

Zum Einfluss der Holzfeuchte bei Nagelplattenverbindungenⁱ

H.J. Blaß, M. Romani

1 Problemstellung - Zielsetzung

Die meisten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Holzes werden durch höhere Holzfeuchten ungünstig beeinflusst. Der tragfähigkeitsmindernde Einfluss steigender Holzfeuchten trifft auch auf Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln zu.

Neben den bereits bekannten ungünstigen Einflüssen hoher Holzfeuchten bei der Belastung von Nagelplattenverbindungen haben neuere Untersuchungen zur Verankerungsfestigkeit von Nagelplatten gezeigt, dass die Verankerungsfestigkeit für einige Winkelkombinationen des Winkels α zwischen Kraft- und Plattenhaupttrichtung sowie des Winkels β zwischen Kraft- und Faserrichtung des Holzes in nicht zu vernachlässigender Weise durch die Holzfeuchte zum Zeitpunkt des Einpressens der Nagelplatten beeinflusst wird, auch wenn das Holz später nachtrocknen kann.

Die Herstellung von Nagelplattenverbindungen ist in DIN 1052-2, Ausgabe 1988 geregelt. In dieser Norm wird der Feuchtegehalt des Holzes auf maximal 20 % bei der Herstellung festgelegt, wobei bei Hölzern mit einer Holzdicke über 40 mm im Inneren eine Holzfeuchte von 25 % zulässig ist.

In der Praxis werden Nagelplattenverbindungen häufig bei einem wesentlich höheren Feuchtegehalt des Holzes hergestellt. Um die Sicherheit von Nagelplattenverbindungen auch weiterhin gewährleisten zu können, wurden Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Einpressfeuchte und der Prüffeuchte auf die Tragfähigkeit von Nagelplattenverbindungen durchgeführt [1].

2 Experimentelle Untersuchungen

Als Grundlage der Versuche wurden die Nagelplatten und Prüfkörpergeometrien entsprechend den Versuchsreihen aus einem früheren Forschungsvorhaben gewählt

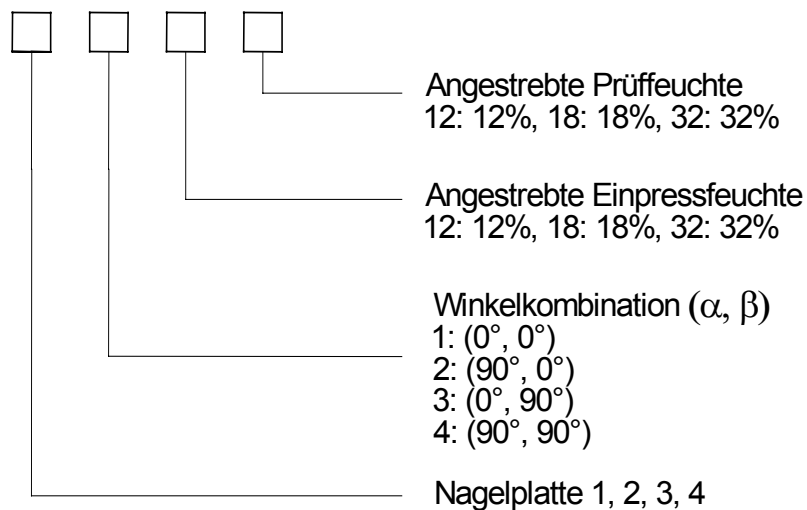
ⁱ Diese Arbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin und der Güte- und Informationsgemeinschaft der Nagelplattenverwender e.V. (GIN) in Düsseldorf

[2]. Dadurch konnten die dort gewonnenen Ergebnisse auch für die weitere Auswertung (z.B. der Rohdichteabhängigkeit) herangezogen werden. In Tabelle 1 sind die geometrischen Eigenschaften der verwendeten Nagelplatten dargestellt.

Tabelle 1: Angaben zu den verwendeten Nagelplatten

| Nagelplatte | Blechdicke [mm] | Nagellänge [mm] | Nageldichte [Nägel/cm ²] | Form der Nagelspitze |
|-------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|----------------------|
| 1 | 1,0 | 8,3 | 1,076 | scharfkantig |
| 2 | 2,0 | 21,0 | 0,286 | stumpf |
| 3 | 1,0 | 8,5 | 1,240 | scharfkantig |
| 4 | 2,0 | 15,0 | 0,465 | stumpf |

Die Bezeichnung der Prüfkörper entspricht folgendem Schema:



In Tabelle 2 ist der Versuchsplan für jede der vier untersuchten Nagelplatten dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsprogramm für jede der vier Nagelplatten

| Versuchsreihe zur Nagelplatte X | Winkelkombination Y | Anzahl pro Winkelkombination | angestrebte Einpressfeuchte [%] | angestrebte Prüffeuchte [%] |
|---------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| XY1212 | 1, 2, 3, 4 | je 5 | 12 | 12 |
| XY1812¹⁾ | 1, 2, 3, 4 | je 5 | 18 | 12 |
| XY3212 | 1, 2, 3, 4 | je 3 | 32 | 12 |
| XY1218 | 1, 2, 3, 4 | je 5 | 12 | 18 |
| XY3218 | 1, 2, 3, 4 | je 5 | 32 | 18 |
| XY3232 | 1, 2, 3, 4 | je 3 | 32 | 32 |

¹⁾ Referenzreihe

Die Versuchsreihen XY1812 wurden entsprechend den Vorschriften nach DIN EN 1075 [3] mit einer Einpressfeuchte von etwa 18 % bis 20 % hergestellt und bei einer Prüffeuchte von etwa 12 % geprüft. Als ungünstigste Versuchsreihe wurde die Feuchtekombination (32%, 32%) vorgesehen. Bei angestrebten Feuchten von 32 % wurde auch eine Feuchte oberhalb dieses Wertes akzeptiert, da der Fasersättigungspunkt bei etwa 32 % Holzfeuchte liegt und über diesem Wert keine weiteren Einflüsse auf die Verankerungsfestigkeit zu erwarten sind. Für den Feuchtebereich von 32 % wurde frisch eingeschnittenes Holz verwendet oder das Holz in einer Nasslagerung auf $\geq 32\%$ befeuchtet. Die Feuchtekombinationen (32%, 18%) und (12%, 18%) wurden durchgeführt, um einen möglichst großen Unterschied der Einpressfeuchten bei gleicher Prüffeuchte zu erhalten und somit einen direkten Vergleich hinsichtlich des Einflusses der Einpressfeuchte zu erhalten. Der Einfluss der Einpressfeuchte sollte zusätzlich durch den Vergleich der Referenzversuchsreihe XY1812 mit der Versuchsreihe XY3212 untersucht werden. Die Versuchsreihen XY1212 und XY3232 sollten die Unterschiede bei einer Herstellung und Prüfung der Verbindung bei Ausgleichsfeuchte gegenüber der ungünstigen Herstellung und Prüfung der Verbindung oberhalb des Fasersättigungspunktes belegen.

Eine ausführliche Darstellung der Untersuchungen kann [1] entnommen werden.

3 Versuchsergebnisse

Um die Traglasten und die Verankerungsfestigkeit auf eine einheitliche Rohdichte zu beziehen, wurden die Traglasten mit einem Beiwert

$$\left(\frac{\rho_k}{\rho} \right)^c$$

modifiziert.

Als charakteristische Rohdichte ρ_k wurde 380 kg/m^3 und für c die in [2], Tabelle 1 angegebenen Werte verwendet. Dabei wird angenommen, dass der Wert c nicht von der Holzfeuchte beeinflusst wird. Die Rohdichte ρ wurde auf die Normalrohichte bei 12% Holzfeuchte bezogen.

Die wirksame Anschlussfläche ist definiert als die Kontaktfläche zwischen Nagelplatte und Holz abzüglich eines Streifens von 10 mm Breite an den freien Rändern des Holzes. Die Traglast F wurde in eine auf die charakteristische Rohdichte ρ_k von 380 kg/m^3 bezogene Traglast F_{cor} umgerechnet. Die Verankerungsfestigkeit ergibt sich somit zu

$$f_{a,\alpha,\beta} = \frac{F_{\text{cor}}}{A_{\text{ef}}} = \frac{F \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho}\right)^c}{A_{\text{ef}}}$$

Der Aufbau der Versuchsreihen mit gleichen Prüfkörpergeometrien unter Variation der Einpress- und Prüffeuchte lässt einen direkten Vergleich der einzelnen Versuchsreihen zu.

In Tabelle 3 sind die Mittelwerte der Verankerungsfestigkeiten aller Versuchsreihen dargestellt. Der Versuchsumfang betrug 416 Versuche.

Tabelle 3: Mittelwerte der Verankerungsfestigkeiten der Versuchsreihen

| Nagel- platte | Winkel (α,β) | Verankerungsfestigkeit $f_{a,\alpha,\beta}$ [N/cm ²] | | | | | |
|------------------|------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Feuchtekombination Einpress-/ Prüffeuchte | | | | | |
| | | 12/12 | 18/12 | 32/12 | 12/18 | 32/18 | 32/32 |
| 1 | (0°, 0°) | 300 | 270 | 283 | 259 | 274 | 223 |
| | (90°, 0°) | 255 | 234 | 208 | 202 | 175 | 176 |
| | (0°, 90°) | 192 | 179 | 148 | 159 | 146 | 108 |
| | (90°, 90°) | 207 | 197 | 205 | 186 | 190 | 164 |
| 2 | (0°, 0°) | 249 | 259 | 281 | 217 | 221 | 235 |
| | (90°, 0°) | 211 | 206 | 194 | 165 | 173 | 146 |
| | (0°, 90°) | 179 | 168 | 164 | 165 | 152 | 137 |
| | (90°, 90°) | 219 | 170 | 163 | 191 | 184 | 129 |
| 3 | (0°, 0°) | 359 | 339 | 354 | 313 | 339 | 299 |
| | (90°, 0°) | 284 | 290 | 262 | 255 | 231 | 225 |
| | (0°, 90°) | 190 | 196 | 201 | 179 | 173 | 164 |
| | (90°, 90°) | 218 | 213 | 228 | 186 | 169 | 164 |
| 4 | (0°, 0°) | 304 | 309 | 275 | 241 | 253 | 243 |
| | (90°, 0°) | 217 | 215 | 207 | 212 | 208 | 202 |
| | (0°, 90°) | 189 | 188 | 186 | 188 | 170 | 156 |
| | (90°, 90°) | 202 | 200 | 191 | 177 | 172 | 153 |

In Bild 1 und Bild 2 sind die Mittelwerte der Verankerungsfestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen mit steigender Einpressfeuchte auf der Abszisse dargestellt.

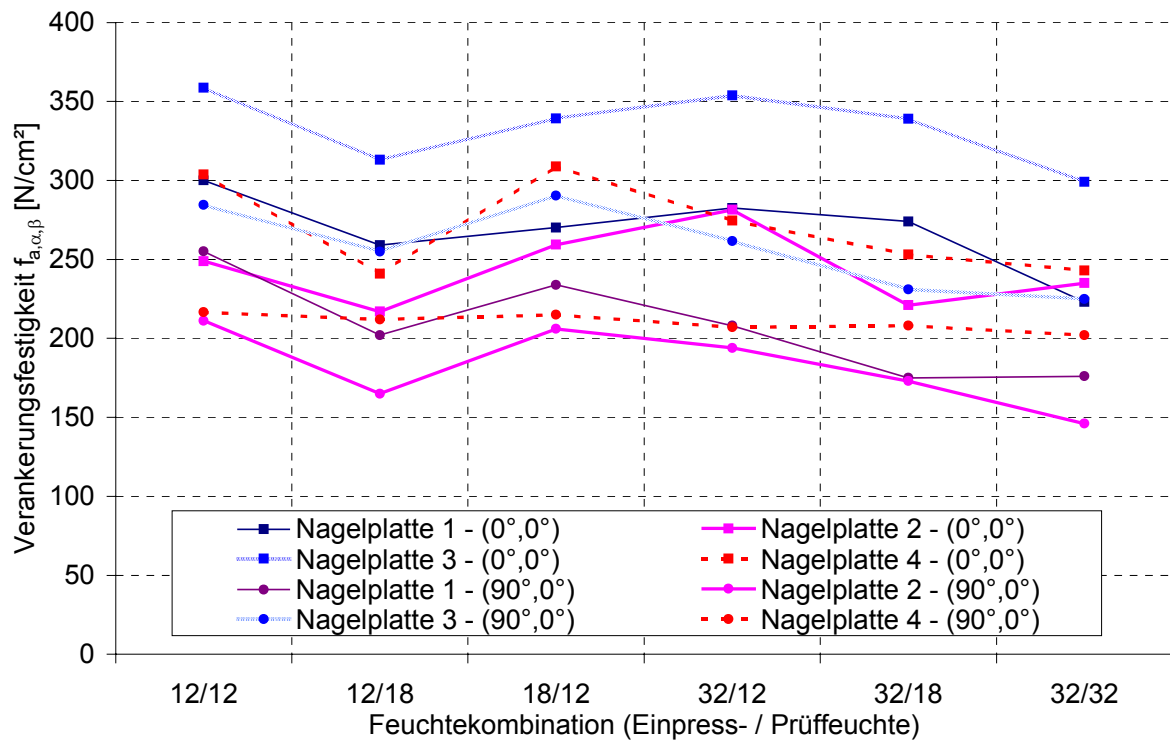


Bild 1: Mittelwerte der Verankerungsfestigkeiten für die Winkelkombinationen (α, β) von $(0^\circ, 0^\circ)$ und $(90^\circ, 0^\circ)$

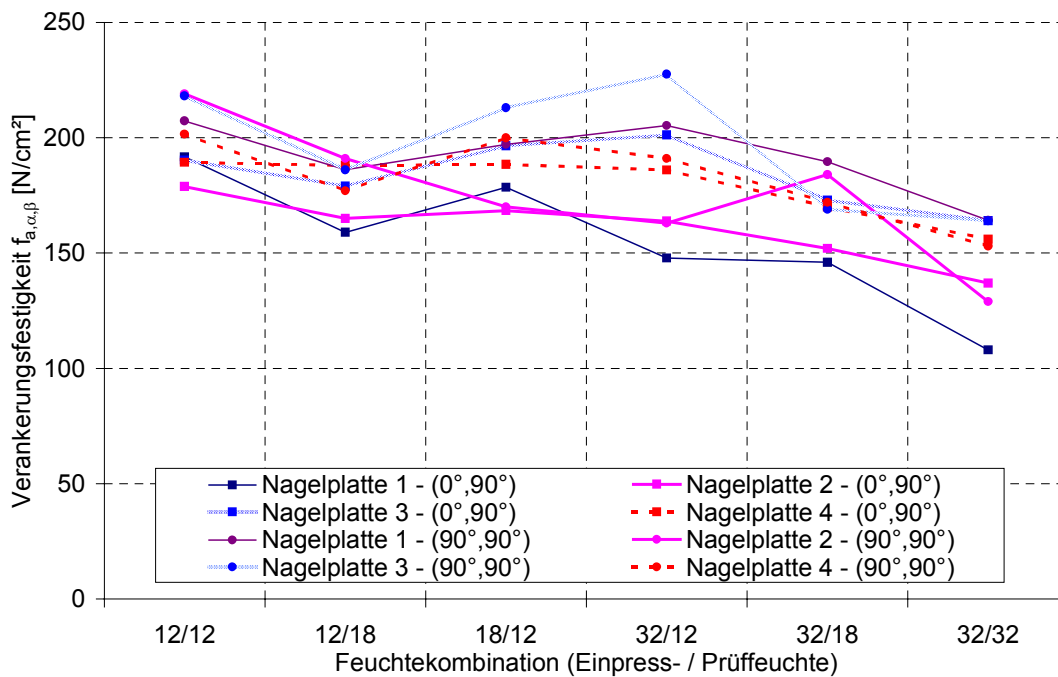


Bild 2: Mittelwerte der Verankerungsfestigkeiten für die Winkelkombinationen (α, β) von $(0^\circ, 90^\circ)$ und $(90^\circ, 90^\circ)$

Ein Vergleich der Mittelwerte der Verankerungsfestigkeiten zwischen den Versuchsreihen mit den Feuchtekombinationen (12%, 12%), (18%, 12%) und (32%, 12%) und den Versuchsreihen mit der Feuchtekombination (12%, 18%) und (32%, 18%) lässt keinen einheitlichen Einfluss der Einpressfeuchte erkennen. Dennoch sind bei einzelnen Nagelplatten und Winkelkombinationen wie z.B. der Nagelplatte 1 bei der Winkelkombination (0°, 90°) deutliche Verringerungen der Tragfähigkeit aufgrund höherer Einpressfeuchte festzustellen.

Ingesamt nimmt aber mit steigender Prüffeuchte zwischen 12 % und 32 % die Verankerungsfestigkeit deutlich ab. Diese Abnahme ist bei einem Winkel von $\beta = 90^\circ$ größer als bei einem Winkel von $\beta = 0^\circ$. Dies liegt bei steigender Holzfeuchte vermutlich an einer größeren Abnahme der Querkzugfestigkeit als der Lochleibungsfestigkeit. Eine Bestätigung hierfür sind ausgeprägte, lokale Querkzugrisse in den Nagelreihen bzw. Nagelbereichen der Versuchsreihen mit $\beta = 90^\circ$ bei steigender Feuchte.

In Bild 3 ist ein Prüfkörper bei der Feuchtekombination (32%, 32%) mit einer großen Lochleibungsverformung und in Bild 4 mit Querkzugrisse in den Nagelspalten dargestellt.



Bild 3: Große Lochleibungsverformungen bei der Feuchtekombination (32%, 32%) und Winkelkombination (0°, 0°)



Bild 4: Querzugrisse in den Nagelspalten der Nagelplatte 2 bei der Feuchtekombination (32%, 32%) und Winkelkombination (0°, 90°)

Die größte Verringerung der Verankerungsfestigkeit trat bei der Nagelplatte 1, Winkelkombination (0°,90°) bei einer Feuchtekombination von (32%, 32%) mit 42,2 % gegenüber der Referenzreihe auf. Die mittlere Verringerung der Verankerungsfestigkeit aller Versuchsreihen für die Feuchtekombination (32%, 32%) beträgt 26,5 % gegenüber den Referenzreihen. Die deutlichste Erhöhung erfolgte bei der Versuchsreihe 241212 bei einer Feuchtekombination von (12%, 12%) mit 29,0 % bei einem Mittelwert aller Versuchsreihen der Feuchtekombination (12%, 12%) von 4,3 %. Den Einfluss der Einpressfeuchte bezogen auf die Referenzreihe gibt die Feuchtekombination (32%, 12%) bzw. ein Vergleich der Versuchsreihen XY1218 mit XY3218 an. Ein Vergleich dieser Versuchsreihen ergibt keinen signifikanten Einfluss. Es sind zwar bei einzelnen Versuchsreihen deutliche Abweichungen zu erkennen – z.B. bei Versuchsreihe 133212 mit einer Verringerung von 17,3 % bezogen auf die Versuchsreihe 131812-, der Mittelwert aller Versuchsreihen hingegen ist mit 3,6 % bzw. 3,2 % Verringerung der Traglast bzw. Verankerungsfestigkeit nur unwesentlich unterhalb des jeweiligen Bezugswertes. Dennoch zeigen die vereinzelt, deutlichen Abweichungen, dass im Einzelfall ein nicht zu vernachlässigender Einfluss vorhanden sein kann.

In Tabelle 4 sind die Minimalwerte, Maximalwerte und Mittelwerte der Abweichung bezogen auf die Feuchtekombination (18%, 12%) dargestellt.

Tabelle 4: Abweichungen der mittleren Verankerungsfestigkeiten von der jeweiligen Referenzversuchsreihe XY1812 bzw. Versuchsreihe XY1218

| Feuchte- kombination | Minimum ¹⁾ [%] | Maximum ¹⁾ [%] | Mittelwert ¹⁾ [%] |
|--|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| bezogen auf den Mittelwert der jeweiligen Versuchsreihe XY1812 | | | |
| (12%, 12%) | -4,1 | 29,0 | 4,3 |
| (32%, 12%) | -17,3 | 8,4 | -3,6 |
| (12%, 18%) | -22,7 | 11,0 | -11,1 |
| (32%, 18%) | -25,9 | 7,4 | -14,1 |
| (32%, 32%) | -42,2 | -14,4 | -26,5 |
| bezogen auf den Mittelwert der jeweiligen Versuchsreihe XY1218 | | | |
| (32%, 18%) | -13,9 | 7,9 | -3,2 |

1) positives (negatives) Vorzeichen entspricht einer Erhöhung (Verringerung) der Verankerungsfestigkeit

Neben den teilweise sehr ungünstigen Tragfähigkeitseigenschaften bei Nagelplattenverbindungen mit zu feuchtem Holz wurde ohne entsprechenden Holzschutz eine ästhetische Beeinträchtigung durch beginnenden Pilzbefall beobachtet, so dass auch aus diesem Grund die Verwendung von zu feuchtem Holz vermieden werden sollte. Ein typischer Prüfkörper der Feuchtekombination (32%, 32%) ist in Bild 5 dargestellt.

Auch unterschiedliche Holzfeuchten der einzelnen Hölzer von Nagelplattenbindern sind bei der Herstellung unbedingt zu vermeiden. Einerseits stellt sich durch das größere Schwinden der anfangs feuchteren Hölzer eine unterschiedliche Holzdicke im Zustand der Ausgleichsfeuchte ein, andererseits besteht die Gefahr des Längsschwindens durch größere Anteile von juvenilem Holz oder Druckholz und der damit verbundenen Zwängungsbeanspruchungen.



Bild 5: Beginnender Pilzbefall bei einer Feuchtekombination von (32%, 32%)

4 Vorschlag für die Praxis

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass eine hohe Holzfeuchte bei der Herstellung einer Nagelplattenverbindung einen geringeren Einfluss auf die Verankerungsfestigkeit hat als eine Feuchtezunahme nach der Herstellung.

Eine hohe Einpressfeuchte kann vereinzelt einen deutlich negativen, jedoch schwer abschätzbaren Einfluss auf die Verankerungsfestigkeit haben. Zusätzlich kann bei erhöhten, nicht normgerechten Herstellfeuchten nicht davon ausgegangen werden, dass bei der Erstbelastung der Verbindung im Bauwerk eine schon deutlich niedrigere und somit günstigere Holzfeuchte vorliegt.

Größere Feuchteänderungen sollten grundsätzlich vermieden werden, da beim Austrocknen oder bei der Feuchteaufnahme Schwind- und Quellverformungen auch in Längsrichtung der Hölzer auftreten können. Insbesondere unterschiedliche Längenänderungen der Hölzer eines Nagelplattenbauteils, die z.B. bei juvenilem Holz oder Druckholz beträchtliche Werte annehmen können, führen bereits ohne äußere Beanspruchungen zu deutlichen Vorbelastungen der Bauteile und Verbindungen, die in der Bemessung nicht berücksichtigt sind.

Aus diesen Gründen wird eine Anpassung der Verankerungsfestigkeit durch Wahl einer entsprechenden Nutzungsklasse vorgeschlagen. Zur Berücksichtigung einer Holzfeuchte über 20 % entweder beim Herstellen der Verbindung oder während der Nutzungsdauer des Bauteils wird eine Einstufung in die Nutzungsklasse 3 nach

DIN V ENV 1995 [4] bzw. E DIN 1052, Ausgabe Mai 2000 vorgeschlagen. Die Nutzungsklasse 3 erfasst Klimabedingungen, die zu einer höheren Ausgleichsfeuchte des Holzes führen als die in DIN 1052, Ausgabe 1988 festgelegte Holzfeuchte von 20 % für die Herstellung. Aus der Änderung der Nutzungsklasse ergibt sich durch den Modifikationsbeiwert k_{mod} eine Reduzierung des Bemessungswertes der Verankerungsfestigkeit $f_{a,\alpha,\beta,d}$. Die Nutzungsklasse wird bei erhöhter Herstellfeuchte des Holzes somit nicht auf die Ausgleichfeuchte im Bauwerk, sondern auf die Herstellfeuchte selbst bezogen.

Bei einer Dachkonstruktion mit der Klasse der Lasteinwirkungsdauer kurz und Nutzungsklasse 2 ergibt sich z.B. bei normgerechter Herstellung für eine Ausgleichsfeuchte des Holzes von 20 % ein Wert für k_{mod} von 0,90. Bei höheren Holzfeuchten bei der Herstellung der Nagelplattenverbindung sollte ein k_{mod} - Wert von 0,70 entsprechend der Nutzungsklasse 3 angesetzt werden. Die Höhe der Abminderung der Verankerungsfestigkeit entspricht in diesem Beispiel 22 %. Für die verschiedenen Klassen der Lasteinwirkungsdauern ergeben sich Abminderungen zwischen 17 % und 22 %. Diese Abminderungen sind etwas geringer als die mittlere Abweichung der Verankerungsfestigkeit von 26,5 %, bezogen auf die Versuchsreihen XY1812 nach Tabelle 4.

Bei Anwendung der DIN 1052, Ausgabe 1988, wird eine Abminderung der Verankerungsfestigkeit um 1/6, entsprechend Teil 1, Abs. 5.1.7, bei einer Herstellfeuchte oberhalb der nach DIN 1052, Ausgabe 1988, Teil 2, Abs. 10.4 angegebenen Herstellfeuchte empfohlen.

Literatur

- [1] BLAß, H.J.; ROMANI, M. (2001); Einfluss der Holzfeuchte auf die Tragfähigkeit von Nagelplattenverbindungen; Forschungsvorhaben der Universität Karlsruhe (TH)
- [2] BLAß, H.J.; KURZWEIL, L. (1999); Einfluss der Rohdichte auf die Tragfähigkeit von Nagelplattenverbindungen; Forschungsvorhaben der Universität Karlsruhe (TH)
- [3] DIN EN 1075, AUSGABE JULI 2000, (2000) Prüfverfahren, Verbindungen mit Nagelplatten
- [4] DIN V ENV 1995, (1995) Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken