

Zusammenfassung

Mit der Entwicklung der Brettsperrholz-Massivbauweise in den letzten Jahrzehnten, erlebt der Holzbau zurzeit einen regelrechten Aufschwung. Brettsperrholz ermöglicht durch seinen mehrschichtigen „gesperrten“ Aufbau die Anwendung als flächiges Element. Aufgrund seiner hohen Tragfähigkeit kommen Brettsperrholzelemente vielfach als Decken-, Dach- und Wandelemente zur Anwendung. Im Bereich der Verbindungen der Elemente zueinander werden die Elemente auf verschiedenste Weise beansprucht. Eine Beanspruchungsart ist der Querdruck, welcher in dieser Masterarbeit behandelt wird. Brettsperrholz besitzt aufgrund des „Sperrreffekts“ eine höhere Querdrucksteifigkeit sowie Querdruckfestigkeit im Vergleich zu Brettschichtholz bzw. Schnittholz.

In der Praxis findet eine Querdruckbeanspruchung häufig im Anschluss Wand/Decke oder Stütze/Decke statt. Um diese Beanspruchungsart beschreiben und berechnen zu können ist es notwendig die mechanischen Querdruckeigenschaften zu kennen. Diese sind derzeit normativ noch nicht geregelt. In der Forschung wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt, welche das Ziel haben, die mechanischen Querdruckeigenschaften von Brettsperrholz zu beschreiben. Jedoch wurden einige Einflussparameter dieser Eigenschaften noch nicht umfassend betrachtet.

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Einflussparameter betreffend die Belastungslage, Belastungsgeometrie und Holzfeuchte auf die mechanischen Querdruckeigenschaften von Brettsperrholz untersucht. Es kommen zwei Modelle zur Verwendung, die auf Basis der Lastausbreitungsbereiche entwickelt worden sind. Die beiden Modelle unterscheiden sich durch die Annahme der Lastausbreitungswinkel. Ein Modell verwendet die normativ festgestellten Winkel gemäß ÖNORM EN 1995-2:2004 [35] und das andere die aus den Versuchsdaten abgeleiteten Winkel. Ziel der entwickelten Modelle ist die Ermittlung des $k_{c,90,BSP}$ -Faktors in Bezug auf die oben genannten Einflussparameter.

Die Beobachtungen aus den Untersuchungen wurden anschließend den Ergebnissen aus der Literatur gegenübergestellt und interpretiert.

Summary

With the development of the solid timber construction technique with cross-laminated timber (CLT) in the recent decades, the construction in timber is currently experiencing a veritable boom. The multi-layered "locked" construction of CLT makes it possible for the use as a plate element. Due to its high capacity CLT elements are widely used as ceiling, wall and roof elements. Connecting the elements one to another, the elements are forced to a variety of ways. One type of stress is the lateral pressure, which is discussed in this thesis. CLT has because of the intrinsic "locking effect" a higher perpendicular to the grain stiffness and strength in compression perpendicular to grain it compared to glulam or sawn timber.

In practice, a transverse compressive stress is often found in the connection wall/ceiling or column/ceiling. For description and calculation of this type of stress, it is necessary to know the mechanical properties of perpendicular to the grain. These are not currently regulated by standards. In research, several studies have been conducted, with the goal to describe the mechanical properties of cross laminated timber. However, some parameters influencing these properties have not been sufficiently clarified.

In the context of this thesis, the influencing parameters on the mechanical properties of cross laminated timber are investigated concerning the load situation, load geometry and moisture content. There are two models for use, which have been developed based on the load distribution angles. The two models differ in the assumption of load spreading angle. The normative model uses the determined angle according to ÖNORM EN 1995-2:2004 [35] and the other angles derived from the experimental data. The aim of the developed models is the determination of $k_{c,90,BSP}$ -factor with respect to the above mentioned influencing parameters.

The observations from the tests were then compared with the results from the literature and interpreted.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einflussparameter und Effekte auf die Querdruckeigenschaften von Holz - Recherche I	
1.1	Querdruck.....	1
1.1.1	Definition und Charakteristiken des Holzes	1
1.1.2	Versagenmechanismus von Holzelementen auf Querdruck.....	3
1.1.2.1	Last-Verformungsdiagramm	3
1.1.2.2	Ermittlung der Querdruckfestigkeit bzw. des Querdruckelastizitätsmoduls	4
1.2	Einflussparameter auf den Querdruckeigenschaften	5
1.2.1	Rohdichte	5
1.2.2	Holzfeuchtigkeit.....	6
1.2.3	Jahringverlauf bzw. Jahringlage und Brettposition im Stamm	6
1.2.3.1	Querdrucksteifigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Jahringlage... 7	
1.2.3.2	Querdruckfestigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Jahringlage ... 9	
1.2.3.3	Querdruckfestigkeit und Querdruckelastizitätsmodul in Abhängigkeit der Position der Brettware im Stamm11	
1.2.4	Rollschub.....	12
1.2.5	Schichtdicke, Plattenhöhe und Aufbauparameter	14
1.2.6	Strukturmerkmale	16
1.3	Querdruck auf Vollholz und BSH (bei Voll- bzw. Teilflächenbelastung) ..	18
1.3.1	Querdruck von Vollholz- bzw. BSH bei Vollflächenbelastung	18
1.3.2	Querdruck auf linienförmigen Vollholz- bzw. BSH-Elementen	18
1.3.2.1	Einhängeeffekt.....	18
1.3.2.2	kc,90 -Faktor.....	19
1.3.2.3	Verhalten von teilflächig beanspruchten Vollholz- und BSH-Elementen... 20	
1.3.3	Die Ermittlung Querdruckspannung nach ÖNORM EN 1995-1-1 [30].....	26
1.4	Querdruck auf BSP (bei würfel- bzw. plattenförmigen Elementen)	27
1.4.1	Aufbauparameter	27
1.4.2	Querdruck auf würfelförmigen bzw. plattenförmigen BSP-Elementen	29
1.4.2.1	Betreffend des Druckelastizitätsmoduls quer zur Faser.....	29
1.4.2.2	Betreffend der Druckfestigkeit quer zur Faser.....	29
1.4.3	Querdruckeigenschaften von teilflächenbeanspruchten plattenförmigen BSP-Elementen30	
1.4.3.1	Sperreffekt.....	30
1.4.3.2	Zusammenfassung der Effekte	31
1.4.3.3	Querdruck auf BSP-Platten	32
1.4.4	Festlegungen für BSP-Elemente gemäß europäische Norm.....	37
1.5	Motivation und Ziel der Arbeit	38

2	Material und Methoden	39
2.1	Einleitung	39
2.2	verwendete Holzart	39
2.3	Kriterien der Untersuchung, Prüfkörper und Probenumfang	39
2.3.1	Allgemeines	39
2.3.2	Unterteilung der ursprünglichen Prüfkörper	40
2.3.3	Parameter der Prüfkörper und Kriterien der Untersuchung	42
2.3.4	Probenumfang	51
2.4	Klimatisierung und Verteilung der Prüfkörper	53
2.5	Versuchsdurchführung	53
2.5.1	Allgemeines	53
2.5.2	Prüfkonfigurationen	53
2.5.2.1	Prüfungen an Würfeln	53
2.5.2.2	Prüfungen an Platten	54
2.6	Bestimmung der Maße der Prüfkörper	55
2.7	Bestimmung der Prüfkörperabmessungen	55
2.8	Bestimmung der Masse der Prüfkörper	56
2.9	Bestimmung der Rohdichte der Prüfkörper	56
2.10	Bestimmung der Feuchte der Prüfkörper	57
2.10.1	elektronische Widerstandsmessung	57
2.10.2	Darmmethode	57
2.11	Klimatisierung und Verteilung der Prüfkörper	58
2.11.1	Bestimmung der Querdruckfestigkeit gemäß ÖNORM EN 408:2010 [32]	58
2.11.2	Bestimmung des Querdruck-E-Moduls gemäß ÖNORM EN 408:2010 [32]	59
2.12	Streuungs- und Lageparameter	61
2.12.1	Varianz	62
2.12.2	Standardabweichung	62
2.12.3	Variationskoeffizient (COV)	62
2.12.4	Quantile	63
2.13	Statistische Verteilung	63
2.13.1	Logarithmische Normalverteilung	63
2.14	Regression und Korrelation	64

3	Lastausbreitungsmodell	65
3.1	Einleitung	65
3.2	Prinzip der Lastausbreitung im Holz.....	65
3.2.1	Modell 1	67
3.2.2	Modell 2	68
4	Versuchsergebnisse	69
4.1	Einleitung	69
4.2	Allgemeines.....	69
4.3	Ergebnisse der Würfelversuche	70
4.3.1	Holzfeuchte	70
4.3.2	Rohdichte	71
4.3.3	Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserlängsrichtung	72
4.3.4	Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung	73
4.4	Ergebnisse der Plattenversuche	74
4.4.1	Holzfeuchte	74
4.4.2	Rohdichte	76
4.4.3	Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung.....	76
4.4.4	Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung	79
4.5	Charakteristische (5 %-Quantil-) Werte der Querdruckkenngrößen.....	80
4.6	Auswertungen des $k_{c,90,BSP}$ -Beiwertes mittels der Modelle 1, Modelle 2, und auf Basis der Versuchdaten von $f_{c,90B1}$	
4.7	Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit der würfelförmigen BSP-Elemente ⁸³	
4.8	Einfluss der Stempelposition auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente und auf $f_{c,90,BSP}$	
4.8.1	Einfluss auf $f_{c,90,BSP}$	84
4.8.2	Einfluss auf $k_{c,90,BSP}$	85
4.9	Einfluss der Lagerung (vollflächig und Durchleitung) auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente ⁸⁶	
4.9.1	Einfluss auf $f_{c,90,BSP}$	86
4.10	Einfluss der Stempelfläche auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente ..	
	87	
4.10.1	Einfluss auf $f_{c,90,BSP}$	87

4.10.2	Einfluss auf $k_{c,90,BSP}$	90
4.11	Vergleich zwischen Konfiguration „a+b“ und Konfiguration „c“.....	92
5	Interpretation der Ergebnisse	93
5.1	Einleitung	93
5.2	Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit der würfelförmigen BSP-Elemente	93
5.3	Einfluss der Stempelposition bzw. der Lagerung (vollflächig und Durchleitung) auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente	94
5.4	Einfluss der Stempelposition bzw. der Lagerung (vollflächig und Durchleitung) auf den $k_{c,90,BSP}$	96
5.5	Einfluss der Stempelfläche auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente ..	98
5.6	Anwendung des Modells 2 auf Basis der Versuchsdaten von Salzmann [8].	99
5.7	Vergleich zwischen Konfiguration „a+b“ und Konfiguration „c“.....	101
6	Literatur.....	103

Einflussparameter und Effekte auf die Querdrukkeigenschaften von Holz - Recherche

1.1 Querdruck

1.1.1 Definition und Charakteristiken des Holzes

Da ein Holzelement ein natürliches inhomogenes Material ist, dessen bedingte Anisotropie durch das natürliche Wachstum erzeugt werden, muss man prinzipiell zwischen den unterschiedlichen Charakteristiken in der Haupt- und Querrichtung unterscheiden. Davon betroffen sind auch die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten. Zudem werden diese mechanischen Eigenschaften durch Strukturstörungen beeinflusst.

In dieser Arbeit werden die Eigenschaften quer zur Faserrichtung, nämlich Querdruckfestigkeit und Querdrucksteifigkeit, behandelt. Zur Vereinfachung werden die radialen und tangentialen Eigenschaften zur Eigenschaften quer zur Faser zusammengefasst. Im Vergleich zur Längsrichtung sind diesen Eigenschaften deutlich geringer.

Bei lokaler Querdruckbeanspruchung auf Holzelemente kommt es zu einem Quetschen und Abscheren der Fasern.

In Abb. 1.1 wird ein Segment des Modells einer Zellwand aus [1] dargestellt, welches auf der klassischen Laminattheorie basiert. Jedes solcher Segmente ist schichtweise aufgebaut und kann als dünnwandige Röhre betrachtet werden.

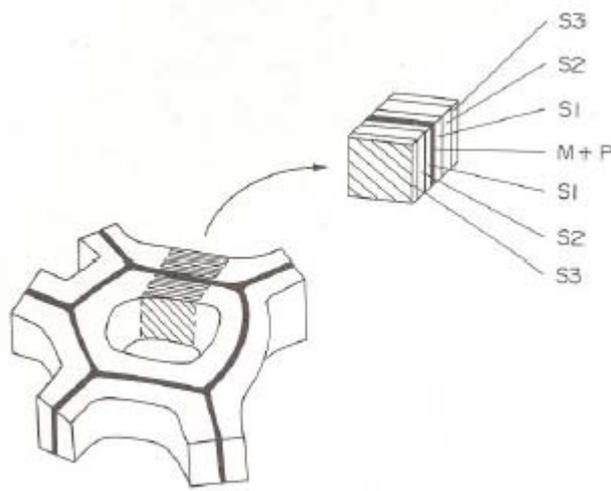


Abb. 1.1 Segment des Modells einer Zellwand, aus [1]

Die Quetschung der oben genannten Zellwände durch horizontale und vertikale Kräfte ist ein Resultat der Form des Jahrringverlaufs (aus [2]).

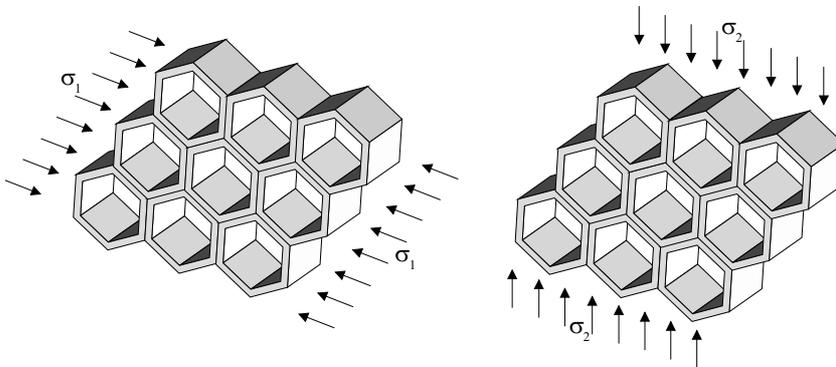


Abb. 1.2 „Honeycombstruktur“ wabenförmige Struktur, aus [2]

Dadurch folgt auch eine Beanspruchung in der orthogonalen Richtung mit entsprechenden Querspannungen, die zu einem Versagen des Elementes führt. Diese Problematik kommt bei Vollholz- und BSH-Elementen vor. Bei BSP-Elementen werden die Querverformungen durch die Querlage gesperrt. Die orthogonalen Schichten wirken als Bewehrung der jeweiligen angrenzenden Längslagen.

1.1.2 Versagenmechanismus von Holzelementen auf Querdruck

1.1.2.1 Last-Verformungsdiagramm

Das Spannung-Dehnungsdiagramm (siehe Abb. 1.3) weist anfangs eine quasi lineare Steigung (elastisches Verhalten) und danach eine deutliche Reduktion der Zunahme der Spannung in Vergleich mit dem Dehnungsinkrement auf. Bei ca. 3-4 % Dehnung (der Prozentsatz ist auf die Prüfkörperhöhe bezogen) ist jener Bereich erreicht, welcher zur Ermittlung der Querdruckfestigkeit nach ÖNORM EN 408:2010 [32] heranzuziehen ist. Bei weiteren verformungsgesteuerter Beanspruchung wird eine zunehmende Verfestigung beobachtet.

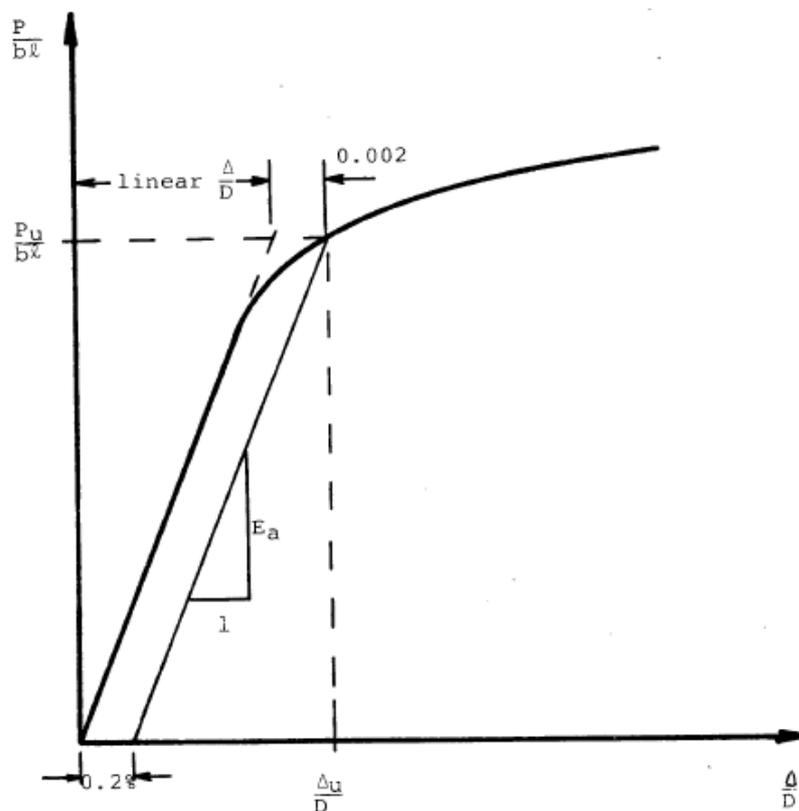


Abb. 1.3 Spannung-Dehnungsdiagramm von einem Prüfkörper auf Querdruck belastet, aus [3]

Notationen der Abb. 1.3:

- P..... Querdruckkraft
- P_u Querdruckkraft bei 0,2 % Verformung
- b..... Breite des Prüfkörpers
- l..... Länge des Prüfkörpers

- Δ Verformung
- Δ_u Verformung bei P_u
- D Höhe des Prüfkörpers
- E_a Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung

Abb. 1.3 zeigt noch einige wichtige Parameter zur Beschreibung der Querdruckeigenschaften: Der Querdruckelastizitätsmodul, E_a , und die maximale Spannung, $P_u/(bl)$, bzw. per Notation festgelegte Festigkeit. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Eigenschaften wird weiter erläutert.

1.1.2.2 Ermittlung der Querdruckfestigkeit bzw. des Querdruckelastizitätsmoduls

Nachdem kein Bruch bei Querdruckbeanspruchung auf Holzelementen auftritt, wird die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und insbesondere der Festigkeit quer zur Faser per Notation festgelegt. In Abb. 1.4 sind unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Querdruckfestigkeit aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm dargestellt (aus [20]). Da die Ergebnisse (Druckfestigkeit quer zur Faser bzw. entsprechende Dehnungen) aufgrund des Unterschieds der Methoden nicht miteinander vergleichbar sind, war es in [20] das Ziel, eine von der Notation unabhängige allgemein anwendbare Gleichung zu definieren.

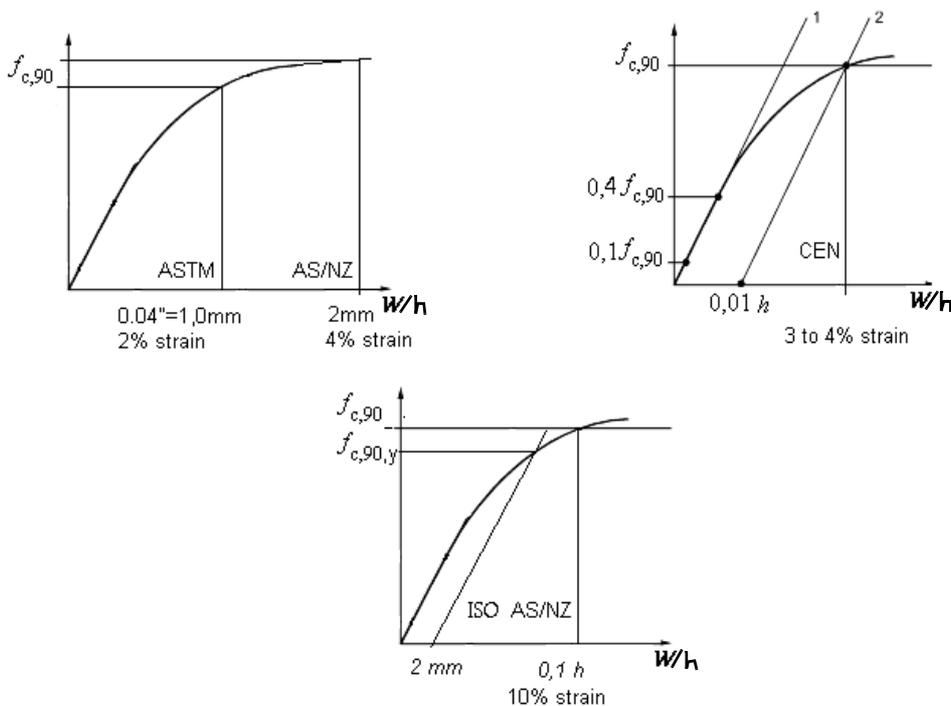


Abb. 1.4 Unterschiedlichen Richtlinien zur Bestimmung der Querdruckfestigkeit, aus [20]

Die Ermittlung der Querdruckfestigkeit ist für die jeweilige Norm wie folgt zu ermitteln:

- für ASTM-D143 bei 1,0 mm (entspricht 2 % der Prüfkörperhöhe);
- für AS/NZ 4063:1993 bei 2,0 mm (entspricht 4 % der Prüfkörperhöhe);
- für CEN (ÖNORM EN 308:2010 [32]) durch den Schnittpunkt zwischen der Kurve und der Gerade (noch mehr dazu wird im Kapitel „Materialien und Methoden“);
- für ISO 13910 bei 0,1h (10% der Prüfkörperhöhe).

1.2 Einflussparameter auf den Querdruckeigenschaften

1.2.1 Rohdichte

Die Rohdichte einzelner Holzarten kann sehr stark schwanken, sogar in ein und demselben Stamm. Bei Nadelhölzern ist im Allg. eine Abnahme der Rohdichte mit einer Zunahme der Jahrringbreite gegeben (siehe Abb. 1.5). Erklärbar ist dieses Phänomen mit dem steigenden Frühholzanteil bei größerer Jahrringbreite. Tendenziell steigt die Querdruckfestigkeit von Schnittholz mit einer Zunahme von der Rohdichte.

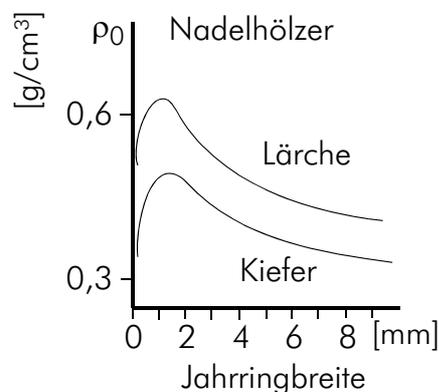


Abb. 1.5 Einfluss der Jahrringbreite auf die Darrdichte bei Nadelhölzern [1]

Eine geringe Rohdichte ist eine der Ursache des Steifigkeits- bzw. Elastizitätsmodulfalles für Kernware. Auf Basis experimenteller Untersuchungen (aus [1]) wurde beobachtet, dass das juvenile Holz (kernnah, geringere Rohdichte) niedrigere Eigenschaften aufweist als das adulte Holz (kernfern, höhere Rohdichte).

1.2.2 Holzfeuchtigkeit

Nach Schickhofer [1] werden alle physikalischen, mechanischen und technologischen Eigenschaften des Holzes durch die Holzfeuchte beeinflusst. Mittels technischer Trocknung werden daher die einzelnen Lamellen des Brettsperrholzes kontrolliert auf eine Einbau-Ausgleichsfeuchte von 12% ($\pm 2\%$) getrocknet. So wird eine ausreichende Formstabilität in der Nutzung erreicht. Im Allgemeinen nehmen mit zunehmender Holzfeuchtigkeit Festigkeit und Elastizitätsmoduli ab, siehe Abb. 1.6.

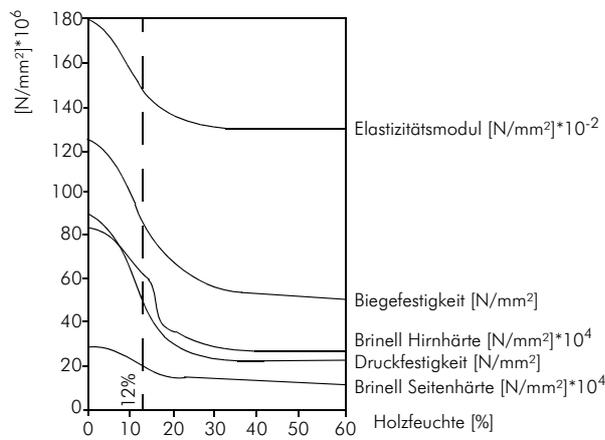


Abb. 1.6 Zusammenhang zwischen mechanischen Kenngrößen und Holzfeuchte, aus [1]

1.2.3 Jahrringverlauf bzw. Jahrringlage und Brettposition im Stamm

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes werden auch durch die Jahrringlage beeinflusst. Ein Jahrring besteht sowohl aus Frühholz als auch aus Spätholz. Das Frühholz (locker und hell) dient dem Wassertransport zu Beginn der Wachstumsphase, während das Spätholz (dicht und dunkler) primär zur Aufrechterhaltung der Stabilität des Baumes dient.

Das mechanische Verhalten von Holz auf Querdruck wurde von Shipsha und Berglund [5] an Kleinproben prüftechnisch und numerisch untersucht. Die Hauptachsen des Materials Holz werden durch folgende Parameter definiert: Längsachse (parallel zur Faser), radiale Achse (normal zu den Jahrringen und zur Faser) und tangential Achse (in tangentialer Richtung zu den Jahrringen und normal zur Faser), siehe Abb. 1.7.

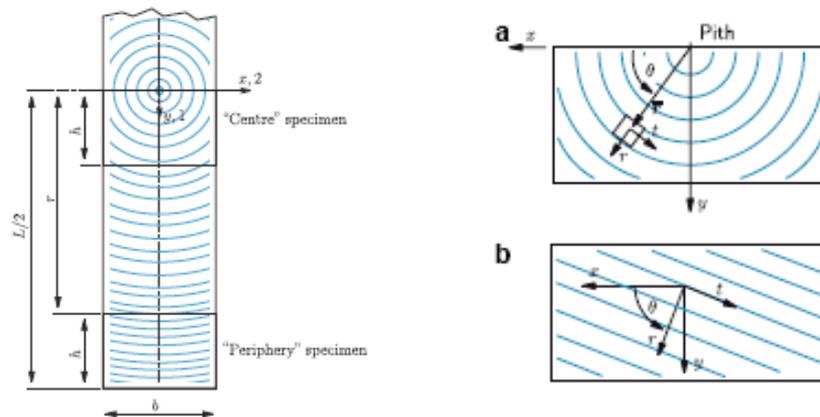


Abb. 1.7 Lage der Achsen im Schnittholz, nach [5]

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Untersuchung nach [5] geschildert.

1.2.3.3 Querdrucksteifigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Jahrringlage

In der RT-Ebene (radial- und tangentialen Achse Ebene) ist die Beanspruchbarkeit und Elastizität um zumindest eine Zehnerpotenz geringer als in der Faserlängsachse. Der radiale E-Modul (E_R) ist in etwa doppelt so hoch wie der tangentiale E-Modul (E_T). Des Weiteren wird vereinfachend angenommen, dass der Rollschubmodul G_{RT} rund 1/10 des Schubmoduls G_{RL} beträgt.

In der Publikation von Shipsha und Berglund [5] wurden Kern- und Seitenware untersucht und erhebliche Unterschiede bei den Ergebnissen der Spannungs- und Dehnungsverläufe festgestellt. Das geprüfte Material waren Fichte und der Querschnitt der Elemente war $20 \times 30 \text{ mm}^2$. Die Stärke der Jahrringen war 2,0 mm für Kernware und 3,3 mm für Seitenware. Die Kernware wiesen eine Rohdichte von 432 kg/m^3 auf und die Seitenware 506 kg/m^3 . Die Proben wurden bei 55 % Feuchte und $23 \text{ }^\circ\text{C}$ untersucht, wobei die mittlere Holzfeuchte der Prüfkörper 8,3 % betrug.

In Abb. 1.8 wird der Verlauf der Kernware gezeigt, welche zunächst linear ansteigt und dann zu einem plastischen Niveau konvergiert. Die Spannungs-Dehnungsbeziehung der Seitenware ist anfangs steiler aber ebenfalls linear. Ab einem Spannungsniveau folgt ein abrupter Spannungsabfall gefolgt von einem nichtlinearen Anstieg und Konvergenz zu einem plastischen Niveau. Die Ursache für den Spannungsabfall, als eine Art Testversagen, wird im Kollabieren von Zellreihen der Jahrringe gesehen.

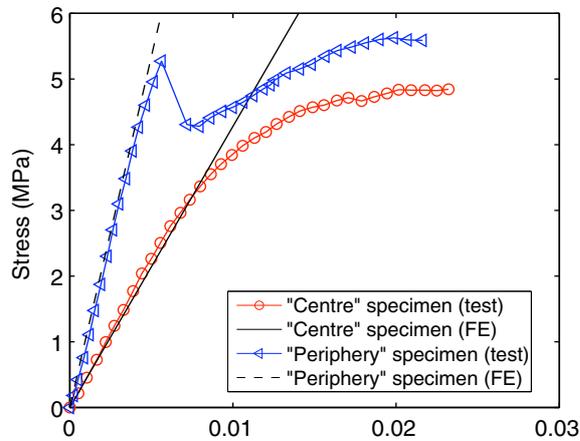


Abb. 1.8 Spannungs-Dehnungs-Beziehung vom Querdruck, aus [5]

Im Vergleich zur Kernware wurden in den Experimenten bei der Seitenware ein in etwa 2,5-mal höherer E-Modul gemessen. Die Ursache dieses Ergebnisses ist nicht auf die unterschiedliche Rohdichte (432 kg/m^3 für Kernware und 506 kg/m^3 für Seitenware) zurückzuführen, sondern primär auf die Lage der Jahrringe.

Die Abhängigkeit der Steifigkeit (für BSH) von der Beanspruchungsrichtung (radial, tangential) wird in Abb. 1.9 gezeigt; dies auf Basis des Parameters α , welcher als Winkel vom xy-System (siehe Abb. 1.11) definiert ist. Das Material wird als homogen, orthotrop und elastisch linear angenommen. Die Untersuchung wurde auf BSH-Elementen durchgeführt. Hierbei wird das Verhältnis zwischen dem E-Modul in radialer und tangentialer Richtung dargelegt. Bei einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$ ist eine deutliche Reduktion des E-Modul-Verhältnisses erkennbar. Das kleinste Verhältnis der E-Moduli beträgt für Fichte rund 0,3. Bei $\alpha = 0^\circ$ ist $E_y = E_T$. Bei 90° beträgt das Verhältnis rund 2,3; d.h. der E-Modul in y-Richtung (hier nun radial) ist rund doppelt so hoch wie der E-Modul in tangentialer Richtung (E_T).

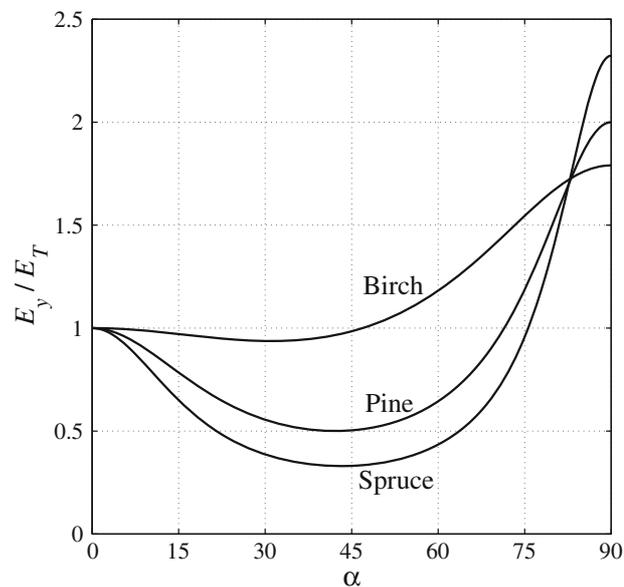


Abb. 1.9 Abhängigkeit des E-Modulverhältnisses E_y/E_T von der Jahrringorientierung (für BSH), aus [6]

1.2.3.4 Querdruckfestigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Jahrringlage

In radialer Richtung ist die Druckfestigkeit quer zur Faser höher als in tangentialer Richtung. D.h., die auf Querdruck beanspruchten Brettware mit stehenden Jahrringen weist eine niedrigere Querdruckfestigkeit auf als Brettware mit liegenden Jahrringen. Das Verhalten kann darauf zurückgeführt werden, dass das Holz ein polar- orthotropes Material ist und das eine Rollschubbeanspruchung (Abschnitt 1.2.4) hier zusätzlich zu beachten ist (siehe Abb. 1.10). Aus diesem Grund weist die Seitenware unter Querdruckbelastung mit liegenden Jahrringen höheren Widerstand als die Kernware, die aus gekrümmten Jahrringen (Winkel α rund 45°) besteht und deswegen deutlich die Schubinteraktion sich aktiviert.

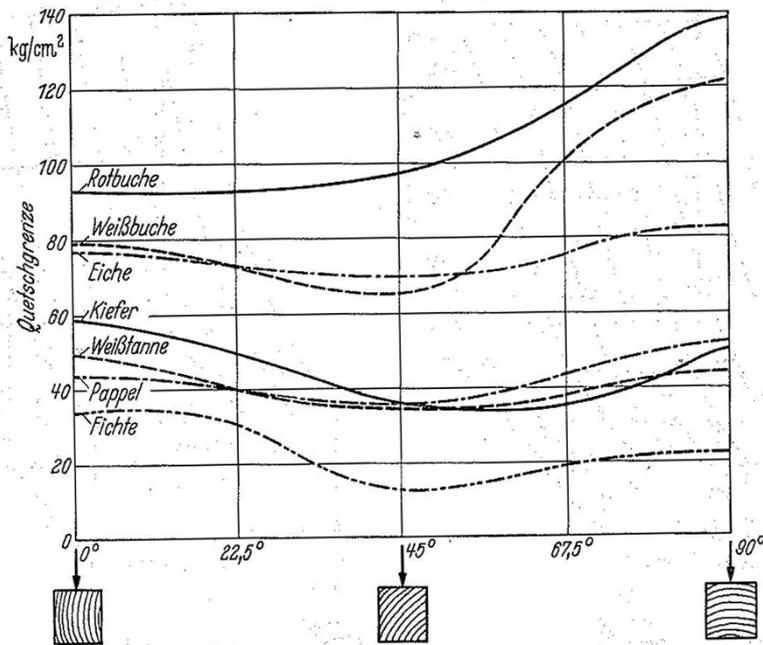


Abb. 1.10 Zusammenhang zwischen der Jahrringlage und der Druckfestigkeit (als Quetschgrenze in der Grafik definiert) quer zur Faserrichtung, aus [6]

Es wurde noch eine Parameterstudie zur Untersuchung der Querdruckfestigkeit bei BSH-Elementen im ebenen Spannungszustand von Gustafsson und Danielsson [7] durchgeführt. Mittels einer Finite-Elemente-Analyse wird gezeigt, dass die Steifigkeit von dem Jahrringverlauf beeinflusst wird. Die Analysen wurden für unterschiedliche Holzarten bzw. Querschnitte (Einzelquerschnitte und zusammengesetzte Querschnitte) durchgeführt. Die Ergebnisse gelten für Nadelholz mit durchschnittlicher Dichte von 398 kg/m^3 und einem Feuchtegehalt von 12 %. Dazu wird noch das verwendete Koordinatensystem gezeigt (siehe Abb. 1.11).

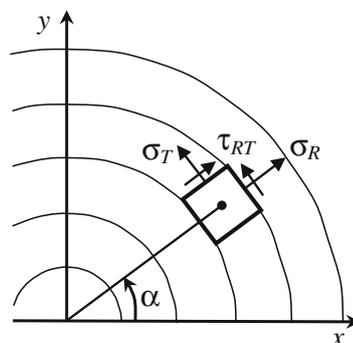


Abb. 1.11 Spannungskomponenten in xy-Ebene, aus [7]

1.2.3.5 Querdruckfestigkeit und Querdruckelastizitätsmodul in Abhängigkeit der Position der Brettware im Stamm

In Versuchen [1] fand man heraus, dass z.B. die Rohdichte und die Zugfestigkeit ausgehend vom Kern nach außen hin zunehmen (siehe Abb. 1.12). Bezüglich der Querdruckeigenschaften hat die Lage im Stamm der untersuchten Lamellen eine zentrale Bedeutung.

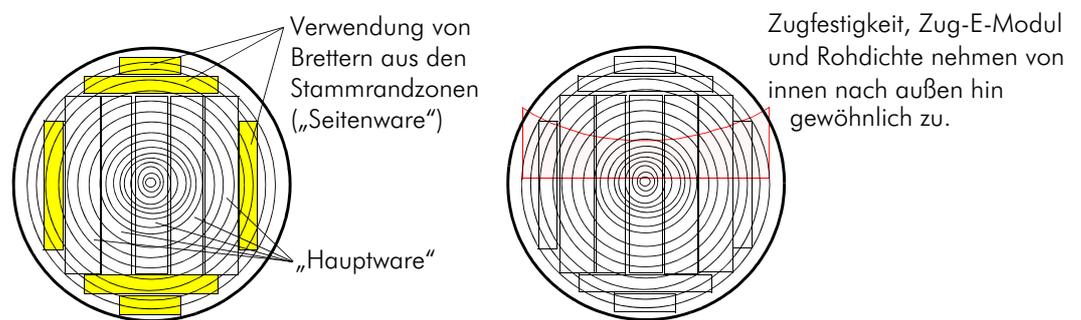


Abb. 1.12 Lage der Einzelbretter im Stamm, aus [1]

Da ein BSP-Element aus verschiedenen, nebeneinander und aufeinander geklebten Brettern besteht, wurde in [4] ein möglicher Einfluß daraus analysiert. Es zeigte sich, dass bei würfelförmigen Probekörpern der Querdruck-Elastizitätsmodul ($E_{c,90}$) bei BSP aus Seitenware über jenen von Halbritt und Riftbrettern liegt. Dieser Sachverhalt wurde durch eine FE-Studie in Salzmann [8] bestätigt (siehe Abb. 1.13). Zudem weisen die Bretter aus der Stammrandzone (Seitenware) eine höhere Querdruckfestigkeit auf als Rift- oder Halbriftbretter. Die charakteristische Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung stieg um 30% von der Kernware oder Hauptware zur Seitenware. Selbiges wurde für den Druck-Elastizitätsmodul quer zu Faser beobachtet.

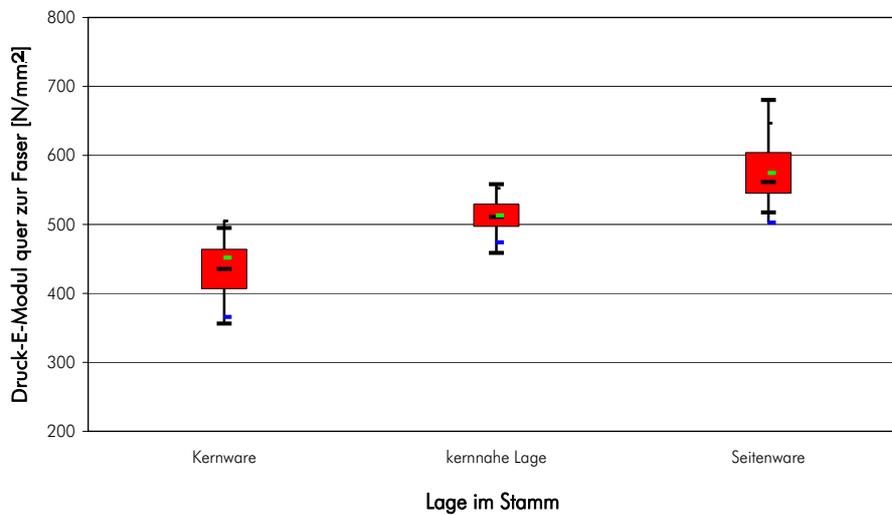


Abb. 1.13 Zusammenhang zwischen Lage im Stamm und Querdruckelastizitätsmodul, aus [4]

1.2.4 Rollschub

Das ist ein Effekt, der mit dem Verlauf der Jahrringen zu tun hat.

Die Nachgiebigkeit der "weichen" Querlagen hat bei Beanspruchung von BSP eine große Auswirkung auf dessen Trag- und Verformungsverhalten, siehe u.a. Mestek [14] und Görlacher [15].

Die Abb. 1.14 zeigt wie die Querdruckbeanspruchung in das Bauteil weiterleitet wird. Hierbei sind sowohl die Haupt- und Nebenkomponenten des Kraftflusses eingedeutet. In Folge der Teilflächenpressung entsteht nicht nur eine Druckbelastung, sondern auch eine Schubbeanspruchung.

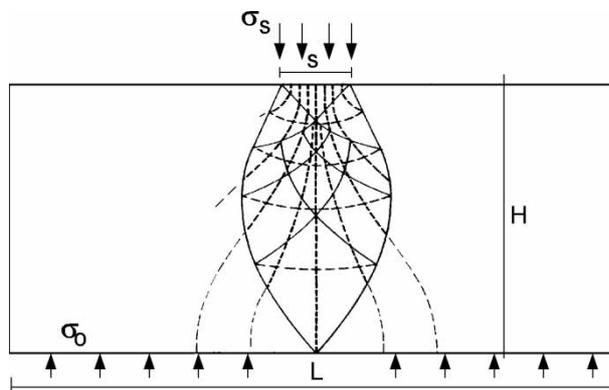


Abb. 1.14 Kraftfluß im Holz bei Beanspruchung quer zur Faser, aus [22]

Aufgrund dieses Kraftflusses müssen die auftretenden Spannungen beim aus zueinander orthogonal geschichtet aufgebauten BSP in die angrenzenden Längslagen umgeleitet

werden, wodurch im Übergangsbereich der Querlage zur Längslage ein kombinierter Spannungszustand auftritt. Beim Dehnen der Längslagen versuchen sich die Querlagen in Folge der Rollschubbeanspruchung zu verdrehen. Die Absperwirkung der Längslagen führt daher zu Querzug- und Querdruckspannungen (siehe . Abb. 1.15).

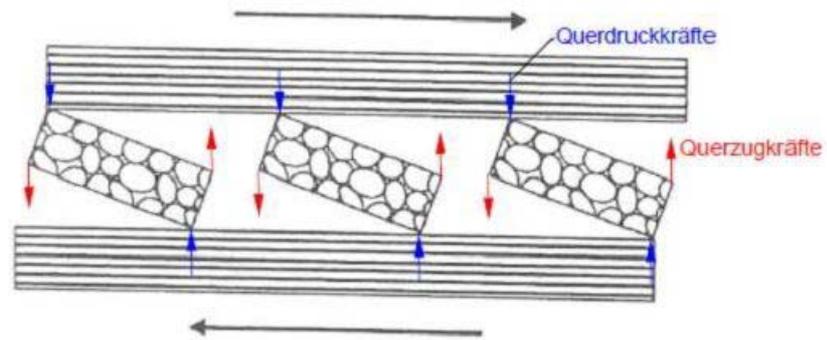


Abb. 1.15 Mechanismus Rollschub bei BSP, aus [8]

Rollschub lässt sich als „Abrollen“ der Längslagen über die "weicheren" Querlagen beschreiben. Der Rollschub (siehe Abb. 1.16) kann damit als Schubbeanspruchung quer zur Faser definiert werden [11].

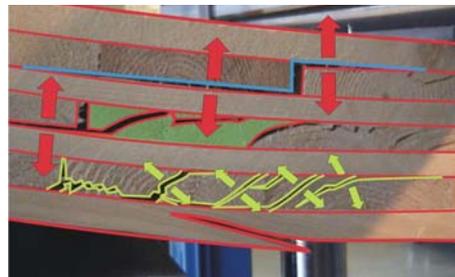


Abb. 1.16 Rollschub - Schubbeanspruchung quer zur Faserrichtung, aus [8]

Das Einfräßen von Entlastungsnuten bei einzelnen Brettern oder auch Fugen, die bei der Produktion entstehen können (fehlende Schmalseitenverklebung), führen zu Unterbrechungen in den Lagen. Geometriebedingt sollte daher ein Verhältnis der Brettbreite zu Brettstärke von

$$\frac{b}{h} \geq 4$$

eingehalten werden.

1.2.5 Schichtdicke, Plattenhöhe und Aufbauparameter

Dillard et al. [8] untersuchten an Kleinproben die Querdruckeigenschaften von Tulpenbaum. Dabei wurde eine starke Zunahme des E-Moduls quer zur Faser bei Proben dünner als 19 mm festgestellt. Proben dicker als 19 mm zeigten kaum weiteren Anstieg in Abgängigkeit der Dicke. Bei Proben mit 12 mm Stärke wurde ein geringerer, weiterer Anstieg beobachtet.

In Halili [4] wurden die Ergebnisse von Brettern und Würfeln mit unterschiedlichen Schichtdicken (bei konstanter Höhe) gegenübergestellt.

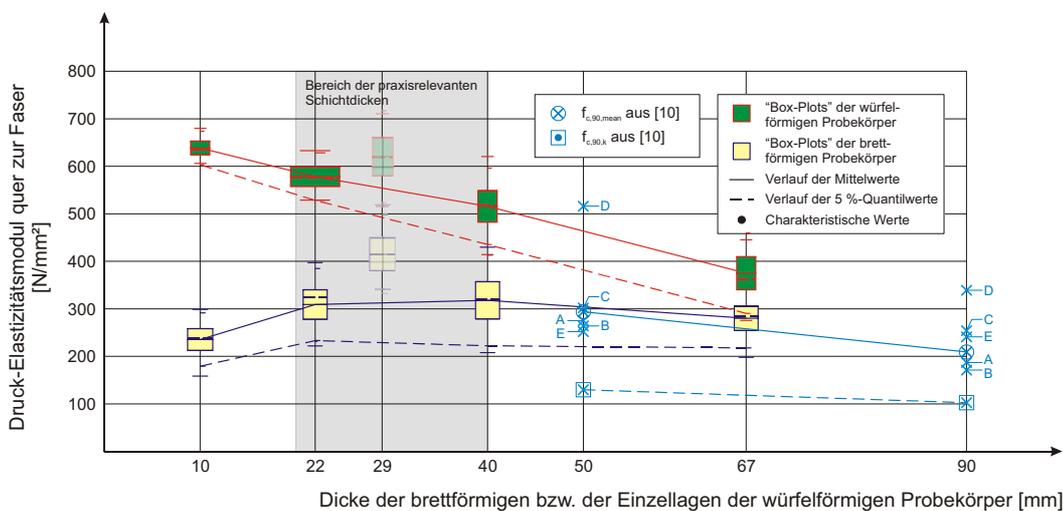


Abb. 1.17 Verlauf des Querdruck-Elastizitätsmoduls bei Brettern und Würfeln mit unterschiedlichen Schichtdicken, aus [4]

Gemäß Abb. 1.17 zeigt sich, dass bei Brettern von praxisrelevanter Schichtdicke der Druck-Elastizitätsmodul beinahe konstant bleibt, während bei würfelförmigen Körpern mit einer Zunahme der Dicke eine Abnahme von $E_{c,90}$ feststellbar ist. Der globale Trend für den Querdruck-E-Modul bei brettförmigen Elementen bleibt ca. konstant, nur von 22 mm auf 10 mm Dicke sinkt der Wert deutlich. Bei den würfelförmigen Probekörpern ist mit einer Zunahme der Dicke eine Abnehm von $E_{c,90}$ gegeben.

Zudem ist ein sogenannter „Homogenisierungseffekt“ beobachtet. Der erhöhte Druck-Elastizitätsmodul bzw. die erhöhte Druckfestigkeit von Würfeln im Vergleich zu den Brettern ist auf diesen Effekt zurückzuführen. D.h., mit steigender Anzahl an Schichten, aus denen der Probekörper besteht, aktivieren sich die Faser in Längsrichtung auf Zug. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der Steifigkeit bzw. der Festigkeit der würfelförmigen Körper.

Bei konstanter Prüfkörperhöhe wurde festgelegt, dass die Druckfestigkeit quer zur Faser mit ansteigender Schichtstärke abnimmt (Abb. 1.18). Selbiges wurde zuvor beim Querdruckelastizitätsmodul festgestellt (Abb. 1.17). Im praxisrelevanten Bereich, ist im Median ein leicht inverses Verhalten feststellbar. Für Bretter mit einer Dicke von 10 mm

beträgt die charakteristische Querdruckfestigkeit rund $2,75 \text{ N/mm}^2$. In der Praxis kommen größere Dicken, zwischen 20 und 40 mm, zur Verwendung. Die entsprechenden charakteristischen Werte der Druckfestigkeit quer zur Faser für diese Brettstärken liegen zwischen $2,0 \text{ N/mm}^2$ und $2,5 \text{ N/mm}^2$.

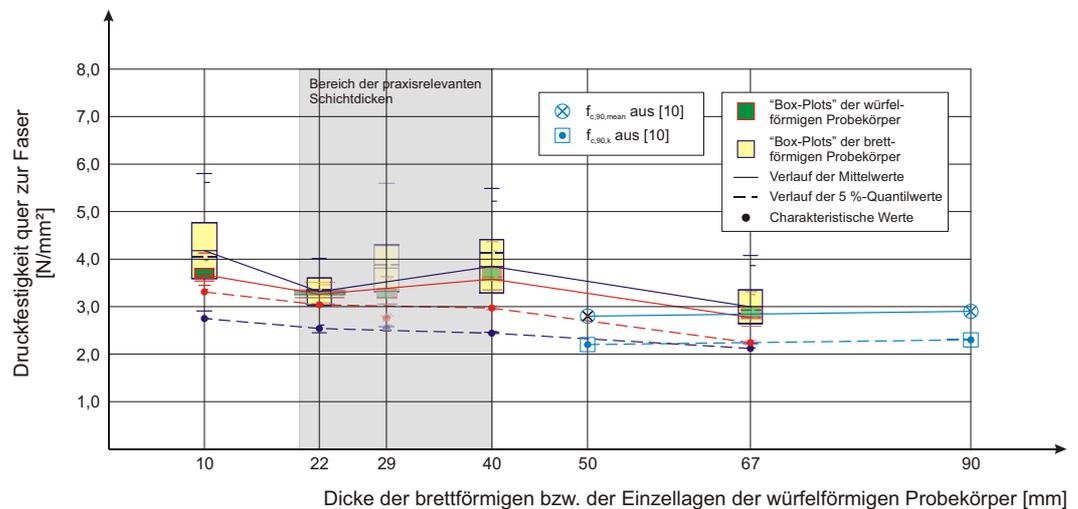


Abb. 1.18 Verlauf der Querdruckfestigkeit bei Brettern und Würfeln mit unterschiedlichen Schichtdicken, aus [4]

Bei gleichen Schichtanzahlen wurde von Salzmann [8] bei größerer Dicke des Elements ein geringerer Druck-Elastizitätsmodul bei höherer Druckfestigkeit quer zur Faser festgestellt. Selbiges wurde bereits von Halili [4] für den praxisrelevanten Bereich beobachtet.

Ein weiterer Parameter, welcher die Querdruckeigenschaften von BSP-Elementen beeinflusst, ist der Aufbauparameter, der das Verhältnis zwischen der Summe der Dicken der Querlagen und der Summe der Dicken der Langlagen darstellt (aus [8]):

$$\frac{\sum d_q}{\sum d_l}$$

Mehr dazu wird im Abschnitt 1.4.1 des selben Kapitels erfahren.

Aus der Untersuchung in [8] ist folgendes Verhalten unter Änderung des Aufbauparameters herausgekommen:

- der Druckelastizitätsmodul quer zur Faser bei Aufbauparameter „1/3“ ist etwas größer als beim Aufbauparameter „1/2“
- für die Querdruckfestigkeit ist bei würfelförmigen Prüfkörpern keine Abhängigkeit vom Aufbauparameter zu erkennen.

Abweichend davon definierte Halili [4] den Aufbauparameter als Verhältnis dq/dl . Aus der Untersuchung in [4] ist folgendes aufgefallen:

- bei einheitlichem Aufbauparameter (1/1) wurde eine Reduktion der Querdrucksteifig- bzw. der Querdruckfestigkeit bemerkt.
- bei Aufbauparametern „1/3“ und „2/3“, wurde keine deutliche Änderung der Eigenschaften des Materials beobachtet.

1.2.6 Strukturmerkmale

Als natürliche gewachsener Roh- und Werkstoff, treten bei Holz häufig Strukturstörungen auf. Diese können die Eigenschaften des Materials erheblich beeinflussen, weshalb es wichtig ist diese Holzmerkmale zu kennen.

Diese Strukturveränderungen wirken sich auf die Tragfähigkeit und die Steifigkeit des Holzes aus. Äst, globale und lokale Faserneigung, Risse, Reaktionsholz reaktives Richtgewebe, das auf Beanspruchungen reagiert, unterschiedliche Jahrringbreiten und Drehwuchs sind die am häufigsten auftretenden Strukturmerkmale. Eine wichtige Rolle spielen sie vor allem bei Biegebeanspruchung, Druck und Zug.

Mit Fokus auf das Merkmal Ast werden hier einige Fälle, wie in Abb. 1.19 gezeigt wird, betrachtet, um die Einflussstärke auf die Querdruckeigenschaften qualitativ abzuschätzen.

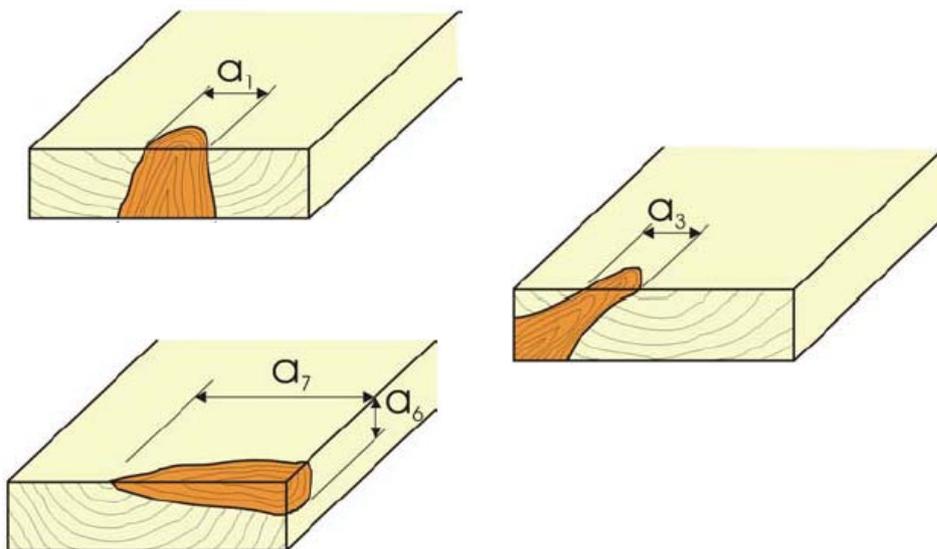


Abb. 1.19 Ausgewählte Asttypen im Brett, aus [1]

Wenn die Achse des Astes parallel zur Richtung der Querdruckbeanspruchung des Prüfkörpers verläuft dann wird der Ast, mit einer zwei- bis dreifache Rohdichte des umgebenden Materials, auf Längsdruck beansprucht. Durch seine hohe Steifigkeit kommt es in Folge primär zu einer Durchleitung der Beanspruchung in die nächste Schicht von BSP-Elementen. Im Fall von einem schrägen Ast ist die Beeinflussung geringer da ebenfalls auf Querdruck beansprucht. Hier wirkt alleinig die höhere Rohdichte als Widerstandserhöhend. Letzter Fall, wo der Ast auf der Seite liegt, ist der Effekt auf die Eigenschaften vernachlässigbar. Das Verhalten kann auch durch die Abb. 1.20 erklärt werden.

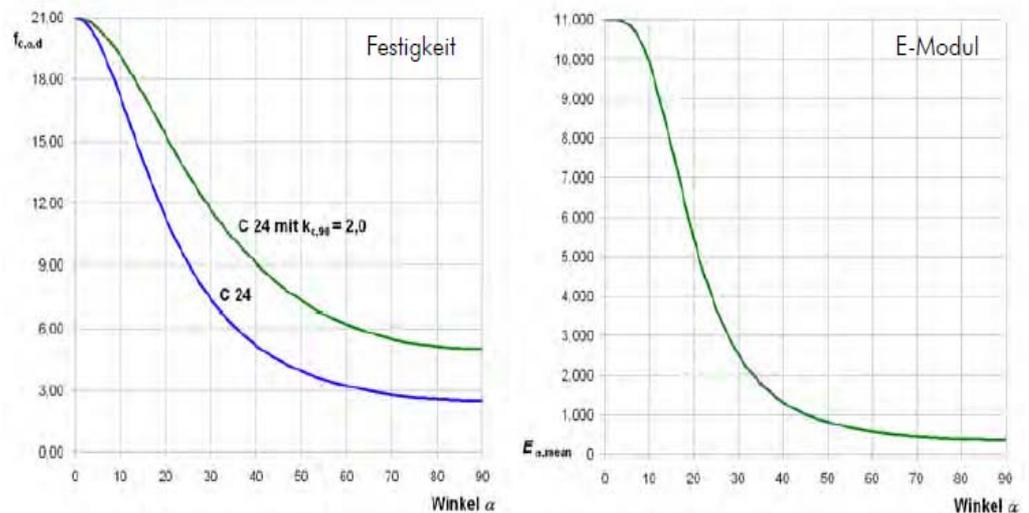


Abb. 1.20 Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul in Abhängigkeit des Winkels α zur Faserrichtung, aus [11]

Wechsmerkmale wie Äste und ihre Auswirkungen auf die Querdruckkenngößen bewirken somit eine größere Variabilität in den Kenngößen.

1.3 Querdruck auf Vollholz und BSH (bei Voll- bzw. Teilflächenbelastung)

1.3.1 Querdruck von Vollholz- bzw. BSH bei Vollflächenbelastung

Hoffmeyer et al. [12] untersuchten die Auswirkungen unterschiedlicher Jahrringlagen, also die Lage der Bretter im Stamm auf die Querdruckkenngößen. Die Versuche zur Bestimmung der Druckfestigkeit quer zur Faser wurden in Abstimmung mit der EN 1193 durchgeführt. Erreicht wurden durchschnittliche Druckfestigkeiten von 2,8 N/mm² bis 3,1 N/mm². Die Höhe der Prüfkörper betrug 55 mm bzw. 90 mm für Bauschnittholz bzw. Brettschichtholz. Hoffmeyer et al. [12] schlussfolgerten, dass die Jahrringlage im Brett keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat. Als Druckelastizitätsmodul quer zur Faser ergibt sich durchschnittlich ein Wert rund 300 N/mm² für beide untersuchten Produkte. Trotz gleichem Stammholz wurde bei Brettschichtholz ein „Versagen“ aufgrund einer Zugspannung in der Querrichtung vor des Erreichens der per Notation maximalen Querdruckkraft festgelegt; bei Schnittholz hingegen nicht.

Augustin et al. [13] haben die eigenen Ergebnisse, gewonnen an würfelförmigen BSH-Elementen, mit den Ergebnissen von [12] verglichen. Sie kommen zu einem Vorschlag der mittleren Querdruckfestigkeit von 2,25 N/mm² und des mittleren Querdruckelastizitätsmoduls von 300 N/mm².

1.3.2 Querdruck auf linienförmigen Vollholz- bzw. BSH-Elementen

Das Verhalten von stabförmigen Elementen unter Teilflächenbelastung unterscheidet sich zu den würfelförmigen Elementen unter Vollflächenbelastung durch höhere Querdruckeigenschaften. Die Erhöhung resultiert aus dem sogenannten „Einhängeeffekt“. Dieser Effekt wird in der Bemessung durch den *Beiwert*- $k_{c,90}$ berücksichtigt.

1.3.2.6 Einhängeeffekt

Der Einhängeeffekt tritt primär in Faserrichtung eines unter Querdruck belasteten Holzbauteils auf, wobei sich die Fasern in Längsrichtung auf Zug aktivieren, und somit die Verformungen in Folge Querdruck seitlich des beanspruchten Bereiches stützen bzw. reduzieren. Dieser Effekt kann sowohl bei Teilflächen beanspruchten Elementen aus Vollholz sowie BSH, aber insbesondere bei BSP beobachtet werden.

1.3.2.7 $k_{c,90}$ -Faktor

Man geht davon aus, dass die Eigenschaften aus den Querdruckversuchen u.a. in [4], [8], [19] bei Elementen unter Teilflächenbelastung größere Werte aufweisen als im Vergleich zu vollflächig beanspruchten Elementen. Um dieser Unterschied zu berücksichtigen, hat man an einen Erhöhungsfaktor eingeführt, welcher das Ziel hat, den Unterschied im Widerstand quantitativ zu erfassen. Diesen Faktor nennt man $k_{c,90}$ -Beiwert. Der Bezug für den Faktor ist der Widerstand des Würfels bei Vollflächenbelastung; hier ist der Faktor gleich 1. Bei teilflächenbeanspruchten linearen und plattenförmigen Elementen ist der $k_{c,90} > 1,0$; dies aufgrund der Zusammenwirkens des Einhäng- und Sperrreffektes.

Die Ermittlung des $k_{c,90}$ -Faktors wird i. Allg. gemäß

$$\frac{f_{c,90,d, \text{Teilflaechenbelastung}}}{f_{c,90,d, \text{Vollflaechenbelastung}}} = k_{c,90, \text{Teilflaechenbelastung}}$$

ermittelt. Ein dazu äquivalenten Ansatz ist die Betrachtung des Verhältnisses der miwirkenden Flächen, siehe

$$\frac{A_{\text{Teilflaechenbelastung}}}{A_{\text{Vollflaechenbelastung}}} = k_{c,90, \text{Teilflaechenbelastung}}$$

Für die Bemessung werden die $k_{c,90}$ -Faktoren auf Basis des 5 %-Quantilwerts der Festigkeiten ermittelt. Die Anwendung dieses Faktors wird auch in [24] vorgeschlagen. Hierbei wurden BSH-Träger mit den Höhen 200 und 480 mm bei Variation der Lastsituation analysiert. Hierbei ergeben sich ein: $k_{c,90}=1,5$ bei Belastung an der Ecke und ein $k_{c,90}=1,8$ für eine Last mit einem Abstand > 100 mm vom Rand positioniert.

Nach Schickhofer [11] werden zwei $k_{c,90}$ -Beiwerte im nachfolgenden ULS-Nachweis berücksichtigt:

$$\frac{F_{c,90,d}}{A} \leq k_{c,90} \cdot k_{c,90,l} \cdot f_{c,90,d}$$

hiebei bedeuten:

$F_{c,90,d}$ Bemessungswert einer Druckkraft rechtwinkelig zur Faserrichtung [N]

A querdruckbeanspruchte Fläche [mm²]

$k_{c,90}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Geometrie der Lastanordnung [-]

$k_{c,90,l}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Länge der Lasteinleitung [-]

$f_{c,90,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung [N/mm²]

In Abb. 1.21 werden die verschiedenen Werte dieses Parameters mit entsprechenden Lastpositionen für ein Vorholz gezeigt:

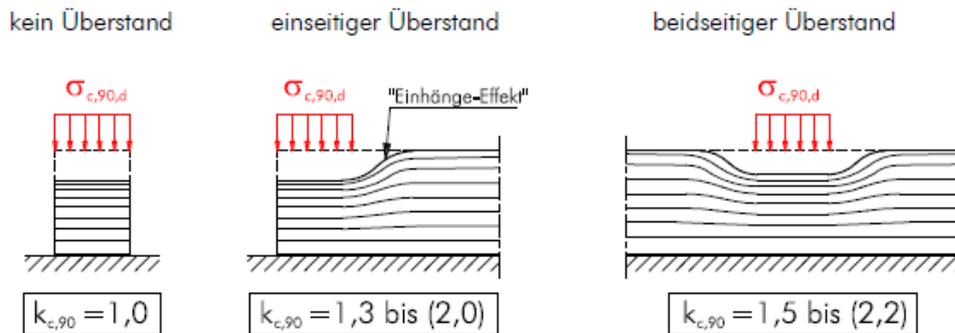


Abb. 1.21 Faktor $k_{c,90}$ bei unterschiedlichen Stempelpositionen bei unidirektionalen stabförmigen Elementen, aus [11]

Die $k_{c,90}$ -Beiwerte liegen zwischen 1,0 (kein Überstand) und 1,5 (beidseitiger Überstand).

In der Veröffentlichung von Van der Put [21] wurde eine Formel zur Ermittlung des Parameters $k_{c,90}$ vorgeschlagen (siehe Abschnitt 1.3.2.8).

In [4] wird ein $k_{c,90}$ -Wert für BSP-Platten von 1,80 vorgeschlagen.

Nach Salzmann [8] wird ein Mittelwert für $k_{c,90} = 1,85$ eingeschätzt.

1.3.2.8 Verhalten von teilflächig beanspruchten Vollholz- und BSH-Elementen

Blass und Görlacher [17] erstellten ein einfaches, mechanisches Modell zur Erklärung der Querdruckkenngrößen an Brettschichtholz-Schwellen. Untersucht wurden vier unterschiedliche Lagerungsarten, siehe Abb. 1.22.

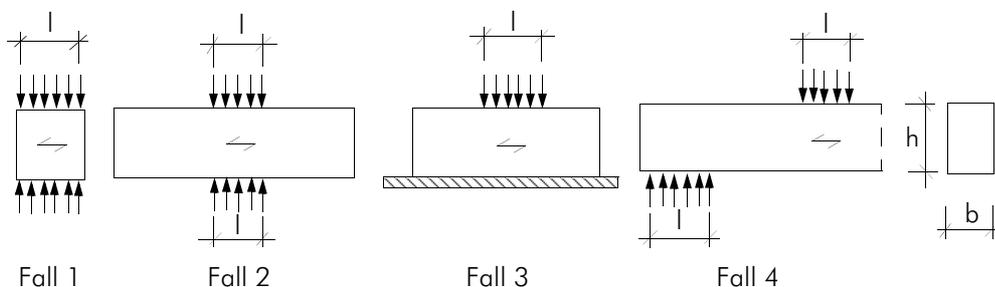


Abb. 1.22 Vier unterschiedliche Lagerungssituationen bei Querdruckbeanspruchung, aus [8]

Zur Berücksichtigung der erhöhten Druckfestigkeit bei Teilflächenpressung im Gegensatz

zur vollflächigen Pressung bei den Würfelproben wurde eine rechnerische Erhöhung der Kontaktlänge in Faserlängsrichtung von 30 mm je Seite mit Überstand vorgeschlagen. Bei der Erhöhung der wirkenden Fläche entfällt die Anwendung des $k_{c,90}$ -Faktors für den ULS-Nachweis. Eine Vergrößerung der Kontaktlänge findet sich auch im Eurocode 5 [30] für Querdruckberechnungen an Brettschichtholz und im BSP-Handbuch [18] betreffend BSP.

- Bestimmung der Querdruckeigenschaften mittels $k_{c,90}$ bei Schwellen (aus [20], [21] und [22])

In der Veröffentlichung von Leijten et al. [20] wurde ein Modell basierend auf Versuchsdaten entwickelt, welches das Ziel hatte, die unterschiedlichen Regelungen in europäischen amerikanischen, australischen bzw. neuseeländischen Normen wirken zur Ermittlung der Querdruckeigenschaften vom Holz und stabförmigen Holzprodukten miteinander vergleichen zu können. Das Modell ergibt sich zu

$$f_{c,90} \cdot k_{c,90} = \sqrt{\frac{l_{ef}}{l}} \cdot f_{c,90} = \frac{F_{c,90,d}}{bl}$$

hierbei sind:

$f_{c,90}$Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung;

$k_{c,90}$Faktor zur Berücksichtigung der mitwirkenden Effekte, die die Festigkeit erhöhen;

bStempelbreite (in diesem Fall entspricht sie die Breite des Elementes);

lStemPELLänge;

l_{ef}effektiv wirkende Länge des Elementes, die unter Querdruck wirkt;

$F_{c,90,d}$..Querdruckkraft rechtwinklich zur Faserrichtung.

Der Faktor $k_{c,90}$ nach diesem Modell ergibt sich zu

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{l_{ef}}{l}}$$

Das Modell wurde aus Versuchen über Streifenplatten (Träger) hiebeigeführt, für das dieser Faktor geeignet ist. Wäre ein plattenförmiges Element getestet werden, dann wäre ein neuer Faktor mit einem anderen Modell definieren zu müssen.

Unter Ansatz eines voll-plastischen Materials leitet Van der Put [21] die Querdruckfestigkeit von Holz her. Die Modellbildung erfolgte auf Basis von Versuchsdaten unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Lagerungssituationen. Mit numerisch hergeleiteten Gleitlinien, die als Funktion einer logarithmischen Spirale dargestellt werden können, wird die Ausbreitung der Druckspannung dargestellt.

Mit diesem Modell, für stabförmigen Holzelemente, wurden zudem die $k_{c,90}$ -Faktoren für verschiedene Bedingungen (Lastposition, Elementhöhe) definiert. Es werden einige geometrischen Randbedingungen für die Anwendung dieses Modells angegeben. Für die Ermittlung der $k_{c,90}$ -Faktoren wurde die nachstehende Formel verwendet:

$$k_{c,90} = \frac{f_{c,s}}{f_{c,90}} = \sqrt{\frac{L}{s}}$$

hiebei sind:

- $k_{c,90}$... Faktor zur Berücksichtigung der Lastausbreitung;
- $f_{c,s}$ Querdruckfestigkeit auf der unteren Randfläche des Holz-Trägers;
- $f_{c,90}$ Querdruckfestigkeit auf der Stempelfläche;
- L Länge der Lastausbreitung am unteren Rand des Holz-Trägers;
- s Stempellänge.

Hier gilt:

$$\sigma_s \cdot s = \sigma_0 \cdot L$$

- σ_s Querdruckspannung auf der Stempelfläche;
- σ_0 Querdruckspannung auf der unteren Randfläche des Holz-Trägers.

Abb. 1.23 zeigt den Verlauf der Gleitlinien im Bauteil bei vollflächiger Lagerung und unter Teilflächenpressung mit einer rechteckigen Pressfläche mit Kantenlänge „s“ in Faserrichtung.

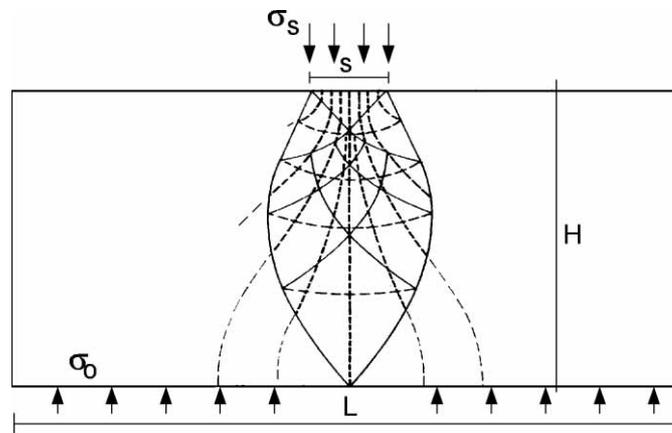


Abb. 1.23 „Kraftfluß“: Darstellung der Richtung der Hauptspannungen, aus [22]

Es wurden Würfel bzw. vollgelagerte Trägerabschnitte aus BSH mit verschiedenen Längen unter Lasteinleitung in der Mitte und an der Ecke geprüft, wobei für die Lastausbreitung ein Winkel von 45° angenommen wurde. Um das Modell zu verifizieren, wurde der Parameter $k_{c,90}$ auf zwei unterschiedliche Arten betrachtet: einmal aus der Geometrie bestimmt und einmal gemäß dem Nachweis in [30]. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse festgelegt. Folgende Modellgrenzen sind zu berücksichtigen:

$$L < 2a + s; \quad L < s + l_1; \quad L < 2H + s$$

a der kürzere Abstand des Stampels vom Rand

l_1 der Abstand zwischen zwei vorhandenen auf dem Träger Querdrucklasten;

H die Höhe des Elementes.

Der aus dem Modell entwickelte formale Zusammenhang für den Faktor $k_{c,90}$ bei mittiger Teilflächenpressung ergibt sich wie folgt:

$$k_{c,90} = 1,1 \cdot \sqrt{0,5 + \frac{(3H + L)}{2s}} \leq 5$$

Die Lastausbreitung wird auf Basis der Plastizitätstheorie beschrieben. Als Fließkriterium gilt jenes von Tresca. Der Vergleich des Modells mit Prüfergebnissen zeigte eine gute Übereinstimmung.

In der aktuellen Veröffentlichung von Van der Put [22] wird die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften quer zur Faserrichtung von tragenden Bauteilen gemäß Eurocode 5 [30] diskutiert. Der für den Eurocode geltende Referenztest (Case 3, Abb. 1.24) zur Bestimmung der Querdruckkenngrößen sollte für alle in der Praxis auftretende Fälle, laut Norm, geeignet sein.

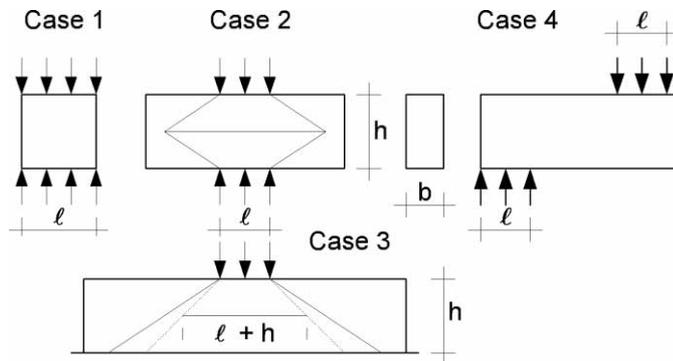


Abb. 1.24 Lastsituationen nach [15]

Diese Vorgehensweise werden empirisch erarbeitet und die Festigkeit quer zur Faser wird aus einem Referenztest mit definierten Prüfbedingungen bestimmt. Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Geometriegröße des Stempels bzw. des Bauteils im Referenztest, schreibt Van der Put, dürfen die gewöhnlichen Situationen nicht mit diesem Test gleichgestellt werden. Dies wird auch in Abb. 1.25) dargelegt.

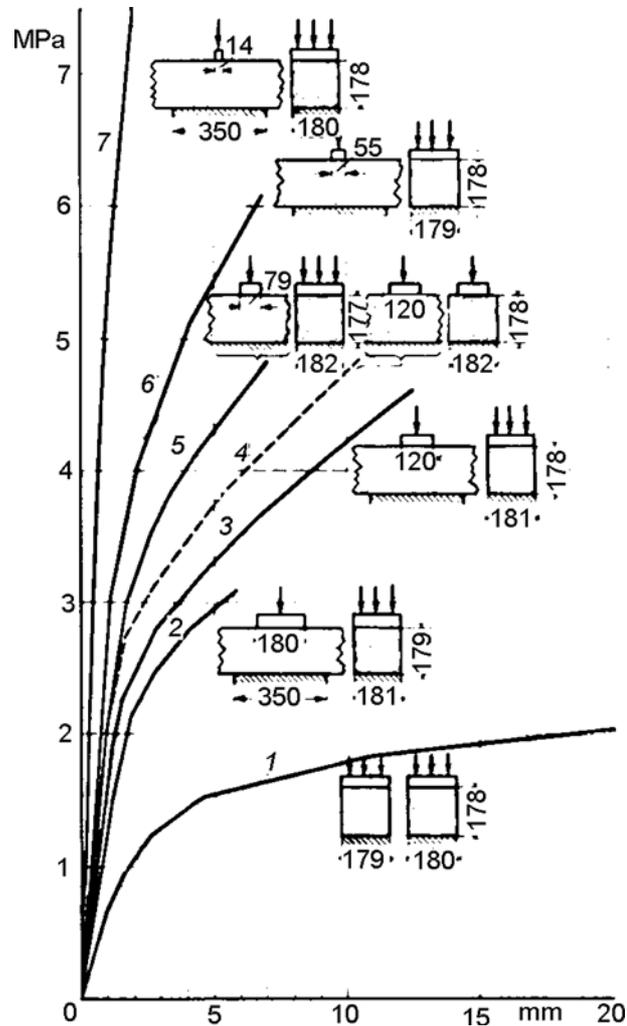


Abb. 1.25 Festigkeit von tragenden Elementen mit unterschiedlichen Stempelgeometrien unter Querdruck rechtwinkelig zur Faser, aus [22]

Je kleiner die Stempellänge (s), im Vergleich zu der Lagerungslänge (L) ist, desto größer ist der Querdruckfestigkeit. In Anbetracht dessen, dass bei Erfindung einer geeigneten Funktion nötig ist, wird die Theorie von Van der Put [21] vorgeschlagen, welche die Bedingungen der Lagerungssituationen und der Geometrie des Stempels bzw. des Elementes berücksichtigt.

1.3.3 Die Ermittlung Querdruckspannung nach ÖNORM EN 1995-1-1 [30]

Die Ermittlung der wirkenden Querdruckspannung nach ÖNORM EN 1995-1-1 erfolgt durch:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

hierbei sind:

$F_{c,90,d}$ der Bemessungswert der Querdruckkraft;

A_{ef} die effektive wirksame Fläche, bei Querdruckbeanspruchung.

Nach ÖNORM EN 1995-1-1 [30] sollte die effektive Fläche unter Berücksichtigung einer erhöhten wirksamen Kontaktlänge parallel zur Faserrichtung bestimmt werden. Auf jeder Seite mit ausreichend Vorholz darf die Kontaktlänge l um 30 mm erhöht werden.

In Bezug auf den $k_{c,90}$ -Beiwert trifft die ÖN EN 1995-1-1 für Vollholz- bzw. BSH-Träger folgende Festlegungen:

- für Vollholz aus Nadelholz und vollflächigen Lagerung, (siehe Abb. 1.26, a) mit $l_1 \leq 2h$ ist ein $k_{c,90} = 1,25$ anzunehmen;
- für BSH aus Nadelholz und vollflächigen Lagerung, (siehe Abb. 1.26, a) mit $l_1 \leq 2h$ ist ein $k_{c,90} = 1,5$ anzunehmen;
- für Vollholz aus Nadelholz und Teilflächigenlagerung (siehe Abb. 1.26, b), mit $l_1 \leq 2h$ ist ein $k_{c,90} = 1,5$ anzunehmen;
- für BSH aus Nadelholz und Teilflächigenlagerung (siehe Abb. 1.26, b), mit $l_1 \leq 2h$ und $l \leq 400$ ist ein $k_{c,90} = 1,75$ anzunehmen.

Hiebei sind:

l Kontaktlänge;

l_1 Abstand zwischen benachbarten Stempel, die auf dem Element liegen;

h Höhe des Trägers.

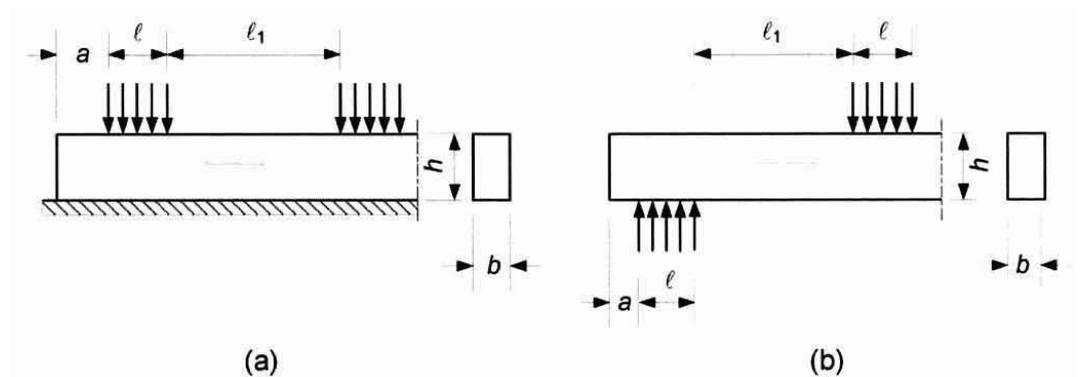


Abb. 1.26 Querdruckbeanspruchung auf Träger bei kontinuierlichen (a) und Teilflächenlagerung (b), aus [30]

Für eine Sortierklasse C24 wird ein $E_{c,90,mean}=370 \text{ N/mm}^2$ für praktisch relevante Schichtdicken vorgeschlagen. Für die Festigkeit quer zur Faserrichtung gilt die Norm [26] einen charakteristischen Wert von $f_{c,90,k}=2,50 \text{ N/mm}^2$ an.

1.4 Querdruck auf BSP (bei würfel- bzw. plattenförmigen Elementen)

1.4.1 Aufbauparameter

Mit diesem Parameter werden die Stärke der Längs- bzw. Querlage erfasst. Insbesondere, der Aufbauparameter ist das Verhältnis zwischen Längslagen und Querlagen und wurde als Einflussparameter in der MA [4] und [8] betrachtet.

In dieser Masterarbeit wurden BSP-Elemente untersucht, die aus aufeinander geklebten Längs- und Querlagen bestehen. Die Anzahl der Längsschichte in diesem Fall ist ungerade, nämlich drei und entspricht die Orientierung der Hauptspanrichtung. Die Querlagen sind zwei (normalerweise ist die Zahl der Querschichte für BSP-Aufbauten gerade). Die Ermittlung dieses Parameters ist derzeit noch nicht von der Norm festgelegt und in den [4] und [8] erfolgte sie nach nachfolgenden Gleichungen:

1. nach Halili [4]:

$$\frac{d_g}{d_l}$$

2. nach Salzmans [8]:

$$\frac{\sum d_q}{\sum d_l}$$

3. Dazu wird noch eine Definition im BSP-Handbuch [23] gegeben:

$$\frac{\sum d_{li}}{\sum d_{ges}}$$

Mit dem Aufbauparameter von Halili kann nicht ein Element aus unterschiedlichen Schichtdicke (z.B. 42-19-28-19-42) beschreiben werden. Das Problem wird aber mit der zweiten Option von Salzman gelöst, welche die Summe der Querlagen durch die Summe der Längslagen dividiert und damit alle Schichtdicke in Betracht kommen. Die dritte Variante in [23] stimmt die Option von Salzman zu (siehe Beweiseung in der [8]).

In diesem Sinn wird die zweite Option als getroffener Aufbauparameter in dieser Masterarbeit angenommen, weil sie günstiger ist.

Da die Geometrie der untersuchten Elemente (siehe Abb. 1.27) die selbe ist, ist nur ein einmaliger Aufbauparameter vorhanden:

$$\frac{\sum d_q}{\sum d_l} = \frac{(2 \times 20)}{(3 \times 40)} = \frac{1}{3}$$



Abb. 1.27 Untersuchtes BSP-Element mit Aufbauparameter 1/3

1.4.2 Querdruck auf würfelförmigen bzw. plattenförmigen BSP-Elementen

In der Masterarbeit von Halili [4] wurden die Eigenschaften von würfelförmigen BSP-Elementen bei Querdruckbeanspruchung untersucht. Analysiert wurden Änderungen ein Aufbauparameters (d_q/d_l), der Schichtstärke und der Prüfkörperhöhe. Zudem wurden die Ergebnisse von BSP-Würfeln mit jenen von Brettern verglichen und ein deutlicher Unterschied in den Widerstände beobachtet. Im Allgemeinen liegen die Mittelwerte der Eigenschaften von Brettern unter jedem der BSP-Körper. Dieser Umstand bei BSP wird auf den Sperr effekt des Materials zurückgeführt.

1.4.2.9 Betreffend des Druckelastizitätsmoduls quer zur Faser

Der Querdruckelastizitätsmodul von BSP-Würfeln ist im Mittel rund 70 % höher als bei Brettern; dies aufgrund des auftretenden Sperr effekts bei BSP-Elementen.

Zudem wurden Ergebnisse von würfelförmigen BSH- und BSP-Prüfkörpern verglichen. Wie zu erwarten konnte auch hier ein Elastizitätsmodul quer zur Faser bei BSP-Körpern von rund 70 % höher ist als bei BSH-Elementen festgestellt werden.

Der Querdruckelastizitätsmodul von BSP-Würfeln in Abhängigkeit von Schichtdicke bzw. Schichtanzahl nimmt bei einer Steigerung der Stärke ab. Es wurde festgestellt, dass die Parameter Stärke und Anzahl der Lagen einen wesentlichen Einfluss auf den Querdruck-E-Modul haben.

1.4.2.10 Betreffend der Druckfestigkeit quer zur Faser

Die Querdruckfestigkeit von würfelförmige-BSP wird von der Stärke bzw. der Anzahl der Lagen, bei konstanter Prüfkörperhöhe, geringfügig beeinflusst. Es fiel folgende Tendenz auf: je größer die Schichtdicke, desto niedriger die Festigkeit quer zur Faser.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Kernware bzw. Seitenware auf die Festigkeit quer zur Faser wurde festgestellt, dass sich die Querdruckfestigkeit invers zum Querdruckelastizitätsmodul verhält, sprich die Kernware weist eine höhere Querdruckfestigkeit auf als die Seitenware.

Für die normative Festlegung einer charakteristischen Querdruckfestigkeit bei BSP-Elementen wird in [4] ein Wert von $f_{c,90,k}=3,00 \text{ N/mm}^2$ vorgeschlagen. Nach enBR:2007 [26] wird für die Festigkeitsklasse C24 ein Wert von $f_{c,90,k}=2,50 \text{ N/mm}^2$ festgelegt.

Augustin et al. [13] haben die Ergebnisse bei Querdruck auf würfelförmigen BSP-Elementen mit jenen von [12] und schugen in Folge eine mittlere Querdruckfestigkeit von $f_{c,90,k}=2,85 \text{ N/mm}^2$ und einen Querdruck-E-modul von $E_{c,90,\text{mean}}=450 \text{ N/mm}^2$ vor.

1.4.3 Querdruckeigenschaften von teilflächenbeanspruchten plattenförmigen BSP-Elementen

Das Verhalten von plattenförmigen BSP-Elementen unterscheidet sich zu den Vollholz- bzw. BSH-Elementen, weil die Erste höhere tragende Eigenschaften auf Querdruck aufweisen. Der Grund dafür ist der sogenannte „Sperreffekt“, der gemeinsam mit den für Träger-Elemente mitwirkenden Einhängeneffekt an einer Erhöhung des Widerstands mitwirkt. Bei Teilflächenbeanspruchung wird dies durch den Faktor $k_{c,90,clt}$ („clt“ ist die englische Bezeichnung für BSP) berücksichtigt, welche von den $k_{c,90}$ -Faktoren für lineare Elemente zu unterscheiden ist. Der Unterschied bei linear- und plattenförmigen BSP-Elementen liegt an die Mitwirkung des Sperreffekts um die gedruckte Zone herum. Sprich bei BSP-Platten ist der Auftritt dieses Effekts deutlicher als bei BSP-Träger.

1.4.3.11 Sperreffekt

Entscheidend für das Auftreten des Sperreffekts ist die Anordnung der Lagen im Element. Wenn sie abwechselnd mit unterschiedlichen Winkelanordnungen aufeinander geklebt werden (z.B., Orthogonal, wie bei BSP-Elemente), wird dieser Effekt ermöglicht. Durch der Mitwirkung dieser Schichte wird ein größeres Volumen, im Vergleich mit BSH-Elementen, aktiviert. Das wirkt auf die tragende Querdruckfähigkeit des Elements, die dadurch erhöht werden (siehe Abb. 1.28, aus [16]). Durch die Sperrwirkung bei BSP, welche in wergleichbarer Weise von Furnierspertholz bekannt ist, ist nicht nur eine Reduktion der Quell- und Schwindmaße in Scheibenebene, sondern u.a. auch eine Beeinflussung auf die Steifigkeits- und Fertigkeitseigenschaften von BSP unter Querdruckbeanspruchung gegeben. Im Vergleich zu BSH zeigt sich bei BSP eine erhöhte Steifigkeit quer zur Faser. Nach Halili [4] : *„Die querliegenden Lagen wirken also als ‘Bewehrung’ der jeweiligen darüber- bzw. darunter befindlichen längslaufenden Lagen und verhindern, dass sich zu große Querdehnungen mit damit verbundenen Querzugspannungen aufbauen.“*

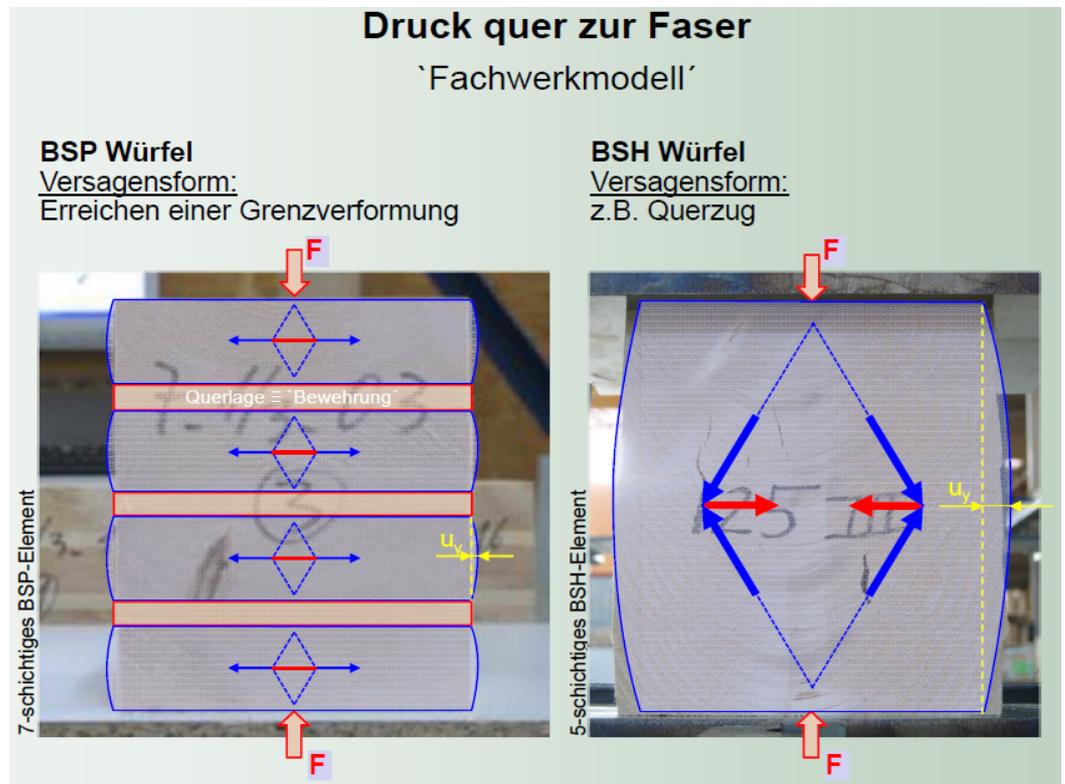


Abb. 1.28 Unterschied der Verformungen von BSP-Elementen (links) und BSH-Elementen (rechts), aus [16]

1.4.3.12 Zusammenfassung der Effekte

Tab. 1.1 stellt eine Übersicht betreffend das Auftreten von „Sperr effekt“ und „Einhängeeffekten“ in Abhängigkeit des auf Querdruck beanspruchten Produktes (Vollholz, BSH, BSP) und der Prüfkörpergröße in Abhängigkeit Voll- bzw. Teilflächenpressung dar.

	EINHÄNGEEFFEKT	SPERRWIRKUNG
Brett (Teilflächenbeansp.)	ja	nein
BSH (vollflächig)	nein	nein
BSH-Träger (Teilflächenbeansp.)	ja	nein
BSP (vollflächig)	nein	ja
BSP-Träger/Platte (Teilflächenbean.)	ja	ja

Tab. 1.1 Auftreten der Effekte bei Brettern, würfel-, träger- und plattenförmigen BSH-, BSP-Elementen

Die quantitative Ausprägung dieser Effekte bei Brettspertholz im Vergleich mit Brett-schichtholz, nach [4] ergibt:

- $E_{c,90,BSP-Würfel} = 1,70 E_{c,90,BSH-Würfel}$
- $E_{c,90,BSP-Platte*} = 1,60 E_{c,90,BSP-Würfel}$
- $f_{c,90,BSP-Würfel} = 1,41 f_{c,90,BSH-Würfel}$
- $f_{c,90,BSP-Platte*} = 1,77 f_{c,90,BSP-Würfel}$

* Datenbasis je fünf Prüfungen, bei mittlerer Teilflächenpressung.

1.4.3.13 Querdruck auf BSP-Platten

Salzmann [8] untersuchte das Verhalten von Platten bzw. Würfeln von BSP unter Quer-druckbeanspruchung rechtwinkelig zur Faser.

Unter Variation des Aufbauparameters ($\Sigma d_q/\Sigma d_l$) wurde festgestellt, dass:

- der Querdruckelastizitätsmodul bei würfelförmigen Körpern mit einem Aufbaupa-rameter $\Sigma d_q/\Sigma d_l = 1/3$ etwas höher ist als bei $\Sigma d_q/\Sigma d_l = 1/2$;
- kein Einfluß auf die Querdruckfestigkeit von würfelförmigen Körpern nachgewie-sen werden konnte.

Die Ergebnisse von Querdruckprüfungen an seifflächenbeanspruchten BSP-Platten zeig-ten sich von der Lagerungssituationen abhängig: Bei einer Platte mit mittlerer Lagerung wurde eine höhere Druckfestigkeit bzw. ein höherer E-Modul quer zur Faser festgestellt, als bei Belastung an der Ecke.

Es fiel folgendes Verhalten auf: Die Querdruckfestigkeit weist bei Beanspruchung in der Mitte des Prüfkörpers den maximalen Wert auf; sie war kleiner am Rand (in der Quer- und Längsrichtung) und nahm noch stärker an der Ecke ab.

Selbiges gilt qualitativ für den Querdruckelastizitätsmodul. Diese Beobachtungen sind auf Unterschiede seitens des um die belastete Zone herum aktivierte Volumen zurückzu-führen. Das Volumen selbst wird durch die Sperrwirkung und den Einhängeneffekt be-stimmt.

Die Zusammenhänge zwischen Querdruckfestigkeit, Querdruckelastizitätsmodul und Rohdichte wurden analysiert. Aufgrund der Anisotropie des Materiales, Anwesenheit der Äste, etc. kamen folgenden Tendenzen heraus:

- $E_{c,90}$ vs. Rohdichte: es lag kein deutlicher Zusammenhang zwischen den beiden Größen vor. Zu merken war, dass eine flache Neigung der Jahrringlage und eine enge Jahrringbreite ein Indiz für höhere Steifigkeit war.

- $f_{c,90}$ vs. Rohdichte: kein Zusammenhang; alle Körper wiesen eine Querdruckfestigkeit größer als $3,0 \text{ N/mm}^2$ auf.
- $E_{c,90}$ vs. $f_{c,90}$: ein Zusammenhang war nicht vorhanden. Tendenziell: je größer $E_{c,90}$, desto größer $f_{c,90}$. Diese Proportionalität hing von anderen Parametern (Lastausbreitungswinkel, Körperhöhe, etc.) ab. Diesbezüglich wurde die Variation des E-Moduls quer zur Faser in Abhängigkeit vom Lastausbreitungswinkel (durch unterschiedliche Modelle berücksichtigt) betrachtet, wobei mit einer Zunahme des Winkels der Querdruckelastizitätsmodul abnahm. Bei einer konstanten Plattenhöhe und bei zunehmender Querdruckfestigkeit blieb der Druckelastizitätsmodul quer zur Faser weitgehend konstant.

Aus den Berechnungen in [8] erfuhr man die Abhängigkeit des Querdruckelastizitätsmoduls vom Lastausbreitungswinkel. Hierbei wurden einige Werte berichtet: Bei 0° -Ausbreitungswinkel mit Stempel an der Ecke betrug der Mittelwert des E-Moduls 505 N/mm^2 , während bei 45° -Ausbreitungswinkel 233 N/mm^2 (mit gleicher Stempelposition). Also der mittlere E-Modul bei 0° -Ausbreitungswinkel war fast doppelt so viel.

Es wurden die Folgerichtigkeit der Winkel durch die Gegenüberstellung der Querdruck-E-Module von Würfeln zu Platten ermittelt (aus [8]). Die Mehrheit der betrachteten Winkel (0° , 20° , $27,5^\circ$, 30° , 45°), die durch unterschiedliche Modelle berücksichtigt wurden, liefern die dazugehörige effektiv wirkende Fläche. In der Tab. 1.2 sind die Ergebnisse von idealen Winkeln aus der Untersuchung [8] sichtbar:

Stempelposition	idealen WINKEL
Mitte	zwischen 20° und 30°
Längsricht.	zwischen 15° und $27,5^\circ$
Querricht.	20°
Ecke	zwischen $27,5^\circ$ und 30°

Tab. 1.2 Idealen Winkel durch die Gegenüberstellung der Druck-E-Moduli, aus [8]

Im Großen und Ganzen waren nach [8] die idealen Winkel zwischen 20° und 30° gut geeignet für die Steifigkeit von BSP-Platten unter Querdruck. Die Modelle basierend auf den Winkel 0° und 45° waren nicht zuverlässig, weil die jeweilige $E_{c,90}$ -Werte nicht in die graue Streife zurückfallen (siehe Abb. 1.29). Die Ergebnisse auf Würfeln fiel in den begrenzte Range.

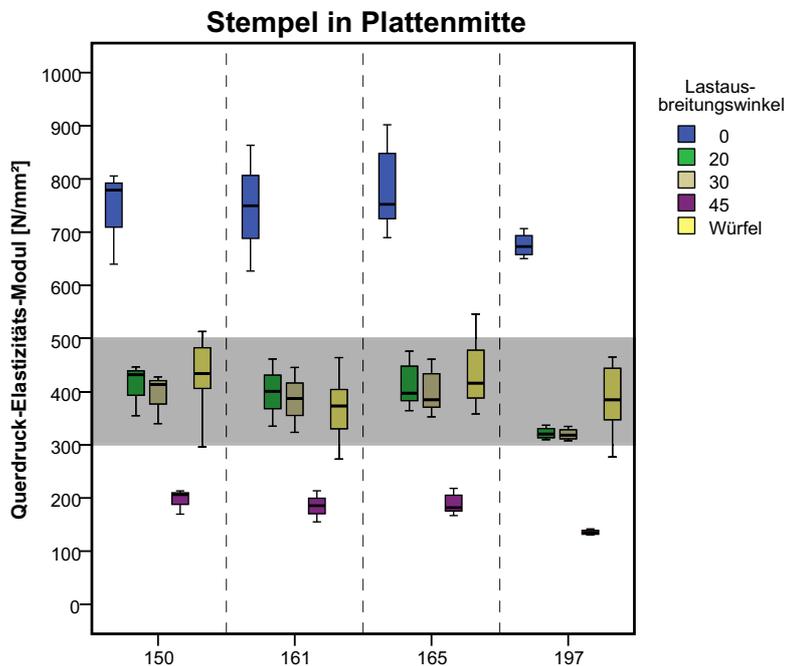


Abb. 1.29 Gegenüberstellung der Druck-E-Moduli mit unterschiedlichen Lastausbreitungswinkeln für die Stempelstellung in Plattenmitte, aus [8]

Für die verschiedenen Lagerungen bei Teilflächenpressung wurden zudem Erhöhungsfaktoren ($k_{c,90}$ -Beiwerte) angegeben, welche in [8] empirisch einen Wert von 1,8 bei mitigen Stempelproben, am Rand (bei Quer- und Längsorientierung der Platte) 1,5 und an der Ecke 1,4 betrug.

Serrano und Enquist [19] untersuchten 3-schichtige BSP-Elemente auf Querdruck in fünf unterschiedlichen Lagerungssituationen. Es wurde zum Einen (Serie A) eine vollflächige Lasteinleitung und zum Anderen (Serie B und C) verschiedene Linienlastdurchleitungen (in der Praxis als Wand-Deckenanschlüsse) in der Plattenmitte (in der Längs bzw. Querrichtung) und am Plattenrand (ebenfalls Längs- und Querrichtung) analysiert, siehe Abb. 1.30. Für die Linienversuchen wurden relative schmale linearförmige Stempel verwendet.

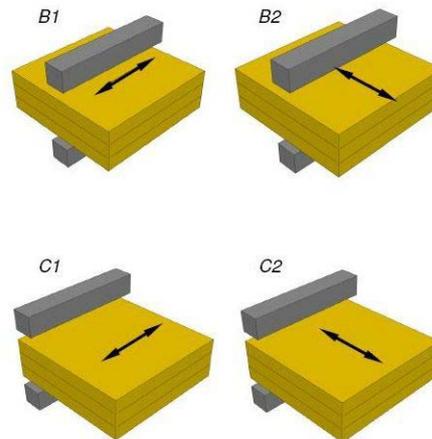


Abb. 1.30 Untersuchte Lasteinleitungskonfigurationen, aus [19]

Durch diese Untersuchung wurde festgestellt, dass die Querdruckfestigkeit von der Stempelfläche, der Lastorientierung (bezogen auf die Richtung der Decklage) und der Lastposition abhängig sind. Bei Belastung mit Linienlast am Rand der Platte liegt eine geringere Druckfestigkeit quer zur Faser vor als bei einer mittig aufgebracht Drucklast. Außerdem war auch deutlich der größere Widerstand bei in der Querrichtung liegender Linienlast in Vergleich mit dem Stempel parallel zur Faser der Platte. Durchschnittlich ergaben sich für die Querdruckfestigkeiten 2,9 N/mm² bis 5,8 N/mm². Die 2,9 N/mm² wurden im Randbereich der Platten gemessen, wo die Lastausbreitung nur in eine Richtung erfolgen konnte. Der Wert 5,8 N/mm² wurden bei einer Lastdurchleitung mit Lagerung in der Plattenmitte erreicht, siehe Tab. 1.3.

Test series	Strength, $f_{c,90}$	
	Mean (MPa)	COV
A	3.3	7.4%
B1	4.4	9.8%
B2	5.8	5.3%
C1	2.9	4.7%
C2	4.9	5.5%

Tab. 1.3 Testresultate, aus [19]

In [13] wurde eine Untersuchung mittels eines FE-Modells geführt. Es fiel eine Abhängigkeit des $k_{c,90-BSP}$ -Faktors von der Prüfkörperhöhe (siehe Tab. 1.4) und der Stempelfläche (siehe Tab. 1.5) auf.

	$k_{c,90,clt}(165)$	$k_{c,90,clt}(200)$
load position “central”	1.83	1.93
load position “longitudinal edge”	1.58	1.66
load position “crosswise edge”	1.47	1.53
load position “vertex”	1.25	1.30

 Tab. 1.4 Vergleich des $k_{c,90,BSP}$ -Faktors bei BSP-Elementen mit unterschiedlicher Höhe

Die Variation des $k_{c,90,BSP}$ -Faktors bei Änderung der Prüfkörperhöhe ist relativ leicht.

	relative area	$k_{c,90,clt}$ ($h_{ref}=200\text{ mm}$)
standard area $160 \cdot 160\text{ mm}^2$	100%	1.93
enhanced area $196 \cdot 196\text{ mm}^2$	150%	$1.93 \cdot 0.90$
reduced area $113 \cdot 113\text{ mm}^2$	50%	$1.93 \cdot 1.35$

 Tab. 1.5 Abhängigkeit des $k_{c,90,BSP}$ -Beiwert von der Stempelfläche

Die Variation des $k_{c,90,BSP}$ -Faktors bei Änderung der Stempelfläche ist erheblicher als bei Änderung der Prüfkörperhöhe. Eine Erhöhung von 35 % bei einer Stempelfläche von $113 \times 113\text{ mm}^2$, in Vergleich zu einer Referenzfläche von $160 \times 160\text{ mm}^2$ sowie eine Reduktion um 10 % bei einer Erhöhung der Pressungsfläche auf $196 \times 196\text{ mm}^2$ wurde gefunden. Eine Erklärung für die Änderung des $k_{c,90,clt}$ in Abhängigkeit beider geometrischer Parameter kann in der Theorie der Plastizität gefunden werden. Nach [21] ergibt sich eine Funktion zur Beschreibung der Lastausbreitungswinkel mit:

$$\theta = 0,62 \cdot \ln\left(2 \frac{H}{s}\right)$$

hierbei sind:

- θ ist der Lastausbreitungswinkel;
- H ist die Höhe des belasteten Elements;
- s ist die Stempellänge.

Daraus können zwei Schlüsse gezogen werden:

- je größer die Höhe, desto größer ist der Lastausbreitungswinkel;
- je größer die Stempellänge, desto kleiner ist der Lastausbreitungswinkel.

Bei Zunahme der Höhe ist der Winkel θ (in Abb. 1.31, Figur „b“) größer und deshalb auch die wirkende Fläche. Aus diesem Grund ist der $k_{c,90}$ -Faktor größer. Bei Vergrößerung der Stempellänge wird der Winkel θ kleiner und deshalb wird auch die wirkende Lastausbreitungfläche kleiner. Dadurch folgt ein niedrigerer $k_{c,90}$ -Faktor (siehe Abb. 1.31).

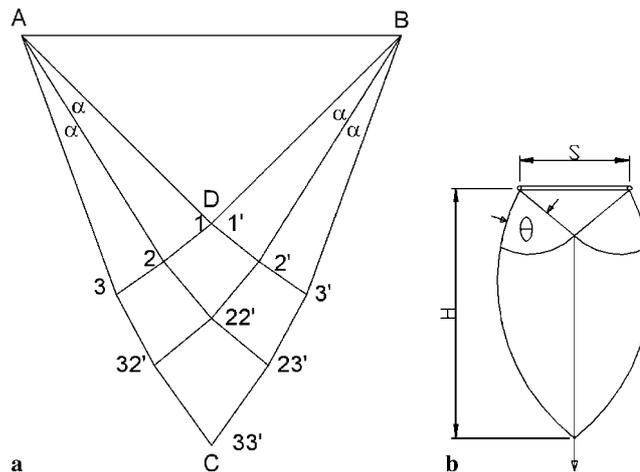


Abb. 1.31 Konstruktion der Gleitlinie (a) und Lastausbreitungswinkel θ (b)

1.4.4 Festlegungen für BSP-Elemente gemäß europäische Norm

Gegenwärtig sind für BSP-Elemente noch keine spezifischen Festlegungen betreffend die Querdruckkenngrößen und die $k_{c,90,BSP}$ -Faktoren in den europäischen Normen vorhanden. Zur Behebung dieses Mankos geht man davon aus, dass die für BSH-Elemente geltende Festlegungen auch für BSP-Elemente angelegt werden.

1.5 Motivation und Ziel der Arbeit

Holz ist ein natürliches Material, das beim tragenden Zweck zur Verwendung kommt. In letzte 20 Jahren sind die Anforderungen im Anwendungsgebiet bis zu flächenförmigen Elementen gestiegen. Auf diesem Grund sind mehrschichtige Aufbauelemente (das sogenannte BSP) entwickelt worden, die sowohl als Decken-, Dachelemente, Wände, Stiegenläufe als auch stabförmige lastabtragende Bauteile (Unterzüge, Stützen) anwendbar sind. Dadurch kommen verschiedenen Stößen (zwischen Wand-, Stütze und Deckenelementen) in der Praxis zur Anwendung, welche unterschiedliche Widerstände bei Querdruckbelastung aufweisen (siehe die Untersuchungen von Halili [4], Salzmann [8] und Serrano-Enquist [19]). Der gegenwärtige Kenntnisstand über das Thema ist noch nicht komplett, deshalb ist eine Aufbereitung nötig. Einige der bleibenden offenen Punkten betreffend den Querdruck quer zur Plattenebene auf BSP-Elementen werden im Rahmen dieser Masterarbeit geforscht. Das Ziel besteht darin, das Verhaltens von BSP-Elementen bei Querdruckbeanspruchung unter Variation der Lasteinleitungsfläche, der Holzfeuchte, der Lasteinleitungsposition und der Lagerung zu untersuchen.

Die mechanischen Bemessungskenngrößen der BSP-Elemente quer zur Faserrichtung sind derzeit von den europäischen Normen noch nicht geregelt. Zurzeit werden die für BSH-Elemente geltenden normativen Vorgaben, auch für BSP-Elemente verwendet. Man geht davon aus, dass das Potenzial von BSP bei Querdruckbelastung höher ist als jenes von BSH (wie in [4], [8], etc. bestätigt). Die Kenntnisse aller Bemessungskennwerte von BSP-Elementen steht im Interesse einer wirtschaftlich orientierten Holzindustrie. Dahingehend wurden schon erhebliche Forschungsarbeiten geleistet, jedoch blieben bisher noch einige Punkte offenen. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Basiskenngrößen für die charakteristischen Werte betreffend lokaler Querdruckbeanspruchung normal zur Plattenebene ($f_{c,90,k}$) sowie die dazugehörigen E-Module ($E_{c,90,mean}$) versuchstechnisch ermittelt. Insbesondere werden, die in der Praxis auftretenden Lagerungssituationen, mit den oben genannten Variationen betrachtet.

Aus der zahlreichen Literatur ist zu entnehmen, dass die verschiedenen Aufbauarten (BSH, BSP) sowie Elementformen (Würfel, Stäbe und Platten), bei Querdruckbelastung unterschiedliche Tragfähigkeiten aufweisen. Deshalb ist es notwendig die verschiedenen Einflüssen mit Hilfe eines Parameters zu beschreiben. Hierzu bietet sich der $k_{c,90}$ -Faktor an.

Schlussendlich werden die ermittelten Kennwerte der BSP-Elemente mit den derzeit normativ geregelten Kenngrößen für BSH verglichen. Weiters wird versucht, die geltenden Festlegungen der Norm betreffend dem Lastausbreitungswinkel, sowie die Ermittlung der maximalen Spannung in der Mitte des belasteten Körpers, auf die Anwendung an BSP zu überprüfen.

Material und Methoden

2.1 Einleitung

Um die Qualität der Versuche zu gewährleisten und die Ergebnisse vergleichen zu können, ist ein einheitliches Verfahren bei der Durchführung und Auswertung der Versuche von zentraler Bedeutung.

Für alle Gruppen werden die physikalischen (mechanischen) Ergebnisse in Tabellen dargestellt. Alle Daten wurden nach statistischem Kriterium aussortiert.

Als Grundlage für die Durchführung der in dieser Arbeit beschriebenen Versuche, wurden die Bestimmungen der ÖNORM EN 408:2010 [32] herangezogen.

Die Auswertung der Resultate basiert auf der ÖNORM EN 14358:2006 [33].

2.2 verwendete Holzart

Im Rahmen dieser Arbeit wurden als Prüfmaterial Elemente aus Fichte (*Picea abies* Karst.) für die Querdruckversuche im Labor verwendet.

Die Festigkeitsklasse dieses Materiales war nach EN 338:2007 [27] die C24.

2.3 Kriterien der Untersuchung, Prüfkörper und Probenumfang

2.3.1 Allgemeines

Die durchgeführten Versuche erfolgten an würfelförmigen und plattenförmigen Probekörpern. [32] regelt die Höhe mit 200 mm und die Querschnittsfläche würfelförmiger

Proben mit 25.000 mm², wobei eine Mindestbreite von 100 mm einzuhalten ist. Von der normativ festgelegten Höhe der Prüfkörper musste bei den Versuchen dieser Arbeit abgewichen werden, da für die Querdruckversuche nur BSP-Platten mit einer Höhe von 160 mm zur Verfügung standen.

Zudem wurde darauf geachtet, dass die Auflager und Lastausbreitungsflächen der Prüfkörper plan, zueinander parallel und normal zur Achse der Prüfmaschine waren; dazu mehr in Abschnitt 2.5.2.

2.3.2 Unterteilung der ursprünglichen Prüfkörper

Aus den ursprünglich gelieferten 30 BSP-Elementen wurden 140 Prüfkörper in Form von Würfeln bzw. Platten herausgeschnitten, welche in Folge fünf Gruppen zugeordnet wurden. Es wurde darauf geachtet, dass alle fünf Gruppen vergleichbare Rohdichte aufweisen. Die Einteilung erfolgte auf Basis der Rohdichte der 30 BSP-Elemente (siehe Tab. 2.1).

Gruppe I		Gruppe II		Gruppe III			
Nr. BSP-Element	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Nr. BSP-Element	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Nr. BSP-Element	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Nr. BSP-Element	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]
13a	460	2a	456	4a	457	1a	459
2b	452	3a	440	11a	447	6a	454
15a	448	8a	454	14a	465	7a	447
10b	446	10a	450	1b	452	8b	436
5b	456	12a	451	14b	455	9b	445
$\rho_{12,mean}$	452	-	450	-	455	-	448
COV [ρ_{12}] [%]	1,3	-	1,4	-	1,5	-	2,0

Gruppe IV		Gruppe V	
Nr. BSP-Element	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]	Nr. BSP-Element	Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]
5a	444	3b	446
9a	434	6b	450
4b	450	7b	436
11b	456	13b	456
12b	437	15b	456
$\rho_{12,mean}$	444	-	449
COV [ρ_{12}] [%]	2,0	-	1,9

Tab. 2.1 Einteilung der ursprünglichen BSP-Platten

Die Gruppen I, II, IV, V bestand aus je fünf BSP-Elementen und die Gruppe III aus zehn BSP-Elementen. Im letzten Schritt wurden die Würfel und die Platten aus diesen Elementen herausgeschnitten. Somit kam es zu folgenden Maßen der Prüfkörper:

- **Würfelförmige Prüfkörper**

Höhe = 160 mm

Länge = 100 mm, 150 mm, 200 mm

Breite = entsprechend Länge



Abb. 2.1 Ermittlung der Querdruckkenngößen an Würfeln

- **Plattenförmige Prüfkörper**

Höhe = 160 mm

Länge = 300 mm bis 900 mm

Breite = 400 mm bis 600 mm



Abb. 2.2 Ermittlung der Querdruckkenngrößen an Platten

2.3.3 Parameter der Prüfkörper und Kriterien der Untersuchung

Die gesamten geprüften BSP-Elemente (Würfel bzw. Platten) weisen folgende Parameter auf:

- Jahrringlage: zufällig *;
- Schichtanzahl/Aufbau: 5 / 40-20-40-20-40;
- Aufbauparameter : $d_q/d_l = 1/3$;
- Höhe: 160 mm.

*Kein gezielter Aufbau mit Brettwaren stehenden oder liegenden Jahrringlagen.

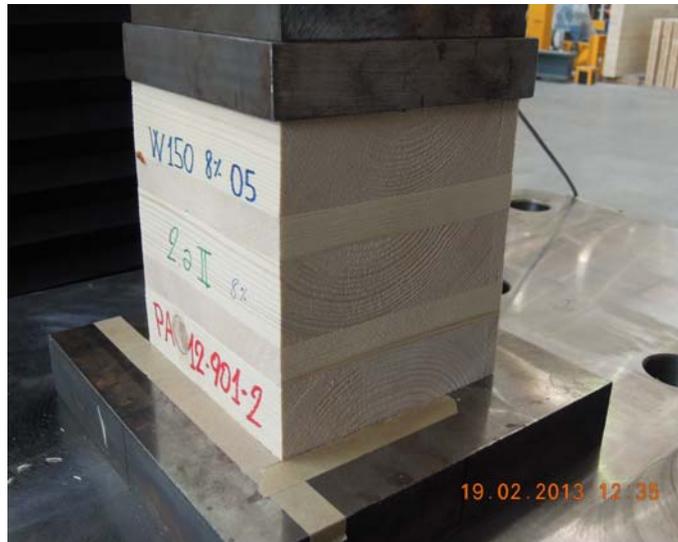


Abb. 2.3 Prüfkörper mit Aufbauparameter 1/3

Bei lokaler Querdruckbeanspruchung von Platten gilt die Position der Lasteinleitung relativ zur Plattenbegrenzung als wesentlicher Faktor. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vier verschiedenen Positionen untersucht (siehe auch Abb. 2.4):

- Mitte (M);
- Rand-Mitte in Richtung der Decklage (L);
- Rand-Mitte quer zur Decklage (Q);
- Ecke(E).

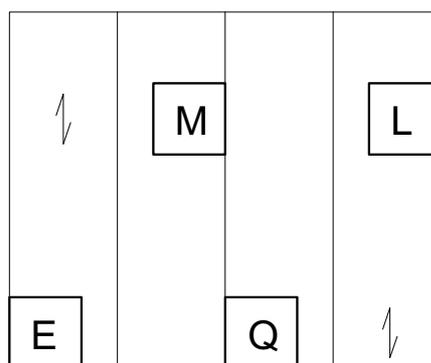


Abb. 2.4 Skizze der Stempelposition

Die verschiedenen Stempelstellungen repräsentieren mögliche Auflagerungen von Deckenelementen auf Stützen bzw. von Wänden auf Decken. Aufgrund der in der Praxis auftretenden Auflagersituationen wurden die obengenannten Untersuchungen durchgeführt.

Zusätzlich zur Position wurde noch unterschieden zwischen:

- Einleitung von Stempel- bzw. Linienlasten auf BSP-Plattenelementen, bei vollflächiger Lagerung (V), und
- Auflager- und Einleitungssituation, bei einer sogenannten Durchleitung (D).

Die zwei verschiedenen Arten haben das Ziel Unterschiede im „Einhänge- bzw. Sperreffekt“ zwischen den beiden Fällen auf die Querdruckfestigkeit bzw. den Druck-Elastizitätsmodul für BSP zu untersuchen.

Die Versuche wurden mit einer Stempelfläche von $100 \times 100 \text{ mm}^2$, $150 \times 150 \text{ mm}^2$, $200 \times 200 \text{ mm}^2$ bzw. mit Linienflächen von $100 \times 400 \text{ mm}^2$ und $150 \times 400 \text{ mm}^2$ durchgeführt.

Zudem werden die Referenz-Querdruckkenngrößen an Würfeln in Anlehnung an die ÖNORM EN 408 ermittelt. Bei den Würfeln mit einer Querschnittsfläche von $150 \times 150 \text{ mm}^2$ wurde der Einfluß der Holzfeuchte auf die Querdruckkenngrößen anhand von drei Serie mit einer Zielholzfeuchte von $u = 8 \%$, 12% und 20% analysiert. Die jeweiligen Feuchtbedingungen jeder Serie wurden mit Hilfe der Klimatisierung in dafür geeigneten Klimakammern erreicht.

Bei den Versuchen, mit Linienlast (Gruppen IV und V), wurden 3- bzw. 5-schichtige, auf einer Decke aufgelagerte Wand-Elemente (siehe Abb. 2.5) simuliert.

Folgende drei Konfigurationen wurden überprüft:

- KONF. „a“: die Querlage der Wand wurde mit gleichem Material (Stahl) wie die anderen Längsschicht der Wand betrachtet (gleiche Steifigkeit aller Lage; siehe Abb. 2.6, KONF. „a“);
- KONF. „b“: die Querlage der Wand wurden mit einem weicheren Material (Holz) dargestellt, während die Längsschichten der Wand aus Stahl waren (siehe Abb. 2.6, KONF. „b“);
- KONF. „c“: die Querlage der Wand wurde als Lage mit Querdrucksteifigkeit gegen 0 betrachtet, und in Folge bei der Beanspruchung frei gelassen (siehe Abb. 2.6, KONF. „c“).

Kontaktfuge "Wand-Decke-Wand"

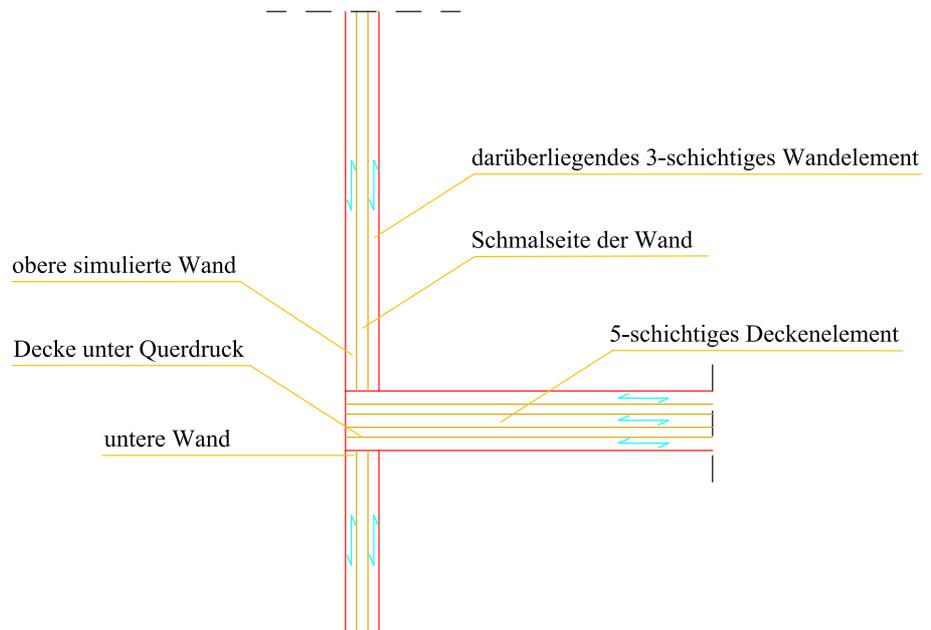
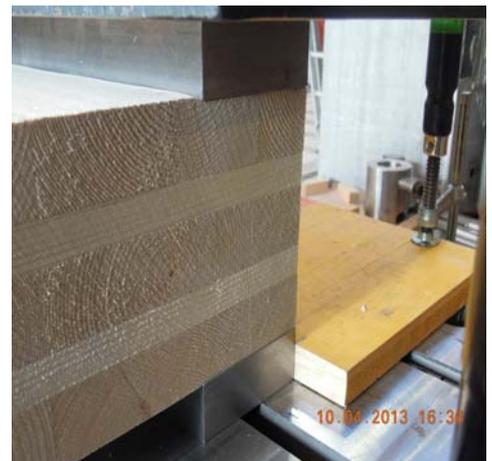
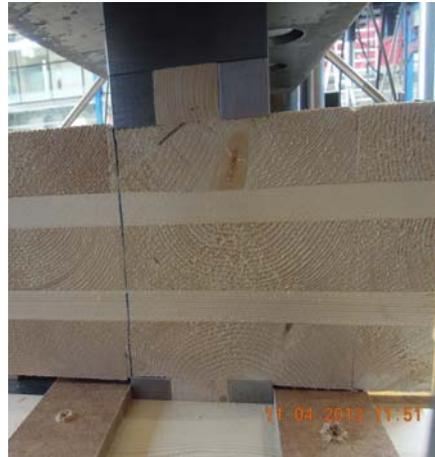


Abb. 2.5 Kontaktfuge „Wand-Decke-Wand“, als Basis für die Untersuchungen mittels Linienlasten

Konf. „a“



Konf. „b“



Konf. „c“



Abb. 2.6 Die drei Konfigurationen in den Fotos stellen Prüfungen an der Kontaktfuge „Wand-Decke“ bzw. Wand-Decke-Wand mit verschiedenen Varianten für eine 3-schichtige Wand (Konf. „a, b, c“) dar

Nachdem die Kriterien der Untersuchung erläutert wurden, werden jetzt alle Gruppen detailliert dargelegt.

- GRUPPE I

Die fünf BSP-Elementen der Gruppe I wurden zu fünf Würfeln (mit 12 %-Holzfeuchte) und zehn Prüfkörpern als Platten verarbeitet. An den Platten wurde mit Hilfe eines quadratischen Stempels die Auflagersituation „Decke-Stütze“ geprüft. Die zehn Platten wurden dafür in zwei gleich große Untergruppen unterteilt. Eine Gruppe wurde während der Prüfungen vollflächig und die zweite Gruppe in Sinne einer Durchleitung geprüft. Die Stempelfläche betrug für alle Prüfungen $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Die Lagersituation „Durchleitung“

(Stütze-Decke-Stütze) wurde für die Position Mitte (M) und Ecke (E) untersucht. Die Lagerung „vollflächig“ (Fundamentplatte-Decke-Stütze) wurde anhand von vier verschiedenen Positionen (M, L, Q, E) betrachtet. Insgesamt wurden 35 Versuche bei dieser Gruppe durchgeführt. Die Prüfkörper und die untersuchten Laststellungen sind in Abb. 2.7 dargestellt.

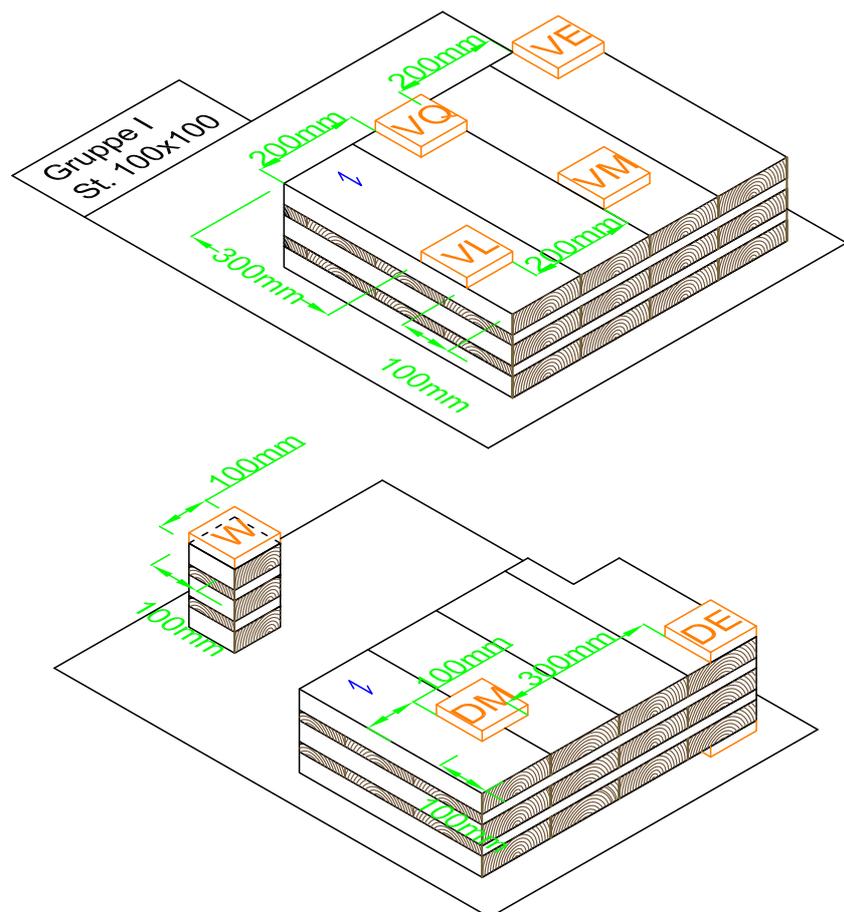


Abb. 2.7 Gruppe I: Prüfkörper und untersuchte Laststellungen

- GRUPPE II

Die fünf BSP-Elemente der Gruppe II wurden zu fünfzehn Würfeln und zehn Prüfkörpern als Platten verarbeitet. An den Platten wurden mit Hilfe eines quadratischen Stempels die Auflagersituation „Decke-Stütze“ geprüft. Die Würfel wurden dafür in drei gleich große Untergruppen unterteilt, welche unterschiedliche Holzfeuchten (8 %, 12 %, 20 %) aufwiesen. Die zehn Platten wurden in zwei gleich große Untergruppen unterteilt. Eine Gruppe wurde während der Prüfungen vollflächig und die zweite Gruppe im Sinne einer Lastdurchleitung geprüft. Die Stempelfläche selbst betrug für alle Prüfungen $150 \times 150 \text{ mm}^2$. Die Lastsituation „Durchleitung“ (Stütze-Decke-Stütze) wurde für die Position Mitte (M) und Ecke (E) untersucht. Die Lagerung „vollflächig“ (Fundamentplatte - Decke - Stütze) wurde bei mittiger Position (M) betrachtet. Insgesamt wurden 30 Ver-

suche bei dieser Gruppe durchgeführt. Die Prüfkörper und die untersuchten Laststellungen sind in Abb. 2.8 dargestellt.

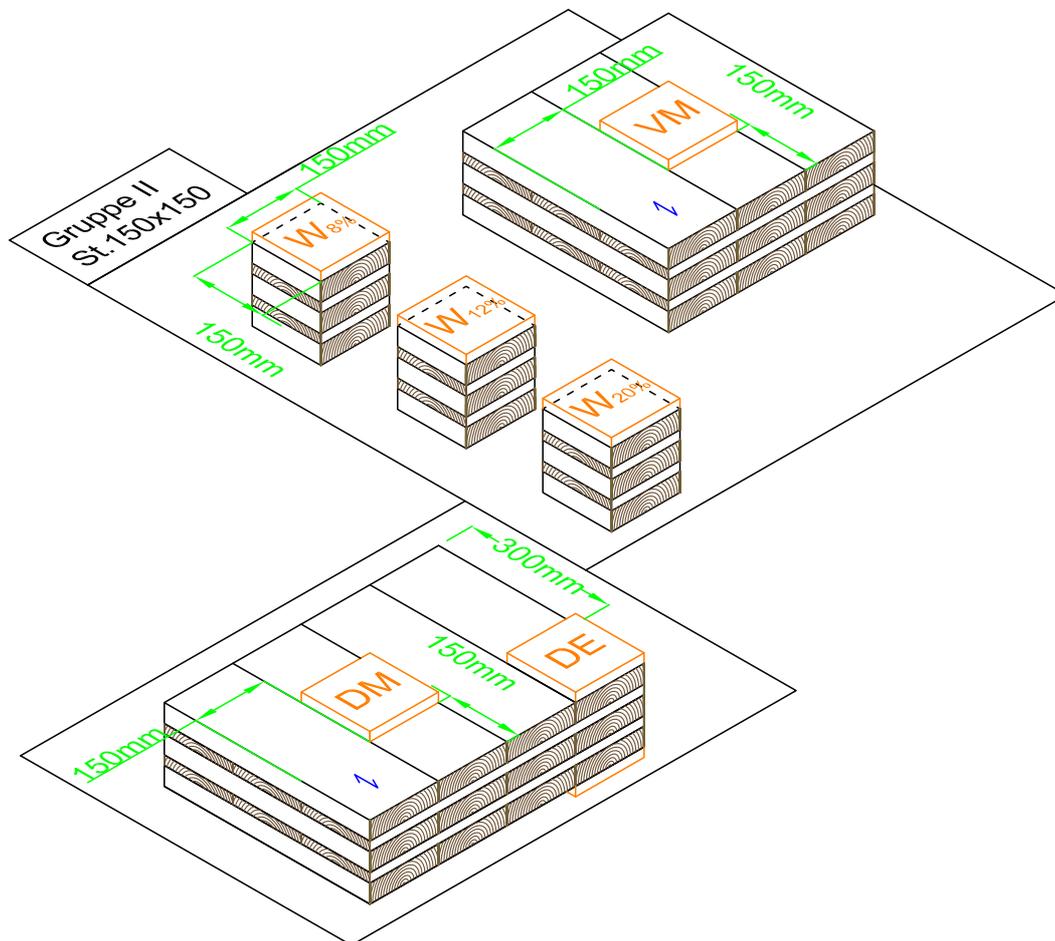


Abb. 2.8 Gruppe II: Prüfkörper und untersuchte Laststellungen

- GRUPPE III

Die zehn BSP-Elemente der Gruppe III wurden zu zehn Würfeln (mit 12 %-Holzfeuchte) und zehn Prüfkörpern als Platten verarbeitet. An den Platten wurde mit Hilfe eines quadratischen Stempels die Auflagersituation „Decke-Stütze“ geprüft. Die zehn Platten wurden dafür in zwei gleich große Untergruppen unterteilt. Eine Gruppe wurde während der Prüfungen vollflächig und die zweite Gruppe im Sinne einer Lastdurchleitung geprüft. Die Stempelfläche selbst beträgt für alle Prüfungen $200 \times 200 \text{ mm}^2$. Die Lastsituation „Durchleitung“ (Stütze-Decke-Stütze) wurde für die Position Mitte (M) und Ecke (E) untersucht. Die Lagerung „vollflächig“ (Fundamentplatte-Decke-Stütze) wurde anhand der mittigen Position (M) betrachtet. Insgesamt wurden 25 Versuche bei dieser Gruppe durchgeführt. Die Prüfkörper und die untersuchten Laststellungen sind in Abb. 2.9 dar-

gestellt.

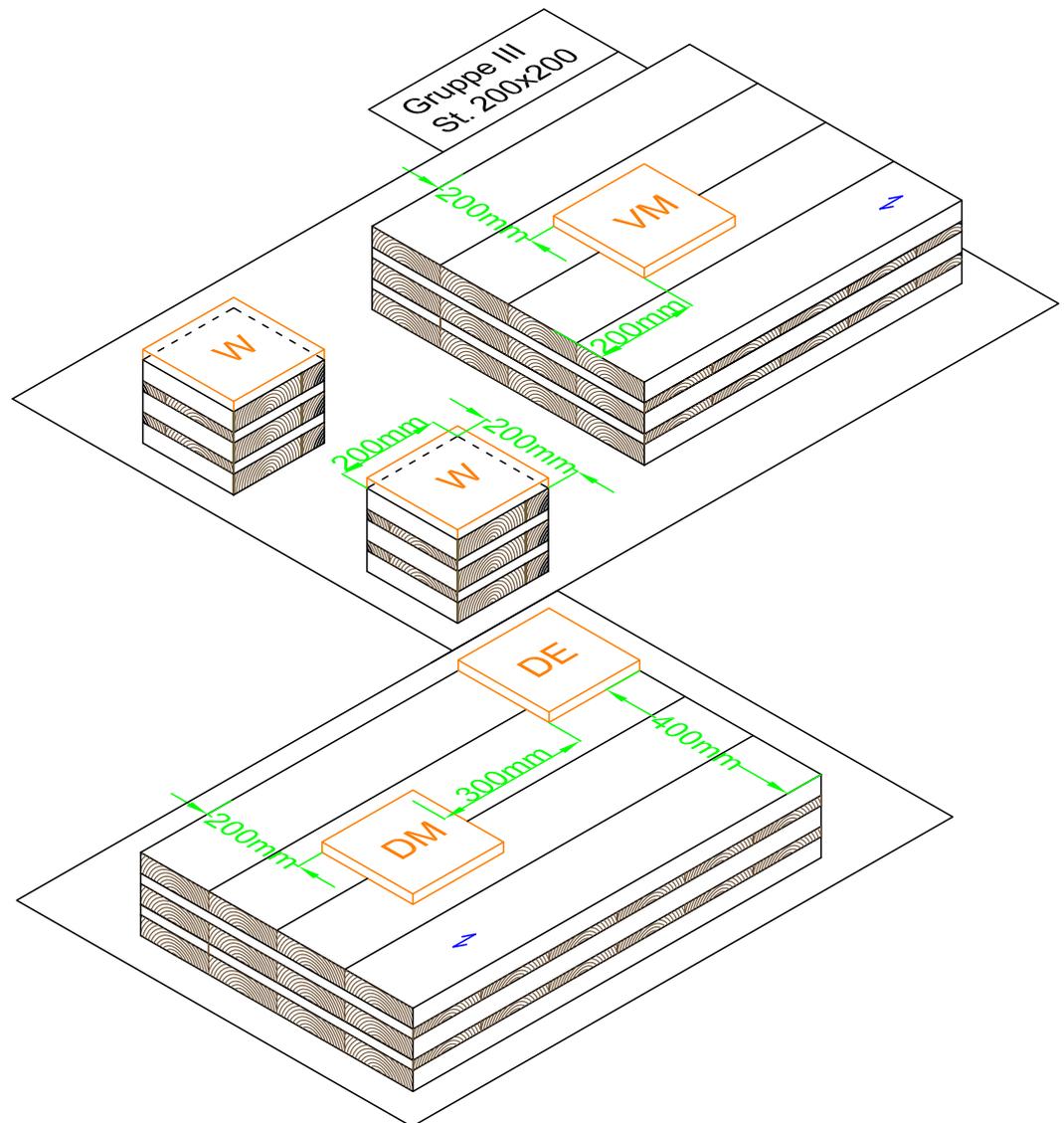


Abb. 2.9 Gruppe III: Prüfkörper und untersuchte Laststellungen

- GRUPPE IV

Die fünf BSP-Elemente der Gruppe IV wurden zu fünf Würfeln (mit 12 %-Holzfeuchte) und zehn Prüfkörpern als Platten verarbeitet. An den Platten wurde mit Hilfe einer Linienlast die Auflagersituation „Decke-Wand“ geprüft. Die zehn Platten wurde dafür in zwei gleich große Untergruppen unterteilt. Eine Gruppe wurden während der Prüfungen vollflächig und die zweite Gruppe im Sinne einer Lastdurchleitung geprüft. Die Stempelfläche selbst für Platten und Würfel beträgt je $100 \times 400 \text{ mm}^2$ und $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Die

Lastsituation „Durchleitung“ (Stütze-Decke-Stütze) wurde für die Position Mitte (M) und Ecke (E) untersucht. Die Lagerung „vollflächig“ (Fundamentplatte-Decke-Stütze) wurde anhand zwei unterschiedlichen Positionen (M und E) betrachtet. Insgesamt wurden 25 Versuche bei dieser Gruppe durchgeführt. Die Prüfkörper und die untersuchten Laststellungen sind in Abb. 2.10 dargestellt.

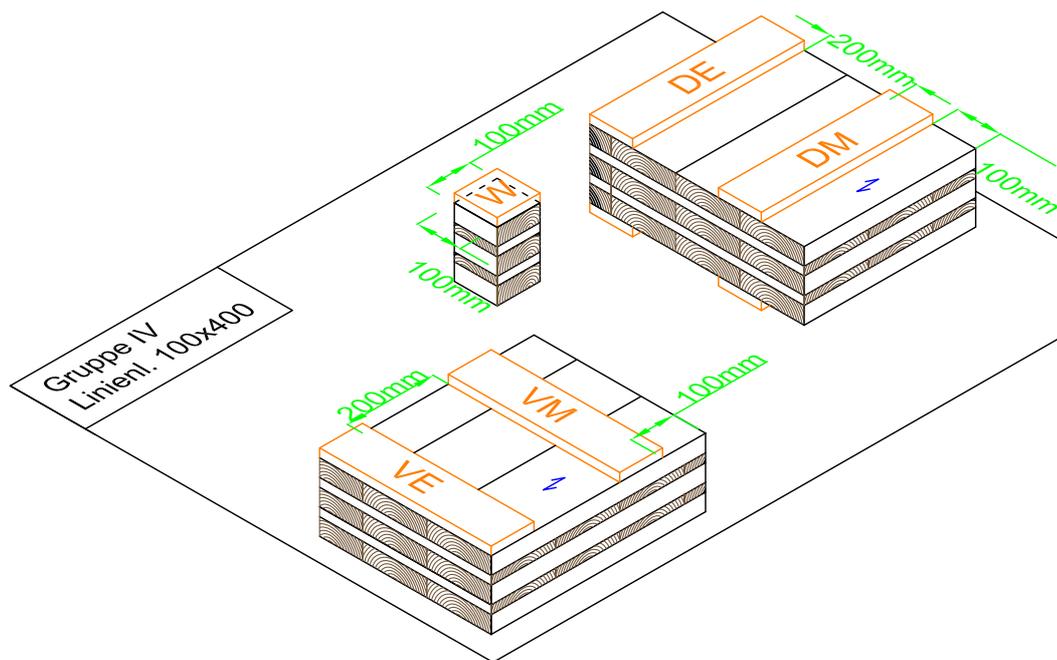


Abb. 2.10 Gruppe IV: Prüfkörper und untersuchte Laststellungen

- GRUPPE V

Die fünf BSP-Elemente der Gruppe V wurden zu fünfzehn Würfeln (mit unterschiedlichen Holzfeuchten: 8 %, 12 %, 20 %) und zehn Prüfkörpern als Platten verarbeitet. An den Platten wurde mit Hilfe einer Linienlast die Auflagersituation „Decke-Wand“ geprüft. Die zehn Platten wurden dafür in zwei gleich große Untergruppen unterteilt. Eine Gruppe wurde während der Prüfungen vollflächig und die zweite Gruppe im Sinne einer Lastdurchleitung geprüft. Die Stempelfläche für Platten und Würfel beträgt je $150 \times 400 \text{ mm}^2$ und $150 \times 150 \text{ mm}^2$. Die Lagerung „vollflächig“ (Fundamentplatte-Decke-Stütze) wurde anhand zwei unterschiedlichen Positionen (M und E) betrachtet. Insgesamt wurden 25 Versuchen bei dieser Gruppe durchgeführt. Die Prüfkörper und die untersuchten Laststellungen sind in Abb. 2.11 dargestellt.

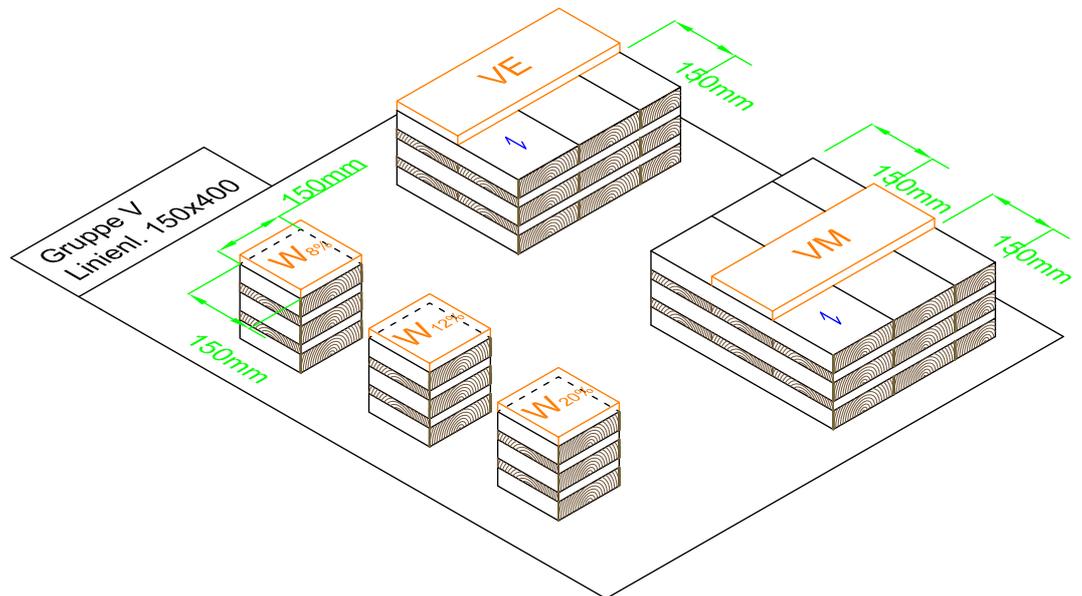


Abb. 2.11 Gruppe V: Prüfkörper und untersuchte Laststellungen

2.3.4 Probenumfang

In diesem Abschnitt werden die Probekörperumfänge bzw. die Versuchsanzahl für Würfel und Platten dargelegt.

- Würfelförmige Probekörper

In Tab. 2.2 werden alle würfelförmigen Prüfkörper aufgelistet:

Gesamte Versuchsreihe für Würfeln:

Lage im Stamm	Schichtanzahl [-]	Aubauparameter $\Sigma d_q / \Sigma d_l$	Höhe [mm]	Gruppe	Stempelfläche [mm ²]	Anzahl [Stk.]	Holzfeuchte [%]
"random"	5-schichtig	1/3	160	I	100x100	5	12
				II	150x150	15	8, 12, 20
				III	200x200	10	12
				IV	100x100	5	12
				V	150x150	15	8, 12, 20

Tab. 2.2 Prüfplan „Würfel“

- Plattenförmige Probekörper

In Tab. 2.3 werden alle plattenartigen Prüfkörper aufgelistet:

Lage im Stamm	Schichtanzahl [-]	Aubauparameter $\Sigma d_q / \Sigma d_l$	Höhe [mm]	Gruppe	Stempelfläche [mm ²]	Lagerung "V" oder "D"	Posit. des Stempels	Anzahl [Stk.]
"random"	5-schichtig	1/3	160	I	100x100	"V"	Mitte	5
							Ecke	5
							RL	5
						RQ	5	
						"D"	Mitte	5
							Ecke	5
				II	150x150	"V"	Mitte	5
							"D"	Mitte
						"D"	Ecke	5
							Mitte	5
				III	200x200	"V"	Mitte	5
							"D"	Mitte
						"D"	Ecke	5
							Mitte	5
				IV	100x400	"V"	Mitte	5
Ecke	5							
"D"	Mitte	5						
	Ecke	5						
V	150x400	"V"	Mitte	5				
			Ecke	5				

Lagerungen: "V" (vollflächige Lagerung) und "D" (Durchleitung)

Tab. 2.3 Prüfplan „Platten“

Die Bezeichnung der Prüfkörper und Versuche wird hier mit Hilfe folgender Beispiele erläutert:

W 100 _ 08 _ 01

S 150 _ VM _ 02

L 100 _ DE _ 03

- „W“, „S“ bzw. „L“ geben einen Hinweis auf die drei Prüfkörperformen und die Art der Lastenteilung, mit „W“ für Würfel, „S“ für Stempel und „L“ für Linienlast;
- die Zahlen 100, 150 oder 200 nach dem ersten Buchstaben geben die Breite der Lastenteilungsfläche wieder;
- die nachfolgenden Zahlen 08, 12 oder 20 bezeichnen die jeweilige Klasse der Holzfeuchte;
- danach folgt die jeweilige Nummer des Prüfkörpers mit 01, 02, ..., 10 für die Würfelserie und 01, 02, ..., 05 für die Serie mit Platten.

2.4 Klimatisierung und Verteilung der Prüfkörper

Da die Holzfeuchte ein entscheidender Einflußfaktor für die Querdruckeigenschaften ist, ist die adäquate Klimatisierung eine wichtige Verfahrensweise. Diese hat vor dem Beginn der Versuche stattzufinden.

Alle Prüfkörper wurden zuerst in der Klimakammer (mit einer Temperatur von 20 ± 2 °C und Luftfeuchte von 65 ± 5 %) für eine ausreichende Zeit gelagert, bis die Ausgleichsfeuchte von circa 12 % erreicht wurden.

Die würfelförmigen Prüfkörper von den Gruppe II und Gruppe V wiesen drei unterschiedliche Holzfeuchtezustände (ca. 8 %, 12 % und 20 %) auf. Die Maße dieser Prüfkörper waren für alle ident ($150 \times 150 \times 160$ mm³).

Das Ziel bestand darin, den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Eigenschaften unter Querdruckbelastung zu untersuchen.

Das Umgebungsklima (Luftfeuchte und Raumtemperatur) im Labor, während der Prüfungen wurde zudem auf dem Prüfprotokoll registriert.

2.5 Versuchsdurchführung

2.5.1 Allgemeines

Der Zweck der durchgeführten Versuche war die Ermittlung der Eigenschaften des Materiales und insbesondere dessen Querdruckfestigkeit und Querdruck-Elastizitätsmodul. Die dahingehende Prüfungsdurchführung erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 408:2010 [32]. Abweichend zu den gegebenen Spezifikationen zur Prüfungsdurchführung wird die Querdruckverformung über die gesamten Prüfkörperhöhe bestimmt. In Anlehnung an die ÖNORM EN 408:2010 wurde die Maximalkraft innerhalb von $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$ erreicht. Die Prüfungen wurden weggesteuert durchgeführt.

2.5.2 Prüfkonfigurationen

2.5.2.1 Prüfungen an Würfeln

Zur Sicherungsstellung eines gleichmäßigen Querdrucks wurde Augenmerk auf die Planheit und Parallelität der Auflager- und Lasteneinleitungsflächen sowie auf die Rechtwinkeligkeit im Zuschnitt der Prüfkörper gelegt. Die Wegmessung erfolgte durch vier induktive Weggeber an jeder Ecke der oberen Stahlplatte. In der weiteren Auswertung wurde der Mittelwert dieser Wegmessungen herangezogen. Die Prüfungen an Würfeln wurden an der Universalprüfmaschine Zwick Universal 275 am Lignum Test Center des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt.



Abb. 2.12 Prüfkongfiguration für Würfelpfungen an der Prüfmaschine Zwick Universal 275 am Lignum Test Center des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz

2.5.2.2 Prüfungen an Platten

Ein Teil von den Versuchen an Platten wurde, ebenso wie die Versuche an den Würfeln, an der Prüfmaschine Zwick Universal 275 durchgeführt. Die übrigen Versuche wurden, aufgrund der Begrenzung der Maximallast auf 275 KN, an der 1 MN-Prüfmaschine des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Graz geprüft. Prüfbedingungen bei beiden Prüfgerüsten unterscheiden sich nur unwesentlich; die ausgeführte Prüfkongfiguration zur Ermittlung der Querdruckkenngößen an BSP-Platten bei quasi punkt- bzw. linienförmiger Lasteinleitung bzw. Auflagersituation sind bei beiden Prüfgerüsten ident, siehe Abb. 2.13.



Abb. 2.13 Prüfkongfiguration für Plattenpfungen an der 1 MN-Prüfmaschine des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Graz

Durchgeführte Messungen

2.6 Bestimmung der Maße der Prüfkörper

Die Ermittlung der Maße erfolgte, in Anlehnung an die folgende Punkte:

- die Messunsicherheit darf maximal 1 % erreichen;
- alle Messungen dürfen nach der Klimatisierung der Prüfkörper vorgenommen werden;
- falls Abweichungen der Breite und der Dicke auftreten würden, sollten Mittelwerte der Maße aus drei verteilten Einzelmessungen berechnet werden;
- die Prüfkörper müssen gehobelt sein.

Dies entspricht Festlegungen der ÖNORM EN 408:2010 [32].

2.7 Bestimmung der Prüfkörperabmessungen

Um die Prüfkörper gemäß ÖNORM EN 408:2010 [32] abzumessen, wurde eine Schiebelehre der Firma Mahr verwendet (siehe Abb. 2.14). Das Gerät weist eine Präzision von 0,1 % auf. Für jeden Körper wurde zwei mal in unterschiedlichen Stellen die Länge, Breite und Höhe gemessen, und die Wert folgend gemittelt.



Abb. 2.14 Schiebelehre

2.8 Bestimmung der Masse der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden direkt vor der Durchführung der Prüfungen mittels einer Waage vom Typ SARTORIUS EA60 EDE-1 (mit einer Genauigkeit von 1 g) gewogen.

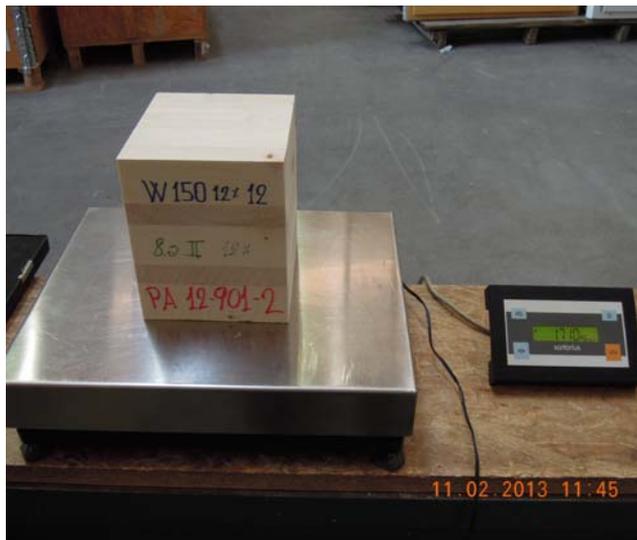


Abb. 2.15 Messung der Masse mittels der Waage „SARTORIUS EA60 EDE-1“

2.9 Bestimmung der Rohdichte der Prüfkörper

Zur Bestimmung der Rohdichte einzelner Prüfkörper sind die Masse (m_u) und das Volumen (V_u) in feuchtem Zustand des Elementes (laut ÖNORM EN 408:2010 [32]) zu ermitteln. Da die Variation der Masse bzw. der Abmessungen empfindlich auf das Umgebungsklima sind, wurden die Prüfkörper unmittelbar vor der Prüfung abgewogen und gemessen. Die Ermittlung der Rohdichte erfolgte nach folgender Gleichung:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

hierbei sind:

m_u die Masse bei vorhandenem Feuchtegehalt u , in kg;

V_u das Volumen bei vorhandenem Feuchtegehalt u , in m^3 .

Nach ÖNORM EN 384:2010 [32] wurden alle Ergebnisse in Folge auf eine Referenzholzfeuchte von $u_{ref}=12\%$ umgerechnet. Die dahingehende Rohdichte ist mit ρ_{12} bezeichnet.

2.10 Bestimmung der Feuchte der Prüfkörper

Der Feuchtegehalt in einem Holzelement spielt eine große Rolle bei den mechanischen Eigenschaften des Materials. Zur Klärung dieses Einflusses auf die Querdruckkenngrößen von BSP wurden drei Serien mit unterschiedlicher Holzfeuchte geprüft.

Zur Bestimmung der Holzfeuchte wurden zwei Verfahren verwendet: Zum einen die Messung direkt vor der Querdruckprüfung mittels elektronischer Widerstandsmessung, und zum anderen nach der Durchführung der Querdruckprüfung mittels der Darrprobe. Im Folgenden werden beide Methode erläutert.

2.10.1 elektronische Widerstandsmessung

Mit einer Genauigkeit von 3 % wird die Holzfeuchtigkeit mittels des Gerätes „Hydromette M 4050“, der Firma Gann bestimmt. Die Messung erfolgt durch den Widerstand vom Holz gegenüber dem elektrischen Fluss zwischen den zwei Elektroden am Gerät.



Abb. 2.16 Holzfeuchte Messgerät „Hydromette M 4050“

2.10.2 Darrmethode

Die Bestimmung der Feuchte durch Darrprobe erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 13183-1:2004 [34]. Nach der Durchführung der Querdruckprüfungen wurde eine Probe aus jedem Prüfkörper herausgeschnitten, wobei geachtet wird, dass es frei von

Harzgallen und Ästen war. Der entnommene Probekörper wurden zuerst gewogen und danach im Darrschrank unter einer Temperatur von ca. 103 °C den getrocknet. Die Holzfeuchte lässt sich aus der folgenden Gleichung ermittelt:

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100$$

hierbei sind:

u Feuchtegehalt [%];

m_u Masse bei Holzfeuchte u , vor der Darrprobe [g];

m_o Masse bei Holzfeuchte $u=0$ % (darrtrocken) [g].

2.11 Klimatisierung und Verteilung der Prüfkörper

Die Klimatisierung wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 408:2010 [32] durchgeführt.

Hierzu wurden alle Prüfkörper in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 20 ± 2 °C und Luftfeuchte von 65 ± 5 % bis zu Massenkonstanz (ad. 12 % Holzfeuchte) gelagert. Die zwei Serien mit 8 % bzw. 20 % Feuchtegehalt wurden davon abweichend bei Klimata mit entsprechend erwartbaren Ausgleichfeuchte gelagert Ausgleichsfeuchte gelagert. Zudem wurde das Klima im Labor, während der Prüfungsdurchführung protokolliert.

2.11.1 Bestimmung der Querdruckfestigkeit gemäß ÖNORM EN 408:2010 [32]

Die Bestimmung der Druckfestigkeit quer zur Faser erfolgte laut ÖNORM EN 408:2010 [32] nach:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{A}$$

hiebei sind:

$f_{c,90}$ die per Notation festgelegte Druckfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm^2];

$F_{c,90,max}$.. die per Notation festgelegte maximale Druckkraft rechtwinkelig zur Faserrichtung [N];

A die Querschnittsfläche des Druckstempels bzw. der Würfelpuben [mm^2].

Die Ermittlung von $F_{c,90,max}$ erfolgte nach ÖNORM EN 408 [32] iterativ.

2.11.2 Bestimmung des Querdruck-E-Moduls gemäß ÖNORM EN 408:2010 [32]

Die Bestimmung des Druck-Elastizitätsmoduls quer zur Faser erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 408:2010 [32]:

$$E_{c,90} = \frac{F_{40} - F_{10}}{w_{40} - w_{10}} \cdot \frac{h}{A}$$

hierbei sind:

$E_{c,90}$ der Druckelastizitätsmodul rechtwinkelig zur Faserrichtung [N/mm^2];

$F_{40}-F_{10}$ die Lastdifferenz im linearen Bereich der Last-Verformung-Kurve [N];

$w_{40}-w_{10}$ die Verformungsdifferenz entsprechend $F_{40}-F_{10}$ [mm];

A..... die Querschnittsfläche des Druckstempels bzw. der Würfelpuben [mm^2];

h..... die Gesamthöhe des Prüfkörpers [mm].

Im Fall von Querdruckversuchen wird kein Bruch erreicht, sondern die Festlegung der Maximalkraft ist per Notation geregelt. Aus diesem Grund legt die Norm eine Vorgehensweise fest, nach dem die Maximalkraft iterativ bestimmt wird, siehe ÖNORM EN 408:2010 [32] und siehe Abb. 2.17. Folgende Vorgangsweise ist zu wählen:

1. es wird eine maximale Querdruckkraft per Notation ($F_{c,90,max,est}$) geschätzt;
2. es werden zwei Punkte des Last-Verformungsdiagrammes bestimmt ($0,1F_{c,90,max,est}$ und $0,4F_{c,90,max,est}$);
3. durch diese beiden Punkte wird eine Gerade gezogen;
4. die Gerade wird von einem Abstand von $0,01h$ (h ist die Prüfkörperhöhe) auf der

x-Achse nach rechts verschoben;

- die per Notation definierte maximale Kraft ergibt sich in Folge aus dem Schnittpunkt der verschobenen Gerade und des Last-Verformungsdiagrammes.

Schlussendlich ist zu prüfen, ob die so ermittelte max. Querdruckkraft $F_{c,90,max}$ innerhalb eines Bereichs von $\pm 5\%$ von $F_{c,90,max,est}$ liegt. Ist dies nicht erfüllt, so ist der Vorgang auf Basis einer neuen Schätzung von $F_{c,90,max,est}$ nochmals durchzuführen. Auf Basis von $F_{c,90,max}$ erfolgt die Ermittlung der Querdruckfestigkeit und des Querdruck-E-Moduls mit den bereits genannten Gleichungen. Hierbei sind $f_{c,90}$ und $E_{c,90}$ mit einem maximalen Fehler von 1% zu berechnen.

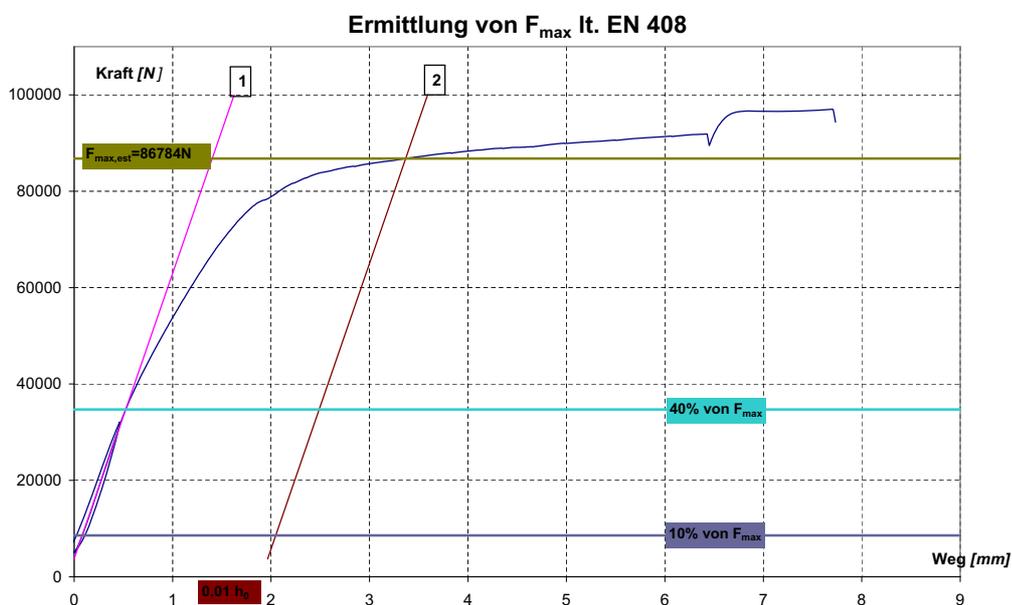


Abb. 2.17 Ermittlung von $F_{c,90,max}$ des Last-Verformungsdiagrammes, aus [8]

Zudem zum Auswerteprozederen der Norm wurde zur Bestimmung der Gerade eine lineare Regressionsanalyse maximal über den Bereich $0,1F_{c,90,max}$ und $0,4F_{c,90,max}$ durchgeführt. Die Bedingung zur Festlegung des Auswertebereiches war ein Korrelationskoeffizient von $\geq 0,999$. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Berücksichtigung aller Messdateninnerhalb des Auswertebereiches der linearen Regression.

Statistische Auswertungsmethoden

Die Wahrscheinlichkeitstheorie und die Statistik bilden mathematische Teilgebiete der Stochastik. Im folgenden wurden kurz statistische Methoden zur Qua- und Bewertung von Prüf- und Versuchsdaten erläutert. Augenmerk liegt hier insbesondere an der Darlegung von Kennwertbestimmungen mit Relevanz für die Nachweisführung.

2.12 Streuungs- und Lageparameter

Die aus den Versuchen gewonnenen statistischen Werte lassen sich in Streuungs- und Lageparameter unterscheiden. Streuungsparameter sind Kennzahlen, die die Verteilung der Messwerte um das Zentrum der Daten beschreiben. Die in dieser Diplomarbeit verwendeten Streuungsparameter sind:

- Varianz;
- Standardabweichung;
- COV (Variationskoeffizient).

Lageparameter beschreiben die Lage der Masse der Daten. Es wurden die folgende Lageparameter berücksichtigt:

- Median;
- Mittelwert.

Im Folgenden werden die obengenannten und weitere Parameter kurz erläutert.

- Minimalwert: damit wird der niedrigste Wert einer Prüfserie beschrieben.
- Maximalwert: gibt den höchsten Wert einer Prüfserie an.
- Median: ist der Wert, der genau im Zentrum einer nach Größe sortierten Datenreihe liegt. Bei einer geraden Anzahl von Daten ist der Median die Hälfte der Summe der beiden Werten, die in der Mitte liegen. Der Median entspricht dem 50 %-Quantil.
- Mittelwert: dieser entspricht dem arithmetischen mittleren Wert einer Datenreihe und wird wie folgt berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

hierbei sind:

ndie Anzahl der Messwerte

x_i der i-te Messwert.

2.12.1 Varianz

Die empirische Varianz einer Datenreihe wird aus der Summe der quadrierten Abweichungen vom arithmetischen Mittel dividiert durch die Anzahl der Messwerte errechnet, siehe

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

hiebei sind:

n die Anzahl der Messwerte;

x_i der i -te Messwert;

\bar{x} das arithmetische Mittel.

2.12.2 Standardabweichung

Die empirische Standardabweichung errechnet sich aus der Quadratwurzel der empirischen Varianz, siehe:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

2.12.3 Variationskoeffizient (COV)

Der Variationskoeffizient ist eine statistische Kenngröße, welche das Verhältniss von Standardabweichung zu Mittelwert beschreibt, siehe

$$\text{COV} = \frac{s}{\bar{x}}$$

2.12.4 Quantile

Ein Quantil einer Verteilung trennt die Daten in zwei Teilen. Das p-Quantil legt fest, dass zumindest $p \cdot 100\%$ der Daten darunter und $(1 - p) \cdot 100\%$ über dem Quantil liegen.

2.13 Statistische Verteilung

2.13.1 Logarithmische Normalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung ist eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariable, wobei die Verteilung der logarithmierten Zufallsvariablen X einer Normalverteilung folgt. Sie ist nur für den positiven Wertebereich definiert. Die Dichtefunktion ergibt sich zu

$$f(x) = \frac{1}{\zeta \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2}$$

hierbei sind:

$\ln(x)$ist der Logarithmus der x-Funktion

λist der Mittelwert

ζist die Standardabweichung

Kenngrößen lognormeilverteilter Daten können wie folgt ermittelt werden:

- Median (50 %-Quantil)

$$x_{50} = e^{\bar{y}}$$

hierbei ist:

\bar{y}ist der Mittelwert der y-Funktion

- Standardabweichung

$$s = \sqrt{e^{(2\bar{y} + s_y^2)} \cdot (e^{s_y^2} - 1)}$$

- Mittelwert

$$\bar{x} = e^{(\bar{y} + 0,5s_y^2)}$$

2.14 Regression und Korrelation

Zur Analyse einer Beziehung bzw. dessen Stärke zwischen Realisierungen zweier Zufallsvariablen kann eine einfache lineare Regression- und Korrelationsanalyse durchgeführt werden. Ihre Kenngrößen sind wie folgt bestimmt worden.

Die einfache lineare Regressionsfunktion ist definiert als:

$$y = b_0 + b_1 x$$

wobei der Achsenabschnittsparameter b_0 sich an:

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}$$

errechnen läßt und der Steigerungsparameter sich zu

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

ergibt. Das Bestimmtheitsmaß r^2 als das Quadrat des Korrelationskoeffizients (r) gibt den Anteil der durch die Regression erklärten Varianz zu erklärenden Zufallsvariable an. Der Korrelationskoeffizient ist definiert mit

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

und liegt zwischen -1 und 1.

Lastausbreitungsmodell

3.1 Einleitung

Dieses Kapitel geht auf das für die Auswertungen der Steifigkeit und Festigkeit der geprüften Platten verwendete Lastausbreitungsprinzip ein. Auf Basis dieses Prinzipes wurden zwei Modelle entwickelt. Ihre Erstellung basiert grundsätzlich auf einem bestimmten Konzept der Lastausbreitung der Querdruckspannung in BSP-Elementen in Abhängigkeit von Lastausbreitungswinkeln. Damit wurde die für die Berechnung wirkende Fläche bestimmt, welche eine große Rolle in der Ermittlung der Eigenschaften des Materiales (Festigkeit und E-Modul quer zur Faser) spielt. Beiden Modellen gemeinsam sind zwei verschiedene Ausbreitungswinkel, je einer für die Faserrichtung längs und quer.

3.2 Prinzip der Lastausbreitung im Holz

Dies wird mit einem Beispiel verdeutlicht. Betrachtet wird ein einzelnes Brett, definiert über die Dicke, Länge und Breite, unter Querdruckbeanspruchung. Es gilt, dass die Länge und Breite größer sind als die Stempelfläche. Dies um die Verformungen aufgrund des Querdrucks in beide Material-Richtungen (längs und quer) beobachten zu können. Die dabei resultierenden Deformationen sind in Abb. 3.1 anhand eines FE-Modells dargestellt.

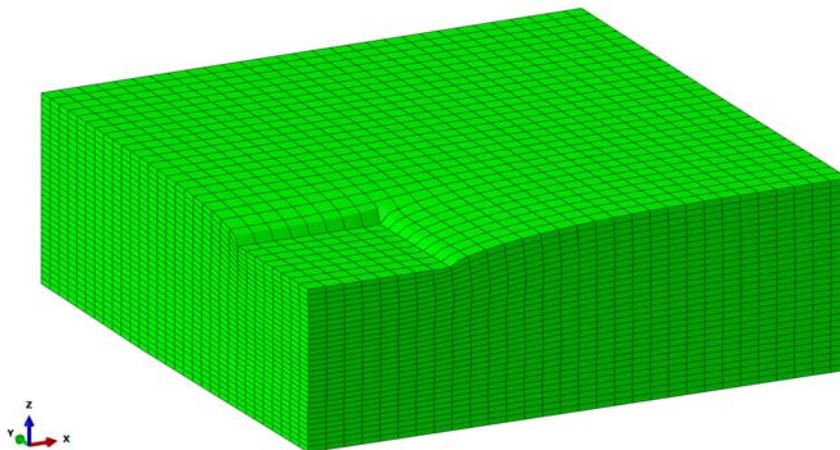


Abb. 3.1 Verformungen von Vollholz unter lokaler Querdruckbeanspruchung; FE-Modell mit ABAQUS, aus [8]

In Abb. 3.1 sieht man, dass der Druck in den beiden Richtungen des Brettes ungleichmäßig wirkt. In der Längsrichtung (x-Achse) ist ein weitaus größeren Bereich an der Lastabtragung beteiligt, als in der Querrichtung (y-Achse). Dies ist auf die Materialstruktur mit primärer Ausrichtung der Holzfasern in Längsrichtung zurückzuführen. Sinngemäß gilt somit die Beobachtung aus Abb. 3.1 auch für die unidirektional geschichtete Produkte wie z.B. Brettschichtholz. Bei orthogonal geschichteten Produkten kommt es, in Folge der sich in Dickenrichtung abwechselnden Lastausbreitungswinkeln und Faserrichtungen, zu einem davon abweichenden Verhältnis siehe Abb. 3.2 und Abb. 3.3.

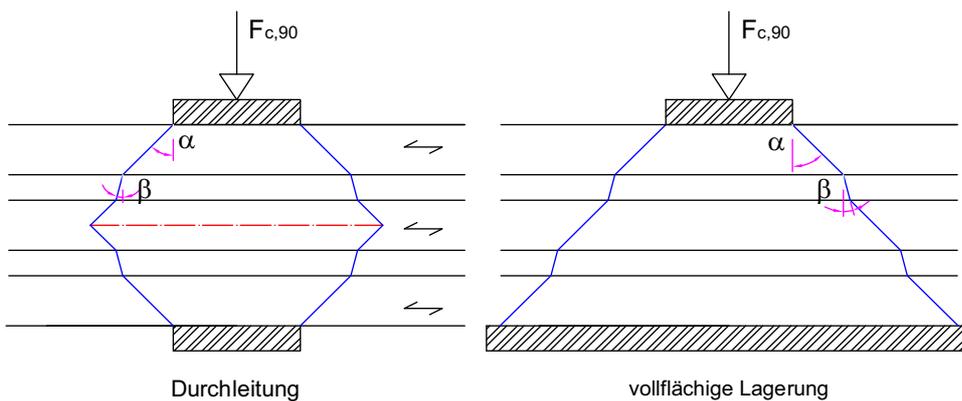


Abb. 3.2 Lastausbreitungsmodell in der Längsrichtung für ein 5-schichtiges BSP-Element

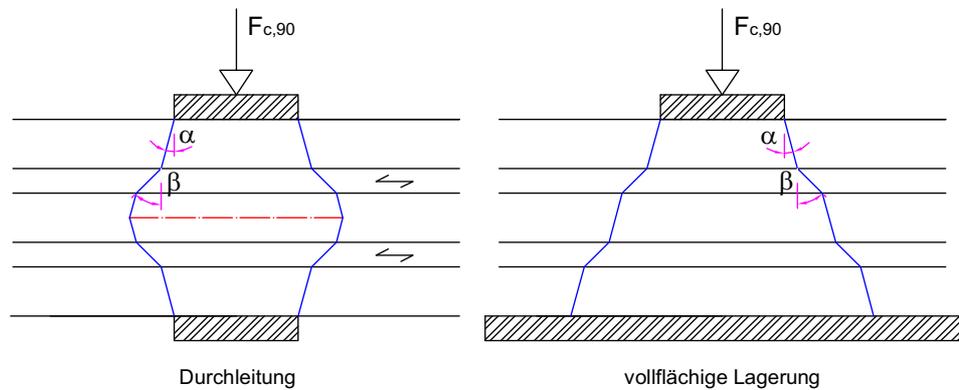


Abb. 3.3 Lastausbreitungsmodell in der Querrichtung für ein 5-schichtiges BSP-Element

Das Lastausbreitungsprinzip wird „Überlappung der Lastausbreitungsbereich“ benannt. Die Figuren in den Abb. 3.2 und Abb. 3.3 stellen das in dieser Masterarbeit geprüfte Subjekt dar. Hier wies allen Längslage die gleiche Stärke (40 mm) auf und die Querrlage halb so viel wie diese (20 mm). Was die beiden Modelle unterscheidete, waren die Winkel alfa (α) und beta (β). Mehr dazu geht man im nächsten Abschnitten ein.

3.2.1 Modell 1

Das Modell 1 basiert sich bei den Lastausbreitungswinkeln auf die ÖNORM EN 1995-2:2004 [35]. Diese gibt in Faserrichtung einen Winkel von $\alpha=45^\circ$ und rechtwinklig dazu einen Winkel von $\beta=15^\circ$ an, siehe Abb. 3.4. Davon abweichend gilt für Sperrholzdeckplatten und Deckplatten aus über Kreuz angeordneten Lamellen ein Winkel von 45° .

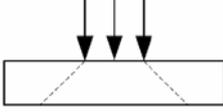
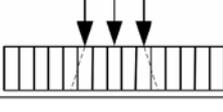
Belag (in Übereinstimmung mit EN 1991-2, 4.3.6)		45°
Bretter und Bohlen		45°
Holzdeckplatten aus Lamellen		
— in Richtung der Lamellen		45°
— rechtwinklig zu den Lamellen		15°
Sperrholzdeckplatten und Deckplatten aus über Kreuz angeordneten Lamellen		45°

Abb. 3.4 Verteilungswinkel von Einzellasten für verschiedene Materialrichtungen, aus [35]

3.2.2 Modell 2

Im Modell 2 wurden α und β aus den vorliegenden Versuchdaten mittels einer Optimierungsfunktion ermittelt. Man ging davon aus, dass der Widerstand der Würfel auf Querdruck gleich sein sollte, wie jener von teilflächenbeanspruchten Platten, sofern die auf die Kraft bezogene Fläche adäquat ist. Tab. 3.1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der einzelnen Konfigurationen.

Stempel	Probenanzahl-Platte	$\Sigma(Y_1-Y_2)^2$	α	β
100 x 100	5	0,036	31,4	7,9
150 x 150	5	< 0,001	30,0	6,8
200 x 200	5	< 0,001	32,6	10,5
100 x 400	3	0,003	42,7	10,7
150 x 400	3	< 0,001	35,6	8,9
			30-35°	7-11°

für *vollflächige Lagerung* mit *unterschiedlichen Stempelpositionen* und mit $A_{eff,mittig}$

Y_1 ... die mittlere Querdruckfestigkeitsfunktion der Würfel

Y_2 ... die mittlere Querdruckfestigkeitsfunktion der Platten

$\Sigma(Y_1-Y_2)^2$... die Summe der quadratischen Differenz beider Funktionen

Tab. 3.1 Auswertung der Winkel α und β mittels der Optimierungsfunktion, aus den Versuchdaten

Die Daten der Serie von Würfeln wurden mit den Daten der dazugehörigen passenden Platten aus verschiedenen Stempelpositionen und Lagerungsbedingungen gegenübergestellt, um die optimalen Winkel zu bestimmen. Die effektive Fläche ($A_{eff,Mitte}$) wurde in der Mitte des Bauteils bestimmt. Daraus kamen zwei durchschnittlichen Werte heraus: $\alpha \approx 32^\circ$ und $\beta \approx 9^\circ$. Im Vergleich mit dem Modell 1 sind die Lastausbreitungswinkeln bei Modell 2 basierend auf Versuchsdaten, geringer, und in Folge die effektiv wirksam erscheinenden Flächen kleiner.

Die Berechnung der $k_{c,90}$ -Beiwerte auf Basis der beiden Modellen wird in Kapitel 4 geschildert.

Versuchsergebnisse

4.1 Einleitung

Die aus den Versuchen ausgewerteten Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargelegt. Die Darstellung erfolgt durch eine erste Unterteilung auf Basis der grundsätzlichen Form der Elemente (Würfel oder Platte). Danach werden die Resultaten pro jede Gruppe nach folgenden Kriterien angeordnet :

- Lagerungsart (Durchleitung und vollflächige Lagerung);
- Stempelfläche (unterschiedliche Formen);
- Stempelposition.

Schlußendlich werden die Einflüsse der Stempelposition, Stempelfläche und der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit in Abbildungen dargelegt, bzw. die aus zwei geometrischen Modelle und aus den Versuchsdaten ermittelten $k_{c,90}$ -Faktore in einer Tabelle gezeigt.

4.2 Allgemeines

Die dargestellten Ergebnisse (charakteristische Werte) betreffen Holzfeuchte, Rohdichte, Querdruckelastizitätsmodul und Querdruckfestigkeit und werden für die Würfel und Platten separat in Tabellen dargestellt.

Es wurden alle Proben hinsichtlich Risse, Äste und sonstige Merkmale mit möglichen Beeinflußung auf die Querdruckeigenschaften analysiert. Zur Beurteilung lagen allerdings nur die Außenflächen der Probenkörper vor.

4.3 Ergebnisse der Würfelversuche

4.3.1 Holzfeuchte

Die Ermittlung der Holzfeuchte erfolgte mittels des Holzfeuchtemessgeräts vor der Durchführung der Querdruckprüfungen.

Nach den Versuchen wurde eine zusätzliche Kontrolle der Holzfeuchte durch die Entnahme von Darrproben durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 zu entnehmen.

- Messung der Feuchte mittels Holzfeuchtemessgerät:

Die Tab. 4.1 zeigt die Ergebnisse der Holzfeuchte betreffend die würfelförmige Prüfkörper, die mit dem Holzfeuchtemessgerät ermittelt wurden. Die Untersuchungen bei den Gruppen II und V wurden mit unterschiedlichen Feuchtegehalten (nominelle Feuchtegruppen: 8 %, 12 % und 20 %) geführt.

Gruppe	Versuchsanzahl	Holzfeuchte-Klasse	min. Wert [%]	Mittelwert [%]	max. Wert [%]	Median [%]	COV [%]
I	5	"12%"	12,2	13,3	14,1	13,4	5,3
II	5	"8%"	8,4	8,7	9,5	8,6	5,1
	5	"12%"	13,5	13,6	13,8	13,5	1,0
	5	"20%"	15,2	16,0	16,5	16,3	3,5
III	10	"12%"	12,4	13,5	14,1	13,7	3,5
IV	5	"12%"	12,9	13,5	14,0	13,7	3,5
V	5	"8%"	8,0	8,4	8,9	8,3	4,2
	5	"12%"	12,8	13,5	14,0	13,7	3,8
	5	"20%"	15,7	16,3	16,6	16,4	2,2
Alle Werte dazugehöriger Klasse		"8%"		8,6		8,5	5,0
		"12%"	-	13,5	-	13,6	3,3
		"20%"		16,1		16,3	2,9

ANM. Die in der Spalte "Holzfeuchte-Klasse" angegebenen stellen eine Gruppe-Bezeichnung dar

Tab. 4.1 Holzfeuchte von Würfeln, ermittelt mittels des Holzfeuchtemessgeräts

Die Werte der Proben der nominellen Holzfeuchteklasse von 12 % zeigen eine Bandbreite von $u=12,2$ % bis $u=14,1$ %. Der Mittelwert beträgt $u=13,5$ % und die Median 13,6 %.

Direkt im Anschluss an die durchgeführten Versuche wurde von allen Probekörpern eine Darrprobe genommen. Wenn die Entnahme der Darrproben nicht direkt im Anschluss an die Prüfung stattfinden konnte, wurden die Prüfkörper in der Klimakammer bis zum nächsten Morgen zwischengelagert.

- Ergebnisse der Holzfeuchten auf Basis von Darrproben:

In Tab. 4.2 werden die Ergebnisse der Holzfeuchte auf Basis von Darrproben dargelegt.

Gruppe	Versuchsanzahl	Holzfeuchte-Klasse	min. Wert [%]	Mittelwert [%]	max. Wert [%]	Median [%]	COV [%]
I	5	"12%"	12,2	12,5	12,8	12,6	2,0
II	5	"8%"	8,6	8,8	8,9	8,7	1,0
	5	"12%"	12,4	12,6	12,8	12,6	1,4
	5	"20%"	14,6	15,3	15,7	15,4	2,6
	10	"12%"	12,3	12,9	12,9	12,5	1,3
IV	5	"12%"	12,4	12,6	13,0	12,7	1,7
V	5	"8%"	8,7	9,4	9,4	8,8	3,1
	5	"12%"	12,2	12,1	13,1	13,0	3,0
	5	"20%"	15,2	15,7	15,7	15,3	1,5
Alle Werte dazugehöriger Klasse		"8%"	-	9,1	-	8,8	2,3
		"12%"		12,5		12,6	1,8
		"20%"		15,5		15,3	2,0

ANM. Die in der Spalte "Holzfeuchte-Klasse" angegebenen stellen eine Gruppe-Bezeichnung dar

Tab. 4.2 Ermittlung der Holzfeuchte von Würfeln auf Basis der Darrproben

Die Holzfeuchten auf Basis der Darrproben zeigen eine Bandbreite von $u=12,2$ % bis $u=13,1$ %. Der Mittelwert über die gesamten Prüfkörper der nominellen Holzfeuchteklasse von 12 % liegt im Bereich der in der Norm angestrebten Bandbreite von 10 % bis 14 %, der Median beträgt 12,6 %.

4.3.2 Rohdichte

Die Rohdichte wurde durch das Verhältnis der Masse und des Volumens für jenen Prüfkörper ermittelt. Dazu wurden alle Werte in Bezug auf die Referenzholzfeuchte von $u_{ref}=12$ % gemäß EN 384:2010 [36] umgerechnet. Dafür notwendig war, dass Masse und Volumen bei gleicher Holzfeuchte geprüft wurden. Die umgewandelten Werte werden mit „ ρ_{12} “ gekennzeichnet.

Die ermittelten Rohdichten der einzelnen Elemente wiesen eine Bandbreite von $\rho_{12}=417$ kg/m³ bis $\rho_{12}=488$ kg/m³ auf. Die Rohdichte des gesamten Probenumfangs betrug im Mittel $\rho_{12}=452$ kg/m³. Der Median aller Prüfkörper beträgt 454 kg/m³. Der Variationskoeffizient (COV) bewegte sich in einem Bereich von 0,7 % bis 5,2 %.

Gruppe	Versuchsanzahl	Holzfeuchte-Klasse	min. Wert [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	max. Wert [kg/m ³]	Median [kg/m ³]	COV [%]
I	5	"12%"	417	448	477	441	5,2
II	5	"8%"	439	458	476	457	3,0
	5	"12%"	447	466	488	463	3,4
	5	"20%"	432	456	483	454	5,0
	5	"12%"	434	455	482	451	3,9
III	10	"12%"	427	441	454	439	2,9
IV	5	"8%"	452	456	459	457	0,7
	5	"12%"	418	449	465	457	4,1
	5	"20%"	428	440	459	437	2,8
Alle	50			452	-	454	3,8

ANM. Die in der Spalte "Holzfeuchte-Klasse" angegebenen stellen eine Gruppe-Bezeichnung dar

Tab. 4.3 Rohdichte ρ_{12} (gemäß EN 384:2004 [36]) der BSP-Würfel

4.3.3 Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserlängsrichtung

Die Ergebnisse des Druck-Elastizitätsmoduls quer zur Faserrichtung sind in der Tab. 4.4 abgebildet. Die Ergebnisse enthalten jene nach der linearen Regression und nach der ÖNORM EN 408:2010 [32] ermittelten Querdruck-E-Modul.

Ergebnisse des Druck-E-Modul quer zur Faser, ermittelt mittels linearer Regression:

Der ermittelte Druck-Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung der würfelförmigen Brettsperholzprobekörper für die einzelnen Gruppen liegt zwischen 323 N/mm² und 491 N/mm². Die Mittelwerte der einzelnen Gruppen liegt zwischen 347 N/mm² und 434 N/mm². Es wurde ein Mittelwert von 415 N/mm² für alle durchgeführten Würfelversuche mit der Holzfeuchteklasse „12 %“ erreicht. Der Variationskoeffizient der Gruppen liegt zwischen 5,8 % und 12 %.

- Gelieferte statistische Wertgröße aus der Gleichung gemäß Norm:
 Der ermittelte Druck-Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung der würfelförmigen Brettsperholzprobekörper für die einzelnen Gruppen liegt zwischen 297 N/mm² und 472 N/mm². Die Mittelwerte der einzelnen Gruppen liegt zwischen 311 N/mm² und 414 N/mm². Es wurde ein Mittelwert von 396 N/mm² für alle durchgeführten Würfelversuche mit der Holzfeuchteklasse „12 %“ erreicht. Der Variationskoeffizient der Gruppen liegt zwischen 6,6 % und 15,7 %.

Fläche	Gruppe	Holzfeuchte-Klasse	Versuchs-anzahl [Stk.]	min. Wert	Mittelwert	max. Wert	Median	COV
				[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
100 x 100	I + IV	"12%"	10	323 ⁽¹⁾	378 ⁽¹⁾	444 ⁽¹⁾	383 ⁽¹⁾	9,2 ⁽¹⁾
				297 ⁽²⁾	366 ⁽²⁾	430 ⁽²⁾	371 ⁽²⁾	9,8 ⁽²⁾
150 x 150	II + V	"8%"	9	346 ⁽¹⁾	374 ⁽¹⁾	415 ⁽¹⁾	370 ⁽¹⁾	5,8 ⁽¹⁾
				319 ⁽²⁾	349 ⁽²⁾	391 ⁽²⁾	344 ⁽²⁾	6,6 ⁽²⁾
		"12%"	9	400 ⁽¹⁾	432 ⁽¹⁾	491 ⁽¹⁾	421 ⁽¹⁾	6,7 ⁽¹⁾
				372 ⁽²⁾	409 ⁽²⁾	472 ⁽²⁾	398 ⁽²⁾	8,1 ⁽²⁾
		"20%"	10	283 ⁽¹⁾	347 ⁽¹⁾	417 ⁽¹⁾	340 ⁽¹⁾	12,0 ⁽¹⁾
				329 ⁽²⁾	311 ⁽²⁾	398 ⁽²⁾	303 ⁽²⁾	15,7 ⁽²⁾
200 x 200	III	"12%"	10	397 ⁽¹⁾	434 ⁽¹⁾	482 ⁽¹⁾	422 ⁽¹⁾	7,9 ⁽¹⁾
				370 ⁽²⁾	414 ⁽²⁾	465 ⁽²⁾	404 ⁽²⁾	8,6 ⁽²⁾
Alle			48					

⁽¹⁾ Werte nach der linearen Regression

⁽²⁾ Werte nach ÖNORM EN 408:2010

ANM. Die in der Spalte "Holzfeuchte-Klasse" angegebenen stellen eine Gruppe-Bezeichnung dar

Tab. 4.4 Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung der BSP-Würfel

4.3.4 Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung

Die Ergebnisse der Druckfestigkeit für würfelförmige Prüfkörper werden in der Tab. 4.5 erfasst.

Fläche	Gruppe	Holzfeuchte-Klasse	Versuchs-anzahl [Stk.]	min. Wert	Mittelwert	max. Wert	Median	COV
				[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
100 x 100	I + IV	"12%"	10	2,9	3,2	3,4	3,2	5,2
150 x 150	II + V	"8%"	10	3,5	3,9	4,1	3,9	5,5
		"12%"	10	3,1	3,5	3,9	3,6	7,4
		"20%"	9	2,7	3,0	3,3	3,0	6,1
			9	2,7	3,0	3,3	3,0	6,1
200 x 200	III	"12%"	10	3,4	3,8	4,2	3,8	6,2
Alle Werte dazugehöriger Klasse		"8%"	10	-	3,9	-	3,9	5,5
		"12%"	30		3,5		3,5	9,5
		"20%"	9		3,0		3,0	6,1

ANM. Die in der Spalte "Holzfeuchte-Klasse" angegebenen stellen eine Gruppe-Bezeichnung dar

Tab. 4.5 Druckfestigkeit der BSP-Würfel quer zur Faserrichtung

Die ermittelte Querdruckfestigkeit der würfelförmigen BSP-Probekörper für die Gruppe mit

Stempelfläche $100 \times 100 \text{ mm}^2$ liegen im Bereich von $2,9 \text{ N/mm}^2$ bis $3,4 \text{ N/mm}^2$. Der Mittelwert und der Median betragen $3,2 \text{ N/mm}^2$.

Bei der Gruppe II wurden unter Variation der Holzfeuchte Würfel mit einer Querschnittsfläche von $150 \times 150 \text{ mm}^2$ untersucht. Die Resultate der Druckfestigkeit sind:

- bei rd. 9 % Holzfeuchte, liegt $f_{c,90}$ zwischen $3,5 \text{ N/mm}^2$ und $4,1 \text{ N/mm}^2$, mit Mittelwert $f_{c,90,\text{mean}} = 3,9 \text{ N/mm}^2$;
- bei rd. 12,5 % Holzfeuchte, liegt $f_{c,90}$ zwischen $3,1 \text{ N/mm}^2$ und $3,9 \text{ N/mm}^2$. Mittelwert $f_{c,90,\text{mean}} = 3,5 \text{ N/mm}^2$;
- bei rd. 15,5 %-Holzfeuchte, liegt $f_{c,90}$ zwischen $3,5 \text{ N/mm}^2$ und $4,1 \text{ N/mm}^2$. Mittelwert $f_{c,90,\text{mean}} = 3,0 \text{ N/mm}^2$.

Der Median bei alle drei Serie entsprach den Mittelwert.

Die Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung für die Gruppe III mit Stempelfläche $200 \times 200 \text{ mm}^2$ lag im Bereich von $3,4 \text{ N/mm}^2$ bis $4,2 \text{ N/mm}^2$. Mittelwert und Median betragen $3,8 \text{ N/mm}^2$.

Der Variationskoeffizient für alle Gruppe war relativ niedrig.

Folgende Tendenzen sind beobachtbar:

- bei allen drei Gruppen mit gleicher Holzfeuchte (12 %) ist eine Zunahme der Querdruckfestigkeit bei Zunahme der Würfelgröße beobachtbar.
- bei Zunahme der Holzfeuchte nahm die Druckfestigkeit quer zur Faser ab.

4.4 Ergebnisse der Plattenversuche

4.4.1 Holzfeuchte

Vor Durchführung der Druckversuche, wurde die Holzfeuchte jedes Körpers mittels des Holzfeuchtemessgeräts erfasst.

- Messung der Feuchte mit dem Holzfeuchtemessgerät:

Tab. 4.6 zeigt die Ergebnisse der Holzfeuchte der Platten, ermittelt mittels dem Holzfeuchtemessgerät.

Die gemessenen Werte für die plattenförmigen Körper liegen in einer Bandbreite von $u = 10,3 \%$ bis $u = 14,0 \%$. Der im Mittel erhaltene Wert über die gesamte Prüfkörperanzahl beträgt $u = 12,9 \%$ und lag im Bereich der angestrebten Holzfeuchtigkeit (12 %). Der Median beträgt $12,9 \%$ über die gesamten Prüfkörper und entspricht damit dem Mit-

telwert aller Gruppen. Der Variationskoeffizient bewegt sich in einem Bereich von 3,5 % bis 7,3 %.

Gruppe	Versuchsanzahl	min. Wert [%]	Mittelwert [%]	max. Wert [%]	Median [%]	COV [%]
I	30	12,5	13,2	13,9	13,1	3,5
II	15	11,1	12,8	14,0	12,9	6,6
III	15	10,3	12,4	13,0	12,7	6,8
IV	20	12,2	13,1	14,0	13,1	4,6
V	10	10,9	12,8	14,0	12,9	7,3
Alle	90	-	12,9	-	12,9	6,1

Tab. 4.6 Holzfeuchten der Platten, nach Holzfeuchtemessgerät

Direkt im Anschluss an die durchgeführten Versuche wurden für alle Platten, in demselben Maß wie für die Würfel, Darrproben genommen und auch mittels dieser die Holzfeuchte bestimmt.

- Messung der Feuchte auf Basis von Darrproben:

Tab. 4.7 enthält die Ergebnisse der Holzfeuchte, ermittelt anhand von Darrproben.

Gruppe	Versuchsanzahl	min. Wert [%]	Mittelwert [%]	max. Wert [%]	Median [%]	COV [%]
I	30	12,0	12,6	12,9	12,6	1,9
II	15	12,4	12,6	13,2	12,6	1,9
III	15	12,1	12,5	13,1	12,5	2,5
IV	20	12,2	12,6	13,0	12,6	1,8
V	10	12,4	12,7	13,0	12,8	1,8
Alle	90	-	12,6	-	12,6	1,9

Tab. 4.7 Holzfeuchte der Platten, nach Darrprobe

Die ermittelten Holzfeuchten aus den Darrproben zeigen eine Bandbreite von $\mu = 12,0$ % bis $\mu = 13,2$ %. Der Mittelwert über die gesamten Prüfkörper liegt im Bereich der angestrebten Feuchtigkeit (12 %).

Der Median beträgt 12,6 % über die gesamte Prüfkörper und entspricht damit dem Mittelwert aller Gruppen. Der Variationskoeffizient bewegt sich in einem Bereich von 1,8 % bis 2,5 %.

4.4.2 Rohdichte

Die Rohdichte wurde durch das Verhältnis der Masse und des Volumens für jeden Prüfkörper ermittelt. Dieser Parameter gehört zu den Einflussparametern der mechanischen Eigenschaften. Die Werte anschließend auf die Referenzholzfeuchte von 12 % gemäß ÖNORM EN 384[36] umgerechnet. Dies vorausgesetzt, dass Masse und Volumen bei der gleichen Holzfeuchte ermittelt wurden. Die transformierten Werte werden mit ρ_{12} gekennzeichnet.

Gruppe	Versuchszahl	min. Wert [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	max. Wert [kg/m ³]	Median [kg/m ³]	COV [%]
I	30	442	453	469	453	1,5
II	15	444	459	499	454	3,5
III	15	437	451	463	451	1,7
IV	20	425	444	458	442	2,5
V	10	430	450	458	453	2,0
Alle	90	-	451	-	453	2,4

Tab. 4.8 Rohdichte ρ_{12} der BSP-Platten

Die ermittelten Rohdichten ρ_{12} der einzelnen Elemente weisen eine Bandbreite von $\rho_{12}=425 \text{ kg/m}^3$ bis $\rho_{12}=499 \text{ kg/m}^3$ auf. Die Rohdichte des gesamten Probenumfangs beträgt im Mittel $\rho_{12}=451 \text{ kg/m}^3$. Der Median aller Prüfkörper beträgt 453 kg/m^3 . Der Variationskoeffizient (COV) bewegte sich in einem Bereich von 1,5 % bis 3,5 %.

4.4.3 Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung

Die Ergebnisse des Druck-Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faser werden in Tab. 4.9 und Tab. 4.10 für alle fünf Gruppe gezeigt, wobei für die Gruppe IV und V nur der Mittelwert und der Median aufgrund des geringen Prüfanzahl angegeben werden.

Folgende Tendenzen sind beobachtbar:

- der E-Modul quer zur Faser nimmt mit der Zunahme der Stempelfläche deutlich ab;
- bei mittlerer Stempelposition weist der E-Modul quer zur Faser den größten Wert auf, an der Ecke den kleinsten. Das gilt sowohl für vollflächige Lagerung als auch für Durchleitung, wobei der erste Fall deutlich größere Werte ausweist als der zweite. Der Grund ist auf eine kleinere mitwirkende Fläche bei Durchleitung zurückzuführen.

Gruppe	Stapelposition	Versuchszahl [Stk.]	min. Wert [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	max. Wert [N/mm ²]	Median [N/mm ²]	COV [%]	
I	VM	5	1139 ⁽¹⁾	1265 ⁽¹⁾	1474 ⁽¹⁾	1227 ⁽¹⁾	10,2 ⁽¹⁾	
			1051 ⁽²⁾	1177 ⁽²⁾	1398 ⁽²⁾	1085 ⁽²⁾	13,0 ⁽²⁾	
	VL	5	772 ⁽¹⁾	877 ⁽¹⁾	1000 ⁽¹⁾	889 ⁽¹⁾	9,6 ⁽¹⁾	
			659 ⁽²⁾	803 ⁽²⁾	976 ⁽²⁾	766 ⁽²⁾	15,2 ⁽²⁾	
	VQ	5	968 ⁽¹⁾	1023 ⁽¹⁾	1116 ⁽¹⁾	1025 ⁽¹⁾	5,9 ⁽¹⁾	
			872 ⁽²⁾	947 ⁽²⁾	1023 ⁽²⁾	932 ⁽²⁾	7,2 ⁽²⁾	
	VE	5	657 ⁽¹⁾	820 ⁽¹⁾	927 ⁽¹⁾	832 ⁽¹⁾	14,0 ⁽¹⁾	
			669 ⁽²⁾	795 ⁽²⁾	906 ⁽²⁾	800 ⁽²⁾	13,8 ⁽²⁾	
	DM	5	608 ⁽¹⁾	711 ⁽¹⁾	771 ⁽¹⁾	715 ⁽¹⁾	8,7 ⁽¹⁾	
			548 ⁽²⁾	672 ⁽²⁾	742 ⁽²⁾	693 ⁽²⁾	11,4 ⁽²⁾	
	DE	5	550 ⁽¹⁾	615 ⁽¹⁾	715 ⁽¹⁾	593 ⁽¹⁾	10,1 ⁽¹⁾	
			484 ⁽²⁾	580 ⁽²⁾	680 ⁽²⁾	576 ⁽²⁾	12,2 ⁽²⁾	
	II	VM	5	979 ⁽¹⁾	1083 ⁽¹⁾	1233 ⁽¹⁾	1061 ⁽¹⁾	8,7 ⁽¹⁾
				811 ⁽²⁾	978 ⁽²⁾	1165 ⁽²⁾	959 ⁽²⁾	13,2 ⁽²⁾
DM		5	648 ⁽¹⁾	719 ⁽¹⁾	881 ⁽¹⁾	684 ⁽¹⁾	13,1 ⁽¹⁾	
			630 ⁽²⁾	695 ⁽²⁾	856 ⁽²⁾	663 ⁽²⁾	13,3 ⁽²⁾	
DE		5	441 ⁽¹⁾	480 ⁽¹⁾	537 ⁽¹⁾	453 ⁽¹⁾	9,5 ⁽¹⁾	
			417 ⁽²⁾	471 ⁽²⁾	522 ⁽²⁾	465 ⁽²⁾	10,2 ⁽²⁾	
III	VM	5	509 ⁽¹⁾	820 ⁽¹⁾	1106 ⁽¹⁾	811 ⁽¹⁾	28,7 ⁽¹⁾	
			563 ⁽²⁾	795 ⁽²⁾	989 ⁽²⁾	805 ⁽²⁾	21,6 ⁽²⁾	
	DM	5	656 ⁽¹⁾	739 ⁽¹⁾	836 ⁽¹⁾	755 ⁽¹⁾	9,8 ⁽¹⁾	
			640 ⁽²⁾	714 ⁽²⁾	809 ⁽²⁾	680 ⁽²⁾	9,7 ⁽²⁾	
	DE	5	405 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	548 ⁽¹⁾	520 ⁽¹⁾	11,1 ⁽¹⁾	
			399 ⁽²⁾	487 ⁽²⁾	537 ⁽²⁾	500 ⁽²⁾	10,6 ⁽²⁾	
Alle	60							

⁽¹⁾ Werte nach der linearen Regression

⁽²⁾ Werte nach ÖNORM EN 408:2010

Tab. 4.9 Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung der BSP-Platten (Gruppen I bis III)

Gruppe	Stempelposition	Versuchszahl [Stk.]	Bezeichnung-Konfigurat.	Mittelwert [N/mm ²]	Median [N/mm ²]
IV ⁽³⁾	VM	3	Konf. "a+b"	798 ⁽¹⁾	857 ⁽¹⁾
				745 ⁽²⁾	787 ⁽²⁾
		2	Konf. "c"	1250 ⁽¹⁾	
				1126 ⁽²⁾	
	VE	3	Konf. "a+b"	550 ⁽¹⁾	568 ⁽¹⁾
				524 ⁽²⁾	532 ⁽²⁾
		2	Konf. "c"	775 ⁽¹⁾	
				730 ⁽²⁾	
	DM	3	Konf. "a+b"	459 ⁽¹⁾	449 ⁽¹⁾
				428 ⁽²⁾	395 ⁽²⁾
		2	Konf. "c"	517 ⁽¹⁾	
				467 ⁽²⁾	
DE	3	Konf. "a+b"	331 ⁽¹⁾	339 ⁽¹⁾	
			300 ⁽²⁾	300 ⁽²⁾	
	2	Konf. "c"	285 ⁽¹⁾		
			300 ⁽²⁾		
V ⁽³⁾	VM	3	Konf. "a+b"	740 ⁽¹⁾	726 ⁽¹⁾
				691 ⁽²⁾	686 ⁽²⁾
		2	Konf. "c"	1105 ⁽¹⁾	
				992 ⁽²⁾	
	VE	3	Konf. "a+b"	543 ⁽¹⁾	548 ⁽¹⁾
				511 ⁽²⁾	513 ⁽²⁾
		2	Konf. "c"	835 ⁽¹⁾	
				757 ⁽²⁾	
Alle		30			

⁽¹⁾ Werte nach der linearen Regression

⁽²⁾ Werte nach ÖNORM EN 408:2010

⁽³⁾ Aufgrund der geringen Prüfanzahl wurden nur Mittelwert und Median

Tab. 4.10 Druck-Elastizitätsmodul quer zur Faserrichtung der BSP-Platten (Gruppen IV und V)

Die Tendenzen bei Gruppen IV und V stimmen mit jenen der Gruppen I bis III überein. Der Unterschied dieser Gruppen mit den Ergebnissen in Tab. 4.9 ist, dass diese Prüfkörper unter eine Linienlast beansprucht wurden, während die in der Tab. 4.9 unter einer quadratischen Stempelfläche belastet wurden.

Bei Gruppe IV und V kamen drei Konfigurationen des Stempels zur Anwendung: Konf. „a, b, c“. Die Ergebnisse von zwei von diesen Konfigurationen („a“ und „b“) wurden in der selben Serie eingeschlossen, da die Voraussetzungen der Stempelfläche (Geometrie und Position) vergleichbar sind. Die Serie mit der Konfiguration „c“ wurde separat betrachtet.

4.4.4 Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung

Bei den Plattenversuchen wurden, wie zuvor erwähnt, vier verschiedene Stempelstellungen untersucht. Diese wiesen gleiche Geometrien wie bei den Brettsperrholzwürfeln auf. Zudem kamen noch zwei linearförmige Stempel zur Anwendung.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung für Platten sind auf Basis der geometrischen (Stempelfläche) und örtlicher Voraussetzungen („Mitte“, „Ecke“, „Rand“ in Plattenlängsrichtung und „Rand“ in Plattenquerrichtung) in der Tab. 4.11 angeführt. Auch in diesem Fall, wie bei den Ergebnissen des Druck-Elastizitätsmoduls (siehe 4.4.3), sind daher die Resultate nur bedingt miteinander vergleichbar.

Gruppe	Stempelposition	Versuchsanzahl [Stk.]	min. Wert [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	max. Wert [N/mm ²]	Median [N/mm ²]	COV [%]
I	VM	5	6,7	8,4	10,2	7,8	17,6
	VL	5	5,9	6,8	8,1	6,4	14,1
	VQ	5	6,2	7,4	9,5	6,7	17,9
	VE	5	5,5	6,1	6,6	6,1	8,1
	DM	5	6,2	6,9	8,0	6,5	11,0
	DE	5	4,5	5,0	5,6	5,2	9,8
II	VM	5	6,3	7,1	7,7	7,2	7,7
	DM	5	5,7	6,4	6,7	6,6	6,4
	DE	5	4,3	5,1	5,7	5,1	11,1
III	VM	5	6,2	7,0	7,7	7,2	8,0
	DM	5	5,3	5,6	5,9	5,7	4,9
	DE	5	3,9	4,7	5,3	4,6	11,0
IV ⁽¹⁾	VM	3	Konf. "a+b"	6,9		6,8	
		2	Konf. "c"	8,8			
	VE	3	Konf. "a+b"	5,1		5,0	
		2	Konf. "c"	7,3			
	DM	3	Konf. "a+b"	5,1		5,4	
		2	Konf. "c"	4,9			
	DE	3	Konf. "a+b"	3,8		3,7	
		2	Konf. "c"	4,2			
V ⁽¹⁾	VM	3	Konf. "a+b"	7,0		6,5	
		2	Konf. "c"	8,3			
	VE	3	Konf. "a+b"	5,9		5,1	
		2	Konf. "c"	7,4			
Alle		90					

⁽¹⁾ Aufgrund der geringen Prüfanzahl wurden nur Mittelwert und Median angegeben

Tab. 4.11 Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung der BSP-Platten

Bei den ersten drei Gruppen (I, II, und III) wurde in Anlehnung an die Stempelpositionen folgende Tendenz beobachtet:

- bei mittiger Stempelposition (sowohl für vollflächige Lagerung als auch für

Durchleitung) nahm die Querdruckfestigkeit bei Zunahme der Stempelfläche ab. Der COV lag zwischen 4,9 % und 11,0 % (außer bei Gruppe I, mit einem Wert von 17,6 %);

- bei Durchleitung mit Stempelposition an der Ecke sind die Mittelwerte der Querdruckfestigkeiten nahezu ident ($4,7 \text{ N/mm}^2$ bis $5,1 \text{ N/mm}^2$). Der COV liegt bei rund 10 % bis 11 %.

Bei den letzten zwei Gruppen (IV und V) wurden in Anlehnung an die Stempelpositionen trotz niedriger Prüfanzahl folgende Tendenzen beobachtet:

- sowohl für vollflächige Lagerung als auch für Durchleitung war der Mittelwert der Festigkeit quer zur Faser bei mittiger Pressung größer als an der Ecke;
- ausgehend von unterschiedlichen Stempelflächen beider Gruppen, waren die Mittelwerte der Querdruckfestigkeit bzw. die Mediane bei mittiger Position und vollflächiger Lagerung vergleichbar.

4.5 Charakteristische (5 %-Quantil-) Werte der Querdruckkenngrößen

Es wurden die charakteristischen (5 %-Quantil-) Werte der Querdruckfestigkeit und des Querdruckelastizitätsmoduls in Tab. 4.12 und Tab. 4.13 präsentiert. Die 5 %-Quantilwerte wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN 14358:2006 [33] ermittelt. Die für die Gegenüberstellung bzw. den Vergleich der Größen verwendeten Werte wurden markiert.

Gruppe	Anzahl Prüfkörper	Holzfeuchteklasse	Charakteristische und mittlere Werte der Würfel [N/mm^2]							
			$f_{c,90,\text{mean}}$	$f_{c,90,05}^{(1)}$	$f_{c,90,05}^{(2)}$	$f_{c,90,05}^{(3)}$	$E_{c,90,\text{mean}}$	$E_{c,90,05}^{(1)}$	$E_{c,90,05}^{(2)}$	$E_{c,90,05}^{(3)}$
I	10	"12"	3,2	2,8	2,9	2,9	378	311	332	324
II	10	"8"	3,9	3,4	3,5	3,5	374	331	348	340
	10	"12"	3,5	3,0	3,2	3,1	432	376	405	386
	10	"20"	3,0	2,7	2,8	2,7	347	268	292	283
III	10	"12"	3,8	3,3	3,5	3,4	434	367	399	380

⁽¹⁾ nach ÖNORM EN 14358:2007 [33], Annahme Lognormalv. mit Berücksichtig. der Prüfkörperanzahl

⁽²⁾ nach Rangstatistik

⁽³⁾ nach Annahme Lognormalverteilung

Tab. 4.12 Charakteristische Werte bzw. Mittelwerte der jeweiligen Gruppen betreffend würfelförmige Prüfkörper

Gr.	Lagerung	Stempelposition	Anzahl Prüfkörp.	Charakteristische und mittlere Werte der Würfel [N/mm ²]							
				$f_{c,90,mean}$	$f_{c,90,05}^{(1)}$	$f_{c,90,05}^{(2)}$	$f_{c,90,05}^{(3)}$	$E_{c,90,mean}$	$E_{c,90,05}^{(1)}$	$E_{c,90,05}^{(2)}$	$E_{c,90,05}^{(3)}$
I	V	M	5	8,4	5,4	6,9	6,2	1265	990	1150	1065
		L	5	6,8	4,8	5,9	5,3	877	690	784	745
		Q	5	7,4	4,8	6,3	5,4	1023	887	969	928
		E	5	6,1	5,0	5,5	5,3	820	570	678	646
	D	M	5	6,9	5,3	6,2	5,7	711	566	630	614
		E	5	5,0	3,9	4,5	4,2	615	482	559	519
II	V	M	5	7,1	5,8	6,4	6,2	1083	875	992	935
	D	M	5	6,4	5,4	5,8	5,8	719	528	652	575
		E	5	5,1	3,9	4,4	4,2	480	380	443	409
III	V	M	5	7,0	5,7	6,3	6,1	820	374	545	496
	D	M	5	5,6	5,0	5,3	5,2	739	661	661	626
		E	5	4,7	3,5	4,1	3,9	500	371	425	414
IV	V	M	3	6,9	6,5	6,8	6,7	798	510	693	635
		E	3	5,1	4,8	4,8	4,5	550	431	509	485
	D	M	3	5,1	3,3	4,4	4,0	459	278	398	351
		E	3	3,8	3,1	3,6	3,4	331	242	300	281
V	D	M	3	6,1	5,3	5,9	5,7	740	585	696	652
		E	3	4,9	4,4	4,8	4,7	543	477	522	508

⁽¹⁾ nach ÖNORM EN 14358:2007 [33], Annahme Lognormalv. mit Berücksichtig. der Prüfkörperanzahl

⁽²⁾ nach Rangstatistik

⁽³⁾ nach Annahme Lognormalverteilung

Tab. 4.13 Charakteristische Werte bzw. Mittelwerte der jeweiligen Gruppen betreffend plattenförmige Prüfkörper

4.6 Auswertungen des $k_{c,90,BSP}$ -Beiwertes mittels der Modelle 1, Modelle 2, und auf Basis der Versuchdaten von $f_{c,90}$

Die $k_{c,90,BSP}$ -Beiwerte wurden mittels zwei Formeln ermittelt: Geometrisch (durch das Verhältnis der Flächen zwischen Platten und Würfeln, $\frac{A_{ef,Platte}}{A_{Wuerfel}}$) und versuchtechnisch

(durch das Verhältnis der Versuchdaten der mechanischen Eigenschaften zwischen Platten und Würfeln). Das Ziel wurde mit Hilfe der gelieferten Daten von $f_{c,90}$ und mittels der Modelle 1 und Modelle 2 vollbracht. Die Gegenüberstellung von Daten der Platten mit den entsprechenden passenden Daten der Würfel erfolgte auf Basis der Stempelgeometrie. Es wurden die Mittelwerte bzw. die charakteristischen Werte der jeweiligen Serie verwendet. Die Tab. 4.14 beinhaltet die Auswertungen. Wenn die Ergebnisse der zwei geometrischen Modelle mit jenen aus den Versuchsdaten gegenübergestellt werden, erkennt man, dass das Modell 2 jene aus dem Verhältnis der Querdruckfestigkeiten gut übereinstimmt (siehe Tab. 4.14). Zur Vereinfachung wurden ähnliche Werte im Grün markiert.

Der $k_{c,90,BSP}$ -Beiwert nahm in Abhängigkeit von der Lastposition, Stempelgröße und Lagerung (vollflächig und Durchleitung) unterschiedliche Werte an.

Quadratischer/Linearer Stempel		A _{ef,Mitte,BSP,Platte}		k _{c,90,BSP} [-]			
Fläche	Lagerung	Position	Mod 1 ⁽¹⁾		Mod 2 ⁽²⁾		f _{c,90,k,BSP,p} /f _{c,90,k,BSP,w} ⁽⁴⁾
			A _{ef,Mitte,Platte} /A _{Stempel} ⁽¹⁾	A _{ef,Mitte,Platte} /A _{Stempel} ⁽²⁾	f _{c,90,mean,BSP,p} /f _{c,90,mean,BSP,w} ⁽²⁾	f _{c,90,mean,BSP,p} /f _{c,90,mean,BSP,w} ⁽³⁾	
100 x 100	vollflächig	Mitte	39719	26110	4,0	2,6	1,9
		Längsrand	31395	22121	3,1	2,1	1,7
		Querrand	28467	20255	2,8	2,3	1,7
		Ecke	22502	17161	2,3	1,7	1,8
150 x 150	Durchleitung	Mitte	39719	26110	4,0	2,2	1,9
		Ecke	22502	17161	2,3	1,7	1,4
		Mitte	62363	44876	2,8	2,0	1,9
		Ecke	62363	44876	2,8	2,0	1,8
200 X 200	Durchleitung	Mitte	90006	68642	2,3	1,5	1,3
		Ecke	90006	68642	2,3	1,5	1,7
		Mitte	62645	53427	1,6	1,2	1,1
		Ecke	92287	72528	2,3	1,8	2,3
100 x 400	vollflächig	Mitte	66144	56264	1,7	1,6	1,7
		Ecke	68862	57600	1,7	1,4	1,2
		Mitte	54431	48800	1,4	1,2	1,1
		Ecke	112287	92528	1,9	1,5	1,8
150 x 400	vollflächig	Mitte	86144	76264	1,4	1,3	1,5
		Ecke					

A_{ef,Platte} ... ist die wirksame Fläche, ermittelt anhand der Lastausbreitungsmodell (Modell 1,2)

⁽¹⁾ Modell 1: es werden die Winkel $\alpha=45^\circ$ und $\beta=15^\circ$ nach ÖNORM EN 1995-2:2004 [34] verwendet

⁽²⁾ Modell 2: es werden die Winkel $\alpha=32^\circ$ und $\beta=9^\circ$ ermittelt aus der Versuchsdaten, verwendet

⁽³⁾ k_{c,90,BSP} auf Basis der Mittelwerte ermittelt

⁽⁴⁾ k_{c,90,BSP} auf Basis der charakteristischen Werte gemäß ÖNORM EN 14358:2007 [33] ermittelt

Tab. 4.14 Vergleich der Ergebnisse aus den geometrischen Modellen 1 und 2 mit jenen aus den Prüfdaten

Die für BSH-Bauteilen normativ festgelegten $k_{c,90}$ -Faktoren sind in Bezug auf die charakteristische Festigkeit quer zur Faser ermittelt worden. In Tab. 4.14 unterscheiden sich teilweise deutlich die Differenz zwischen den charakteristischen Querdruckfestigkeiten und den entsprechenden Mittelwerten aufgrund einer großen Streuung der vorliegenden Daten jeweiliger Verteilungsfunktion. Dazu fällt ein, dass der $k_{c,90}$ -Faktor zwischen 1,1 und 1,9 schwangt. Nur eine Ausnahme wird bei der Serie „L100VM (Linienlast)“, mit $k_{c,90}=2,3$ (aus den charakteristischen Werten ermittelt), verzeichnet.

4.7 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit der würfelförmigen BSP-Elemente

Die Abb. 4.1 zeigt die Variation der Querdruckfestigkeit von würfelförmigen Elementen (Querschnittsfläche $150 \times 150 \text{ mm}^2$) in Abhängigkeit von drei unterschiedlichen Holzfeuchten. Hierbei wird die Verläufe der Mittelwerte bzw. charakteristischen (5 %-Quantil-) Werte der Querdruckfestigkeit dargelegt.

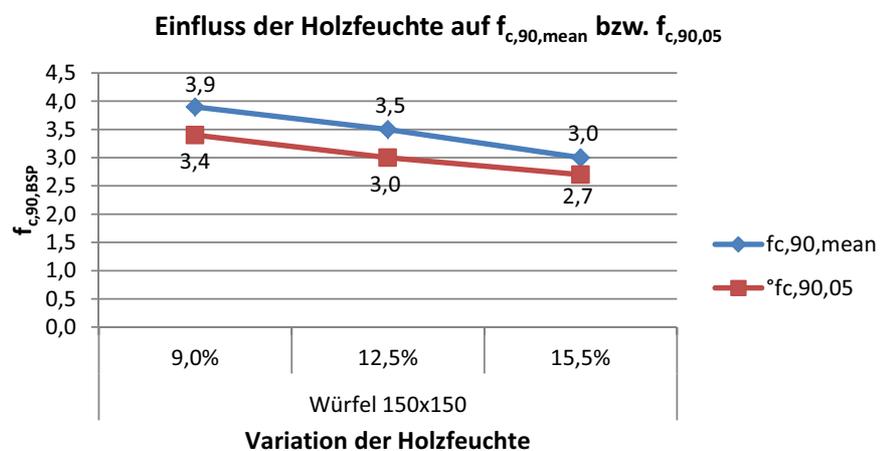


Abb. 4.1 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit

Für das betrachtete Intervall der Feuchtevariation (von rund 8 % bis 16 %) wird beobachtet, dass beiden Verläufen quasi eine lineare Regression folgen. D.h., je höher die Holzfeuchte, desto niedriger ist die Querdruckfestigkeit, sowohl für die Kurve der Mittelwerte als auch für die der charakteristischen Werte.

4.8 Einfluss der Stempelposition auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente und auf $f_{c,90,BSP}$

4.8.1 Einfluss auf $f_{c,90,BSP}$

Zur Betrachtung des Einflusses der Stempelposition auf der Festigkeit quer zur Faserrichtung werden einigen repräsentativen Diagramme dargelegt und ihre Verläufe analysiert. Bei der Serie mit Stempelfläche $100 \times 100 \text{ mm}^2$ (Gruppe I) wurden vier unterschiedlichen Lastpositionen in Betracht genommen, welche die Ergebnisse in Abb. 4.2 lieferten. Mit den Ergebnissen der Platten werden die Ergebnisse der Würfel (mit St. $100 \times 100 \text{ mm}^2$) nebeneinander gestellt. Hier werden auch die Ergebnisse der quadratischen Stempelfläche bei Durchleitung und die lineare Stempelfläche (mit St. $100 \times 400 \text{ mm}^2$) dargelegt.

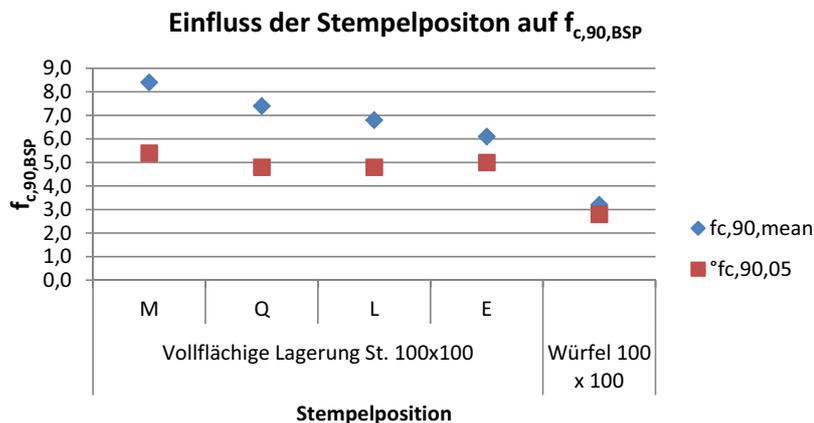


Abb. 4.2 Vergleich der Querdruckfestigkeit von Würfeln zu Platten, bei vollflächiger Lagerung mit quadratischem St. 100×100

In Abb. 4.2 fällt ein, dass der Mittelwert bzw. charakteristische Wert der Referenz-Querdruckfestigkeit des Würfels erheblich niedriger ist als die entsprechenden Werte aus den Plattenversuchen. Zudem ist es eine Abnahme der Querdruckfestigkeit der Plattenversuche beobachtet worden, wobei die charakteristischen Werte circa konstant bleiben.

In Abb. 4.3 werden die Ergebnisse betreffend Durchleitung der Platten (Gruppe I, mit St. $100 \times 100 \text{ mm}^2$) im Vergleich zu den Würfeln dargelegt. Die Differenz zwischen den Ergebnissen aus Platten und aus Würfel liegt vor, wobei sie nicht so stark ist wie bei vollflächiger Lagerung. Eine Abnahme der Querdruckfestigkeit von der mittigen Stempelposition zur Ecke ist auch in diesem Fall, sowie für vollflächige Lagerung, vorhanden. Diese Abhängigkeit von der Stempelposition stimmt auch die Beobachtungen von Salzmann [8] (Seite 115) überein, wobei die Druckfestigkeiten quer zur Faser sich bei Querdruckbelastung am Längs- und Querrand näherten. In dieser Arbeit sind die charakteristischen Werte bei Plattenrand in der Längs- und Querrichtung ident. Nur die entsprechenden Mittelwerte weisen differente Wert auf, wobei bei Querrandbeanspruchung größer ist.

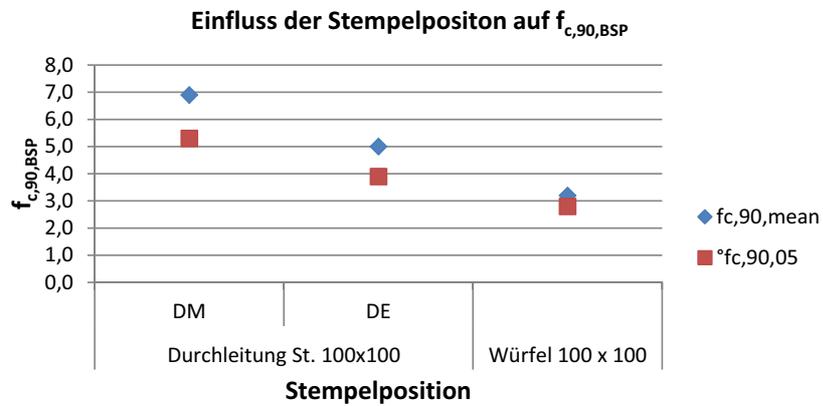


Abb. 4.3 Vergleich der Querdruckfestigkeit von Würfeln zu Platten, bei Durchleitung mit quadratischem St. 100 x 100

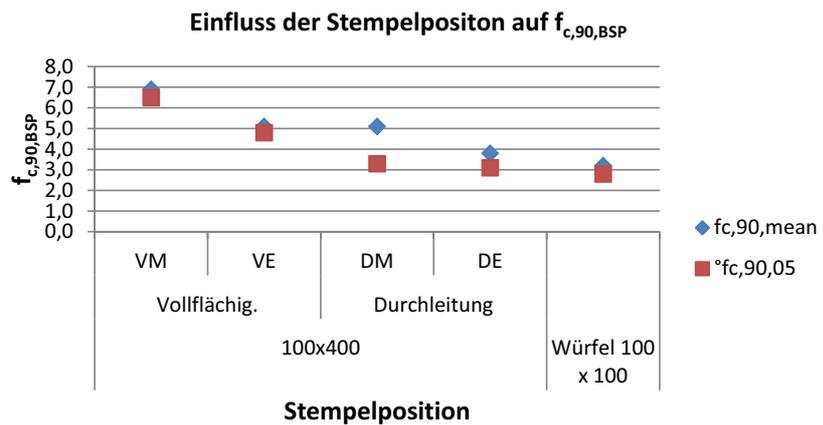


Abb. 4.4 Vergleich der Querdruckfestigkeit von Würfeln zu Platten, bei beiden Lagerungen mit linearem St. 100 x 100

In Abb. 4.4 werden die Ergebnisse bei vollflächiger Lagerung bzw. Durchleitung der Platten (Gruppe IV, mit St. 100 x 400 mm²) im Vergleich zu den Würfeln (Querschnittsfläche 100 x 100 mm²) dargestellt. Eine Abnahme der Querdruckfestigkeit ist auch in diesem Fall, sowie für quadratische Stempelpressung, betreffend die Stempelpositionen vorhanden. Der mittlere bzw. charakteristische Werte der Würfel liegt unterhalb der entsprechenden Werte von Platten, wobei der Unterschied mit den Werten bei Durchleitung nicht so groß ist wie bei vollflächiger Lagerung.

4.8.2 Einfluss auf $k_{c,90,BSP}$

Hier wurden die Ergebnisse der $k_{c,90,BSP}$ -Beiwerte aus zwei geometrischen Modellen und aus den Versuchsdaten (in Tab. 4.14, Kap. 4 gezeigt) in Abb. 4.5 dargestellt. Die Er-

mittlung des Faktors erfolgte mit den Mittelwerten der Spannungen jener Serie und auf Basis der in der Mitte des Elements ermittelten effektiv Fläche.

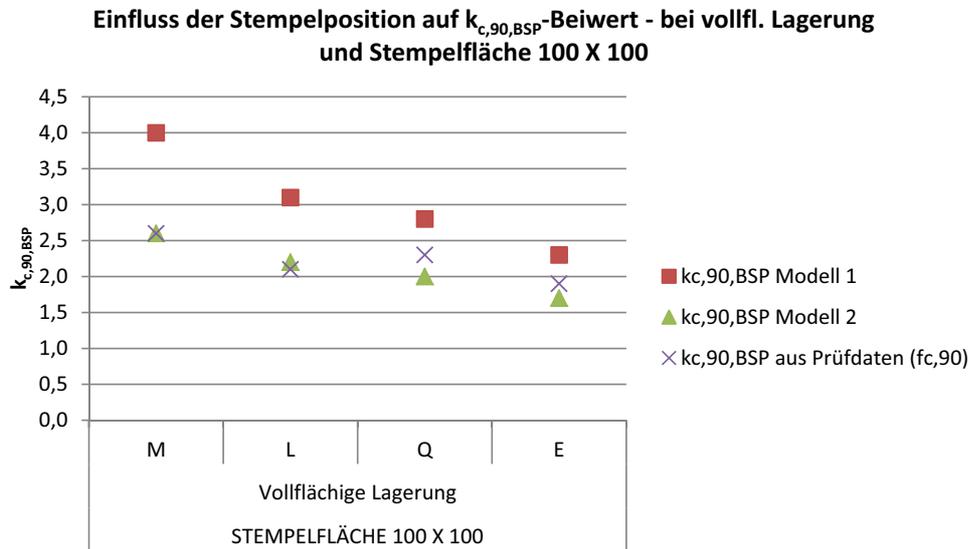


Abb. 4.5 Einfluss der Stempelposition auf den $k_{c,90,BSP}$ -Beiwert bei Gruppe I, vollflächige Lagerung

In Abb. 4.5 wird eine Abnahme des $k_{c,90,BSP}$ -Beiwerts bei Übergang von Querdruckbeanspruchung in der Plattenmitte zu Pressung an der Plattenecke beobachtet. Das bedeutet, der Widerstand der Platte bei mittiger Querdruckkraft ist größer als der bei Querdruckbelastung an der Ecke. Die Ergebnisse aus Modell 2 stimmen in groben Zügen die aus der Prüfdaten, weil die erste aus den zweiten abgeleitet wurden.

4.9 Einfluss der Lagerung (vollflächig und Durchleitung) auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente

4.9.1 Einfluss auf $f_{c,90,BSP}$

In Abb. 4.6 wurden alle mittleren und charakteristischen Werte der Querdruckfestigkeit aller Gruppe in Abhängigkeit der Lagerungsart (vollflächige Lagerung und Durchleitung) dargelegt und betreffend die Abmessungen des Stempels und Lastposition (Mitte und Ecke) zugeteilt.

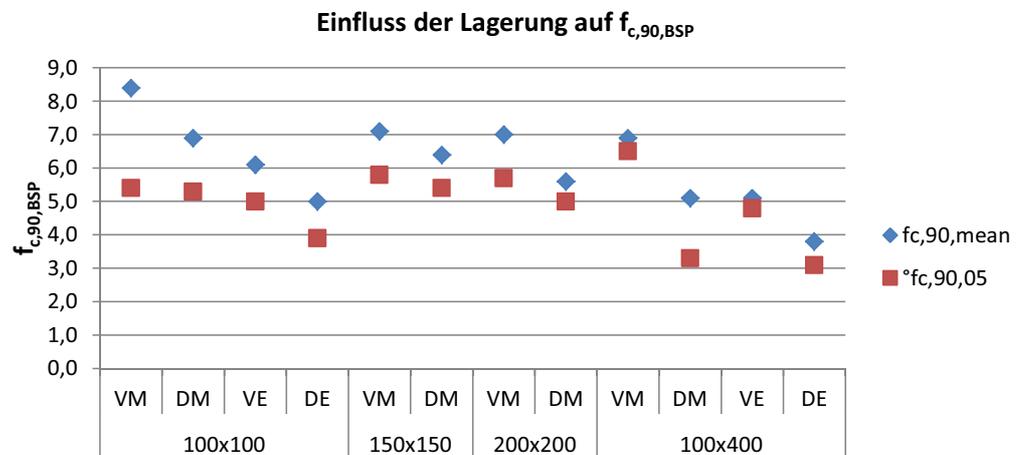


Abb. 4.6 Einfluss der Lagerung auf $f_{c,90,BSP}$

Hinsichtlich der Mittelwerte der Querdruckfestigkeiten weisen die Elemente, unter einer mittigen Pressung bei $100 \times 100 \text{ mm}^2$ Stempelfläche, den größten Wert auf, im Vergleich mit den Werten der anderen Gruppen. Die minimale Festigkeit quer zur Faser ist bei den Linienlast ($100 \times 400 \text{ mm}^2$) mit Querdruckpressung an der Ecke zu finden. Bei Durchleitung sind die Querdruckfestigkeiten deutlich niedriger als die bei vollflächiger Lagerung der entsprechenden Gruppen. Nur, bei mittiger Pressung der Stempelfläche „ 100×100 “, es ist eine gleiche charakteristische Festigkeit quer zur Faser wegen der großen Streuung der Serie „VM“ zu beobachten. Auch die Ergebnisse bei Querdruckpressung an der Ecke liegen unter die Ergebnisse bei mittiger Querdruckkraft. Kein großer Unterschied der mittlere Festigkeit ist bei Stempelflächen $150 \times 150 \text{ mm}^2$, $200 \times 200 \text{ mm}^2$ und $100 \times 400 \text{ mm}^2$, betreffend die mittige Stempelposition, sichtbar.

4.10 Einfluss der Stempelfläche auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente

4.10.1 Einfluss auf $f_{c,90,BSP}$

Mit Pressungslage in der Mitte der Platte, bei vollflächiger Lagerung.

Es wurde den Einfluss der Stempelfläche (bei mittiger Querdruckpressung) auf die Festigkeit quer zur Faserrichtung bei vollflächiger Lagerung der Platte untersucht. In Abb. 4.7 wurden allen Serie betrachtet.

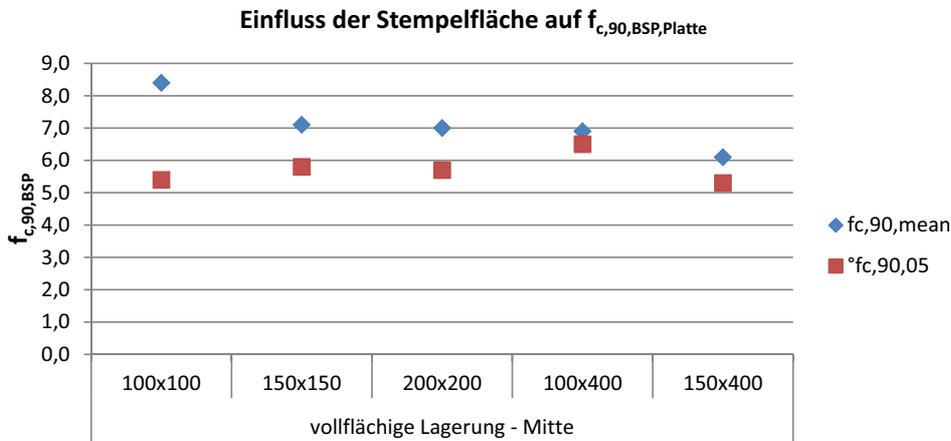


Abb. 4.7 Einfluss der Stempelfläche auf Querdruckfestigkeit, bei vollflächiger Lagerung

Die Abb. 4.7 zeigt eine Abnahme der mittlere Querdruckfestigkeit bei Zunahme der Stempelfläche. Lokal war ein konstanter Mittelwert rund 7 N/mm² für Stempel mit Flächen 150 x 150 mm², 200 x 200 mm², 100 x 400 mm² zu merken. Dagegen nehmen die charakteristischen Werte der Querdruckfestigkeit bei Zunahme der Stempelfläche leicht zu. Der Grund dafür ist auf eine große Standardabweichung zurückzuführen.

Mit Pressungslage in der Mitte der Platte, bei Durchleitung.

Es wurde den Einfluss der Stempelfläche (bei mittlerer Querdruckpressung) auf die Festigkeit quer zur Faserrichtung bei Durchleitung untersucht. In Abb. 4.8 werden Serien betreffend der quadratischen und linearen Stampelfläche betrachtet.

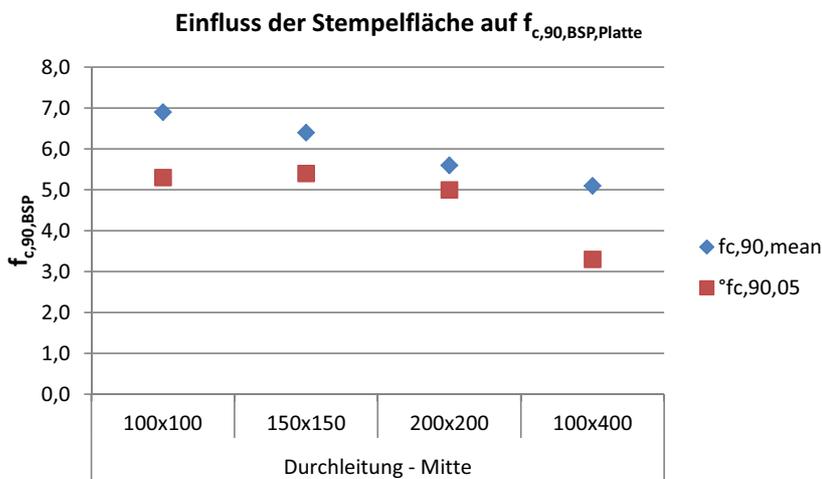


Abb. 4.8 Einfluss der Stempelfläche auf Querdruckfestigkeit, bei Durchleitung

Auch in diesem Fall, wie bei vollflächiger Lagerung, wird eine Abnahme der Querdruckfestigkeit bei Zunahme der Stempelfläche beobachtet. Die mittlere charakteristischen Werte bleiben circa konstant oberhalb von $5,0 \text{ N/mm}^2$ bei Würfeln und sinkt erheblich bei Linienlast bis ca. $3,0 \text{ N/mm}^2$.

Mit Pressungslage an der Ecke der Platte, bei vollflächiger Lagerung.

Es wurde den Einfluss der Stempelfläche (bei Querdruckbelastung an der Ecke) auf die Festigkeit quer zur Faserrichtung bei vollflächiger Lagerung untersucht. In Abb. 4.9 wurden die Serie betreffend der quadratischen Stempelfläche ($100 \times 100 \text{ mm}^2$) und beiden Serien betreffend linearer Stempelfläche betrachtet.

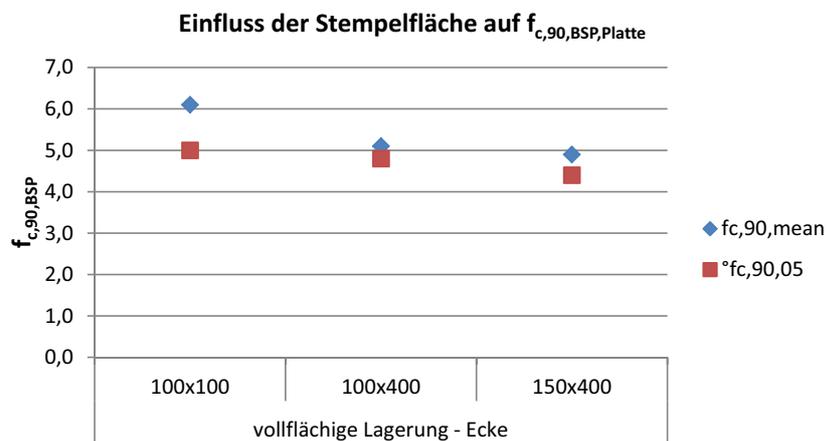


Abb. 4.9 Einfluss der Stempelfläche auf Querdruckfestigkeit, bei vollflächiger Lagerung und Pressung an der Ecke

In Abb. 4.9 wurde eine relative stärkere Reduktion der mittlere Festigkeit bei einer relevanten Verminderung der Fläche (von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ zu $100 \times 400 \text{ mm}^2$) bemerkt als die Reduktion beim Durchgang der beiden linearen Stempelflächen. Die charakteristische Werte der Querdruckfestigkeit bleiben oberhalb von 4 N/mm^2 .

Mit Pressungslage an der Ecke der Platte, bei Durchleitung.

Es wurde den Einfluss der Stempelfläche (bei Querdruckbelastung an der Ecke) auf die Festigkeit quer zur Faserrichtung untersucht. In Abb. 4.10 wurden zwei Serie mit quadratischen Stempelfläche ($100 \times 100 \text{ mm}^2$ und $150 \times 150 \text{ mm}^2$) und beiden Serie betreffend linearer Stempelfläche betrachtet.

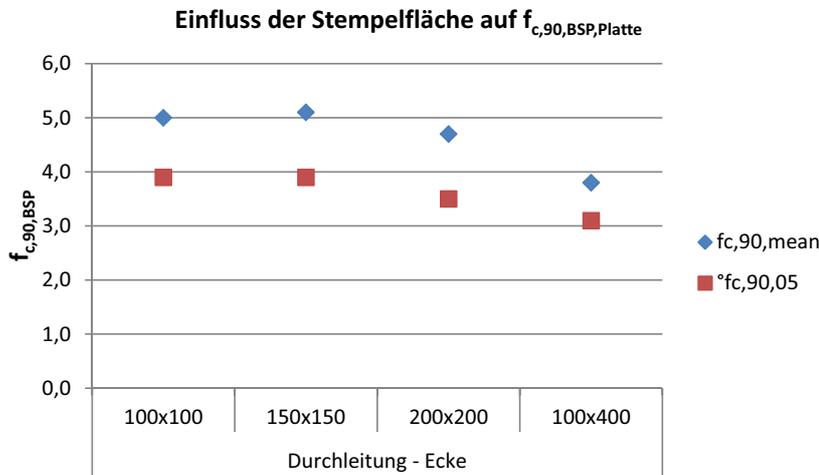


Abb. 4.10 Einfluss der Stempelfläche auf Querdruckfestigkeit, bei Durchleitung und Pressung an der Ecke

Es ist kein Unterschied der mittleren bzw. charakteristischen Werte bei Querdruckbelastung mit kleinen quadratischen Stempelflächen (100 x 100 mm² und 150 x 150 mm²) zu merken, dessen charakteristischer Werte rund 4 N/mm² liegen. Bei der weiteren Zunahme der Stempelfläche, aber, sinken die Querdruckfestigkeiten, wie bevor bei Durchleitung in der Mitte (siehe Abb. 4.8) beobachtet wurde.

4.10.2 Einfluss auf $k_{c,90,BSP}$

Abb. 4.11 und Abb. 4.12 wurden die Ergebnisse der $k_{c,90}$ -Faktore im Bezug auf die Lagerungsart und Stempelposition dargelegt. Es wurden die mittleren Spannungen aus den Versuchsdaten berücksichtigt.

Mit Pressungslage in der Mitte der Platte, bei vollflächiger Lagerung.

Der $k_{c,90,BSP}$ -Beiwert nimmt bei Zunahme der Stempelfläche ab (siehe Abb. 4.11). Das Modell 1 liefern die höchsten Ergebnisse (bis $k_{c,90,BSP}=4$), bei quadratischer Stempelfläche 100 x 100 mm², während das Modell 2 einen Wert von $k_{c,90,BSP}=2,6$. Bei linearer Stempelfläche 150 x 400 mm² reduzieren sich die Werte auf 1,9 fürs Modell 1 und 1,5 fürs Modell 2.

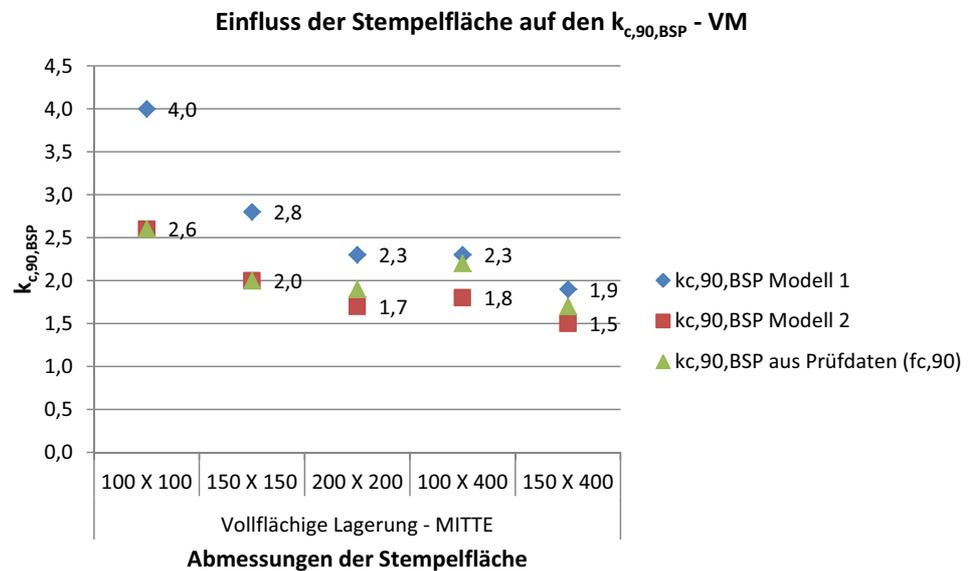


Abb. 4.11 Einfluss der Stempelfläche auf den $k_{c,90,BSP}$ -Beiwert, bei vollflächiger Lagerung mit mittlerer Pressung

Mit Pressungslage an der Ecke der Platte, bei Durchleitung.

In Abb. 4.12 fällt auf, dass eine Verminderung der $k_{c,90}$ -Faktore im Vergleich mit den Ergebnissen in Abb. 4.11 vorliegt. Hierbei spielt die Lagerungart eine wesentliche Rolle.

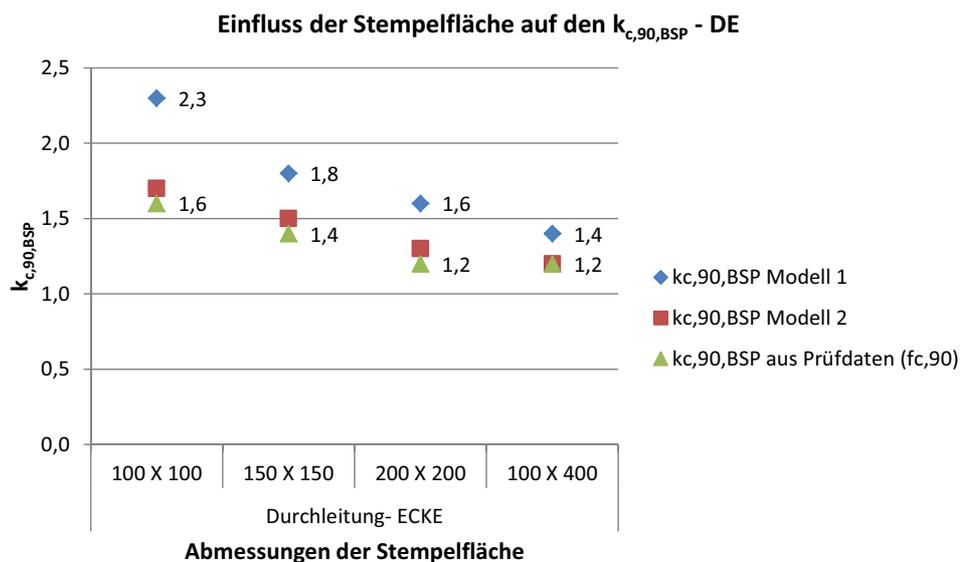


Abb. 4.12 Einfluss der Stempelfläche auf den $k_{c,90,BSP}$ -Beiwert, bei Durchleitung mit Pressung an der Ecke

4.11 Vergleich zwischen Konfiguration „a+b“ und Konfiguration „c“

Bei den Gruppen der Linienlasten (Gr. IV und V) wurden drei Konfigurationen mit unterschiedlichen Stempelfläche betrachtet. In Abb. 4.13 sind zwei von denen (Konf. „a+b“) mit der andere (Konf. „c“) gegenübergestellt.

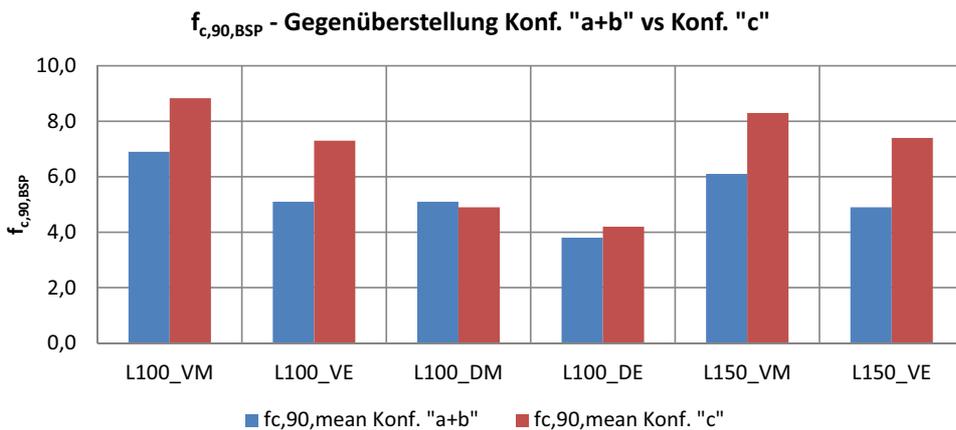


Abb. 4.13 Gegenüberstellung der Konf. „a+b“ vs. Konf. „c“

Die Ergebnisse in Abb. 4.13 zeigen für die Druckfestigkeit quer zur Faser einen deutlichen Unterschied der betrachteten Konfigurationen bei vollflächiger Lagerung, wobei größere mittlere Querdruckfestigkeit bei Konf. „c“ als die Konf. „a+b“ beobachtet worden sind (in der Mitte beträgt die Konf. „a+b“ $6,9 \text{ N/mm}^2$ und die Konf. „c“ $8,8 \text{ N/mm}^2$). Im Gegenteil dazu war bei Durleitung kaum Unterschied der Querdruckfestigkeit infolge die Stempelfläche zu merken. Die Abhängigkeit der Querdruckfestigkeit von der Stempelposition liegt bei beiden Lagerungen vor.

Interprätation der Ergebnisse

5.1 Einleitung

Im Rahmen der Querdruckbelastung auf BSP-Platten wird in diesem Kapitel versucht, die am Anfang gestellten Fragen bzw. Ziele der Arbeit mit den Gegenüberstellungen der aus den Versuchen gelieferten Daten zu beantworten. Es werden die herausgefundenen Beobachtungen, in Kap. 4, zwischen Beeinflussparameter und Querdruckfestigkeit mit Hilfe der Literatur interpretiert. Auch die Ergebnisse des $k_{c,90,BSP}$ -Faktors in Abhängigkeit von Einflussparametern werden interpretiert. Insbesondere werden die $k_{c,90,BSP}$ -Werte der BSP-Elemente aus den charakteristischen Werten ermittelt und mit den normativ festgelegten [30] $k_{c,90,BSPH}$ -Werten bzw. vorgeschlagenen Werten in [13] verglichen. Zur Gegenüberstellung der Größen kamen die Mittelwerte bzw. charakteristischen Werte gemäß ÖNORM EN 14358:2007 [33] zur Anwendung.

5.2 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit der würfelförmigen BSP-Elemente

Das beobachtete Verhalten der Querdruckfestigkeit unter Variation der Holzfeuchte (bei rund 8 %, 12 % und 20 %), in Abb. 4.1, Kap. 4, bei würfelförmigen BSP-Elementen zeigt eine absteigende lineare Tendenz des Widerstands bei Zunahme der Holzfeuchte. Diese Beobachtung stimmt mit der Aussage in [25] überein, wo festgestellt wurde, dass bei etwas oberhalb von 5-8 % die Festigkeit annähernd linear abnimmt. Nach [25] bewirkt 1 % Holzfeuchteänderung, im Holzfeuchtebereich von 8-18 %, eine Abnahme der Druckfestigkeit von 6 %.

Diese Aussage wird auch in [1] unterstützt. Nach [1] wurde die Auswirkung der Feuchte auf das Volumen bzw. die Rohdichte eines Holzelements. Da nach [4] beobachtet wurde,

dass die Rohdichte eine lineare steigende Tendenz bei Zunahme der Querdruckfestigkeit aufweist, liegt, daher, eine Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Festigkeit quer zur Faserrichtung vor. Dazu die Variation der Holzfeuchte beeinflusst das Langzeitverhalten, in [11]: Elemente mit höherer Holzfeuchte versagen früher als Elemente mit geringerer Holzfeuchte.

Auch die normativ Festlegungen nach ÖNORM EN 348:2010 [36] stellen eine Umrechnung auf 12 % (Referenzfeuchte) fest, damit die aus Proben mit unterschiedlichen Holzfeuchten ermittelten Ergebnisse miteinander vergleichbar sind.

Aus den Ergebnissen es kam, dass bei 3,0 % Holzfeuchtezunahme namm die Querdruckfestigkeit um rund $0,5 \text{ N/mm}^2$ ab. Eine solche Reduktion auf die Querdruckfähigkeit von Bauholz ist deutlich relevant.

5.3 Einfluss der Stempelposition bzw. der Lagerung (vollflächig und Durchleitung) auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente

Eine Abnahme der Querdruckfestigkeit von einer mittigen Stempelposition zur Ecke ist, sowohl in Abb. 4.2 (in Kap. 4) für vollflächige Lagerung als auch in Abb. 4.3 (in Kap. 4) für Durchleitung, vorhanden. Durch das Prinzip des Lastausbreitungsbereichs, im Modell 2 verwendet, wird das Verhalten der Querdruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Einflussparameter der Pressungslage erklärt. Das Prinzip basiert auf durch die Sperr- bzw. Einhengeffekte das aktivierte Volumen um die belastete Zone herum: Je größer das Volumen ist, desto größer ist die Querdruckfestigkeit. Eine Ausnahme ist, aber, bei Querdruckbelastung am Plattenrand beobachtet worden, wobei die mittlere Druckfestigkeit quer zur Faser bei Pressung in der Querrichtung größer ist als die in der Längsrichtung (siehe Abb. 4.2, in Kap. 4). Der Grund dafür liegt, voraussichtlich, an die größere Stärke der Querlamellen, die bei Querdruckbeanspruchung in der Querrichtung aufgrund des Rollschubeffekts (siehe Abb. 1.15, in Kap. 1) auf den Widerstand positiv einwirkt. In der Untersuchung von Salzmann wurden fast identen Werte betreffend die Querdruckfestigkeit am Plattenrand mit Pressung in beiden Richtungen beobachtet (siehe Seite 115, in [8]).

Die Reduktion der charakteristischen Querdruckfestigkeit beim Übergang der Querdruckbeanspruchung bei vollflächige Lagerung in der Mitte zu Plattenecke auf Basis der Versuchsdaten der Gruppe I (Abb. 4.2, in Kap. 4) liegt rund 8,0 % (bei $\text{COV}=17,6 \%$ für Serie mit mittiger Querdruckbeanspruchung und $\text{COV}=8,1 \%$ für Serie mit Querdruckpressung am Platteneck). Bei Durchleitung (Abb. 4.3, Kap. 4) mit selber Variation der Stempelpositionen geht eine Reduktion rund 36 % hervor (bei $\text{COV}=6,4 \%$ für Serie mit mittiger Querdruckbeanspruchung und $\text{COV}=11,1 \%$ für Serie mit Plattenecke). Diese Tendenz wurde auch bei der Untersuchung von Serrano, in [19], beobachtet. Aus der Gegenüberstellung der Ergebnisse von Würfeln zu Platten (siehe Abb. 4.2 und Abb. 4.4, in Kap. 4) ist folgende herausgekommen:

- bei vollflächiger Lagerung unter Querdruckbeanspruchung in der Mitte mit quadratischer Stempelfläche, liegt eine Zunahme der charakteristischen Festigkeit quer zur Faser der Platten rund 93 %, im Vergleich mit der Querdruckfestigkeit der Würfel;
- bei vollflächiger Lagerung unter Querdruckbeanspruchung an der Ecke mit quadratischer Stempelfläche, liegt eine Zunahme der charakteristischen Festigkeit quer zur Faser der Platten rund 79 %, im Vergleich mit der Querdruckfestigkeit der Würfel;
- bei Durchleitung unter Querdruckbeanspruchung an der Ecke mit linearer Stempelfläche, liegt eine Zunahme der charakteristischen Festigkeit quer zur Faser der Platten rund 36 %, im Vergleich mit der Querdruckfestigkeit der Würfel.

In Abb. 4.4 (Kap. 4) liegt der mittlere bzw. charakteristische Werte der Würfel unterhalb der entsprechenden Werte von Platten, wobei der Unterschied mit den Werten bei Durchleitung nicht so relevant ist wie bei vollflächiger Lagerung. Auch bei den Ergebnissen in Abb. 4.6 (Kap. 4) betreffend der Lagerungen (vollflächige Lagerung und Durchleitung) fällt dasselbe ein. Es wird eine deutliche Abnahme der mittleren Querdruckfestigkeit beim Übergang von vollflächiger Lagerung zur Durchleitung der dazugehörigen Gruppe beobachtet, wobei nicht dasselbe für die charakteristische Werte aufgrund der abweichenden Streuung der Versuchsdaten bemerkt wurde. Eine Erklärung dafür kann aus dem mathematischen Modell in [22] zurückgeführt werden:

$$k_{c,90} = 1,1 \cdot \sqrt{0,5 + \frac{(3H + L)}{2s}} \leq 5$$

Bei einer Vergrößerung der Auflagerungslänge (wie für vollflächige Lagerung) nimmt der $k_{c,90}$ -Faktor (laut Gleichung in [22]) zu. Da dieser Faktor mit der Querdruckfestigkeit direkt proportional zusammenhängt, wird demnach der Widerstand des Elements bei vollflächiger Lagerung steigern. Dagegen, weisen Elemente unter Querdruckbeanspruchung bei Durchleitung eine niedrigere Querdruckfestigkeit auf.

Aus den Versuchsdaten der Gruppe I bei Querdruckbeanspruchung in der Plattenmitte liegt eine Steigerung der charakteristischen Querdruckfestigkeit zwischen beiden Lagerungen rund 2 % vor. Bei selber Gruppe mit Querdruckbeanspruchung am Platteneck ist eine Steigerung der charakteristischen Querdruckfestigkeit rund 28 % (bei COV 9,8 % und 8,1 %) vorhanden. Bei Gruppe II mit Querdruckbeanspruchung in der Mitte liegt eine Steigerung der charakteristischen Querdruckfestigkeit zwischen beiden Lagerungen rund 7 % und bei Gruppe III circa 14 % vor. Aus den Versuchsdaten der Gruppe IV bei Querdruckbeanspruchung in der Plattenmitte ist die höchste Steigerung rund 97 % vorhanden und am Eck rund 55 %. Man merkt, dass die Prüfkörperanzahl bei Gruppe IV auf drei begrenzt sind.

In Abb. 4.6 (Kap. 4) liegt der niedrige charakteristische Wert für BSP-Platten obenauf

3,0 N/mm² vor, der größer ist als der charakteristische Querdruckfestigkeit von BSH-Elementen mit einer Sortierklasse C24 (2,5 N/mm²).

Nach den Untersuchungen in [8] wurden, wie in dieser Masterarbeit, maximalen Querdruckfestigkeiten bei mittlerer Querdruckpressung auf BSP-Platten und minimalen Festigkeiten quer zur Faserrichtung bei Querdruckbelastung an der Ecke. Die charakteristischen Werte bei Querdruck auf Plattenlängs und Plattenquer näherten sich, sowie auch aus den Ergebnissen dieser Arbeit.

5.4 Einfluss der Stempelposition bzw. der Lagerung (vollflächig und Durchleitung) auf den $k_{c,90,BSP}$

In Tab. 4.14 (Kap. 4) sind die $k_{c,90}$ -Faktore aus zwei geometrischen Modellen (Modell 1 und 2) und den Versuchdaten dargelegt worden. Alle Werte wurden auf Basis der effektiv Fläche in der Mitte des Bauteils ermittelt. Die Ergebnisse aus dem Modell 1, das auf die Lastausbreitungswinkel nach ÖNORM EN1995-2:2004 [35] basiert, sind nicht auf den Ergebnissen aus den Versuchdaten betreffend $f_{c,90}$ übereinander legbar. D.h., die verwendete Winkel ($\alpha=45^\circ$ und $\beta=15^\circ$) liefern zu groß Lastausbreitungsfläche. Das Modell 2, das aus den Versuchdaten betreffend der Festigkeit basiert, weist deswegen kleinere Winkel ($\alpha \approx 32^\circ$ und $\beta \approx 9^\circ$) auf.

In Abb. 4.5 (Kap. 4) sind die mittleren Werte der $k_{c,90}$ -Faktore in Bezug auf die Stempelposition gegenübergestellt. Bei vollflächige Lagerung liegt eine Differenz der Faktoren zwischen einer Querdruckbeanspruchung in der Plattenmitte zu Plattenecke von:

- 1,7, bei Modell 1;
- 0,9, bei Modell 2;
- 0,7, aus den Prüfdaten.

Dieser Unterschied von der Stempelposition abhängig wird nach der Gleichung von Van der Put in [22] erklärt. In diesem Fall ändert sich die Auflagerungslänge mit der Änderung der Querdrucklage (in der Formel mit „L“ bezeichnet). Hinsichtlich der Sperr- bzw. Einhängeneffekt, wird bei Querdruckkraft in der Mitte ein größeres Volumen aktiviert im Vergleich mit eine Pressung an der Ecke.

In Abb. 4.12 (Kap. 4) sind die mittleren Werte der $k_{c,90}$ -Faktore in Bezug auf die Stempelfläche gegenübergestellt. Bei Durchleitung mit Querdruckbeanspruchung an der Ecke liegt eine Differenz der Faktoren zwischen der minimalen Stempelfläche (100 x 100 mm²) und der Linienlast (100 x 400 mm²) von:

- 0,9, bei Modell 1;
- 0,5, bei Modell 2;
- 0,4, aus den Prüfdaten.

Dieser Unterschied von der Stempelfläche abhängig wird nach der Gleichung von Van der Put in [22] erklärt. In diesem Fall ändert sich die Stempellänge (in der Formel mit „s“ bezeichnet). Das wird auch von der Schwellen-Theorie in [21], wobei der Lastausbreitungswinkel wurde definiert als:

$$\theta = 0,62 \cdot \ln\left(2 \frac{H}{s}\right)$$

D.h., bei konstanter Höhe des Elements und Vergrößerung der Stempellänge (s) sinkt der Lastausbreitungswinkel (θ). Daher, auf das Verhältnis der effektiv Fläche und Stempelfläche bezogen, sinkt der $k_{c,90}$ -Faktor. Es wurde auch in [13] bei Zunahme der Stempelfläche eine Reduktion des $k_{c,90}$ -Faktors beobachtet (siehe Tab. 1.5, in Kap. 1).

Es ist noch interessant die ermittelten charakteristischen $k_{c,90,BSP}$ -Werte (siehe Tab. 4.14, in Kap. 4) mit den vorgeschlagenen in [13] bzw. den normativ festgelegten in [30] Werten gegenüberzustellen. In der Tab. 5.1 werden die $k_{c,90}$ -Werte aus den charakteristischen Querdruckfestigkeiten, aus [13] und gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [30] dargelegt. Ihre graphische Gegenüberstellung erfolgt in Abb. 5.1.

	Gr. I St. 100 x 100 - Vollflächige Lagerung			
	Mitte	Längsrand	Querrand	Ecke
$k_{c,90,BSP}$	1,9	1,7	1,7	1,8
$k_{c,90,clt}$ in [13]	1,83	1,58	1,47	1,25
⁽³⁾ $k_{c,90,BSH}$ in [30]	1,5			

⁽¹⁾ $k_{c,90,BSP}$ aus den Versuchsdaten der Gruppe I, auf Basis der charakteristischen Querdruckfestigkeiten gemäß [33]

⁽²⁾ $k_{c,90,BSP}$ nach [13] bei vollfläch. Lagerung, Stempelfläche 160 x 160 mm² und Plattenhöhe von 165 mm

⁽³⁾ $k_{c,90,BSH}$ gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [30] für Bauteile auf kontinuierlicher Unterstützung

Tab. 5.1 $k_{c,90}$ -Faktoren aus den charakt. Querdruckfestigkeiten dieser Masterarbeit, aus [13] und gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [30], in Abhängigkeit der Stempelposition

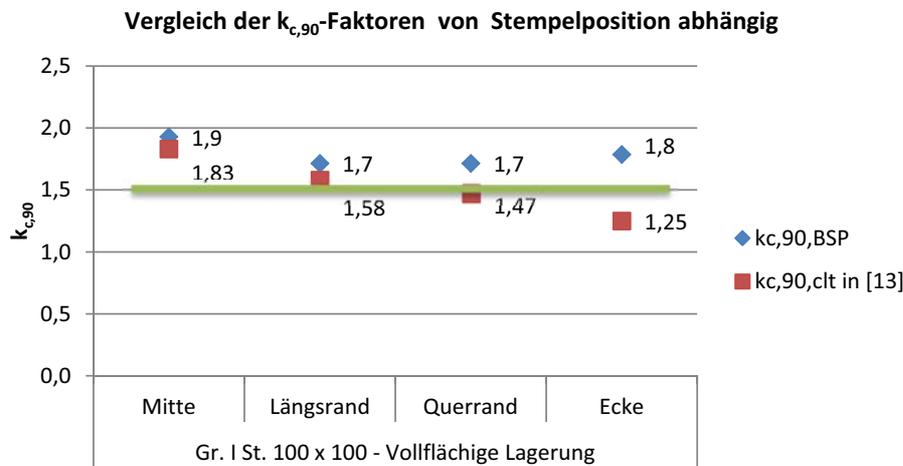


Abb. 5.1 Verschiedene Interpretationen des $k_{c,90}$ -Faktor in abhängigigkeit von Stempelposition

Die doppelte Linie stellt den normativ festgelegte $k_{c,90}$ -Wert (1,5) für BSH-Bauteile auf kontinuierlicher Unterstüzung. Alle ermittelte Werte aus dieser Masterarbeit liegen oberhalb dieser Linie. Der Grund dafür ist auf die Aufbau der BSP-Elemente bzw. auf den Sperreffekt zurückzuführen. In Übereinstimmung mit der Tendenz der Resultaten nach [13], welche die Abhängigkeit des $k_{c,90,BSP}$ -Faktors von der Stempelposition betrachten, sind die in dieser Masterarbeit ermittelten Werte. Die einzige große Ausnahme ist bei Querdruckkraft am Platteneck. Außerdem fällt es auf, dass die aus dieser Arbeit gewonnenen $k_{c,90}$ -Werte etwas größer sind als die in [13]. Der Grund dafür liegt an die Dimension der verwendete Stempelfläche: eine kleinere Fläche 100 x 100 mm² (bei Gruppe I verwendet) ergibt größere $k_{c,90}$ -Werte als eine größere Pressungsfläche (160 x 160 mm²), die in [13] zum Anwendung kommt.

5.5 Einfluss der Stempelfläche auf die Querdruckfestigkeit der BSP-Elemente

Es wurden der Einfluss der Stempelfläche auf die Querdruckfestigkeit untersucht. Die Ergebnisse der mittleren Querdruckfestigkeit in Abb. 4.7 zeigen eine Abnahme bei Zunahme der Stempelfläche. Dagegen, nehmen die charakteristischen Werte, aufgrund großer Streuung der Serie mit Stempelfläche 100 x 100 mm², bei Zunahme der Stempelfläche zu. In den Abb. 4.8, Abb. 4.9 und Abb. 4.10 ist abenso der selbe Einfluss der Stempelfläche auf die Querdruckfestigkeit mit Berücksichtigung der Stempelposition und der Lagerung gezeigt, wobei grundsätzlich eine Abnahme der Querdruckfestigkeit bei zunehmender Stempelfläche, sowohl für die mittlere Werte als auch für die charakteristische Werte, beobachtet wurde.

Bei linearen Stempelflächen (100 x 400 mm² und 150 x 400 mm²) unter

Querdruckpressung in der Plattenmitte, bei vollflächiger Lagerung, liegt eine Abnahme der Querdruckfestigkeit rund 18 %. Beim Unterschied ein 4-fach Stempelfläche (100 x 100 mm² und 200 x 200 mm²) unter Querdruckpressung in der Plattenmitte, bei Durchleitung, liegt eine Abnahme der Querdruckfestigkeit rund 5,5 %.

Diese Beobachtung wurde auch bei den Untersuchungen von Van der Put [22] herausgefunden (siehe Abb. 1.25, in Kap. 1). In [22] wurde ein Modell zur Ermittlung des $k_{c,90}$ -Faktors angenommen. Dieser Faktor hängt mit der Querdruckfestigkeit der Platte direkt proportional zusammen. Dadurch wird es bewiesen, dass bei Zunahme der Stempellänge eine Abnahme des Faktors bzw. der Querdruckfestigkeit folgt. Damit stimmt auch die Gleichung von Leijten [20] überein:

$$k_{c,90} = \sqrt{\frac{l_{ef}}{l}}$$

wobei „ l “ die Stempellänge angibt.

5.6 Anwendung des Modells 2 auf Basis der Versuchsdaten von Salzmann [8]

In der Tab. 5.2 wird die Ergebnisse der Kontrolle der Richtigkeit des Modells 2 auf Basis der Versuchsdaten von Salzmann [8] dargelegt. Um das Ziel zu erreichen, wurden die Spannungen der Platten, in der Mitte des Bauteils durch die effektiv Fläche auf Basis der in dieser Arbeit abgeleiteten Lastausbreitungswinkel ($\alpha \approx 32^\circ$ und $\beta \approx 9^\circ$) ermittelt, und die Spannungen der Würfeln dividiert. Resultiert daraus ein Wert nicht so fern von 1, sind die Annahme der Lastausbreitungswinkel des Modells 2 richtig. Die Verhältnisse beider Spannungen schwangen rund um 10% um die Einheit, Daher ist das Modell 2 für die betrachtete symmetrischen Aufbauten mit der Berücksichtigung der Stempelposition geeignet. Zur Berechnung wurden die Mittelwerte der Würfel bzw. Platten verwendet.

	Stempelposition	$\sigma_{c,90,platte}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,90,würfel}$ [N/mm ²]	$A_{st}=160^2$ [mm ²]	$F_{c,90,platte}$ [N/mm ²]	$A_{ef,mitte}$ $\alpha=32^\circ, \beta=9^\circ$	⁽¹⁾ $\sigma_{c,90,platte}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,90,platte}/\sigma_{c,90,würfel}$	
h=150 mm Aufbau symm.	Mitte	6,4	3,5	25600	163072	47551	3,4	1,0	GUT!
	Ecke	4,5	3,5	25600	113920	35787	3,2	0,9	GUT!
	Längs	5,1	3,5	25600	130048	42656	3,0	0,9	GUT!
	Quer	5,0	3,5	25600	127232	39894	3,2	0,9	GUT!
h=161 mm Aufbau symm.	Mitte	6,54	3,34	25600	167424	49622	3,4	1,0	GUT!
	Ecke	4,81	3,34	25600	123136	36650	3,4	1,0	GUT!
	Längs	5,01	3,34	25600	128256	43569	2,9	0,9	GUT!
	Quer	5,09	3,34	25600	130304	41741	3,1	0,9	GUT!
h=165 mm Aufbau symm.	Mitte	5,72	3,3	25600	146432	49856	2,9	0,9	GUT!
	Ecke	5,03	3,3	25600	128768	36802	3,5	1,1	GUT!
	Längs	5,50	3,3	25600	140800	44508	3,2	0,9	GUT!
	Quer	5,47	3,3	25600	140032	41224	3,4	1,0	GUT!
Durchleit.	Mitte	5,57	3,33	25600	142592	49856	2,9	0,9	GUT!
h=197 mm A. symm.	Mitte	7,01	3,42	25600	179456	55884	3,2	0,9	GUT!
	Ecke	5,52	3,42	25600	141312	39312	3,6	1,1	GUT!

P.S. Hierbei wurden die Mittelwerte der Salzmanss Versuchsdaten verwendet

⁽¹⁾ $\sigma_{c,90,platte}$ ist die Spannung in der Mitte des Elements

Tab. 5.2 Anwendung der abgeleitete Winkel $\alpha=32^\circ$ und $\beta=9^\circ$ bei den Versuchsdaten von Salzmanss

In [8] ging man davon aus, dass ein einzelner Winkel in der Längs- und Querrichtung, die auf Basis vier unterschiedlicher Kriterien ermittelt wurden, für die Berechnungen betrachtet wurde. Vorausgesetzt, dass die Annahme eines einzelnen Winkels bzw. eines resultierenden Winkels in einer Richtung richtig ist, werden die resultierenden Winkel aus dem Modell 2 in Abb. 5.2 gezeigt. In der Längsrichtung ergibt sich 27° , welches die Beobachtung in [8] (Lastausbreitungswinkel zwischen 20° und 30°) übereinkommt. In der Querrichtung ergibt sich 15° , fast doppelt so viel wie in der anderen Richtung.

Resultierende WINKEL aus $\alpha=32^\circ$ und $\beta=9^\circ$

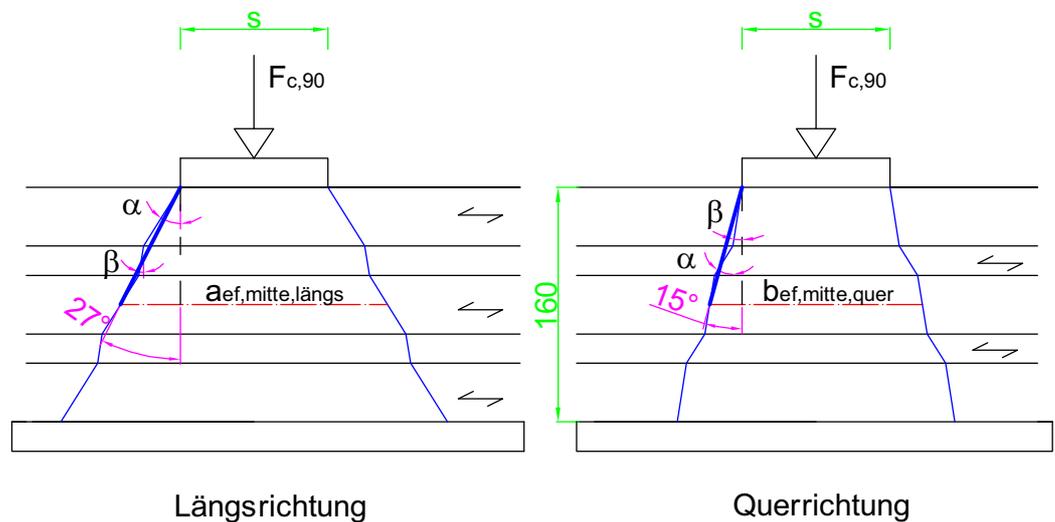


Abb. 5.2 Resultierenden Winkel aus $\alpha=32^\circ$ und $\beta=9^\circ$ in Längs- und Querrichtung

5.7 Vergleich zwischen Konfiguration „a+b“ und Konfiguration „c“

In der Praxis könnte den Fall vorkommen, wobei die dazwischen längslaufenden Lagen der Wand auf der Decke nicht auflagern könnte. Auf diesem Grund wurden die Konf. „a+b“ und Konf. „c“ (Linienlasten, Gr. IV und V) gegenübergestellt. In der Abb. 4.13, Kap. 4, wurden betreffend die vollflächige Lagerung kleineren Querdruckfestigkeit bei Konf. „a+b“ beobachtet als die andere Konfiguration. Der Grund dafür ist auf die niedrigere Stempelfläche der Konf. „c“ zurückzuführen. Nach den mathematischen Modellen in [20] und [22] wird diese Beobachtung unterstützt, weil der $k_{c,90}$ -Faktor und demnach die damit verknüpfte Querdruckfestigkeit der Platte bei einer Abnahme der Stempellänge („s“) zunehmen.

Nebenbei wird noch eine Erläuterung mit Hilfe des Konzepts der Lastweiterleitungsbe- reich (siehe Abb. 5.3) gegeben. Aufgrund der geringere Kontaktfläche bei Konf. „c“, im Vergleich mit Konf. „a+b“, wird die erste Schicht nur ansatzweise beansprucht. Das be- deutet, dass die aus eine niedrigere Kontaktfläche resultierende Spannung (Konf. „c“) größer ist als die aus großer Kontaktfläche resultierende Spannung (Konf. „a+b“). In den betrachteten Konfigurationen, bei Konstanter Querdruckpressung, wäre dieser Unter- schied rund 67 %. Aus den Versuchsdaten resultiert, aber, eine Differenz von 28 % bei vollflächige Lagerung mit Pressung in der Mitte und 43 % am Platteneck. Diese Reduk- tion ist auf die für beide Konfigurationen unterschiedliche notwendige Querdruckkräfte zurückzuführen, die nötig sind, um eine bestimmte Verformung zu erreichen.

Die Abhängigkeit der Querdruckfestigkeit von der Stempelposition liegt bei beiden Lagerungen vor.

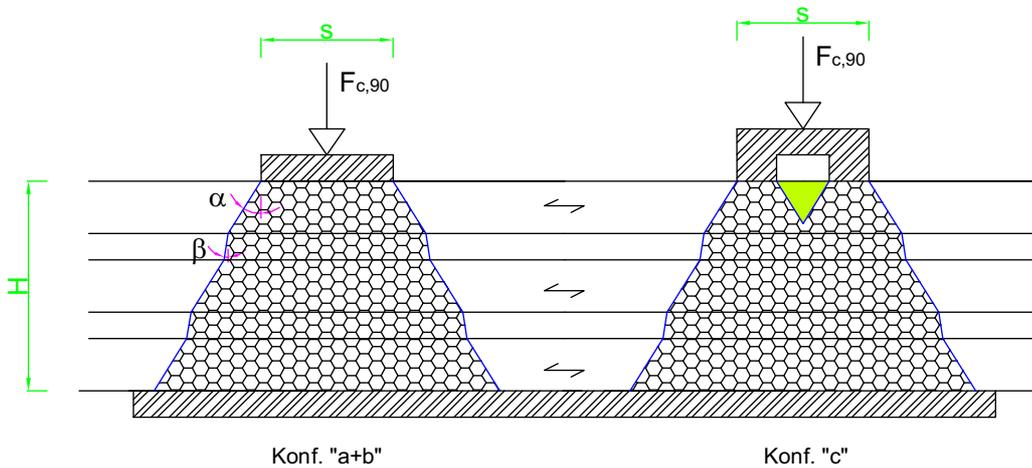


Abb. 5.3 Lastweiterleitung bei Konf. „a+b“ und Konf. „c“

In (Kap 4) betreffend die Durleitung wird kaum Unterschied der Querdruckfestigkeit infolge die lineare Stempelgröße beobachtet, sowohl bei Querdruckpressung in der Mitte als auch in der Ecke. Der Grund dafür liegt an die geometrische Bedingung der oberen und unteren Stempel, sprich an ihre Breiten. Sind dieselben Breite verwendet worden, dann ist die Querdruckfestigkeit der beanspruchten Platte bei Konf. „a+b“ und Konf. „c“ nicht zu unterscheiden. Eigentlich d.h., wenn die längslaufende Lamelle oberer bzw. unterer Wand bei Kontaktfuge Wand-Decke-Wand nicht auf die Decke aufgelagert ist, unterscheidet sich nicht zu eine completa Auflagerung der Wände (siehe Abb. 2.5, Kap 3).

1 Veröffentlichungen

- [1] Schickhofer G. (2006)
Holzbau_Der Roh- und Werkstoff Holz.
Vorlesungsskriptum, S-4-01A, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU
Graz
- [2] Lukkassen D., Meidell A. (2008)
Advanced Materials and Structures and their Fabrication Processes.
Book manuscript, Narvik University College, HiN
- [3] Hall C. P. (1980)
Behaviour of wood under compression perpendicular to grain loading.
Thesis, B.A.Sc., the University of British Columbia
- [4] Halili Y. (2008)
Versuchstechnische Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperr-
holz.
Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [5] Shipsha A., Berglund L. A. (2007)
Shear coupling effects on stress and strain distributions in wood subjected
to traverse compression.
Composites Science and Technology 67, 1362-1369
- [6] F. Kollmann (1951)
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.
- [7] Gustafsson J., Danielsson H. (2012)
Perpendicular to grain stiffness of timber cross sections as affected by

growth ring pattern, size and shape.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg

- [8] Salzmann C. (2010)
Ermittlung von Querdruckkenngrößen für Brettsperrholz (BSP).
Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [9] Dillard A. D., Kasal B., Wolcott P. M. (1989)
Testing small wood specimens in tranverse compression.
Wood and Fiber Science. 21(3), 320-329
- [10] Fahrmeier, Künstler, Pigeot, Tutz
Der Weg zur Datenanalyse, Statistik (5.Auflage), Springer-Verlag
- [11] Schickhofer G. (2009)
Holzbau_Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz.
Vorlesungsskriptum, S-4-01B, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [12] Hoffmeyer P., Damkilde L., Pedersen T. N. (2000)
Struktural timber and glulam in compression perpendicular to grain.
Holz als Roh- und Werkstoff 58 (2000) 73-80, Springer-Verlag
- [13] Bogensperger T., Augustin M., Schickhofer G. (2011)
Properties of CLT-panels exposed to compression perpendicular to their plane.
CIB-W18/44-12-1. Alghero, Italy. Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [14] Mestek P. (2008)
Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen.
Teilprojekt 15 (2008) 83-178, TU München
- [15] Görlacher R. (2004)
Hintergründe und Anwendung der Querdrucknachweise nach DIN 1052:2004.
Ingenieurholzbau; Karlsruhe Tage (2004) Bruderverlang 69-73, Universität Karlsruhe
- [16] Schickhofer G. (2011)
Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz - Ausgewählte Forschungsaktivitäten und Einsatzbereiche.
Präsentation in Zürich, Schweiz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [17] Blass H. J., Görlacher R.
Compression perpendicular to the grain.

Universität Karlsruhe

- [18] Schickhofer G. (2009)
BSPHandbuch, Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz - Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normkonzepts, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [19] Serrano E., Enquist B. (2010)
Compression strength perpendicular to grain in Cross-Laminated Timber (CLT).
World Conference of Timber Engineering
- [20] A.J.M. Leijten, B.J.C. Leijer und A.J.M. Jorissen (2012)
Global test standards and code design rules for compressive strength perpendicular to grain.
Architecture, Building and Planning, TU-Eindhoven, P.O. Box 513, 5600 MB, Eindhoven, The Netherlands
- [21] Van der Put T. A. C. M. (2008)
Derivation of the bearing strength perpendicular to the grain of locally loaded timber blocks.
Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Timber structures and wood technology, Delft University, Delft, The Netherlands
- [22] Van der Put T. A. C. M. (2012)
Restoration of exact design for partial compression perpendicular to the grain.
Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Timber structures and wood technology, Delft University, Delft, The Netherlands
- [23] Schickhofer G., Bogensperger Th., Moosbrugger Th. (2009)
BSPHandbuch - Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz.
2. überarbeitete Auflage, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [24] Augustin M., Ruli A., Brandner R., Schickhofer G.
Behavior of glulam in compression perpendicular to grain in different strength grades and load configurations.
Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
- [25] Niemz P. (2005)
Physik des Holzes.
Institut für Baustoffe, Holzphysik, ETH Zürich

2 Normen

- [26] enBR:2007 („Eurocodenahe Bemessungsrichtlinie, Holzbauwerke – Entwurf, Berechnung und Bemessung“, Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, Graz, 2007)
- [27] ÖNORM EN 338:2007
- [28] ÖNORM EN 386:2002
- [29] ÖNORM EN 301:2006
- [30] ÖNORM EN 1995-1-1:2009
- [31] prEN 14080:2011
- [32] ÖNORM EN 408:2010
- [33] ÖNORM EN 14358:2007
- [34] ÖNORM EN 13183-1:2004
- [35] ÖNORM EN 1995-2:2004
- [36] ÖNORM EN 384:2010