Beanspruchungs- und Optimierungs-potentiale selbstbohrender Holzschrauben

Loading and optimization potential of self-drilling timber screws

Résistance et potentiels d'optimisation des vis bois autoforantes

Potenziale di sollecitazione e d'ottimizzazione delle viti per legno autoperforanti

Gernot Pirnbacher
DI
Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz
Graz, Österreich

Beanspruchungs- und Optimierungs-potentiale selbstbohrender Holzschrauben

1. Einleitung

Auf Basis der EN 1382:1999 [1] wird der Widerstand eines Verbindungsmittels gegen Herausziehen aus dem Bauteil durch eine standardisierte Prüfung – unter einer exakt definierten Belastungsgeschichte und der vorhergehenden Konditionierung im Standardklima 20°C/65% RH bestimmt – dadurch ist auch der Feuchtegehalt der Probe mit ~12 % festgelegt und variiert um rund ± 1%. Der axiale Widerstand ist der primäre Mechanismus mit dem Verbindungen, die in Richtung ihrer Achse belastete Schrauben einsetzen, bemessen werden – der Anteil aus dem Abscheren wird für die Bemessung eines Anschlusses nicht berücksichtigt. Auswirkungen aus der Variation der Holzfeuchte, der (Holz-) Temperatur beim Eindrehen oder Herausziehen oder ob der Einbau vorgebohrt bzw. selbstbohrend erfolgt, sind in aktuellen Normenwerken nicht enthalten. In den gültigen Regeln der EN 1995-1-1:2004-11[2] und –A1 [3], der DIN 1052:2008 [4] und den technischen Zulassungen werden die Parameter effektive Länge l_{ef}, Durchmesser d und Neigungswinkel zur Faserrichtung a berücksichtigt.

2. Stand der Technik

In den gültigen Normen hängt der Ausziehwiderstand von der Rohdichte, dem Durchmesser und der Länge ab [2], [3], [4], [8]. Die Bestimmungsgleichung für die Ausziehfestigkeit (bezogen auf die Mantelfläche, π wird im Parameter eingerechnet) weist allgemein folgende Form auf:

$$f_{ax} = A \cdot d^B \cdot l_{ef}^C \cdot \rho_k^D$$

Tabelle 1: Konstanten der Bestimmungsgleichungen für f_{ax}

Norm	A	A	B	C
EN 1995-1-1:2004/A1 [3]	0.52	-0.5	-0.1	0.8
DIN 1052:2004 [4]	$(60 \div 80) \cdot 10^{-6}$	0.0	0.0	2.0
SIA 265:203 [8]	$30 \cdot 10^{-3} \cdot \pi^{-0.2}$	-0.2	-0.2	1.0

Die Versuchsplanung ist auf die grundlegenden Parameter der Bestimmungsgleichungen abgestimmt und ergänzt weitere Parameter wie die Temperatur und die Holzfeuchte. Cockrell [7] bestimmte für die Schraubendurchmesser 6, 8 und 10 den mittleren Einfluß der Holzfeuchte für verschiedene Holzarten mit 1.5% der Tragfähigkeit pro % Holzfeuchte. Diese Schrauben wiesen einen Durchmesser zwischen 3.5 und 4.8 mm und eine Gewindelänge von 20 mm auf. Diese Werte entsprechen nicht den Größen der im modernen Holzbau eingesetzten Schrauben, wodurch die Gültigkeit hinterfragt und/oder verifiziert werden muß. Newlin und Gahagan [9] stellten einen linearen Zusammenhang zwischen dem Ausziehwiderstand und der eingedrehten Gewindelänge fest. Die auf den nächsten Seiten gezeigte Untersuchung wurde geplant, um ein zusammenhängendes Bild der Auswirkungen aller untersuchten Parameter zu erhalten.

3. Ziel

Um eine solide Referenz und fundierte Aussagen zum Einfluß der unterschiedlichen Parameter zu erarbeiten, wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm, das auf diese Grundkennwerte ausgerichtet ist, am Institut für Holzbau und Holztechnologie und der holz.bau forschungs gmbh gestartet. Ziel ist es, Erkenntnisse über den Einfluß folgender grundlegender Parameter zu erarbeiten:

- Holzfeuchte
- Temperatur beim Eindrehen und Herausziehen
- Schraubendurchmesser
- Schlankheit (l_{ef}/d)
- effektive Gewindelänge l_{ef}
- Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung
- Vorbohren
- alle Versuche in Brettschichtholz (BSH) und Vollholz (VH)

Die Anzahl der in der statistischen Auswertung berücksichtigten Ausziehversuche beträgt 5524. Alle Parameter wurden senkrecht und parallel zur Faser untersucht.

4. Versuchsprogramm

Für die Hauptserie wurde ein "Matched Sample"-Ansatz gewählt. Das eingesetzte Material ist Fichte (picea abies). Die Prüfkörper aus Vollholz (VH) wurden aus dem Grundmaterial der Festigkeitsklasse C24 (bestellt wurde die Sortierklasse S10) hergestellt, für die Prüfkörper aus Brettschichtholz (BSH) wurde die Festigkeitsklasse GL28h eingesetzt. Die Balken wurden in Prüfkörper aufgetrennt und diese nach ihrem Gewicht in die „Matched-Sample"-Gruppen eingeteilt. Diese Vorgehensweise führt zu kohärenten Gruppen für die Versuchsserien und führt zu vergleichbaren Verteilungen auch innerhalb der Kleinproben für die Rohdichtebestimmung (die Mittelwerte der Untergruppen variieren minimal, obwohl die Einteilung nach dem globalen Prüfkörpergewicht erfolgte).

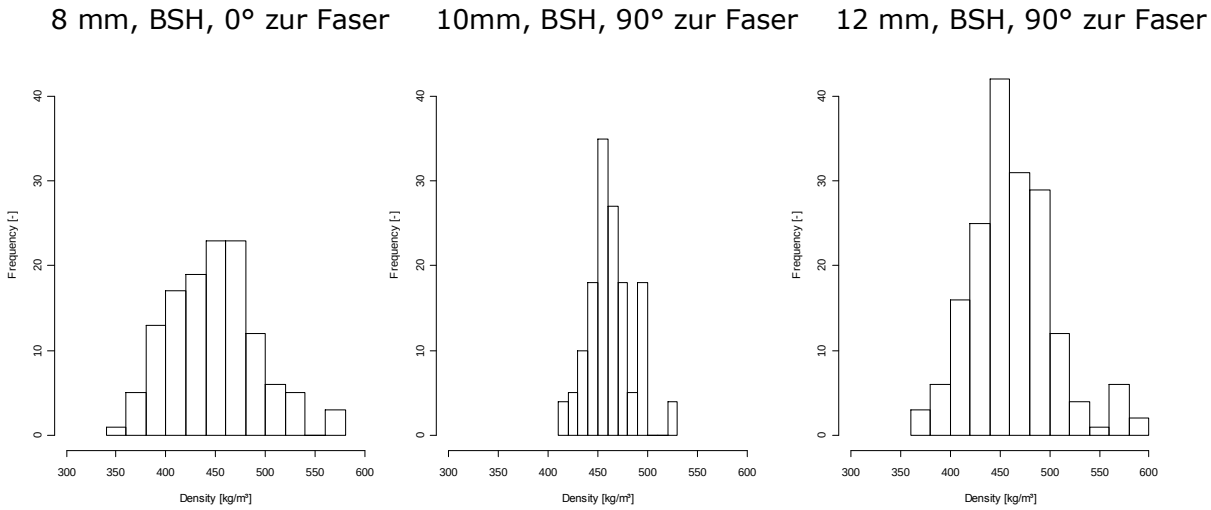


Abbildung 1: Histogramme der Rohdichte bei 12% Holzfeuchte für ausgewählte Untergruppen ($V_{ref} = \mathbf{4d \cdot 4d \cdot l_{ef}}$)

Die einzelnen Prüfkörper wurden über die Länge der Träger (100/280 mm oder 120/180 mm mit 4000 mm (VH) oder 8000 mm (BSH) Länge) in Abschnitte von 180 mm geschnitten. Bereiche mit hohen Astanteilen wurden während der Vorbereitung herausgeschnitten. Die einzelnen Würfel wurden dann gewogen und den Untergruppen zugeordnet. In jedem Würfel ist genug Holzvolumen vorhanden um zumindest 5 Einzelversuche durchzuführen. Dies machte es möglich in jedem „Würfel" alle Stufen eines Parameters zu untersuchen – z.B. wurden für den Parameter Feuchtegehalt die Werte 0% (ofentrocken), 6%, 12% und 20% in jedem Prüfkörper untersucht. Für die Holzeigenschaften jedes „Würfels" – in einem kleinen Volumen von max. $100 \cdot 280 \cdot 180$ mm oder 5.04 dm³ – wurden die Widerstandswerte für alle Parameter und -stufen bestimmt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass für die Prüfung ungeeignete Abschnitte während der Herstellung ausgekappt wurden, dürfen für die einzelnen Prüfkörper homogene Bedingungen angenommen werden.

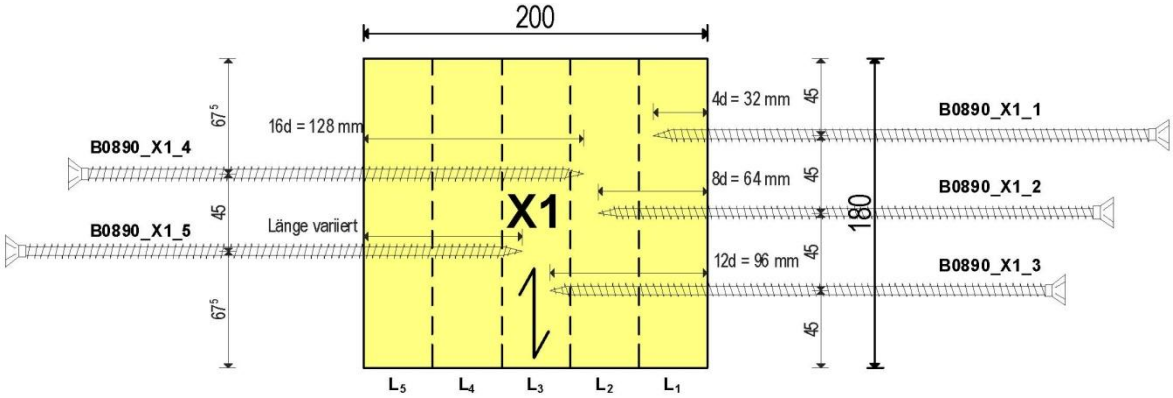


Abbildung 2: Übersicht über die Versuchsanordnung in einem "Würfel", z.B. aus der Serie B0890 [5]

Für die untersuchten Parameter wurden folgende Werte untersucht:

Tabelle 2: Übersicht der Parameterstudie inkl. geplanter Werte und zugehörige konstant gehaltene Parameter

Parametervariation	d [mm]	Parameterwerte (Konstanten oder Mittelwerte)	festgehaltene Werte
Feuchtegehalt **MC** [%]	8	0%, 6%, 12%, 20%	T,D,EL,EM,AG,PD
Temperatur [°C]	8	-20°, 0°, 20°, 50° C	MC,D,EL,EM,AG,PD
Durchmesser	8,10,12	8, 10, 12 mm	MC,T,SL,EM,AG,PD
Effektive **L**änge [mm]	8,10,12	**S**ch**L**ankheit of 4, 8, 12, 15d	MC,T,D,EM,AG,PD
Einbindetiefe **EM** [mm]	8	0, …, 240 mm	MC,T,D,EL,AG,PD
Eindrehwinkel **AG** [deg]	8	0° …/12.5°/… 90°	MC,T,D,EL,EM,PD
Vorbohren **PD** [Ja/Nein]	8	0° …/12.5°/… 90°	MC,T,D,EL,EM,AG

(Referenzen auf die einzelnen Parameter werden mit den Kürzeln in Fettdruck in Tabelle 2 gekennzeichnet)

Die Ausziehprüfungen wurden mit Schrauben der Fa. WÜRTH – der ASSY II; 8x400/100 mm Schraube (alle Serien außer „EL" & „EB") – und mit Schrauben zweier anderer Hersteller durchgeführt (Serien „EL" und „EB"). Die Teilgewindeschraube der Fa. Würth wurde ausgewählt, weil die Fehlerquelle aus der ungewollten Variation der effektiven Länge (Meß-, Markier- und Eindrehfehler) durch die exakt gegebene Gewindelänge generell ausgeschlossen wird. Von dieser Regel wurde nur abgewichen, wenn – wie z.B. in der Serie „EL" – die Gewindelänge variiert wurde.

Der Versuch wurde mit Hilfe von zwei Prüfgerüsten durchgeführt. Der Proceq Z-25FS Haftzugprüfer wurde für alle Versuche an Schrauben mit dem Durchmesser 8 mm eingesetzt. Weitere Versuche – alle Serien mit den Durchmessern 10 mm und 12 mm (bedingt durch die höheren Bruchlasten, die über dem 25 kN Limit des Haftzugprüfers lagen) – wurden mit der Prüfmaschine LIGNUM-UNI-275, einer Universalprüfmaschine der Fa. Zwick-Roell mit einer maximalen Kraft von 275 kN, durchgeführt. Alle Versuche wurden mit einer Lastverteilungsplatte zwischen Prüfgerüst und Prüfkörper durchgeführt. Diese Lastverteilungsplatte garantiert die gleiche Lasteinleitung auf beiden Prüfgerüsten und definiert den unbelasteten Bereich rund um die Schraube. Das Loch zur Durchführung der Schrauben in der Platte wurde mit einem Durchmesser von 4d definiert (eine leichte Abweichung von der EN 1382 [1] die angibt: „kein Teil der Lasteinleitung soll innerhalb von 3d liegen").

Abbildung 3: Prüfgerüste: Bilder des Aufbaues in der Lignum-Uni-275 und des Proceq Z-25FS Haftzugprüfers

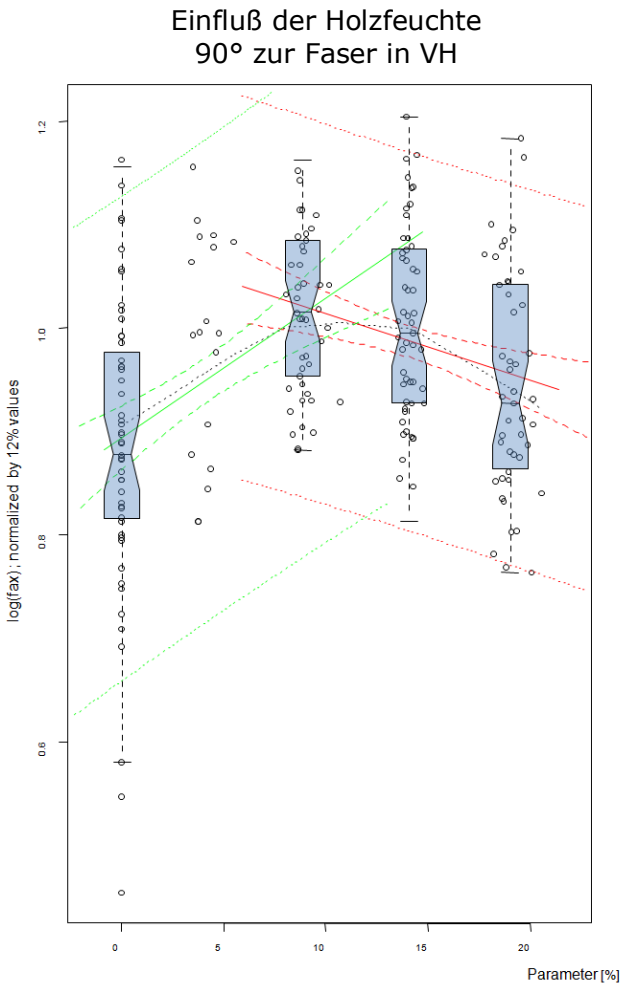
Nach dem Abschluß der Versuche wurde jeder der „Würfel" in kleine Proben mit den Abmessungen $4d \cdot 4d \cdot l_{ef}$ geschnitten, um den Feuchtegehalt und die Rohdichte zu bestimmen. In den Gruppen bei denen die Kleinproben eine Überschneidung aufweisen (Serien mit Durchmesservariation) wurde eine Scheibe ($40 \cdot 180 \cdot 200$ mm oder 1.44 dm³), die alle Kleinproben beinhaltet, herausgeschnitten (dies führt lt. den Untersuchungen in [5] zu einem Fehler von ~±2% im Vergleich zu den Kleinproben). Zusätzlich wurden die Jahrringbreiten und – nach dem Aufspalten der Kleinproben – die Länge von Astdurchdringungen gemessen (nicht der Astdurchmesser).

Abbildung 4: Ausgewählte Kleinproben für Rohdichte und Holzfeuchte mit „clear wood", Ast und einer Harzgalle

5. Analyse

Die Analyse wurde mit dem Statistikpaket R 2.9.1 [10] und den Programmen Excel sowie Tinn-R durchgeführt. Für alle Serien wurde die Anwendbarkeit der Normalverteilung verifiziert oder durch partielle Anwendung von Transformationen (i.d.R. eine Logarithmisierung) gewährleistet. Falls nicht anders angegeben, wurden alle der folgenden Abschnitte auf einen Referenzwert (i.d.R. ein auf das Standardklima bezogener Wert) normiert. Die Referenzwerte sind 12 % für die Holzfeuchte, 20° Celsius für die Temperatur, 90° Referenz für den Winkel zur Faserrichtung, 8 mm als Referenz für den Einfluss des Durchmessers und abschließend für die Serie zur Einbindetiefe ist der Referenzwert festgelegt mit dem Widerstand, der bei einer Einbettung des Gewindes von 15 mm erreicht wurde. Die Parameter der Normierung sind in jeder Abbildung auf der y-Achse angegeben. Das Ziel der statistischen Analyse war es, eine Beschreibung des Verhaltens im Bereich der Mittelwerte zu erarbeiten (und im 5 %-Fraktilbereich für die Hankinson Beziehung und die Ausziehfestigkeit). Um aussagekräftige Mittelwertmodelle zu erhalten wurde eine Ausreisserbereinigung vorgenommen. Alle Extremwerte, die direkt Ästen, Harzgallen, Abweichungen im Versuche oder Messfehlern zugeordnet werden konnten, wurden nicht berücksichtigt. Weitere Extremwerte – die nicht auf Abweichungen im Prüfkörper oder von der Prüfvorschrift zurückgeführt werden konnten – wurden nicht berücksichtigt, wenn sie außerhalb der Bandbreite von ∓ dreimal dem IQR ausgehend vom Mittelwert lagen. Für jeden Parameter wurde eine repräsentative Serie ausgewählt und in den folgenden Abbildungen beispielhaft gezeigt.

5.1. Einfluß der Holzfeuchte



Diese Serie wurde für vier Zielfeuchtigkeiten mit den Werten 20%, 12%, 7% und 0% (ofentrocken) ausgelegt, und in dieser Reihenfolge geprüft. Durch Hystereseeffekte während der Anpassung der Holzfeuchte auf die Zielwerte wurden die vorgesehenene Werte nicht exakt erreicht. Die zum Versuchszeitpunkt vorliegenden Werte waren 0%, 9%, 14% und 19%. Die Untergruppen in dieser Serie waren unterteilt in BSH oder VH und Eindrehrichtung parallel oder rechtwinklig zu Faser. Abb. 5 zeigt das Verhalten für VH und rechtwinklig zur Faser eingedrehter Schrauben. Erkennbar ist die deutliche Teilung in zwei Modi: für Holzfeuchten unterhalb von 10% tritt ein starker Anstieg des Anteiles der Sprödbrüche auf – die Prüfkörper wurden hier vollständig durchgespalten. Auch kleinere Risse im Prüfkörper bilden sich früher und führen zu einer Abminderung der Ausziehwiderstände auf 88% bezogen auf die Werte bei einer Holzfeuchte von 12%.

Abbildung 5: Einfluss der Holzfeuchte für Vollholz, Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung eingedreht

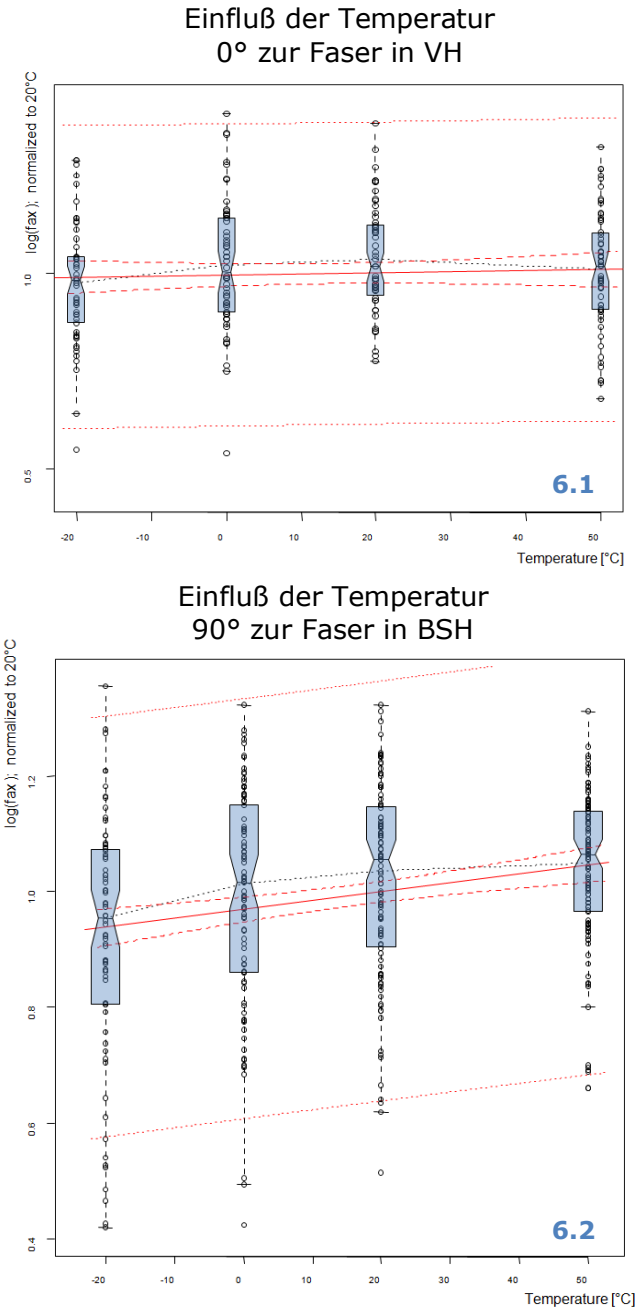
In Prüfkörpern mit mehr als 10% Feuchtegehalt kann ein stetiger Abfall von f_{ax} beobachtet und mit einer linearen Funktion beschrieben werden:

$$k_{mc} = 1.078 - 0.0065 * m.c.[\%] \quad \text{für Holzfeuchten} \geq 12\%$$

Um diese Gleichung in Zahlen zu beschreiben: Ausgehend vom Referenzwert bei 12% beträgt die Abminderung der Scherfestigkeit an der Schraubenmantelfläche -5% für eine Holzfeuchte von 20%. Für Holzfeuchten oberhalb der Fasersättigung muss dieser Zusammenhang noch verifiziert werden, eine lineare Extrapolation würde zu -12% bei einer Holzfeuchte von 30% führen. Da ein Feuchtegehalt unter 7-8% in der Praxis selten auftritt, kann eine Berücksichtigung der Holzfeuchte in der folgenden Form erfolgen:

$$k_{mc} = \begin{cases} 1.00 \\ 1.00 - 0.0065 * (u[\%] - 12) \end{cases} \; for \; \begin{cases} 8\% \leq m.c. \leq 12\% \\ 12\% < m.c. \leq 20\% \end{cases}$$

Für die Nutzungsklassen 1 und 2 ist der Beiwert k_{mod} mit gleichen Größen festgesetzt. Durch diesen Umstand wird vorgeschlagen für die Nutzungsklasse 2 den Beiwert für die Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte mit $k_{mc} = 0.95$ festzusetzen.



5.2. Einfluß der Temperatur

Dieser Abschnitt der Untersuchung wurde mit Temperaturen von 50°, 20°, 0° und -20° C durchgeführt. Die einzelnen Untergruppen zeigen geringe Unterschiede. Für Schrauben parallel zur Faser – in BSH und VH – ist kein Einfluss der Temperatur nachweisbar (Abb. 6.1). Für Schrauben, die rechtwinklig zur Faserrichtung eingedreht sind, zeigen sich entgegengesetzte Tendenzen für BSH und VH. In Brettschichtholz tritt eine leichte Zunahme mit der Temperatur auf (+0.15% pro Grad Celsius), während im Vollholz eine Abminderung mit der gleichen Steigung auftritt (-0.15% pro Grad Celsius) (Abb. 6.3). Dieses unterschiedliche Verhalten ist möglicherweise ein Effekt der Jahrringlage, diese Vermutung muss allerdings noch verifiziert werden. In BSH wurden die Versuche in radialer Richtung durchgeführt, in VH liegen die Schrauben – bedingt durch den vorliegenden Einschnitt – i.d.R. tangential zur Faser. In der verallgemeinerten Beschreibung zeigt sich kein Einfluss der Temperatur (die Effekte aus BSH und VH heben sich gegenseitig auf).

Abbildung 6.1 and 6.2: Einfluß der Temperatur für BSH; 0°(1) und 90°(2)

Einfluß der Temperatur
90° zur Faser in VH

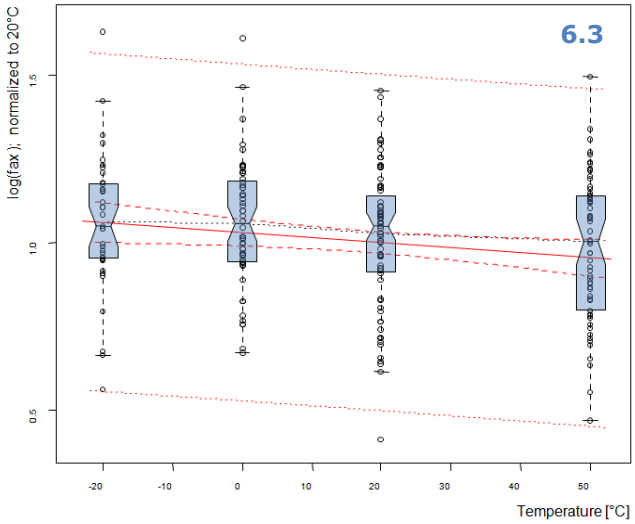


Abbildung 6.3: Einfluß der Temperatur für Vollholz; rechtwinkelig zur Faser

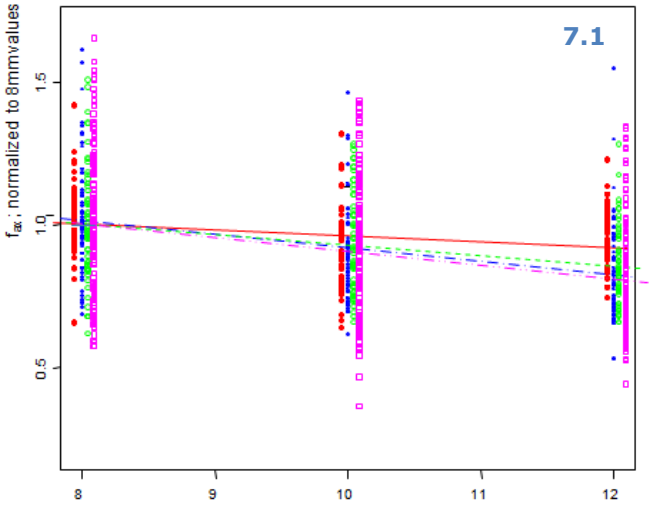
Eine Temperaturkorrektur wird daher in folgender Form vorgeschlagen:

$$ktemp=1.00 \qquad \text{for -20° to +50° C}$$

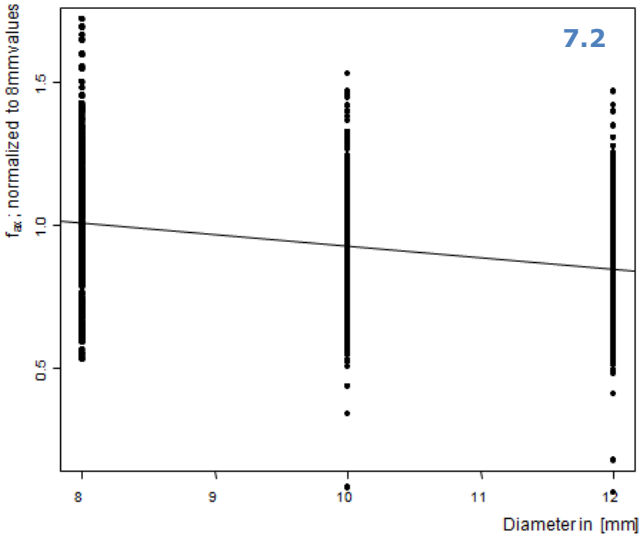
Der Anteil von Sprödbrüchen nimmt ab ~ 0°C sprunghaft zu. Alle verfügbaren Reserveprüfkörper wurden dieser Serie zugeteilt, da bereits während dem Eindrehen der Schraube sprödes Aufspalten der Prüfkörper gehäuft auftrat. I.d.R. wurden die Prüfkörper bereits bei einer Eindrehtiefe von $2 \div 4 \cdot d$ in zwei Teile gespalten. Um das Aufspalten der Würfel zu vermeiden, wurde während dem Eindrehen der Schraube eine Quervorspannung aufgebracht. Nach dem Einbau der Schraube wurde diese Verspannung entfernt und der Ausziehversuch durchgeführt. Aufgrund dieses Verhaltens wird empfohlen, Schrauben nur bei Temperaturen über 5° C einzubauen.

Einfluss des Durchmessers
0° und 90° zur Faser in VH und BSH

einzelne Gruppen:



Verallgemeinertes Modell:



5.3. Durchmesser

Die Versuchsgruppen zur Untersuchung des Durchmessereinflusses wurden mit Schrauben der Durchmesser 8 mm, 10 mm und 12 mm durchgeführt. Die Auziehfestigkeiten wurden mit dem Wert der 8 mm Schraube normiert und in Abb. 7.1 dargestellt (ein leichter horizontaler Offset wurde eingeführt um eine optische Trennung zu erlauben: GLT90°: rot (durchgezogen), GLT00°: blau (strich-punkt), VH90°: grün (strichliert), VH00° Magenta (strich-doppel-punkt)). Ersichtlich ist das gleichartige Verhalten der vier Untergruppen. Alle Material- und Richtungspaarungen zeigen ähnliches Verhalten. In Abb. 7.2 ist ein verallgemeinertes Modell dargestellt.

Abbildung 7: Einfluß des Schraubendurchmessers

Tabelle 3: Abhängigkeit von f_{ax} vom Durchmesser in [mm]

d [mm]	normiert f_{ax} [%] linear	normiert f_{ax} [%] potentiell
8	1.00	1.00
10	0.92	0.91
12	0.84	0.84

Ein lineares Modell lässt sich formulieren als:

$$f_{ax,diam} = k_{diam} \cdot f_{ax,diam=8mm} \quad \text{mit} \quad k_{diam} = 1.322 - 0.0402 \cdot d \qquad \text{d in [mm]}$$

Und alternativ in der üblichen Form als Potenzfunktion des Durchmessers:

$$k_{diam} = 2.44 \cdot d^{-0.428} \qquad \text{d in [mm]}$$

Die Potentialform wurde in der Modellierung von f_{ax} als Funktion der Rohdichte in Kapitel 5.7 eingearbeitet. Die Aufnahme erfolgte als Summenterm zum Rohdichteanteil, da die hier gezeigte Normierung eine Beschreibung des Durchmessereffektes unabhängig von Material und Eindrehrichtung erlaubt (d.h. ein von der Rohdichte unabhängiger Faktor).

5.4. Effektive Länge

Der Einfluß der Eindrehlänge der Schraube in das Holz wurde in [5] im Detail untersucht. Verglichen wurden Versuchsserien mit verschiedenen Durchmessern (d = 8, 10 und 12 mm) und verschiedenen Materialien (BSH und VH) sowie verschiedenen Eindrehwinkeln (90° und 0°). In jeder der untersuchten Serien wurden Längenabstufungen mit den Werten 4d, 8d, 12d und 15d geprüft. Die einzelnen Serien dieses Abschnittes zeigen gleiches Verhalten, repräsentativ ausgewählt, und in der folgenden Abbildung 8 gezeigt, wird die Gruppe B1290 (d = 12 mm, 90° zur Faser, BSH).

Einfluß der Gewindelänge in BSH, rechtwinkelig zu Faser, d = 12 mm;
vor und nach der Korrektur

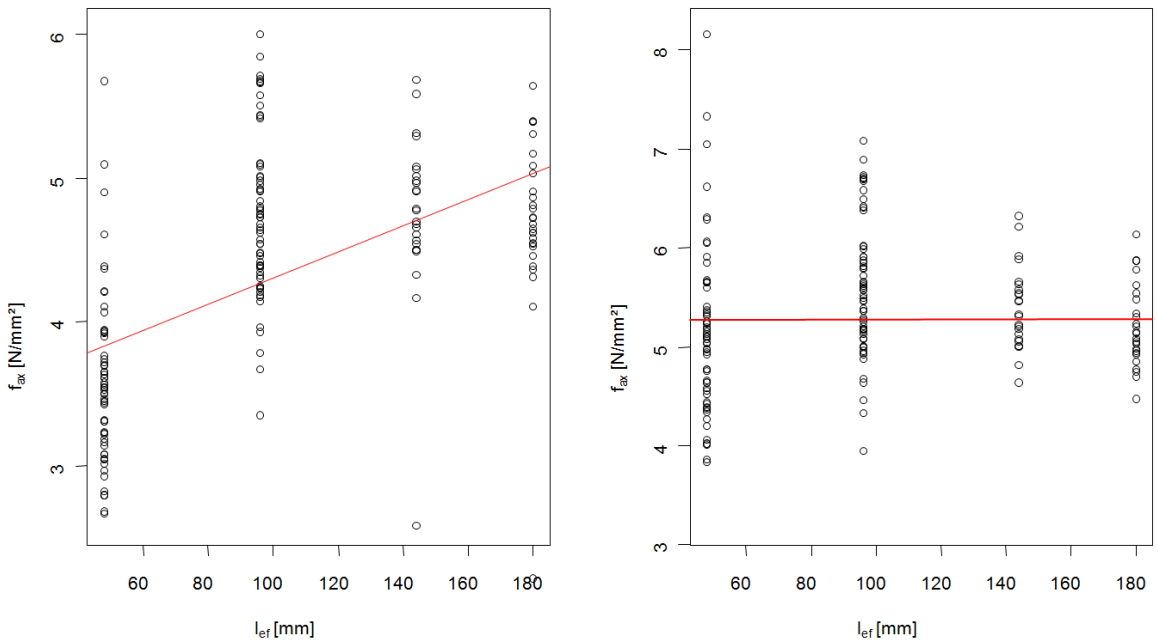


Abbildung 8: Längenkorrektur am Beispiel der Gruppe B1290 – BSH, 12 mm, 90° zur Faser

Der Ansatz der Korrektur ist einfach: Wenn die Ausgleichsgerade im Streuplot horizontal wird, ist kein Einfluß der Länge vorhanden. Dieser Ansatz wurde für alle Serien berechnet und die Ergebnisse in Tabelle 4 dargestellt:

Tabelle 4: Optimierte Längenkorrektur durch Abzug der Spitzenlänge, Ergebnisse der Einzelserien ("B" .. .Brettschichtholz , "K" .. Vollholz)

Gruppe [Material|d|Winkel]	k_{length}	Winkel	$k_{length,\ mean(angle)}$	$k_{length,\ mean}$
B0890	1.20	90°	1.15	1.17
B1090	0.93			
B1290	1.22			
K0890	1.30			
K1090	1.04			
K1290	1.18			
B0800	1.59	0°	1.21	
B1000	1.58			
B1200	0.91			
K0800	1.45			
K1000	0.80			
K1200	0.92			

Die Längenkorrektur durch Abziehen von $1.17 \cdot d$ von der Gewindelänge l_{ef} wurde in die Modellierung von f_{ax} in Kapitel 5.7 eingearbeitet (in der Berechnung der Versuchswerte für f_{ax}).

$$k_{length} = 1.17$$

5.5. Einfluß des Winkels zur Faserrichtung und des Vorbohrens

Eine weitere Untergruppe war darauf ausgelegt den Einfluß des Vorbohrens und der Eindrehrichtung zu untersuchen. Ziel war es, die Gültigkeit des Ansatzes nach Hankinson für Holzschrauben zu verifizieren. Die Winkelabstufungen innerhalb dieser Serie waren 0°, 12.5°, 25°, 37.5°, 45°, 72.5° and 90° zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes.

Tabelle 5: Verhältnis der Ausziehfestigkeiten für parallel und normal zur Faser eingedrehte Schrauben

	Verhältnis $f_{ax,90°}$ / $f_{ax,0°}$		
Typ	Mittelwerte	Median	5% Fraktile
vorgebohrt	1.20	1.25	1.45
selbstbohrend	1.26	1.28	1.50

In Abbildung 9 ist die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit vom Eindrehwinkel dargestellt (normiert auf die Werte bei mit 90° zur Faser eingedrehten Schrauben). Die Hankinson Funktion lt. EN1995-1-1:A1 [3] beschreibt die Mittelwerte gut. Nach der Verschiebung auf das 5%-Fraktilniveau werden die Festigkeiten für Eindrehwinkel über 72.5° leicht konservativ abgebildet. Eine leicht modifizierte Hankinson Funktion beschreibt die Werte auch zwischen 0° und 72.5°:

$$k_{Hankinson,modified} = \frac{1}{\sin(\alpha)^{2.2} + 1.30 \cdot \cos(\alpha)^{2.2}}$$

Diese modifizierte Hankinson Funktion beinhaltet auch die geringe Abnahme der Festigkeiten für zwischen 60° und 90° zur Faser eingedrehte Schrauben und beschreibt auch die Werte für faserparallel eingedrehte Schrauben zuverlässig.

Einfluß des Eindrehwinkels und von vorgebohrten vs. selbstbohrenden Schrauben

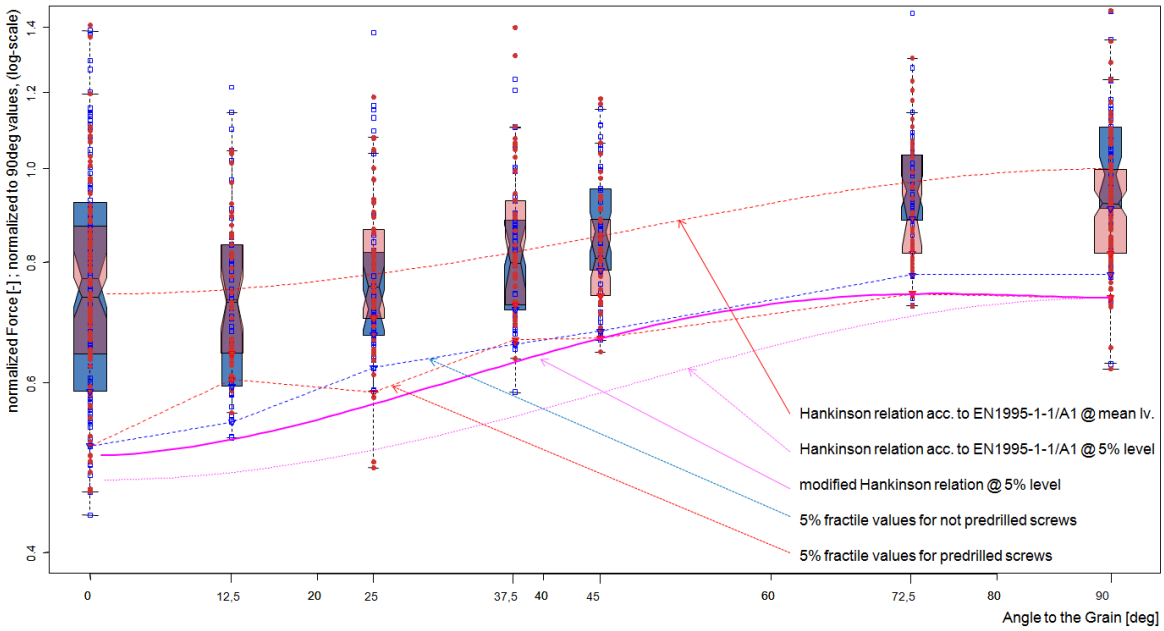


Abbildung 9: Zusammenhang Ausziehfestigkeit – Eindrehwinkel nach Hankinson, d = 8 mm

Tabelle 6 zeigt, dass keine Unterscheidung zwischen vorgebohrten und selbstbohrenden Schrauben notwendig ist. Schrauben gleichen Typs in homogenem Material (Abstand der Versuche beträgt 5d) zeigen einen Unterschied von 1.3% auf dem 5%-Fraktilniveau.

Tabelle 6: Verhältnis von f_{ax} zwischen vorgebohrten und selbstbohrenden Schrauben:

	Verhältnis von $f_{ax,selbstbohrend}$ / $f_{ax,vorgebohrt}$	
Winkel	Mittelwerte	5% Fraktile
90.0°	1.071	1.057
75.2°	1.068	1.045
45.0°	1.065	1.016
37.5°	1.045	0.988
25.0°	0.946	1.061
12.5°	1.005	0.903
00.0°	1.047	1.020
Mittelwert(Winkel)	**1.035**	**1.013**

5.6. Einbindetiefe

Der Versuchsaufbau dieser Serie weicht vom bisher genutzen Schema ab. Über die Länge von zwei BSH Trägern wurde ein Lochraster in 116 Reihen zu je drei Löchern aufgetragen. Jede Reihe wurde mit unterschiedlicher Einbindetiefe geprüft. Untersuchte Tiefen waren (gemessen zwischen dem Ende des Gewindes und der Holzoberfläche): 0 mm, 15 mm, 30 mm, 100 mm, 170 mm und 240 mm
Die Analyse der Versuche zeigt einen steilen Abfall der Festigkeiten, wenn die Einbindeteife unter den Wert von 2d fällt. Der Mittelwert der Ausziehfestigkeit für nicht eingebettete Schrauben ist 4.62 N/mm² (Teilgewindeschrauben mit d = 8 mm und l_{thread} = 100 mm), während 15 mm tief eingebettete Schrauben einen Wert von 5.21 N/mm³ erreichen. Das ist ein Unterschied von 13% (mit $f_{ax,15mm}$ als Normierungsparameter für Abb. 10).

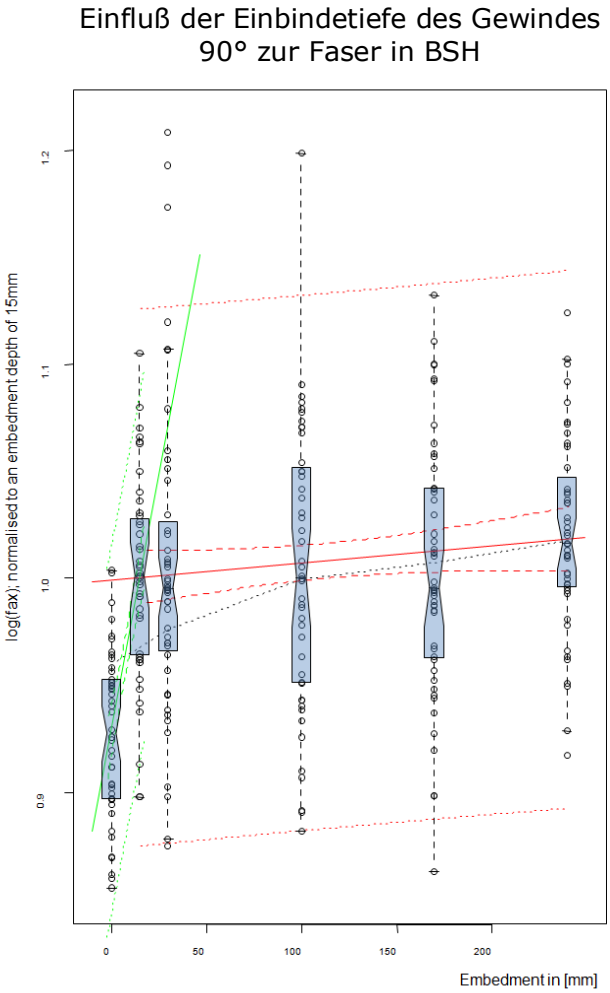


Abbildung 10: Einfluß der Gewindeeinbindung in das Holz

Der gezeigte Wert von 1.13 für k_{emb} ist konservativ da der Trend eine monotone Zunahme mit steigender Einbindetiefe zeigt. Mit der größten untersuchten Einbindetiefe von l_{emb} = 240 mm ergibt sich der größte Wert mit $k_{emb,240mm}$ = 5.43/4.62 = 1.18. Da die Versuche, die in Kapitel 5.7 (Modellierung von f_{ax}) ohne Einbindung des Gewindes durchgeführt wurden, kann ein mittlerer Wert für k_{emb} wie folgt angegeben werden:

$$k_{emb} = 1.15 \qquad \text{wenn} \quad l_{emb} \geq 2d$$

5.7. Ausziehwiderstand – Ausziehfestigkeit f_{ax}

Mit allen im Standardklima durchgeführten Versuchen (und den Temperaturgruppen, da kein nachweisbarer Einfluß aufgetreten ist) kann ein kombiniertes Modell für den Einfluß der Rohdichte erstellt werden. Eingearbeitet in die Grunddaten bzw. in das Modell selbst sind die Längenkorrektur lt. Kap 5.4 (in den Versuchswerten für f_{ax}) und der Durchmessereinfluß aus Kap. 5.3 (in der Gleichung für f_{ax}).
Das gewählte Grundmodell beschreibt die Ausziehfestigkeit als lineare Funktion der Rohdichte mit einem Summenterm, der den Durchmesser berücksichtigt. Diese Grundform wurde durch eine Regressionsanalyse den Daten angepaßt, um die Parameter A, B und C festzulegen.

$$f_{ax} \sim A \cdot \rho_{test} + B \cdot d \cdot (2.44 \cdot d^{-0.428}) + C = A \cdot \rho_{test} + B \cdot (2.44 \cdot d^{0.572}) + C$$

Abbildung 11 zeigt die Streuplots und die Ausgleichslinien die bestimmt wurden:

Lineare Regression für f_{ax} mit Gruppen für 90° und 0° zur Faser

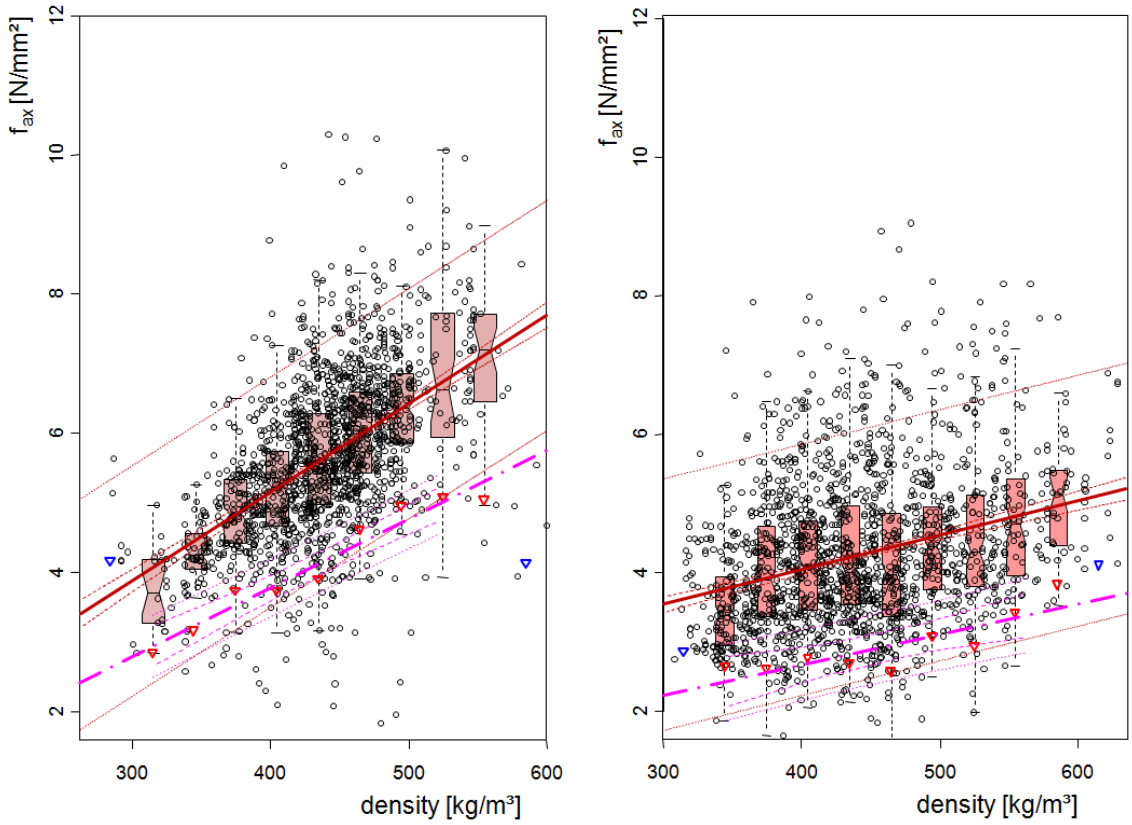


Abbildung 11: Streuplots mit Regressionsgeraden für rechtwinklig und parallel zur Faser eingedrehte Schrauben

In Tabelle 7 sind die Koeffizienten und die erreichten Werte für R² der angepassten Modelle angeführt. Der Parameter A kann interpretiert werden als „N/mm² pro kg/m³", und Parameter C ist der „Grundwert" der Festigkeit. Für rechtwinklig zur Faser eingedrehte Schrauben erreicht der Rohdichteanteil einen Wert von 1.35 N/mm² pro 100 kg/m³ Rohdichte während dieser Wert für faserparallele Schrauben auf 0.54 N/mm² pro 100 kg/m³ Rohdichte abfällt. Der Grundwert der Festigkeit für parallel zur Faser eingedrehte Schrauben ist 5.92 N/mm².

Das Verhältnis der Mittelwerte der Rohdichte zeigt die Vergleichbarkeit der Stichproben, das Verhältnis der Mittelwerte von f_{ax} für 90°/0° mit 1.32 bestätigt die Gültigkeit der Hankinson-Bedingung wie zuvor gezeigt.

Tabelle 7: Werte der Konstanten aus der Geradenanpassung, Verhältniswerte Rohdichte und f_{ax}

	Modell für 90° zur Faser	Modell für 00° zur Faser
Parameter A	0.01353	0.00538
Parameter B	-0.28147	-0.45875
Parameter C	2.18888	5.92460
R² (ohne d-Anteil)	0.32 (0.27)	0.20 (0.08)
Vh. der Rohdichten	1.009	
Vh. der Festigkeiten f_{ax}	0.75 (für Hankinson: 1.32)	

Um die Werte für f_{ax} auf dem Niveau der 5% Fraktile zu beschreiben, wurde die Gesamtserie in 30 kg/m³ breite Untergruppen unterteilt. Die im Hintergrund von Abb. 11 eingetragenen Boxplots zeigen die Verteilung dieser Abschnitte. Die Dreieckssymbole markieren die Werte der 5%-Fraktile für jeden Abschnitt. Eine Geradenanpassung nach der Transformation der gesamten Serie auf das Fraktilniveau führt zur strich-punktiert (magenta) dargestellten Ausgleichslinie in Abb. 11. Die Analyse ergibt folgende lineare Funktionen für $f_{ax,05}$:

Tabelle 8: Gleichungen für f_{ax} auf dem 5% Fraktilniveau

Gleichung für f_{ax} auf dem 5%-Fraktilniveau	
für 90° zur Faser	für 0° zur Faser
mit der transformierten Serie:	
$f_{ax} = 0.0116 \cdot \rho_{test} - 0.272 \cdot (2.44 \cdot d^{0.572}) + 1.97$ R² = 0.25	$f_{ax} = 0.0042 \cdot \rho_{test} - 0.455 \cdot (2.44 \cdot d^{0.572}) + 5.34$ R² = 0.17
Über die 5% Werte je Untergruppe (mit 30 kg/m³) !! *Die Durchmesserabhängigkeit geht bei dieser Vorgehensweise verloren!*	
$f_{ax} = 0.0099 \cdot \rho_{test} - 0.186$ R² = 0.94	$f_{ax} = 0.0044 \cdot \rho_{test} + 0.91$ R² = 0.67

Setzt man die üblichen Werte in diese Bestimmungsgleichungen ein, wird wiederum der bekannte Wert in der Hankinson-Gleichung von 1/1.35 bestätigt (z.B. wenn der Wert 380 kg/m³ eingesetzt wird, nimmt das Verhältnis den Wert von 1/1.38 an). Eine noch weitergehende Vereinfachung erscheint möglich, wenn man die Gleichung für 90° zur Faser betrachtet – hier tritt ein linearer Term mit einem kleinen Summanden auf. Darauf basierend kann folgende Vereinfachung vorgenommen werden:

$$f_{ax} = 0.0116 \cdot \rho_{test} - 0.272 \cdot (2.44 \cdot d^{0.572}) + 1.97$$

Diese komplexe Gleichung kann durch Einschränkung der Gültigkeit auf 8 und 10 mm (12 mm wird in der Praxis selten verwendet) vereinfacht werden zu:

$$f_{ax} = 0.01 \cdot \rho_{test} \qquad \text{für 90° zur Faser geneigte Schrauben}$$

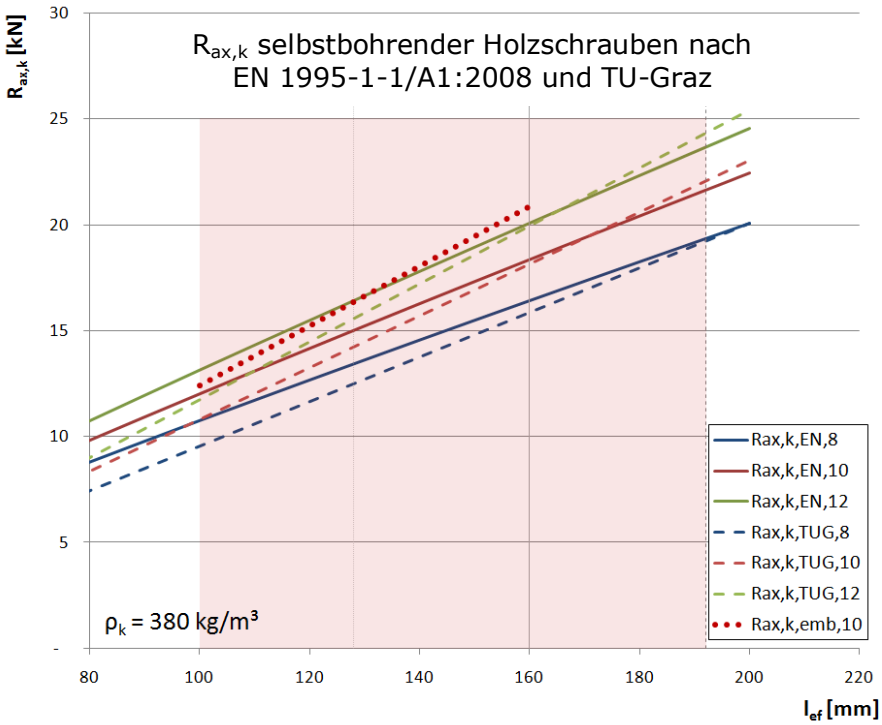


Abbildung 12: Vergleich der Werte auf Basis EN 1995-1-1/A1 und der Gleichung lt. TU-Graz

In Abbildung 12 wird die charakteristische Tragfähigkeit der Durchmesser 8, 10 und 12 mm berechnet und als Funktion der effektiven Gewindelänge l_{ef} aufgetragen. Der üblicherweise eingesetzte Bereich der Gewindelängen – zwischen 100 und 190 mm (ca. 16·d; ~ kritische Reißlänge des Stahles) – ist schattiert dargestellt. Im Vergleich zur EN 1995-1-1/A1 (durchgezogene Linie) sind die Werte nach der TU Graz für die Durcmesser 8 mm und 10 mm leicht konservativ, aber progressiv für d = 12 mm. Die Unterschiede zwischen den Werten nach der Formulierung der TU-Graz referenziert auf die Werte nach EN 1995-1-1/A1 (=100%) sind: 93.4 % für d = 8 mm, 98.1 % für d = 10 mm und 102.5 % für d = 12 mm (berechnet mit einer effektiven Länge l_{ef} = 16d). Der Effekt aus der Einbindung des Gewindes ist in der Datenreihe $R_{ax,k,emb,10}$ (punktiert) dargestellt.

6. Zusammenfassung

Die untersuchten Parameter zeigen signifikante Auswirkungen auf den Ausziehwiderstand von Schrauben. Der Effekt der Einbindung des Gewindes in das Holz ist mit mindestens +15% Tragfähigkeit, ab 15 mm Einbindetiefe, der Parameter mit dem größten Einfluß.

Zusätzlich überdeckt die Einbindung des Gewindes andere Mechanismen – z.B. die Abhängigkeit des Ausziehwiderstandes von der Eindrehrichtung (frühere Untersuchungen ohne Versenken des Gewindes deuteten auf keinen Einfluss von Winkeln zwischen 90° bis <45° hin). Die Berücksichtigung der Einbindung einer Schraube wird in folgender Form vorgeschlagen:

$$k_{emb} = 1.15 \qquad \text{für} \quad l_{emb} \geq 2d$$

Der Feuchtegehalt des Holzes beeinflusst den Widerstand mit –0.65% pro % Holzfeuchte. Die vorgeschlagene Korrektur hat folgende Form:

$$k_{mc} = \begin{cases} 1.00 \\ 1.00 - 0.0065 * (u[\%] - 12) \end{cases} \quad f\text{ür} \quad \begin{cases} 8\% \leq m.c. \leq 12\% \\ 12\% < m.c. \leq 20\% \end{cases}$$

Der Durchmesser zeigt einen Abfall des bezogenen Widerstandes von -12.5% zwischen den Durchmessern 8 mm und 12 mm. In der Gleichung für f_{ax} wird dies in folgender Form berücksichtigt:

$$k_{diam} = 2.44 \cdot d^{-0.428} \qquad \text{d in [mm]}$$

Die effektive Länge des Gewindes kann durch Berücksichtigung der Spitze bei der Bestimmung von l_{ef} berücksichtigt werden. Die Längenkorrektur wird wie folgt vorgeschlagen:

$$l_{korr} = l_{thread} - k_{length} \cdot d \quad mit$$

$$k_{length} = 1.17$$

Die Temperatur zeigt keinen nachweisbaren Einfluß auf die Ausziehwiderstände:

$$k_{temp} = 1.00 \quad \text{für -20° bis +50° C}$$

Eine modifizierte Hankinsongleichung, die auf das 5% Fraktilniveau abgestimmt ist, kann in folgender Form angegeben werden:

$$k_{Hankinson,modified} = \frac{1}{\sin(\alpha)^{2.2} + 1.30 \cdot \cos(\alpha)^{2.2}}$$

Die Abhängigkeit des Ausziehwiderstandes von der Rohdichte zeigt sich in der Regressionsanalyse deutlich. Ein Beispiel mit den bestimmten Mittelwertmodellen wird hier gezeigt:

$$f_{ax,mean,90} = 0.01353 \cdot \rho_{test} - 0.28147 \cdot (2.44 \cdot d^{0.572}) + 2.18888$$

$$\text{mit } \rho_{mean} = 450\, kg/m^3 \text{ und } d = 8\, mm$$

$$f_{ax,mean,90} = 0.01353 \cdot 450 - 0.28147 \cdot (2.44 \cdot 8^{0.572}) + 2.18888$$

$$f_{ax,mean,90} = 6.09 - 2.26 + 2.18 = 6.02\, N/mm^2$$

Die untersuchten Effekte zeigen klare Tendenzen und können für die unterschiedlichen Materialen und Winkel zur Faserrichtung normiert werden. Als Essenz der einzelnen Parameter, gekoppelt mit Beobachtungen aus der Versuchstechnik am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz, kann eine optimierte Schraube für lastabtragende Verbindungen mit außenliegenden Stahlblechen und geneigten Schrauben abgeleitet werden. Diese Schraube besteht aus einem verstärkten Schaftbereich unter dem Kopf um den Kerbeffekt der Kante des Stahlbleches zu verringern. Danach folgt ein freier Schaft mit einer Länge von ~ 1.5d um die optimale Einbindetiefe von 2d zu erreichen. Abschließend beginnt der Gewindeteil der Schraube mit einer Länge von 18-20d. Die Gewindelänge wird in dieser Größe festgesetzt, die mit der maximal nutzbaren Gewindelänge (Stahlversagen des Schraubenschaftes) korreliert.

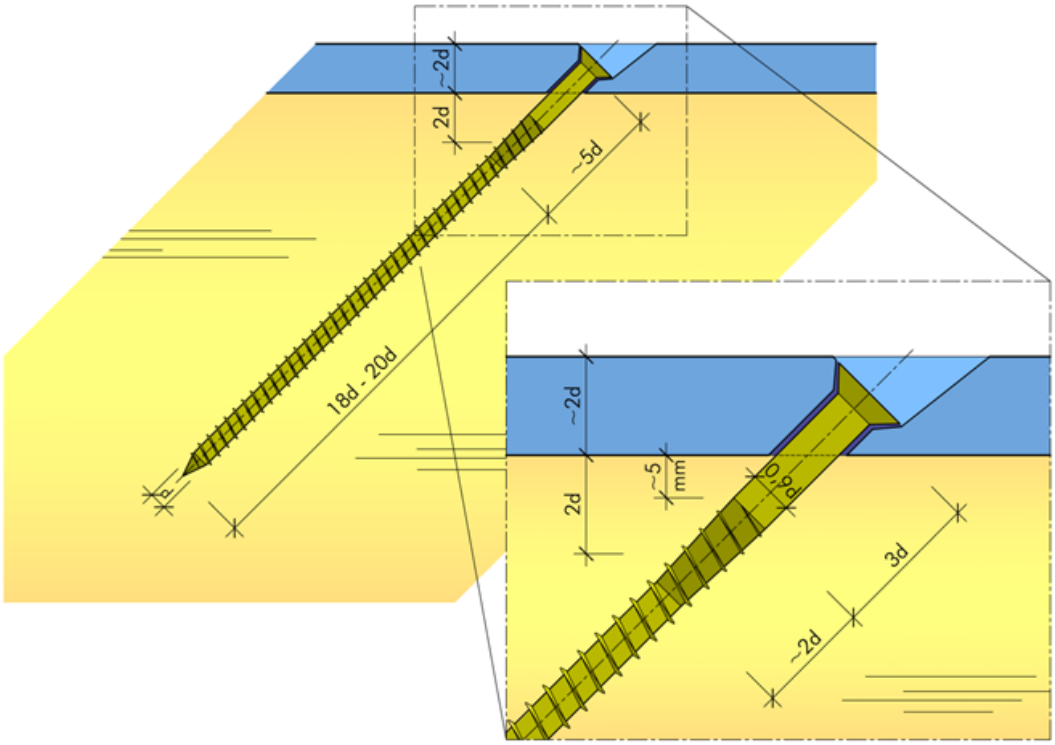


Abbildung 13: Optimierte Schraubengeometrie für lastabtragende Stahlblechverbindungen

Basierend auf den Untersuchungen zum Feuchtegehalt und Feedback aus der Praxis wird vorgeschlagen die, Anwendung von Schrauben auf die Nutzungsklassen 1 und 2 zu beschränken.

7. Danksagung

Die Arbeiten in den Forschungsprojekten P06-II FV und 1.2.1_screw_long_term werden durch die holz.bau forschungs gmbh finanziert und in Kooperation mit dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz und Industriepartnern – speziell dem **Fachverbandes der Holzindustrie** Österreichs – durchgeführt. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH gefördert.

Spezieller Dank geht an alle die an der Durchführung der großen Anzahl an Versuchen beteiligt waren. Das sind: B. Heissenberger, für das Vorbereiten der Prüfkörper und das spätere Zerschneiden dieser; T. Kröpfl, G. Flatscher, U. Hübner, die Bakk-Gang (aka Tick, Trick & Track) und aller anderen Studenten die an der Versuchsdurchführung und Datenerhebung mitgearbeitet haben, und Mr. D. B. Caldwell als Native-Speaker für die Korrektur des englischen Originalberichtes.

Zusätzlicher Dank geht an die Würth Handelsges.m.b.H., speziell Hr. G. Fessl – die Fa. Würth war so freundlich uns die Schrauben für das Projekt zur Verfügung zu stellen.

8. Referenzen

[1] EN 1382:1999 Timber structures. Test methods. Withdrawal capacity of timber fasteners.

[2] EN 1995-1-1:2004-11 Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1 General - Common rules and rules for buildings.

[3] EN 1995-1-1:2004-11:A1 Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1 General - Common rules and rules for buildings.

[4] DIN 1052:2008-12 Entwurf Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln fuer den Hochbau.

[5] GAICH, A., RINGHOFER A., WALLNER R.: Ausziehwiderstand selbstbohrender Holzschrauben in Abhängigkeit der Eindrehlänge, Baccalaureate submitted at the Institute for Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology.

[7] COCKRELL, R., A Study of the Screw-Holding Properties of Wood. Technical Publication No. 44, New York State College of Forestry, Syracuse, 1933.

[8] SIA 265:2003 Timber Structures.

[9] NEWLIN J.A., GAHAGAN J.M., Lag-Screw Joints: Their Bahaviour and Design. USDA. Technical Bulletin BNo. 597, Wahsington DC, 1938.

[10] R Development Core Team (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org.