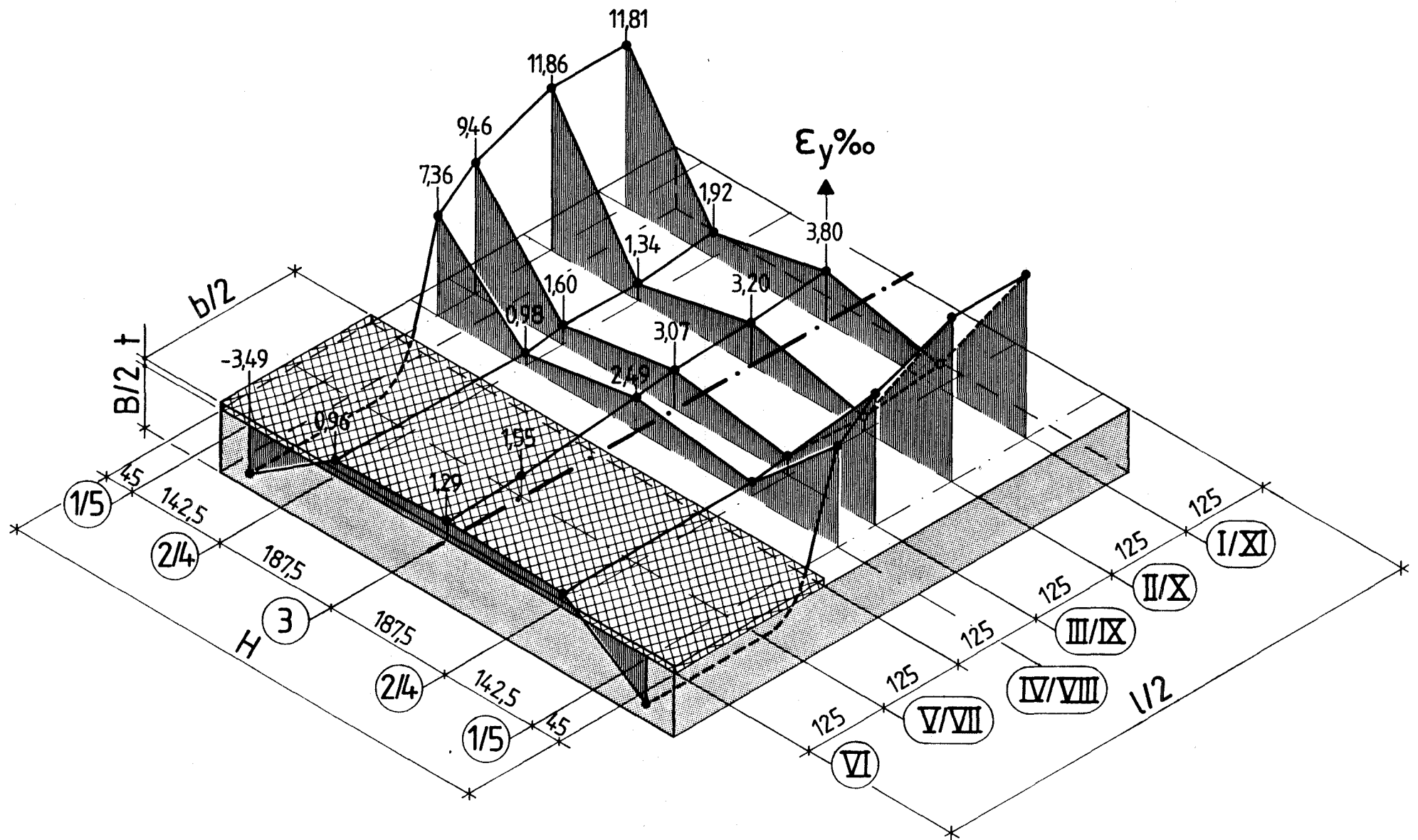


Bild 25: Verteilung der gemessenen Dehnungen des abschnittsweise beplankten Prüfkörpers Ib nach 3 Wochen Feuchtklimalagerung 20°C/95 % rel.F.. Das Dehnungsprofil ist über dem Prüfkörpervierviertel aufgetragen; die angegebenen Meßwerte sind die Mittelwerte aller symmetrisch gelegenen Meßstellen

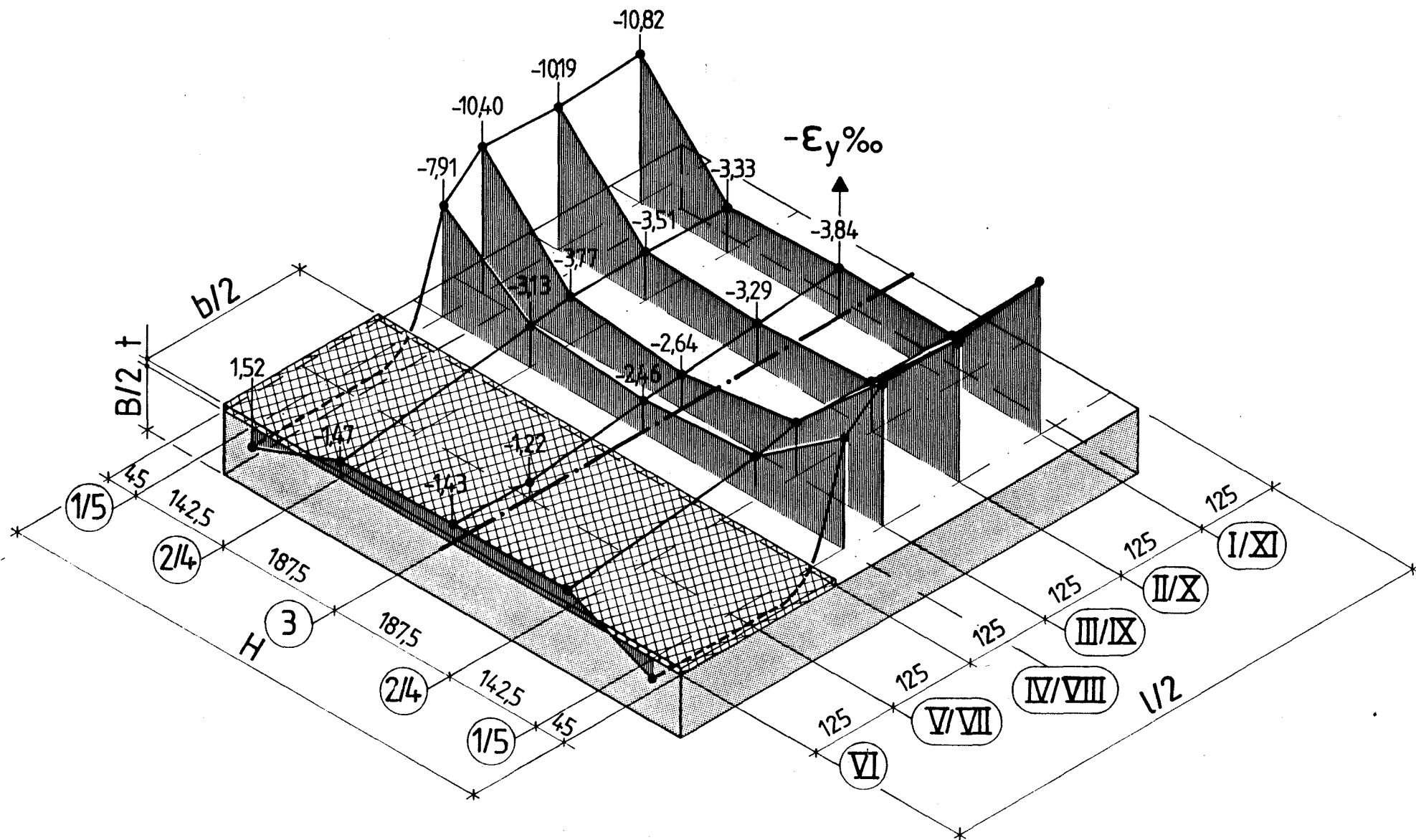


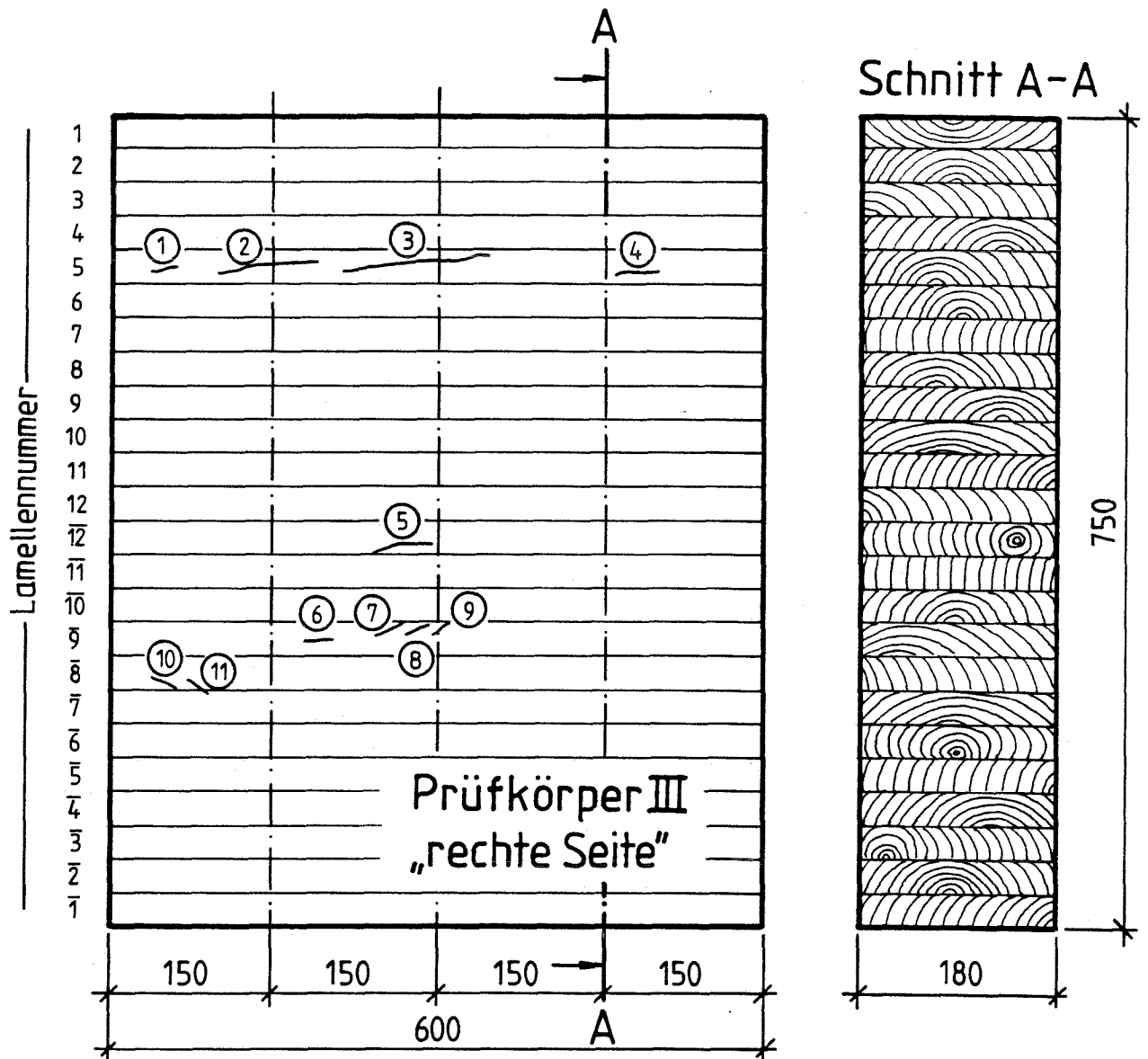
Bild 26: Verteilung der gemessenen Dehnungen des abschnittsweise beplankten Prüfkörpers Ib nach 3 Wochen Trockenklimalagerung 30°C/25 % rel.F.. Das Dehnungsprofil ist über dem Prüfkörperviertel aufgetragen; die angegebenen Meßwerte sind die Mittelwerte aller symmetrisch gelegenen Meßstellen

Prüfkörper	Bereich	Dehnungen ϵ_y in [°/∞] bei Feuchtklimalagerung					
		im mittleren Bereich der Trägerhöhe nach			im Randbereich der Trägerhöhe nach		
		1. Woche	3. Woche	5. Woche	1. Woche	3. Woche	5. Woche
III	unbeplankt	2,15	2,75	3,69	9,64	11,19	11,68
Ia		2,02	2,49	2,97	8,44	11,71	12,57
Ib		2,50	2,49	3,73	7,69	11,04	12,19
$\bar{\epsilon}_y = \Sigma P_i/3$		2,22	2,58	3,46	8,59	11,31	12,15
Ia	beplankt	1,01	1,48	1,67	- 4,19	-3,86	-3,79
Ib		1,53	1,34	1,42	-3,90	-3,49	-3,06
$\bar{\epsilon}_y = \Sigma P_i/2$		1,27	1,41	1,55	-4,05	-3,68	-3,42

Tabelle 6: Gemessene Dehnungen ϵ_y parallel zur Trägerhöhe der Prüfkörper Ia, Ib, III bei Lagerung im Feuchtklima 20°C/95 % rel. F. nach Klimatisierungszeiträumen von 1, 3 und 5 Wochen

Prüfkörper	Bereich	Dehnungen ϵ_y in [°/∞] bei Trockenklimalagerung					
		im mittleren Bereich der Trägerhöhe nach			im Randbereich der Trägerhöhe nach		
		1. Woche	3. Woche	5. Woche	1. Woche	3. Woche	5. Woche
P III	unbeplankt	-0,07	-1,34	-2,38	-8,25	-12,12	-14,28
P Ia		-1,11	-2,13	-2,66	-5,55	-10,00	-11,20
P Ib		-2,27	-3,40	-3,73	-6,40	-10,47	-11,56
$\bar{\epsilon}_y = \Sigma P_i/3$		-1,15	-2,29	-2,92	-6,73	-10,86	-12,35
P Ia	beplankt	-1,02	-1,78	-2,05	+1,80	+2,29	+2,28
P Ib		-0,69	-1,34	-1,49	+1,77	+1,52	+1,53
$\bar{\epsilon}_y = \Sigma P_i/2$		-0,86	-1,56	-1,77	+1,79	+1,91	+1,91

Tabelle 7: Gemessene Dehnungen ϵ_y parallel zur Trägerhöhe der Prüfkörper Ia, Ib, III bei Lagerung im Trockenklima 30°C/25 % rel. F. nach Klimatisierungszeiträumen von 1, 3 und 5 Wochen



Rißnummer	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
Rißlänge l [mm]	14	142	105	47	37	15	24	10	11	15	13
Rißöffnung m [mm]	0,1	0,2	0,2	0,3	0,15	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
Rißtiefe a [mm]	2	3	3	3	3	2	2	3	2	3	3

Bild 27: Lage und Größe der Risse auf der "rechten" Seite des unbeplankten Prüfkörpers III nach 1ner Woche Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.

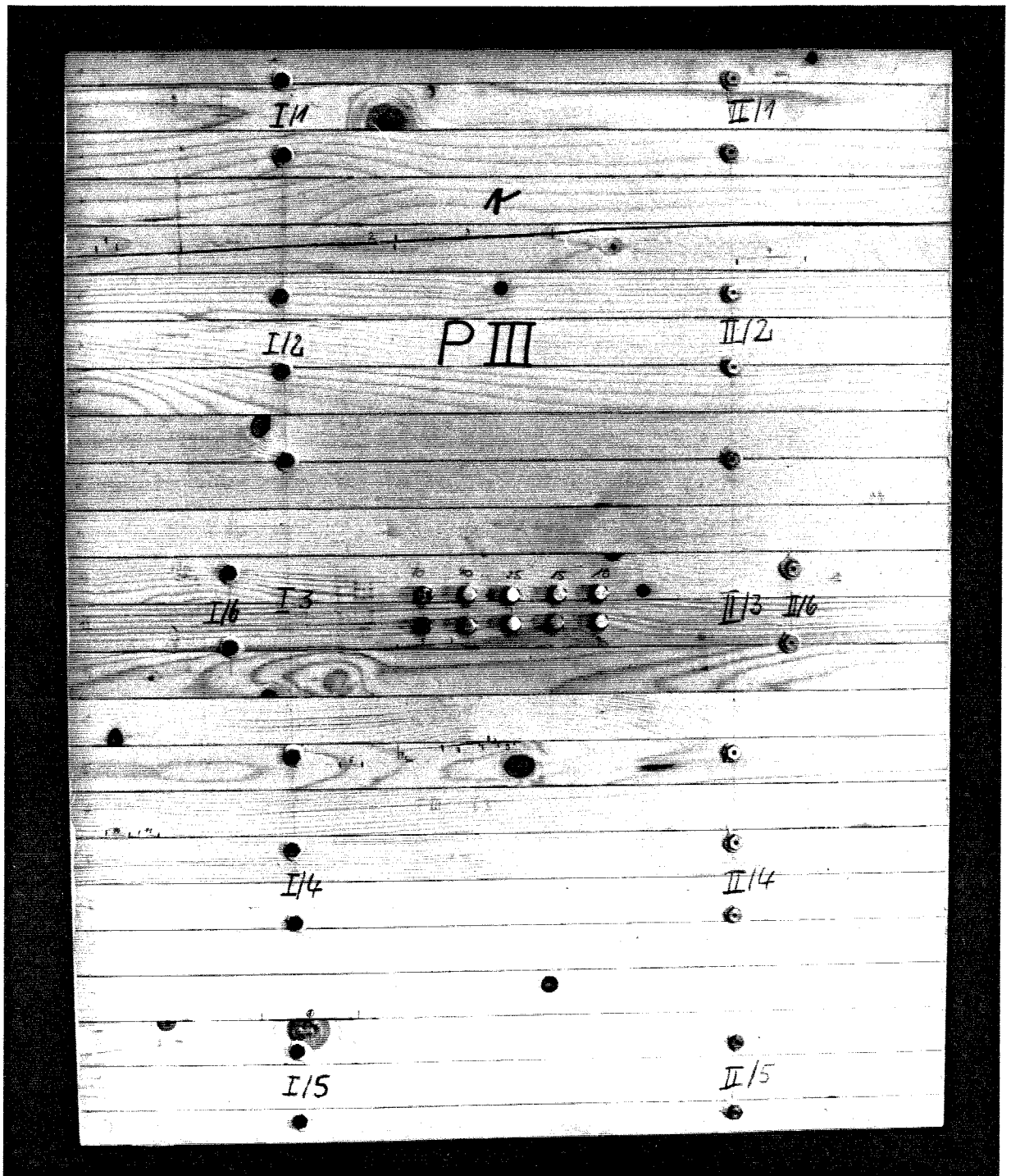


Bild 28: Ansicht der "rechten" Seite des unbeplankten Prüfkörpers III nach 5 Wochen Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangsklima 20°C/95 % rel.F.

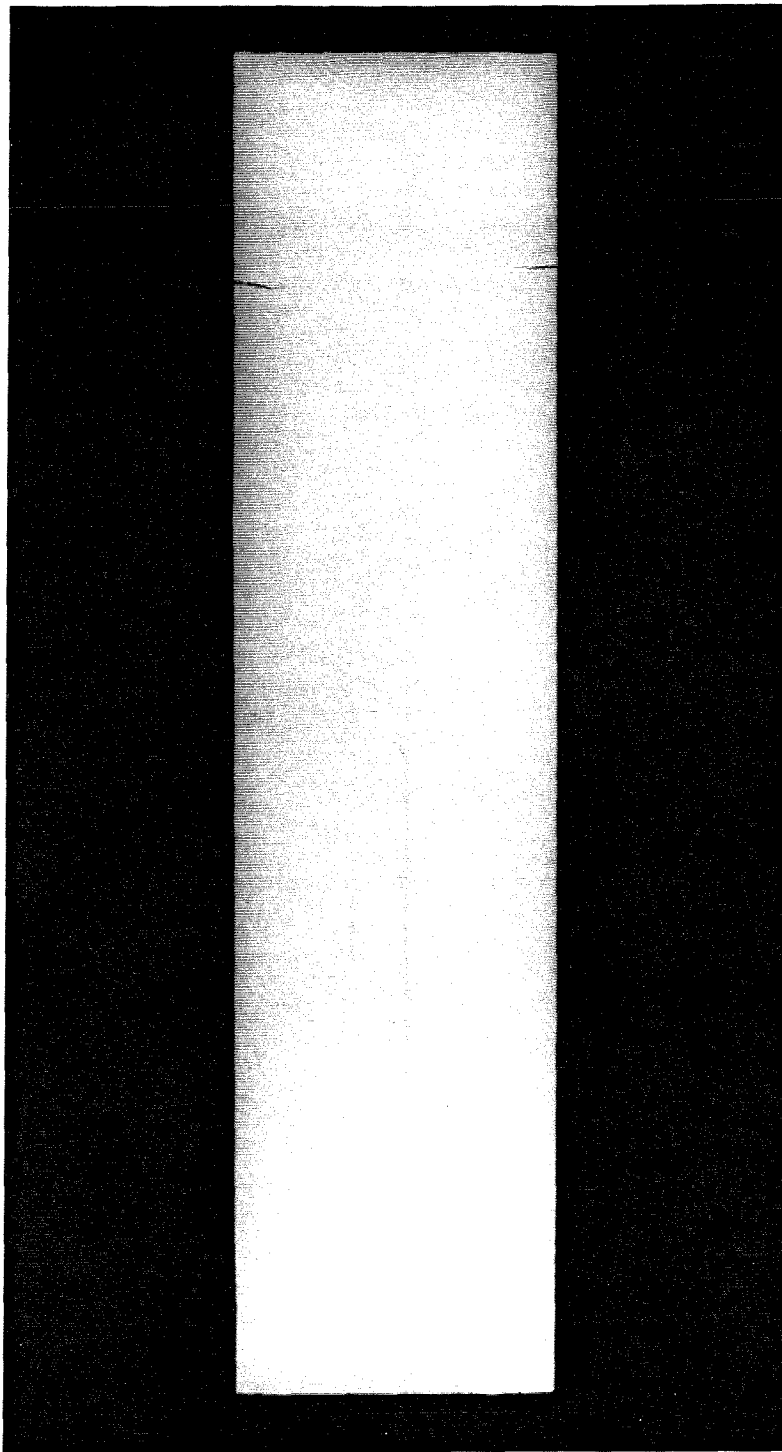
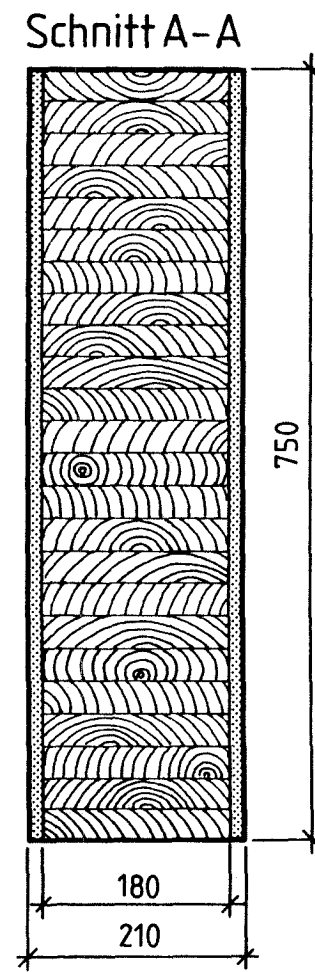
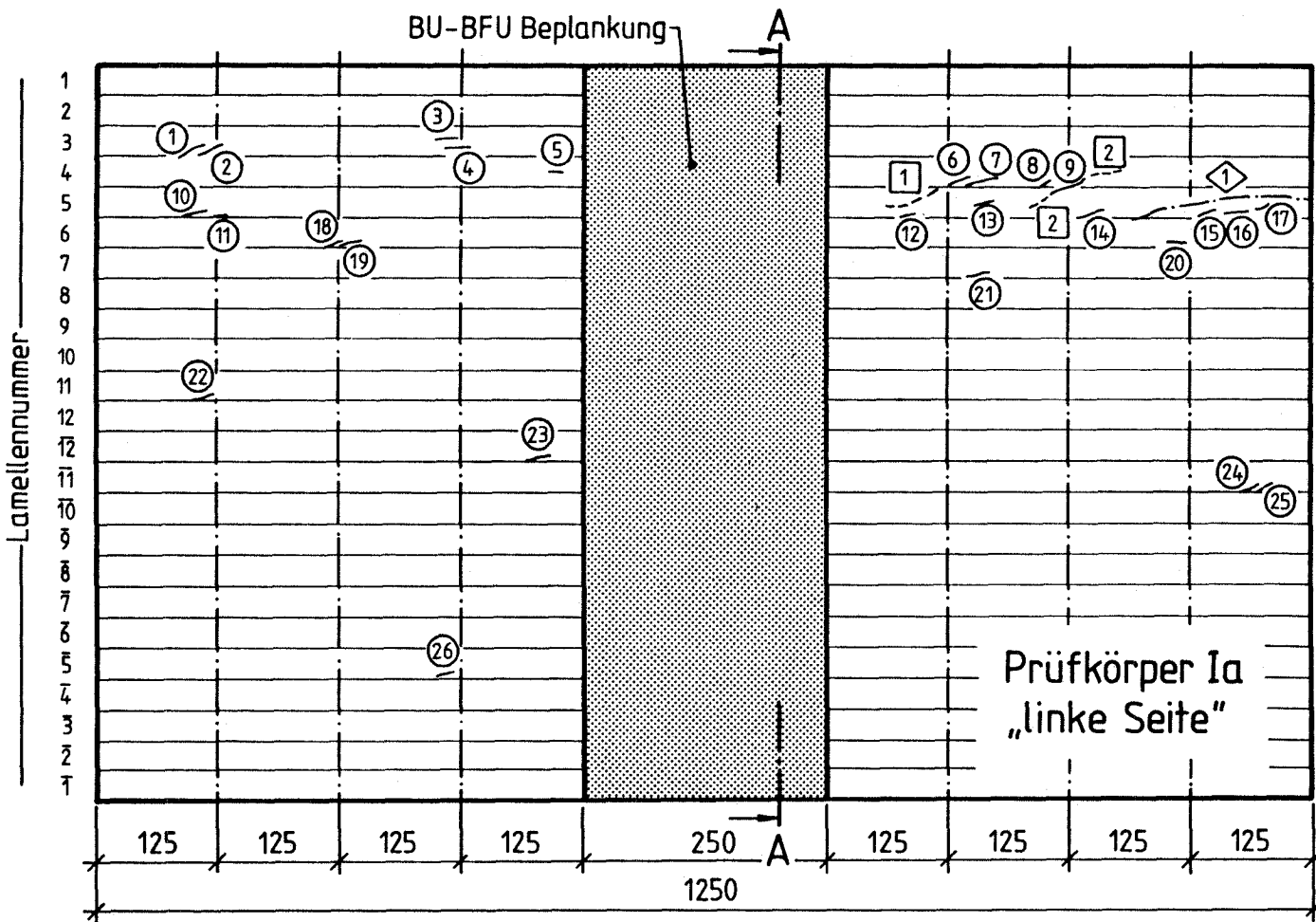


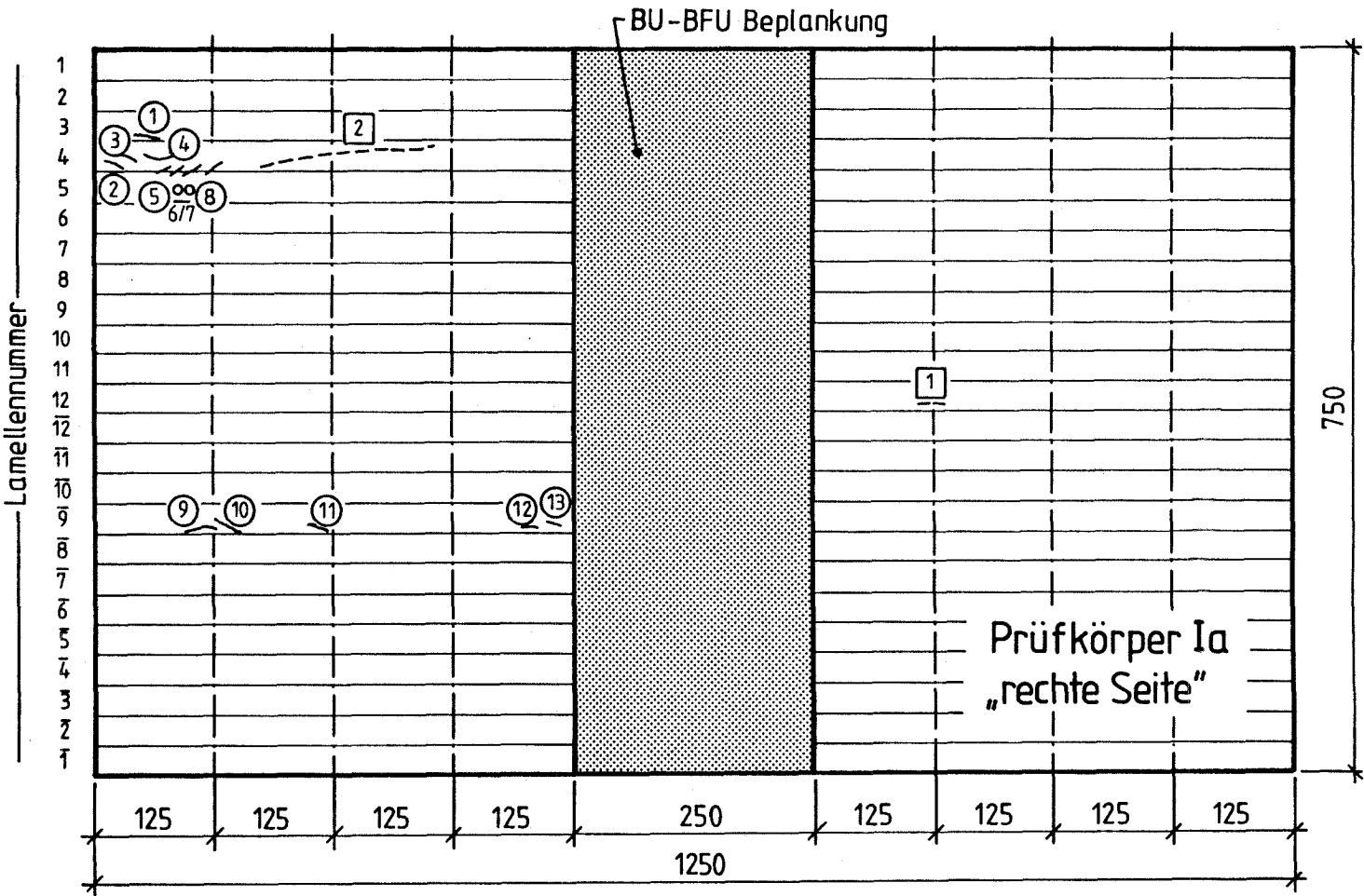
Bild 29: Ansicht der "rechten" Stirnseite des unbeplankten Prüfkörpers III nach 5 Wochen Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.. Bezüglich "rechter" Stirnseite vgl. Bild 28, Beilage 25. Die Trägerstirnseite ist wie die Stirnflächen aller Prüfkörper mit einem 2fachen diffusionshemmenden Epoxidharz-anstrich (Pefalon 115-Z) behandelt

Bild 30: Lage und Größe der Risse auf der "linken" Seite des beplankten Prüfkörpers Ia nach 1, 2 und 3 Wochen Klimatisierung im Trocken-Klima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchteklima 20°C/95 % rel.F.



Rißnummer [○,□,◇]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	①	②	◇			
Rißlänge l [mm]	6	12	17	17	8	15	20	7	45	22	8	11	11	7	4	3	19	6	14	16	7	9	10	8	9	7	50	55+22	200		
Rißöffnung m [mm]	0,05	0,05	0,1	0,3	0,05	0,5	0,3	0,05	0,5	0,3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,2	0,8	0,8	
Rißtiefe a [mm]	2	2	3	2	1	3	2	1	2	2	2	2	3	2	2	1	3	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	4	10	20

○ ≙ Risse nach 1ster Woche, □ ≙ R.n. 2ter W., ◇ ≙ R. n. 3ter W.



Rißnummer	[○, □]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	□ 1	□ 2
Rißlänge	l [mm]	10	30	25	23	9	10	13	10	34	25	36	8	11	13	280
Rißöffnung	m [mm]	0,5	1,0	1,0	0,5	0,4	0,6	0,7	0,5	0,6	0,4	0,9	0,05	0,05	0,05	0,8
Rißtiefe	a [mm]	2	20	3	4	2	2	3	4	5	6	4	2	2	2	15

○ ≙ Risse nach 1ster Woche, □ ≙ R. n. 2ter W.

Bild 31: Lage und Größe der Risse auf der "rechten" Seite des beplankten Prüfkörpers Ia nach 1 und 2 Wochen Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.

Jahreszahl

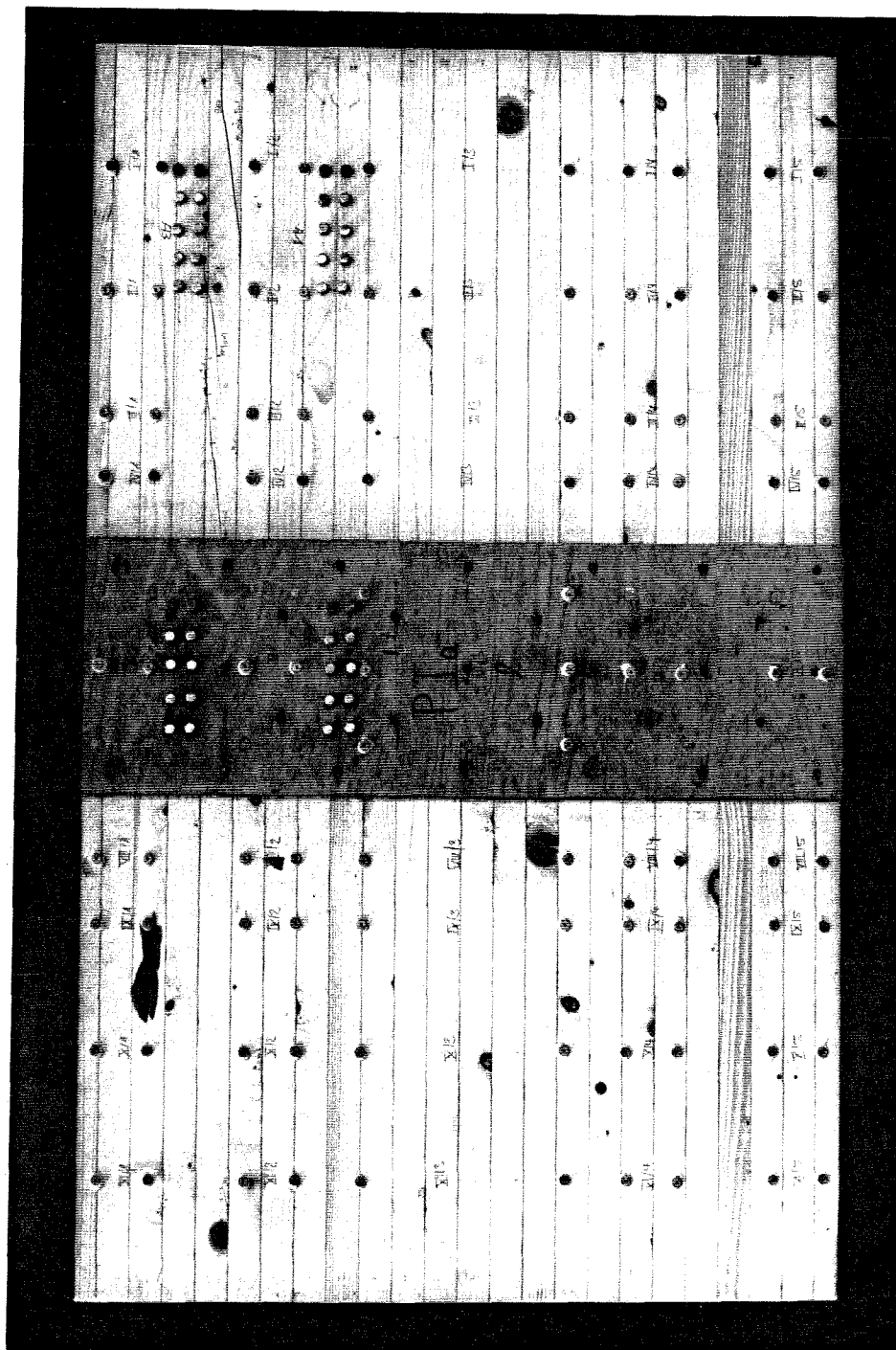


Bild 32: Ansicht der "linken" Seite des beplankten Prüfkörpers Ia nach 5 Wochen Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.

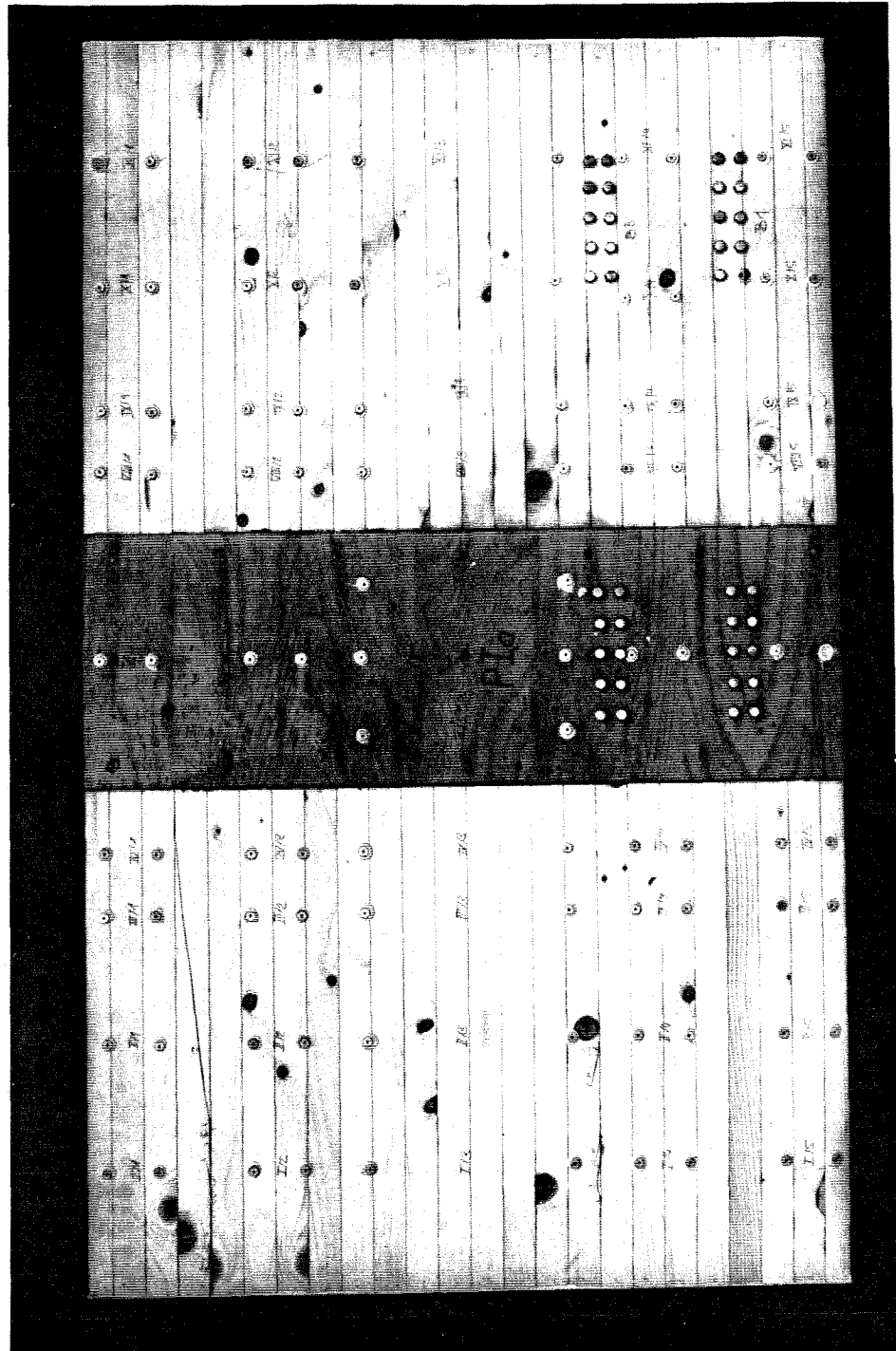
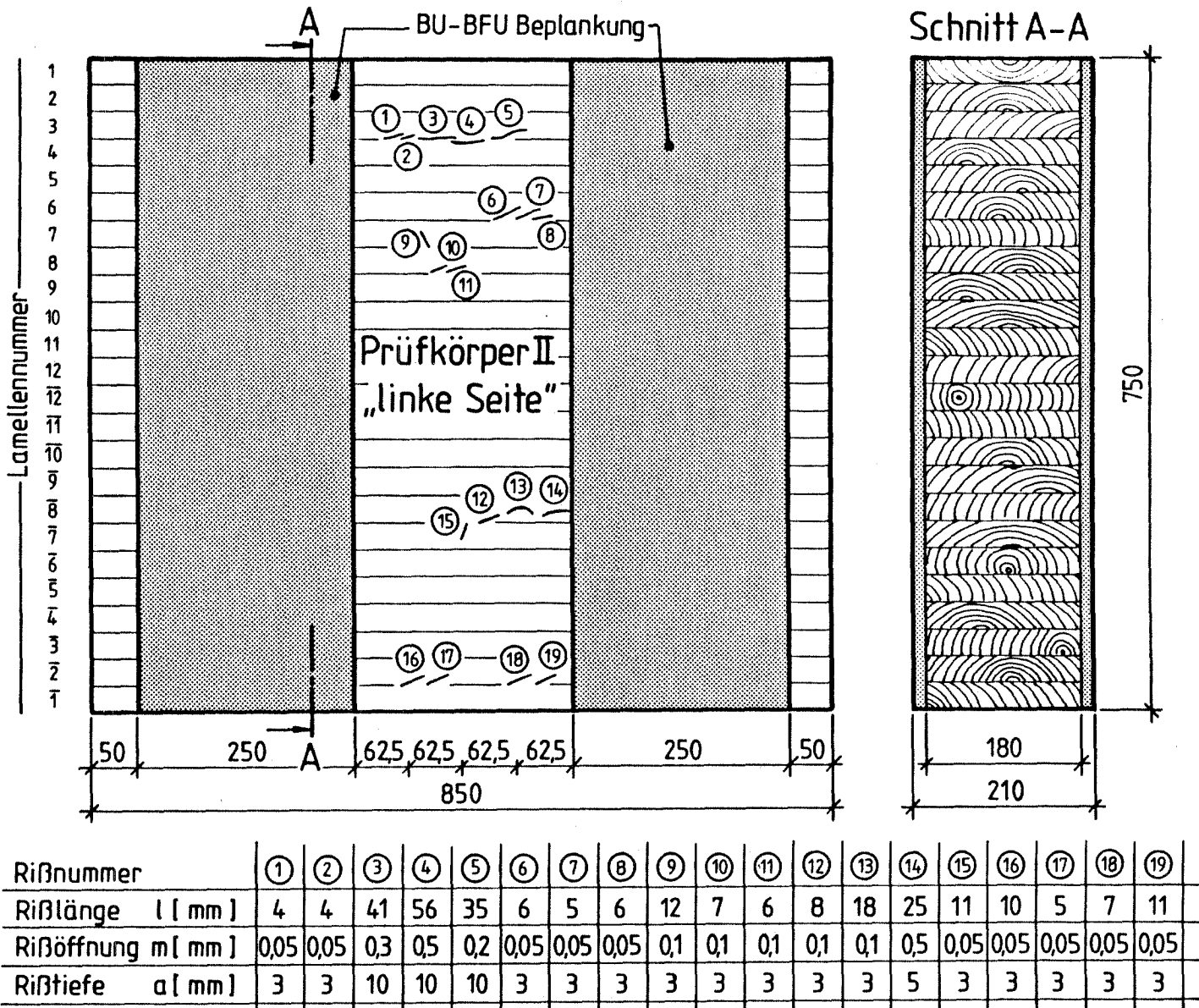


Bild 33: Ansicht der "rechten" Seite des beplankten Prüfkörpers Ia nach 5 Wochen Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.

Bild 34: Lage und Größe der Risse auf der "linken" Seite des beplankten Prüfkörpers II nach 1ner Woche Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.



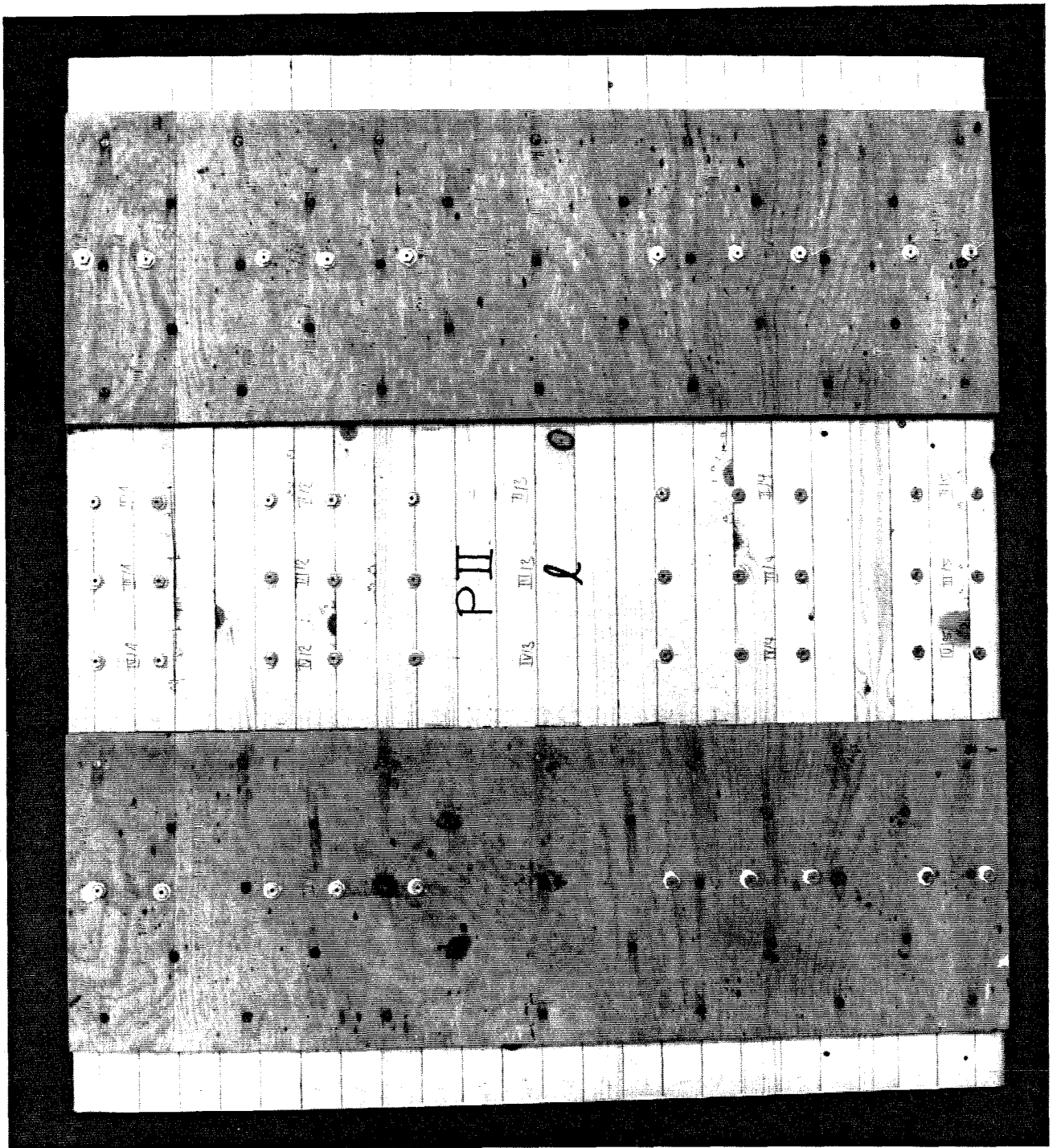


Bild 35: Ansicht der "linken" Seite des beplankten Prüfkörpers II nach 5 Wochen Klimatisierung im Trockenklima 30°C/25 % rel.F.; Ausgangs-Feuchtklima 20°C/95 % rel.F.

Reduction of crack development in timber constructions through
bonded plywood panels E-84/28 (S. Aicher)

The reported investigations deal with the strain and crack reduction of climatically highly stressed glulam through bonded hardwood/beech plywood panels. The target was to quantify the stresses and strains of the compound cross-section when submitted to a change of moisture and to propose adequate panel reinforcements.

In the theoretical part of the project linear elastic finite element computations on plywood reinforced glulam members submitted to a parabolic moisture distribution along width were carried out. The investigated parameters were the glulam cross-section and the thickness, width and elastic properties of the panels. The grain direction of the face veneers was assumed parallel to the beam axis. The FE-results can be comprised as follows: The strain reduction of the longer sides of the glulam cross-section increases with growing panel stiffness and width and with rising glulam cross-sectional slenderness; an increase of the panels widths influences the results only below 1 m. Realistic plywood thicknesses and E_T moduli of elasticity (8 - 30 mm, 4000 - 6000 MPa) in case of panel widths of about 1 m cause strain reductions of 40 - 70 % in the middle part of the member depths. The glulam stresses at the longer cross-sectional rims are increased maximally 35 % depending on the panel type. The panel stresses along depth decrease with growing thickness and width and falling E_T modulus of the panels. Panel widths less than 0.2 m should be avoided due to high panel and glueline stresses.

In the experimental part of the investigations 6 larger scaled specimens (4 with bond attached beech plywood, 2 unplanked) were investigated thoroughly concerning moisture distribution, strain and crack behaviour. For strain measurements about 300 strain gauge fixations were applied. Alle specimens were submitted to a wet climate 20°C/95 % rel. humidity



Réduction de la formation de fissures dans des constructions en bois par collage de panneaux en contreplaqués E-84/28 (S. Aicher)

Des études ont été réalisées sur la réduction des déformations et de la fissuration de bois lamellé-collé soumis à des contraintes climatiques élevées par le collage de panneaux contreplaqués. Il était le but de quantifier le comportement aux contraintes et déformations de la section composée sous l'influence d'un changement d'humidité et de présenter des propositions pour des revêtements en contreplaqué appropriés.

Dans la partie théorique du projet on a réalisé des calculs linéaires-élastiques avec éléments finis sur des poutres en bois lamellé-collé recouverts de contreplaqués soumis à une répartition parabolique de l'humidité sur la section. Les paramètres étudiés étaient la relation de section des poutres en bois lamellé-collé ainsi que l'épaisseur, la largeur et les propriétés élastiques des panneaux dues à l'assemblage composé de feuilles. La direction de fibre de feuilles de couverture était supposée comme étant parallèle à l'axe des poutres. Les résultats d'éléments finis sont les suivants: l'empêchement à la déformation des bords de la section augmente avec la raideur et épaisseur croissante du revêtement ainsi qu'avec la proportion de section de bois lamellé-collé croissante; une augmentation de la largeur des panneaux ne se répercute sur les résultats qu'en dessous d'une largeur de 1 m. Des épaisseurs des panneaux et modules d'élasticité réalistes (8-30 mm, 4000-6000 MN/m²) dans le cas de largeurs de panneaux d'environ 1 m causent des réductions de déformation d'environ 40-70 % dans la partie moyenne de la hauteur du poutre. Les contraintes des panneaux le long des sections sont augmentées de 35 % au maximum. Des largeurs de panneaux < 0,2 m doivent être évitées en raison des contraintes élevées des panneaux et des joints de collage.

Dans la partie expérimentelle des études on a examiné 6 éprouvettes de taille grande (4 éprouvettes recouvertes de contreplaqués de hêtre, 2 non-recouvertes) en vue de la répartition d'humidité, du comportement à la déformation et fissuration. Pour les mesures de déformation on a appliqué à peu près 300 gauges de