

Praxisleitfaden

Beurteilung der Holzfeuchte für Tragwerke und Brücken für die Planung, Errichtung und Nutzung

Bettina Franke
Steffen Franke
Marcus Schiere
Andreas Müller



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Praxisleitfaden - Beurteilung der Holzfeuchte für Tragwerke und Brücken für die Planung, Errichtung und Nutzung

Autoren

Bettina Franke
Steffen Franke
Marcus Schiere
Andreas Müller

Begleitende Arbeitsgruppe

TU München, Philipp Dietsch
Lund University, Erik Serrano
Makiol Wiederkehr AG, Kurt von Felten
Pirmin Jung Ingenieure AG, Niklaus Wirz
Roth Burgdorf AG, Franz Lenherr
WaltGalmarini AG, Michael Bühler
Stalder, Büro für Projektleitungen und Baufragen, Fred Stalder
Henkel & Cie. AG, Christian Lehringer
SFS unimarket AG, Beat Ruch
Würth AG, Sylvia Hildebrandt

2. Auflage

Biel/Bienne

Berner Fachhochschule, 2019

ISBN 978-3-906878-03-4

© Berner Fachhochschule, Biel 2021

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Ohne Zustimmung des Herausgebers dürfen Inhalte oder Teile unabhängig der Form (elektronisch, kopiert, gescannt, o. a.) nicht veröffentlicht werden.

Herausgeber
Berner Fachhochschule
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Solothurnstrasse 102
2500 Biel 6
Schweiz

Vorwort

Die dargestellten Informationen und Hinweise sind im Rahmen der Forschungsprojekte «Langzeituntersuchung zu den Auswirkungen wechselnder Feuchtegradienten in blockverleimten Brettschichtholzträgern», WHFF 2013.06, und «Qualitätssicherung von Holztragwerken», WHFF 2016.17, erarbeitet worden. Beide Projekte wurden durch den Wald und Holzforschungsfond des Bundesamtes für Umwelt gefördert. Die Broschüre konzentriert sich auf ergänzende Fakten zu bestehenden Normen und Richtlinien für die Planung, Errichtung, Nutzung, Überwachung und Inspektion von Holztragwerken in Bezug auf die Holzfeuchte. Die ausführlichen Auswertungen und Ergebnisse von Versuchsreihen, aufgestellten Modellen und verwendeten Grundlagen sind den jeweiligen Forschungsberichten (Franke et al. 2016 und Franke et al. 2019) zu entnehmen. Die Broschüre hat empfehlenden Charakter und beinhaltet nicht die erforderliche Vollständigkeit für einen Qualitätsmanagementplan wie auch einen Massnahmenkatalog für die Erhaltung von Tragwerken.

Vielen Dank dem Fördergeber und vor allem allen Mitwirkenden aus der begleitenden Arbeitsgruppe aus der Forschung und der Wirtschaft im Rahmen der Forschungsprojekte.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Einführung und Grundlagen | 4 |
| 2 | Nutzungsspezifische Holzfeuchten | 6 |
| 3 | Beurteilung des globalen Klimas am Standort | 8 |
| | 3.1 Informationen von Wetterstationen | 8 |
| | 3.2 Vereinfachung der jahreszeitlichen Klimabeanspruchung | 9 |
| 4 | Einfluss auf Tragquerschnitte | 10 |
| | 4.1 Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt | 10 |
| | 4.2 Numerisches Simulationsmodell zur praktischen Anwendung | 11 |
| | 4.3 Dimensionsänderungen | 11 |
| | 4.4 Spannungsverteilungen..... | 11 |
| 5 | Brücken/Kunstabauten in Holz | 13 |
| | 5.1 Generelle Planungshinweise | 13 |
| | 5.2 Konstruktive Hinweise | 13 |
| | 5.3 Beplankung oder Beschichtung | 14 |
| | 5.4 Mechanische Verbindungen | 15 |
| 6 | Bauphase und Errichtung | 15 |
| 7 | Überwachung und Inspektion von Holztragwerken | 17 |
| 8 | Literaturverzeichnis und weiterführende Veröffentlichungen | 18 |

Vorgehen und Anwendung des Leitfadens in den Planungsschritten

- Anwendung der SIA 265:2012 mit Grundlagen und Hinweise für Holztragwerke mit normalen Ansprüchen, siehe Kapitel 1
- Anwendung der nutzungsspezifischen Profile für speziell optimierte, weitspannende Holztragwerke mit besonderer Nutzungsart, siehe Kapitel 2
- Anwendung von regionalen Wetterdaten für Holztragwerke, die vor der direkten Witterung geschützt sind, siehe Kapitel 3
- Abschätzung der Verteilung der Holzfeuchte über den Querschnitt und daraus resultierende Verformungen und feuchteinduzierte Spannungen, siehe Kapitel 4
- Planungs- und Ausführungshinweise zu Brücken in Holz, siehe Kapitel 5
- Hinweise für die Bauphase und Errichtung, siehe Kapitel 6
- Angaben zu Methoden der Überwachung/Monitoring und Inspektionen, siehe Kapitel 7

1 Einführung und Grundlagen

Holz ist ein hygroskopisches Material und stetig bestrebt sich dem umgebenden Klima durch Erreichen der Ausgleichsfeuchte anzupassen. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz sind abhängig vom Holzfeuchtegehalt, Abb. 1. Die Phasen des Abtrocknens und des Aufweichtens von Holz über den Querschnitt ist in Abb. 2 mit den resultierenden Spannungen und möglichen Rissbildern dargestellt. In Folge des Aufweichtens/Abtrocknens ändert sich die Querschnittsgeometrie. Wird das freie Schwinden und Quellen z. B. infolge von ungleichmässiger Feuchteverteilung oder innerhalb von Anschlüssen verhindert, entstehen feuchteinduzierte Spannungen, siehe Kapitel 4. Das Quell- und Schwindmass ist materialspezifisch und richtungsabhängig, vgl. Abb. 3 (*L* = Longitudinal, *R* = Radial, *T* = Tangential).

Die Holzfeuchte *u* ist das Massenverhältnis von nassen und trockenen Holz gemäss Gleichung (1) und wird in Massenprozent [M%] angegeben. Die Holzfeuchte kann exakt durch Darrproben nach SN EN 13183-1:2002 oder durch Messungen des elektrischen Widerstandes bzw. bei Kenntnis des direkten Umgebungsklimas über die rechnerische Ausgleichsfeuchte anhand der Sorptionsisothermen (Abb. 4) bestimmt werden.

$$u = \frac{m_{nass} - m_{trocken}}{m_{trocken}} \cdot 100\% \quad [M\%] \quad (1)$$

Für die Planung und Bemessung von Holztragwerken werden in der SIA 265:2012 bzw. SN EN 1995-1-1:2004 drei Feuchteklassen zur Abschätzung des Holzfeuchtegehaltes während der Lebensdauer in Massenprozent (M%) definiert, siehe Tabelle 3. Anhand der Lage der Bauteile (geschützt, teilweise geschützt, bewittert, feucht) gibt die SIA 265:2012 eine durchschnittlich zu erwartende Holzfeuchte als Jahresmittel an, zu der die Feuchtklassen und mögliche Gebäudetypen in Tabelle 3 ergänzt sind. Laut SIA 265:2012 sind: «Für Jura und Voralpen die Werte etwas höher und für die Alpentäler etwas tiefer anzusetzen. Lokalklimatische Besonderheiten sind zu berücksichtigen.»

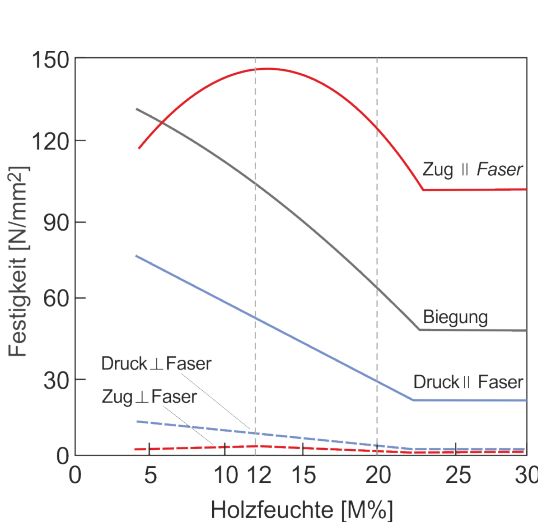


Abb. 1: Festigkeit von Holz in Abhängigkeit der Holzfeuchte, Kretschmann (2010)

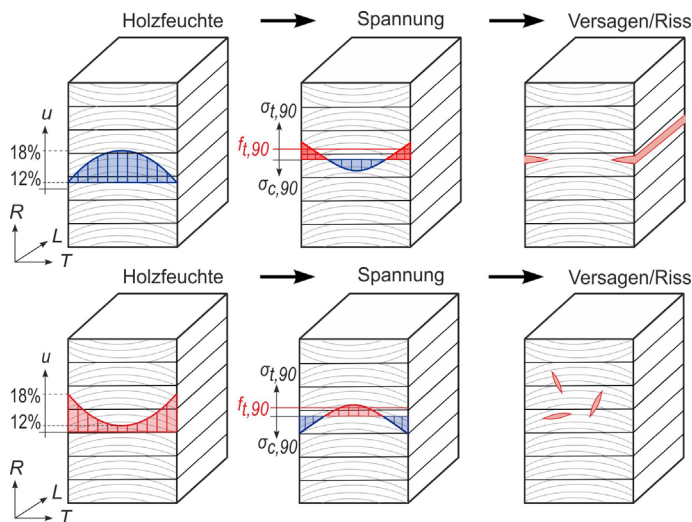


Abb. 2: Phase des Abtrocknens (oben) und Aufweichtens (unten) mit Verteilung der Holzfeuchte, Spannungen über die Querschnittsbreite und Rissbild

Tabelle 1: Quell- und Schwindmasse in % pro % Holzfeuchteänderung, gültig für 10 - 20 M% Holzfeuchte

| Holzart | α_T | α_R | α_L | Quelle |
|---|-----------------------------------|--|--|-----------------|
| Nadelholz | 0.33 | 0.16 | 0.01 | SIA 265/1:2009 |
| Eiche | 0.31 | 0.19 | 0.01 | SIA 265/1:2009 |
| Buche | 0.41 | 0.21 | 0.01 | SIA 265/1:2009 |
| | α_{II} | | | |
| | in Plattenebene | | α_{\perp} senkrecht zur Plattenebene | |
| Holzwerkstoff | In Faserrichtung der Deckfurniere | Senkrecht zur Faserrichtung der Deckfurniere | | |
| Furnierschichtholz (NH) ohne Querfurniere | 0.01 | 0.32 | 0.25 | SIA 265/1:2009 |
| Furnierschichtholz (NH) mit Querfurnieren | 0.01 | 0.03 | 0.25 | SIA 265/1:2009 |
| Furnierschichtholz (Platte BauBuche S) | 0.01 | 0.40 | 0.45 | Pollmeier 10/18 |

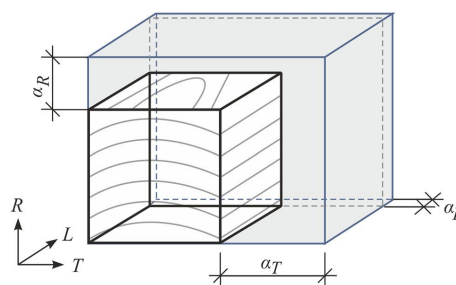


Abb. 3: Schematische Darstellung des Quell- und Schwindmasses in Abhängigkeit der Materialrichtung

Tabelle 2: Durchschnittliche Holzfeuchte in Abhängigkeit der Lage der Bauteile, basierend auf Tabelle 2, SIA 265:2012

| Lage der Bauteile | Durchschnittliche Holzfeuchte |
|--|--|
| Vor der Witterung geschützte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in gut belüfteten, im Winter gut beheizten Räumen - in gut belüfteten, im Winter schwach beheizten Räumen - in gut belüfteten, unbeheizten Räumen | 9 % ± 3 % 12 % ± 3 % 15 % ± 3 % |
| Vor der Witterung teilweise geschützte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in offenen, überdachten Konstruktionen - kleine Querschnitte (z. B. Fassadentäfer) <ul style="list-style-type: none"> ▪ stark strahlungsabsorbierend ▪ wenig strahlungsabsorbierend - mittlere Querschnitte (z.B. Balkenteile unter Dach) <ul style="list-style-type: none"> ▪ stark strahlungsabsorbierend ▪ wenig strahlungsabsorbierend | 17 % ± 5 % 15 % ± 5 % 17 % ± 4 % 13 % ± 4 % 16 % ± 4 % |
| Direkt bewitterte Bauteile mit grösserem Querschnitt <ul style="list-style-type: none"> - durchschnittlich, Kernbereich des Querschnittes - äussere Zone des Querschnitts | 18 % ± 6 % 20 % ± 8 % |
| Feuchte Bauteile <ul style="list-style-type: none"> - in feuchten, ungenügend durchlüfteten Räumen - Bauteile unter Wasser (Süsswasser) | > 24 % über Fasersättigung |

¹⁾ Empfehlungen anhand von Forschungsergebnissen, Gamper et al. (2014), Dietsch et al. (2015), Franke et al. (2016c)

Tabelle 3: Definition der Feuchteklassen für Bemessung und Planung von Holztragwerken

| Feuchtklasse | Beschreibung | SIA 265:2012, EN 1995-1-1:2004 |
|--------------|---|--------------------------------|
| 1 | Vor der Witterung geschützt | ≤ 12 M% |
| 2 | Teilweise vor der Witterung geschützt oder direkt bewittert | 12 - 20 M% |
| 3 | Feucht oder unter Wasser | > 20 M% |

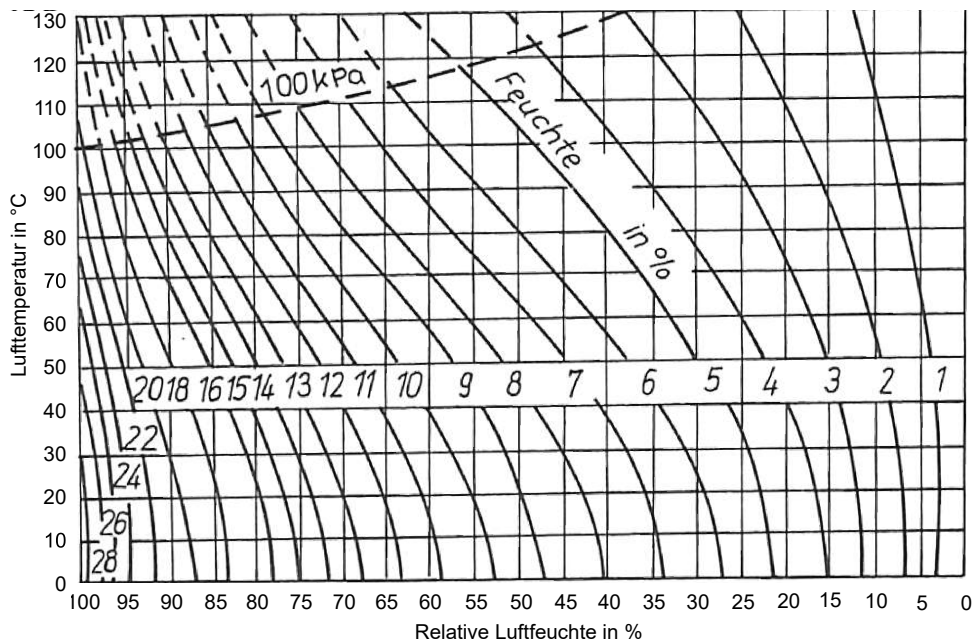


Abb. 4: Ausgleichsfeuchte für Fichtenholz nach Keylwerth und Noack (1964)

2 Nutzungsspezifische Holzfeuchten

Für verschiedene Bauwerkskategorien sind Richtgrößen für die zu erwartende Holzfeuchte in Bezug auf die relative Luftfeuchte in der Nutzungsphase in den Tragquerschnitten erarbeitet worden, siehe Abb. 5 und Abb. 6. Die Diagramme basieren auf Messungen der Holzfeuchte und des Klimas an Holztragwerken von Gamper et al. 2014, Franke et al. 2016c und Franke et al. 2019. Die Holzfeuchten sind auf eine Tiefe von 15 mm von der Oberfläche des Querschnittes bezogen. Ausreisser in Form von täglichen Spitzenwerten sind nicht berücksichtigt. Die Wertebereiche der Holzfeuchte bezogen auf die relative Luftfeuchte sind für beheizt/klimatisierte sowie offene Holztragwerke, die vor Witterungseinflüssen geschützt sind, unterschieden. Anhand der Richtgrößen kann eine Zuordnung von Gebäuden (z. B. Schwimmbäder, Ökonomiegebäude und Eishallen) in die Feuchteklassen lt. SIA 265:2012 erfolgen und die auftretenden Feuchteänderungen innerhalb eines Jahres/Nutzung abgeleitet werden.

Dietsch (2017) weist für die Planungsphase darauf hin, dass in beheizten Gebäuden in Feuchteklasse 1 die Holzfeuchte in den meisten Fällen unter 10 % liegt. Das Gefährdungspotential für Schwindrisse liegt in diesen Gebäuden in der ersten Winterperiode, da durch den Einsatz von Heizanlagen die relative Luftfeuchte zu schnell und zu stark absinken kann. Eine Regulierung der Luftfeuchte oder zusätzliche Massnahmen (Luftbefeuchter) sind evtl. vorzusehen.

- Die **Richtgrößen sind auf eine Messtiefe von 15 mm** von der Oberfläche bezogen, vorliegende Messwerte in anderen Tiefen wurden entsprechend rückgerechnet. Die tatsächliche Ausgleichsfeuchte ist objektspezifisch und abhängig von dem jeweiligen Klima im Gebäude respektive dem Standort.
- **Schwimmbädern** sind klimatisiert und mit Entfeuchtungsanlagen auszuführen, ansonsten sind wesentlich höher Holzfeuchten zu erwarten.
- **Sporthallen und Produktionshallen** weisen eine sehr niedrige Holzfeuchte auf; hier ist insbesondere die erste Winterperiode in der Nutzung bzgl. Heizen/Befeuchten zu definieren, Dietsch (2017)
- **Geschlossene Eishallen** sollten klimatisiert und mit geregelten Entfeuchtungsanlagen ausgeführt werden, ansonsten entstehen sehr hohe Holzfeuchten, besonders an der Querschnittsoberfläche, die der Eisfläche zugewandt ist.
- In **Reithallen** sollte in der Regel eine stetige Luftzirkulation durch minimale Öffnungen im Fensterbereich sichergestellt sein, die Befeuchtung des Bodens sollte auf das Nötigste beschränkt werden, Dietsch (2017)
- **Ökonomiegebäude** verfügen i. d. R. über grössere Öffnungen zur Luftzirkulation, die bei Niederschlag automatisch schliessen sollten; durch Reinigungsintervalle kommt es kurzzeitig zu hohen Feuchtebeanspruchungen, hier ebenfalls den Spritzwasserbereich beachten, Dietsch et al. (2018)
- In **Lagerhallen** ist der Holzfeuchtegehalt abhängig von der Art des Lagergutes und -klimas. Mit Wechsel des Lagergutes ist die Änderung des Lagerklimas zu beachten. Im Fall sehr hoher Lagerfeuchten sind Holzarten mit höherer Dauerhaftigkeit zu erwägen, Dietsch (2017).
- Für **Brücken** kann, unter Einhaltung des konstruktiven Holzschutzes, mit einem Feuchtegehalt unterhalb von 20 M% gerechnet werden, Franke et al. (2016a, 2015).

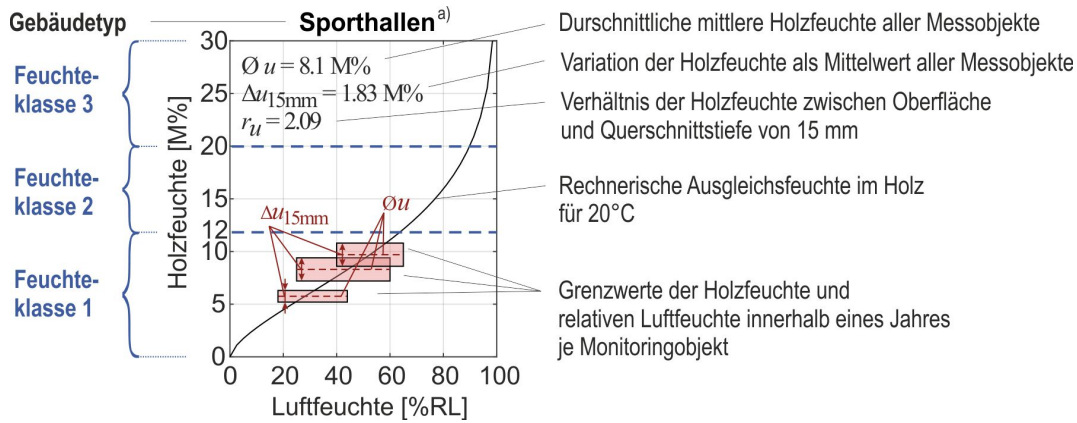


Abb. 5: Erörterung der Angaben in den nutzungsspezifischen Diagrammen, ^{a)} Messwerte von Gamper et al. (2014)

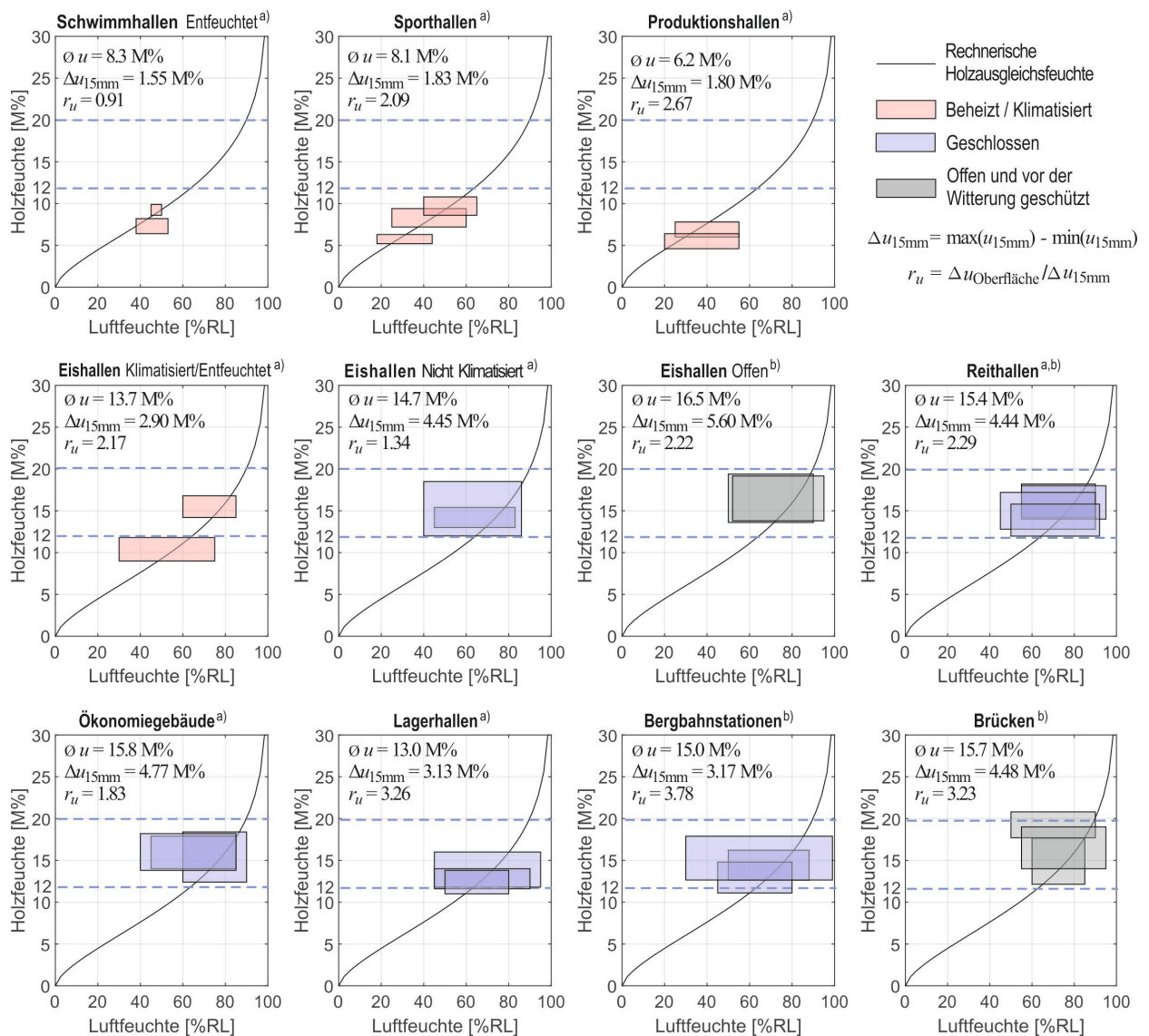


Abb. 6: Veranschaulichung der jahresdurchschnittlichen Holzfeuchten und -schwankungen in einer Tiefe von 15 mm von der Querschnittsoberfläche je Gebäudetyp, abgeleitet aus Messungen der Holzfeuchte in Süddeutschland (mit ^{a)} gekennzeichnet und basierend auf Messungen von Gamper et al. 2014) und der Schweiz (mit ^{b)} gekennzeichnet und basierend auf Messungen von Franke et al. 2019)

3 Beurteilung des globalen Klimas am Standort

3.1 Informationen von Wetterstationen

Für die Beurteilung des Umgebungsklimas von Holztragwerken können Niederschlagskarten, Windanalysen und Wetterdaten zu Temperatur und relative Luftfeuchte von naheliegenden Wetterstationen (z. B. www.meteoswiss.admin.ch) genutzt werden. Die Schweiz gliedert sich in sechs geobiografische Zonen, die eine erste Einschätzung des vorliegenden globalen Klimas am Standort erlaubt, siehe Abb. 7. Die geobiografischen Zonen haben ihren Ursprung in der Agrarwirtschaft. Eine weitere Orientierung ist die Höhe über Meer, s. Abb. 8.

Die Messdaten von 110 Wetterstationen wurden über einen Zeitraum von 30 Jahren (1980-2009) ausgewertet und zu einer Karte mit der Verteilung der mittleren rechnerischen Ausgleichsfeuchte für die Schweiz zusammengestellt, siehe Abb. 9. Die rechnerische Ausgleichsfeuchte im Querschnittsinneren und die auftretende Holzfeuchte an der Oberfläche wurde nach Simpson (1973) gemäss Gleichung (2) für Fichtenholz bestimmt. Die Auswertung der Jahresschwankungen zeigt, dass u. a. in den Alpenregionen die grössten kurzfristigen Feuchteänderung zu erwarten sind, siehe Abb. 10.

$$U_{EMC} = \frac{1800}{M_p} \left(\frac{K_1 \varphi}{1 - K_1 \varphi} + \frac{K_2 K_1 \varphi + 2K_3 K_2 K_1^2 \varphi^2}{1 + K_2 K_1 \varphi + K_3 K_2 K_1^2 \varphi^2} \right) \tag{2}$$

$$M_p = 349 + 1.29T + 1.35 \cdot 10^{-2} T^2$$

$$K_1 = 0.805 + 7.36 \cdot 10^{-4} T - 2.73 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$K_2 = 6.27 - 9.38 \cdot 10^{-3} T - 3.03 \cdot 10^{-4} T^2$$

$$K_3 = 1.91 + 4.07 \cdot 10^{-2} T - 2.93 \cdot 10^{-6} T^2$$

Mit T als Temperatur in °C und φ als relative Luftfeuchtigkeit in [%/100].

- Das Klima ist regional verschieden und muss in der Planung individuell bewertet werden.
- Das lokale Klima/Mikroklima wird u. a. durch die Lage gegenüber der Sonneneinstrahlung, der Windströmrichtung und benachbarter Gebäudestruktur oder Vegetation beeinflusst. Eine erhöhte Verschattung, Eintrag von Niederschlag oder reduzierte Luftzirkulation kann einfach auftreten.

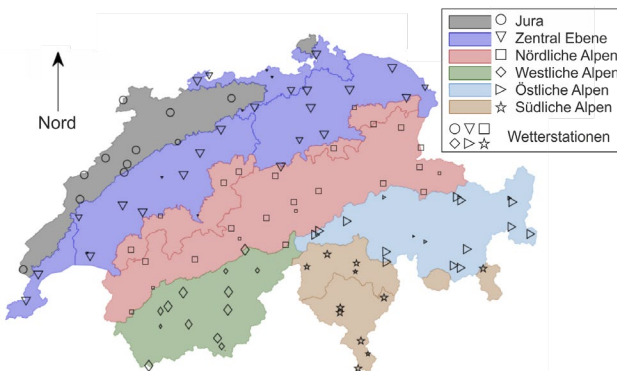


Abb. 7: Geobiografische Zonen der Schweiz mit Zuordnung der analysierten Wetterstationen

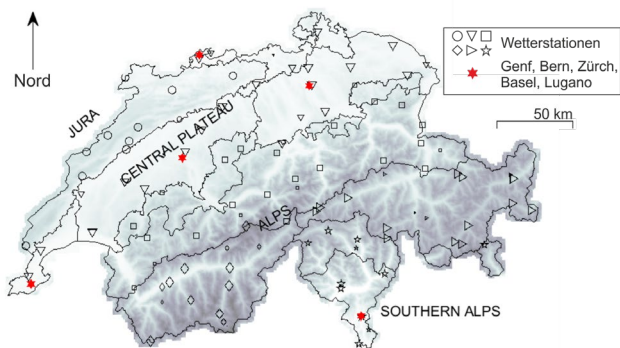


Abb. 8: Darstellung der Höhe über Meer mit Zuordnung der analysierten Wetterstationen

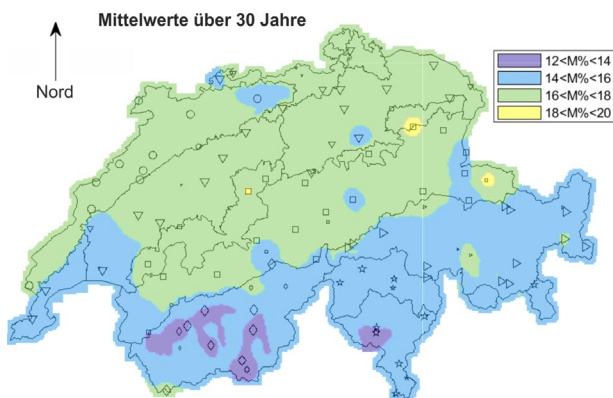


Abb. 9: Rechnerische Ausgleichsfeuchte im Querschnitt von offenen und geschützten Bauteilen basierend auf den Daten von 110 Wetterstationen über 30 Jahre (1980-2009)

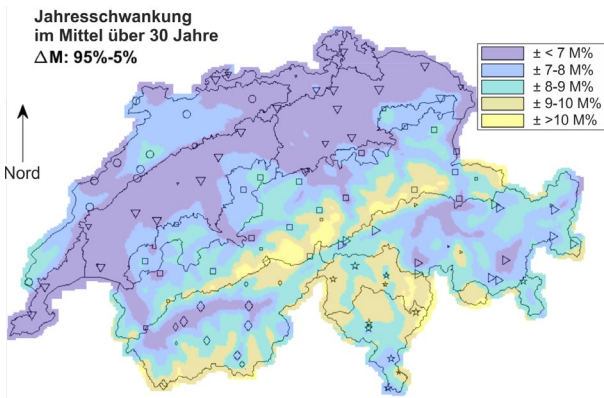
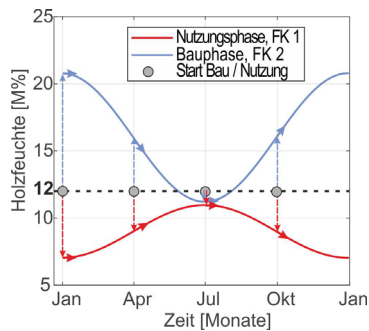


Abb. 10: Betrag der zu erwartenden Änderung der Holzfeuchte an der Oberfläche von offenen und geschützten Bauteilen innerhalb eines Jahres

3.2 Vereinfachung der jahreszeitlichen Klimabeanspruchung

Für die Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchte im Querschnitt und den daraus resultierenden Veränderungen der Querschnittsabmessungen oder internen Spannungen kann an Stelle des jahreszeitlichen Klimas ein vereinfachtes kosinusförmiges Klimamodell angewandt werden, siehe Abb. 11. Ausgehend von einer rechnerischen Ausgleichsfeuchte von 12 M% im Holz während der Produktion bzw. unter Normalklima (20 °C/65 RH%) definieren die Richtklimas aus Abb. 6 die Extreme der Holzfeuchte innerhalb eines Jahres. Für Innenklimas in Feuchtklasse 1 (FK1) wurde eine mittlere Holzfeuchte von 9 M% und für vor der Witterung geschützte Bereiche, gemäss Feuchtklasse 2 (FK2), eine Holzfeuchte von 16 M% angenommen.

- In offenen bzw. gut durchlüfteten und vor der direkten Witterung geschützten Holztragwerken erreicht die relative Luftfeuchtigkeit den Maximalwert im Winter und den Minimalwert im Sommer.
- In geheizten Holztragwerken ergeben sich hingegen im Winter niedrige relative Luftfeuchten und im Sommer höhere relative Luftfeuchten.



$$u(t)_{FK1} = 9 + \frac{\Delta u_{Oberfläche}}{2} \cos\left(2\pi \frac{t}{365} + \pi\right) \quad (3)$$

$$u(t)_{FK2} = 16 + \frac{\Delta u_{Oberfläche}}{2} \cos\left(2\pi \frac{t}{365}\right) \quad (4)$$

Mit:

$$\Delta u_{Oberfläche} = \Delta u_{15\text{ mm}} \cdot r_u \quad (5)$$

t Zeit in Tagen, $t = 0 \hat{=} 1.$ Januar

Abb. 11: Kosinusförmiges Klimamodell zur Abbildung der Referenzklimabeanspruchung abgeleitet aus Gamper et al. (2014)

| Beispiel zur Abschätzung der zu erwartenden Holzfeuchten – Anwendung des Leitfadens | | |
|---|--|---|
| SITUATION | Reithalle im Raum Basel (geschlossen und unbeheizt) | Sporthalle im Raum Zürich (geschlossen und beheizt) |
| Abschätzung lt. SIA 265:2012 Tab.2 & Tab. 3 | Nach Lage der Bauteile: $u = 15 \pm 3$ M% Feuchtklasse 2: teilw. vor der Witterung geschützt $u = 12 - 20$ M% | Nach Lage der Bauteile: $u = 9 \pm 3$ M% Feuchtklasse 1: vor der Witterung geschützt $u \leq 12$ M% |
| BAUPHASE Standort | Region Basel: $14 \leq u \leq 16$ M% , $\Delta u = \pm 7$ M% | Region Zürich: $16 \leq u \leq 18$ M% , $\Delta u = \pm 7$ M% |
| START DER NUTZUNG Änderung von 12 M% auf $u(t)$ | $u(\text{Januar } t = 0)_{FK2} = 16 + \frac{10.2}{2} \cos\left(2\pi \frac{0}{365}\right) = 21$ M% $u(\text{Juli } t = 180)_{FK2} = 16 + \frac{10.2}{2} \cos\left(2\pi \frac{180}{365}\right) = 11$ M% | $u(\text{Januar } t = 0)_{FK1} = 9 + \frac{3.8}{2} \cos\left(2\pi \frac{0}{365} + \pi\right) = 7$ M% $u(\text{Juli } t = 180)_{FK1} = 9 + \frac{3.8}{2} \cos\left(2\pi \frac{180}{365} + \pi\right) = 11$ M% |
| NUTZUNG s. Abb. 6 | Richtgrösse $u_{15\text{ mm}} = 15.4 \pm \frac{4.44}{2}$ M% Richtgrösse $\Delta u_{Oberfläche} = 4.44 \cdot 2.29 = 10.2$ M% | Richtgrösse $u_{15\text{ mm}} = 8.1 \pm \frac{1.83}{2}$ M% Richtgrösse $\Delta u_{Oberfläche} = 1.83 \cdot 2.09 = 3.8$ M% |
| QUERSCHNITT | | |

4 Einfluss auf Tragquerschnitte

4.1 Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt

Die Schwankungen des Klimas übers Jahr führen zur Änderung des Feuchtegehaltes des Holzes. Durch die dynamischen Schwankungen des Klimas mit unterschiedlichen Amplituden und Perioden (Jahreszeit, Tag) entstehen ungleichförmige Holzfeuchteverteilungen über den Querschnitt. Für eine Reithalle ist in Abb. 12 das Innenklima und die gemessenen Holzfeuchten in den Tiefen 10, 25 und 40 mm für ein Messzeitraum von 1 Jahr dargestellt. Die aus dem Innenklima abgeleitete rechnerische Ausgleichsfeuchte an der Holzoberfläche wurde in einer numerischen Simulation als Einwirkung verwendet und die Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt wie auch die resultierenden internen Spannungen berechnet, siehe Abb. 12. Die Kurven stellen die Umhüllende innerhalb des Messzeitraumes von einem Jahr dar.

- Liegt ein dynamisches Klima vor, wird sich keine gleichmässige Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt einstellen. Das Aussenklima wirkt auf die Randbereiche, es entsteht ein Feuchtegradient zwischen Oberfläche und Querschnittsmitte der zu Querkzugspannungen führt.
- Die rechnerische Ausgleichsfeuchte im Querschnittsinneren wird sich je nach Dimension erst über eine längere Nutzung (im Laufe von Wochen, Monaten, Jahren) einstellen.

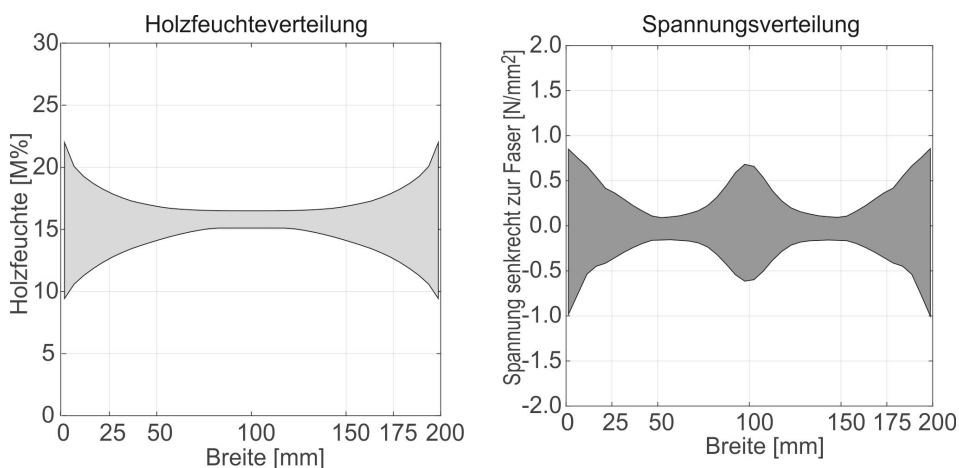
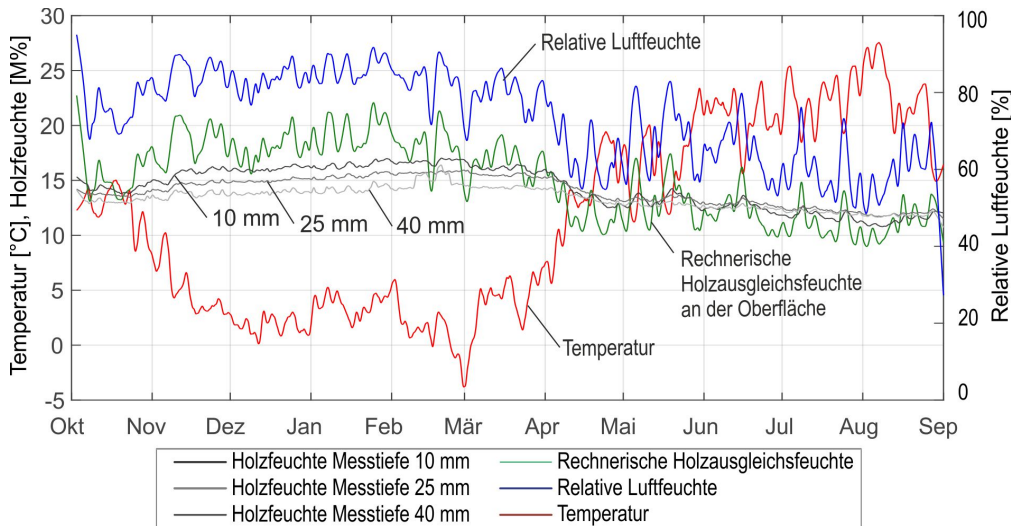


Abb. 12: Klima und gemessene Holzfeuchten für eine Reithalle (oben), resultierende Holzfeuchte- (unten links) und Spannungsverteilung (unten rechts) im Querschnitt als Umhüllende für die Berücksichtigung der Jahresschwankungen

4.2 Numerisches Simulationsmodell zur praktischen Anwendung

Am Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur der Berner Fachhochschule ist ein numerisches Modell entwickelt worden, welches anhand von Klimadaten den Holzfeuchtegehalt, die Dimensionsänderung und die Spannungsverteilung für Tragquerschnitte berechnet. Die Berechnungen für den Holzfeuchtetransport beruhen auf dem 2. Fick'schen Gesetz, und für das zeitabhängige Spannungs-Dehnungsverhalten sind die elastischen, feuchteabhängigen und mechanosorptiven Dehnungen berücksichtigt. Die Grundlagen und die Validierung des Modells sind in Franke et al. (2019) ausführlich gezeigt.

Leistungsmerkmale des numerischen Modells zur Abschätzung des Feuchteverhaltens in Holzquerschnitten

- Holzarten (Fichte, Buche), Vollholz und Brettschichtholz
- Klimabereich (unbegrenzt), Holzfeuchtebereich ($u = 0 - 30 \text{ M\%}$)
- Holzfeuchteverteilung, Dimensionsänderung und Spannungsverteilung über den Querschnitt

4.3 Dimensionsänderungen

Die Änderungen der Holzfeuchte über das Jahr führt zum Schwinden und Quellen der Querschnitte. Die rechnerische Holzfeuchteverteilung und Dimensionsänderungen für Fichtenholz unter einer stufenweisen Änderung der Holzfeuchte u von 12 auf 18 M% ist in Abb. 13 für unterschiedliche Querschnittsbreiten dargestellt. Die Querschnittshöhe ist konstant 800 mm. Dimensionsänderungen sind insbesondere bei behindertem Schwinden und Quellen, wie z. B. in Anschlüssen mit Schlitzblechen zu berücksichtigen.

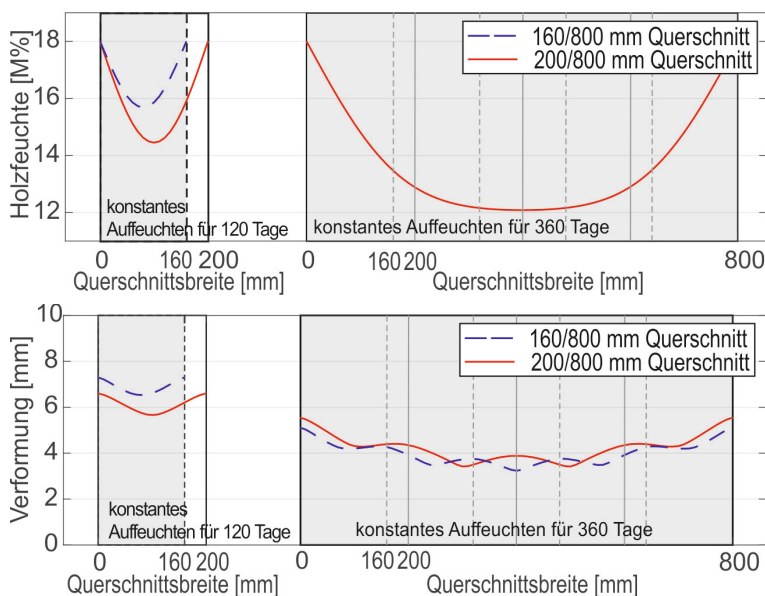


Abb. 13: Holzfeuchteverteilung (links) und Dimensionsänderung (rechts) für Querschnittsbreiten von 160 und 200 mm und für blockverleimte Querschnitte (5 x 160 mm und 4 x 200 mm)

4.4 Spannungsverteilungen

Die Grösse des Klimawechsels beeinflusst die auftretenden Spannungen im Querschnitt. Deren Relation ist durch die mechanosorptive Relaxation in der Gesamtdehnung nicht zwingend linear zueinander. Die dargestellten Spannungen beziehen sich jeweils auf die Mittellinie der konstanten Querschnittshöhe von 800 mm. Aufgrund der Berücksichtigung der Jahrringstruktur in den einzelnen Lamellen im numerischen Simulationsmodell entstehen bei ungeraden Querschnittsaufbauten Spannungsspitzen in Querschnittsmitte, die in der Praxis geringfügiger ausgebildet sein können. Die Diagramme in Abb. 14 zeigen die transversalen Spannungsverteilungen über die Querschnittsbreite in Mitte der Querschnittshöhe zum Zeitpunkt der maximalen Querzugspannungen (im Inneren fürs Aufweichen und an der Oberfläche fürs Abtrocknen) für eine stufenweise Klimaänderung von $u = 12 \pm 6 \text{ M\%}$. Der Zeitpunkt ist abhängig von der Querschnittsgrösse. Für das Abtrocknen geschieht dies innerhalb von Tagen und für das Aufweichen innerhalb von Wochen.

- Die Querschnittsgeometrie hat keinen Einfluss auf die Spannungen an der Oberfläche im Zuge einer Aufweichung oder Abtrocknung.
- Das Zusammensetzen zu blockverleimten Querschnitten hat einen positiven Effekt auf die Entwicklung von Spannungen im Querschnittsinneren, siehe Abb. 14.
 - gleichmässigerer Verteilung der transversalen Dehnungen
 - kleinerer Bereich von Querdruckspannungen an der Oberfläche im Vergleich zu dem Bereich mit Querzugspannungen im Inneren
 - Reduzierung der Spannungen durch Reduzierung der Schlankheit des Balkens

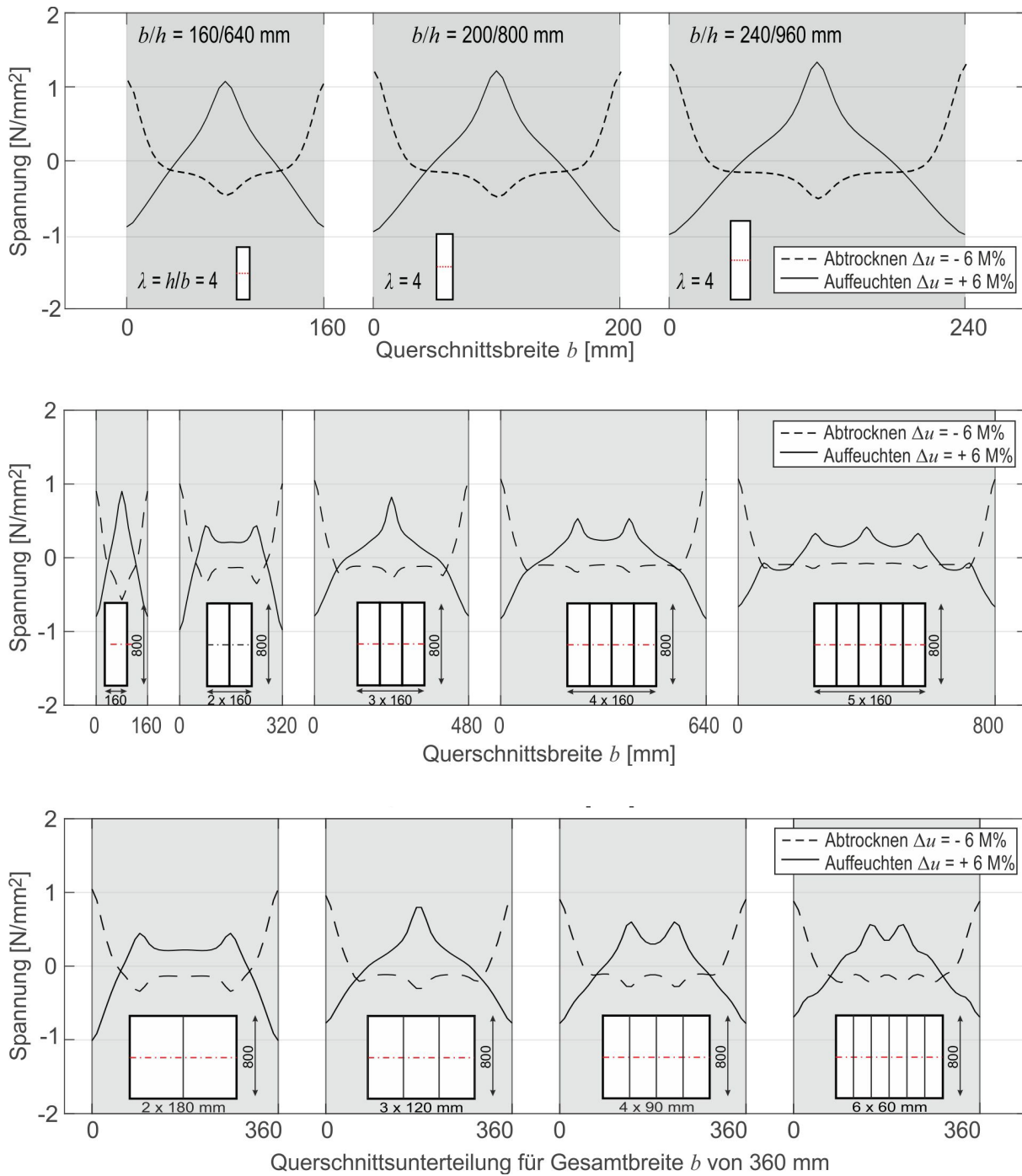


Abb. 14: Maximal berechnete Querszugspannungen über die Querschnittsmitte in Abhängigkeit von der Schlankheit, Querschnittsbreite und Unterteilung des Querschnittes für eine stufenweise Klimaänderung von $u = 12 \pm 6 \text{ M}\%$

5 Brücken/Kunstbauten in Holz

5.1 Generelle Planungshinweise

Holzbrücken sind gemäss der Norm SN EN 1995-2:2004 und SN EN 1995-2/NA:2014 – «Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken», sowie den Standards, Weisungen und Richtlinien des ASTRA Bundesamt für Strassen zu projektieren, auszuführen, zu überwachen und zu unterhalten.

Planungsschwerpunkte für Holzbrücken

- Robustheit im Tragwerk, in den mechanischen Verbindungen und im konstruktiven Holzschutz
- Ausreichendes Austrocknungsvermögen durch genügend Luftzirkulation
- Korrosionsschutz in den Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln
- Die Wasserführung und eine Drainage sind zwingend. Stehendes Wasser birgt ein grösseres Risiko und muss durch Detaillösungen mit ausreichender Entwässerung und Ventilation verhindert werden.
- Kontrollierbarkeit vom Tragwerk und Anschlüssen durch handnahe visuelle Überprüfung

Häufige Fragestellungen zur Dauerhaftigkeit von Holztragwerken anhand des Standortes und Nutzungsart können bzgl. der zu erwartenden mittleren Ausgleichsfeuchte über ein Jahr im Holz wie folgt beantwortet werden:

- Brücken in Wäldern oder schattigem Umfeld können zu höheren mittleren Holzfeuchten führen. Im Überwachungs- und Unterhaltsplan sollte vereinbart sein, dass Bewuchs und Pflanzen vom Tragwerk und im Bereich von Anschlüssen zu entfernen sind, damit eine ausreichende Luftzirkulation/Abtrocknung der Konstruktion möglich ist, (Burkhardt & Kleppe, 2017). Die Gefahr des Schliessens von Drainagen/Abläufen durch Laub ist konstruktiv zu verhindern und gemäss Unterhaltsplan zu reinigen.
- Brücken, die Flüsse oder ähnliche Bereiche queren, weisen keine erhöhte messbare mittlere Holzfeuchte im Tragwerk auf, (Franke et al. 2019). Diese Brücken profitieren i. d. R. durch die erhöhte Ventilation im Bereich der Öffnungen und über den Wasserwegen.
- Für Verkehrsbrücken wird oft mit einer erhöhten umgebenden Luftfeuchte durch das mitgeführte Spritzwasser des Verkehrs gerechnet. Der Verkehr führt gleichzeitig zu erhöhten Temperaturen und Luftzirkulationen/-strömen, die die Feuchteaufnahme im Tragwerk verzögern. Der tatsächliche Einfluss des Spritzwassers ist abhängig von der endgültigen Höhe vom Grund/Lage der Holzbauteile (Spritzwasserbereich bis ca. 150 cm).
- Topografische Einflüsse, die das lokal umgebende Klima/Mikroklima an Brücken durch u. a. erhöhte Verschattung und verstärkte Windströmung, Windausrichtung beeinflussen, sind individuell vor Ort zu bewerten. Allgemein konnten von Müller et al. (2017) und Koch et al. (2017) in den Überwachungen der Holzfeuchte von über 10 Holzbrücken (Langsamverkehrsbrücke, Strassenbrücken, Brücke über Gewässer/Strasse/gewachsenen Boden) keine nennenswerten Unterschiede der mittleren Ausgleichsfeuchte im Holz festgestellt werden.

Auswirkungen von lokalen Effekten/Behinderungen und Extremwerte in den Jahresverläufen sind aktuelle Forschungsfragen.

5.2 Konstruktive Hinweise

Brückentragwerke sind sehr individuell durch die Wahl der Tragstruktur, des Fahrbahnbelags und des Holzschutzes in Form von Bekleidungen und Abdeckungen. Erfahrungen zeigen, dass konstruktive Details, die für Feuchteklasse 2 geplant sind und in der Praxis keinen ausreichenden Regen- und Feuchtschutz oder fehlende ausreichende Luftzirkulation aufweisen, Beanspruchungen der Feuchteklasse 3 erfahren. Tropfendes Wasser und verhindertes Austrocknen sind die grössten Gefährdungsfaktoren für Brückentragwerke. Ziel ist es, für die Dauerhaftigkeit stets geschützte Holzbrücken in Anlehnung an die Definitionen in SN EN 1995-2:2004, DIN EN 1995-2/NA:2011 auszuführen, vgl. Abb. 15. Zur konstruktiven Umsetzung der Anforderungen haben folgende Arbeiten empfehlenden Charakter:

- Bachofner R., Conzett J. (2013) Brücken aus Holz: Möglichkeiten und Grenzen, Forschungsprojekt AGB 2003/012, Bundesamt für Strassen, Schweizerische Eidgenossenschaft
- Seidel A., Keil A., Hafner A., Özdemir Ö., Jacob-Freitag S. (2019) Drüber und drunter – Brücken aus Holz, Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V., ISSN-Nr. 0466-2114
- Seidel A. et al. (2019) Entwurf von Holzbrücken, holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 9, Folge 1, Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V., ISSN-Nr. 0466-2114
- Seidel A. et al. (2019) Tragwerksplanung von Holzbrücken, holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 9, Folge 2, Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V., ISSN-Nr. 0466-2114
- Simon A., Arndt R., Jahreis M., Koch J. (2019) Musterzeichnungen für Holzbrücken, Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V., ISSN-Nr. 0466-2114
- Luggin W. F. (2010) Brücken aus Holz – Standardisierte Detaillösungen und Wartung, 1. Internationale Holzbrückentage, Bad Wörishofen

- Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e. V. (2006) Detailzeichnungen, https://holzbrueckenbau.com/wp-content/uploads/QHB_Detailzeichnungen.pdf, 12.12.2018
- Schwaner, K. (2004) Schutz und Dauerhaftigkeit von Holzbrücken, 10. Internationales Holzbauforum, Garmisch-Partenkirchen.
- Augestein M., Dittrich W., Geohl J. (2000) holzbau handbuch, Reihe 1 Entwurf und Konstruktion, Teil 9 Brücken, Folge 2 Details für Holzbrücken, DGfH Innovations und Service GmbH, München
- Brünninghoff H., Heimeshoff B., Sengler D., Samuel S., Rampf G. (1988) holzbau handbuch, Reihe 1 Entwurf und Konstruktion, Teil 9 Brücken, Folge 1 Planung, Konstruktion, Berechnung, DGfH Innovations und Service GmbH, München

Konstruktive Hinweise für Holzbrücken

- Geschützte Brückentragwerke können der Feuchtklasse 2 zugeordnet werden.
- Einsatz von Abdichtungssystemen auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz gemäss SN 640451.
- Fahrbahnübergänge möglichst geschlossen ausführen, um Öffnungen die Wasser führen zu reduzieren.
- Wasserführung und Wasserableitung ist wichtig, und nach der Ausführung auf Funktionalität zu prüfen.
- Es wird empfohlen Fahrbahnübergänge/Hotspots mit einem lokalen Monitoringsystem und Fahrbahndecken bei Bedarf mit einem flächendeckenden Monitoringsystem auszustatten.

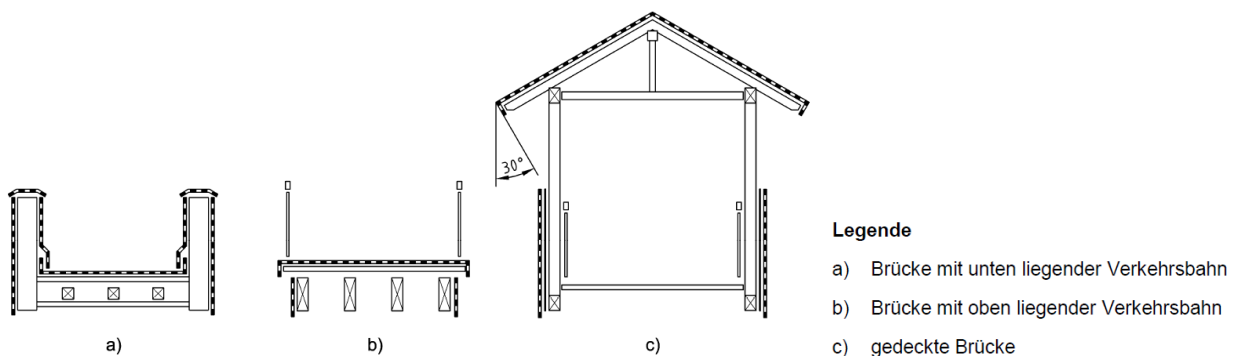


Abb. 15: Konstruktive Ausbildung von geschützten Holzbrücken, lt. DIN EN 1995-2/NA:2011

5.3 Beplankung oder Beschichtung

Traditionell werden Tragwerke, die der Witterung ausgesetzt sind, in der Schweiz konstruktiv, z. B. mit einer Beplankung oder ausreichendem Überstand zum Schutz vor Schlagregen, geschützt, siehe Abb. 16. Der Einsatz von diffusionsoffenen Beschichtungen und Abdichtungssystemen führt zu einer Reduzierung der Holzfeuchteschwankungen im Tragwerk. Diffusionsdichte Beschichtungen hingegen erhöhen das Risiko von Feuchteinschlüssen/-ansammlungen, die die Unterhaltskosten erhöhen, wenn ein Schaden eintritt.

Witterungsschutz von Holzbrücken

- Die Beplankung kann die Tragstruktur wirkungsvoll vor Schlagregen und direkter UV-Strahlung schützen. Die Beplankung verzögert mitunter das Austrocknen durch reduzierte Belüftung und fehlender Sonnenbestrahlung. Die Beplankung aus Holz ist i. d. R. ein Verschleissbauteil und wird innerhalb der Lebenszeit der Brücke ersetzt.
- In der Planung einer schützenden Beplankung ist die Robustheit von jeder Lage/Schicht zu berücksichtigen.
- In der Konstruktion sollte treibender/durchdringender Regen, Schlagregen, Flugschnee beachtet werden.
- Die handnahe Kontrollierbarkeit sollte bei der Planung/Ausführung der Beplankung berücksichtigt werden.



Abb. 16: Neumattbrücke mit Beplankung als konstruktiv geschützte Fachwerkbrücke (links), Überführung in Horen mit Witterungsschutz der Tragglieder durch ausreichenden Überstand (rechts)

5.4 Mechanische Verbindungen

Für eine feuchtegerechte Bemessung und Ausführung von Anschlüssen sind nur einzelne firmenspezifische Regelungen vorhanden. Allgemeingültige normative Regelungen zu Anschlüssen sind im SN EN 1995-2:2004 hingegen nicht enthalten. Von besonderer Bedeutung sind:

Mechanische Verbindungen in Holzbrücken

- Korrosionsschutz bei Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln beachten.
- Kontrolle der maximalen Grössen von Verbindungen insbesondere bei deformationsbehinderten Verbindungen wie z. B. beim Einsatz von Schlitzblechen, da hier noch zusätzliche Spannungen entstehen können. Der Einsatz von Verstärkungsmassnahmen kann hilfreich sein, obwohl deren Wirkung derzeit noch Forschungsgegenstand ist.
- Die Wahl des Materials hat Auswirkungen z. B. auf Feuchteansammlungen, da Kondensationen eher an kalten Oberflächen geschehen (Burkhart and Kleppe, 2017). Für ausreichend Belüftung, Abstände zwischen Bauteilen und Tropfkanten, ist zu sorgen.
- Schlüsselpunkte sind die Verankerungsstellen von vorgespannten Fahrbahndecken und die Befestigung von Schrammbord und Leitplanke.

6 Bauphase und Errichtung

Im Herstellungs- und Errichtungsprozess bis hin zur Inbetriebnahme und dem «ersten Winter» kann es bei gedämmten und beheizten Gebäuden je nach Nutzung zu einem Abtrocknen oder Auffeuchten der Holztragelemente kommen. Aus diesem Grund sollten Holzbauteile immer mit der Holzfeuchte eingebaut werden, die der Ausgleichsfeuchte im fertiggestellten Gebäude entspricht. Schonendes Vorkonditionieren ist zu empfehlen, gerade in Bereichen mit hohen Leistungsanforderungen, verformungsbehindernden Anschlüssen und Anforderungen an die Sichtqualität. Während des Transportes und der Errichtung sind Schutzmassnahmen vor Niederschlägen vorzusehen, siehe Abb. 17. Oberflächennahes Auffeuchten des Querschnittes geschieht innerhalb von Stunden und Tagen und ruft in späteren abtrocknenden Phasen hohe Querspannungen hervor die zu Rissen führen können. Hierbei ist zwischen Rissen, welche die Sichtqualität beeinträchtigen oder Rissen, die statische Relevanz haben, zu unterscheiden. Der Einsatz von diffusionsoffenen Oberflächenbehandlungen wirkt sich stets positiv auf die Verzögerung des Feuchtetransports im Holz auf.

Konditionierung/Witterungsschutz

- Der Zeitpunkt der Errichtung kann die zu erwartende Grösse der Holzfeuchteänderung reduzieren.
- Das Vorkonditionieren ist im Herstellungsprozess bei entsprechenden Planungszeiten möglich.
- Schutz der Holzbauteile gegenüber ungeplanter Feuchteeinwirkung:
 - Schutz auf den Transportwegen/Lagerungsplätzen durch Planen oder Witterungsschutzanstrich
 - Prüfung eines Baustellendaches (kostenintensiv)
 - Effiziente sequentielle Errichtung mit direkter Anwendung der endgültigen Fassadenschicht und/oder Dachhaut als Witterungsschutz, rasches Schliessen der Gebäudehülle
- In der Bauphase kann in geschlossenen Gebäuden der Prozess der Herstellung von Unterlagsböden oder Holz-Beton-Verbunddecken (Vorort-Beton) zu erhöhten Luftfeuchten führen. Hier können Oberflächenbehandlungen das Auffeuchten des Holzes reduzieren. Der Abtrocknungsprozess vom Unterlagsboden/HBV-Decke sollte in Abstimmung der Gewerke und schriftlich geregelt erfolgen. Die Gefahr von Schwindrissen an der Oberfläche besteht, besonders bei zu schnellem massivem Abtrocknen.



Abb. 17: Wirkungsvoller Schutz während der Bauruhezeit (nachts, Wochenende) oder bei direktem Regen, Öffnung der Abdeckungen während der tatsächlichen Bautätigkeit (Swatch Gebäude, Biel/Bienne)

Der Zeitpunkt der Errichtung ruft unterschiedliche Beanspruchungen in den anschliessend abtrocknenden respektive auffeuchtenden Perioden eines Bauwerkes hervor. Abb. 18 und Abb. 19 zeigt die Holzfeuchteverteilung und das daraus auftretende Schwind-/Quell- und Spannungsverhalten für einen möglichen Baubeginn was der i. d. R. der Feuchteklasse 2 entspricht und dem Beginn der Nutzung was mit einem Wechsel in die Feuchteklasse 1 verbunden sein kann.

- Die Spannungen an der Oberfläche reagieren unabhängig vom Abtrocknen oder Auffeuchten sehr schnell und nahezu zeitgleich auf Änderungen im Umgebungsklima.
- Die feuchteinduzierten Spannungen infolge der jahreszeitlichen Klimaschwankungen reduzieren sich für Holztragwerke, die in den Sommermonaten errichtet werden.
- Für Holztragwerken, die im Winter errichtet werden, ist mit grösseren feuchteinduzierten Spannungen zu rechnen.
- In bereits errichteten Tragwerken und normaler Nutzung ergeben sich in Feuchteklasse 1 geringere interne Spannungen als in Feuchteklasse 2.
- Die Querzugfestigkeit von Holz reduziert sich zusätzlich unterhalb von 10 M% Holzfeuchte (Goulet 1960), was die Ursache für viele Fälle von gerissenen Trägern in trockenen Gebäuden sein kann.
- Weiterhin kann sich der Querschnittsaufbau negativ auf die Entwicklung der Spannungen auf der Oberfläche auswirken. Spannungen infolge von Auffeuchten entstehen im Querschnittsinneren und benötigen einen grösseren Zeitraum. Dennoch zeigen die Simulationsergebnisse, dass die Spannungen die gleichen Grössen wie an der Oberfläche erreichen können, vgl. Schiere et al. (2018).
- Die Holzfeuchte im Querschnittsinneren bei einer Querschnittsbreite von 200 mm benötigt ungefähr ein Jahr um die rechnerische Ausgleichsfeuchte infolge eines konstanten Umgebungsklimas zu erreichen. Die Diffusionsgeschwindigkeit in der Praxis kann zum Teil langsamer als angenommen sein, so dass dieser Prozess noch deutlich länger dauert.
- Wird das Holztragwerk gegenüber der Herstellfeuchte von ca. 12 M% in seiner Nutzungsphase austrocknen, so ist mit einer schonenden Trocknung vorzugehen, so dass die Rissbildung durch Relaxation des Holzes reduziert wird. Schonendes Trocknen berücksichtigt die Reduzierung der Luftfeuchte in Stufen von ca. 5 %RH.

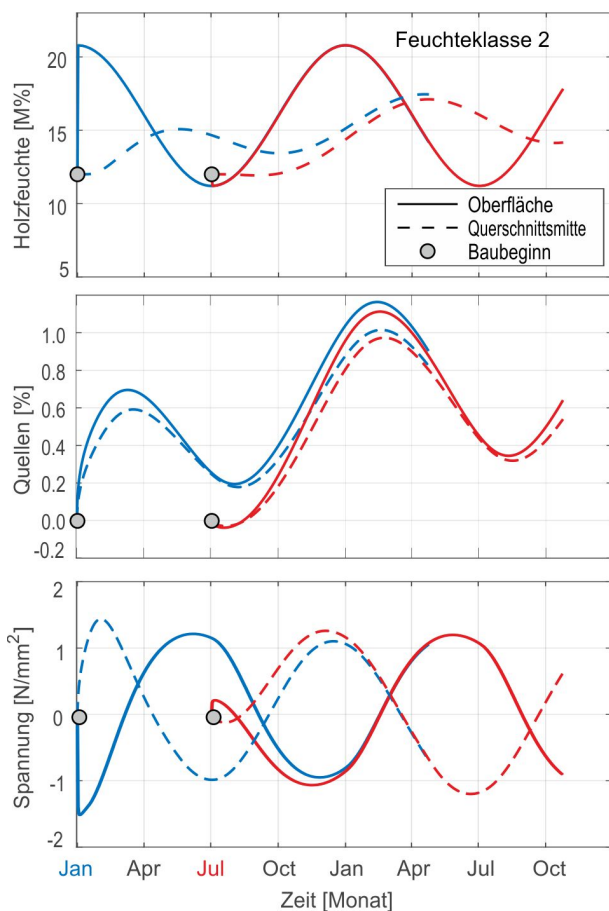


Abb. 18: Abschätzung der Holzfeuchte, des Quell- und Spannungsverhaltens für einen Querschnitt von $b/h = 200/800$ mm in der Feuchteklasse 2 (offene, geschützte Objekte, respektive Bauphase) mit jahreszeitlich dynamischem Referenzklima (vgl. Abb. 11)

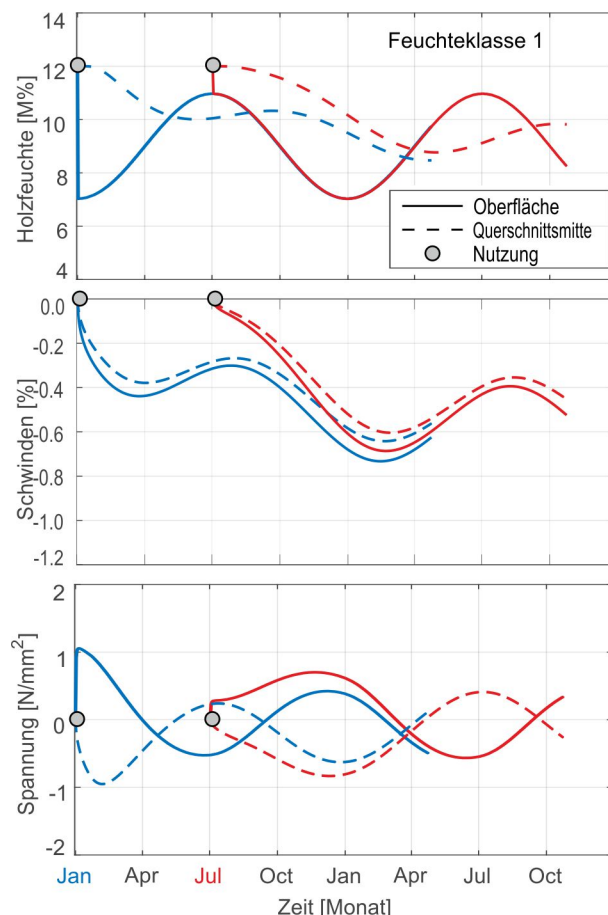


Abb. 19: Abschätzung der Holzfeuchte, des Quell- und Spannungsverhaltens für einen Querschnitt von $b/h = 200/800$ mm in der Feuchteklasse 1 mit jahreszeitlich dynamischem Referenzinnenklima (vgl. Abb. 11)

7 Überwachung und Inspektion von Holztragwerken

Holztragwerke sollten in regelmässigen Abständen zur Qualitätssicherung in Anlehnung an die SIA 469 – «Erhaltung von Tragwerken», SIA 462 – «Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke», SIA 269 – «Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken», SIA 269/5 – «Erhaltung von Tragwerken – Holzbau», überprüft werden. Für Brückentragwerke ist weiterführend die Richtlinie ASTRA 12002 «Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen» (2005) einzuhalten.

Die kontinuierliche Überwachung der Holzfeuchte ist ein geeignetes Frühwarnsystem. Die Kontrollpunkte im Monitoring sollten in möglichen Gefahrenzonen/Hot Spots platziert werden. Dies können Fahrbahnübergänge, Auflagerbereiche, Übergangsbereiche und Durchdringungen sein. Zur Messung der Holzfeuchte eignet sich die elektrische Widerstandsmethode oder die Messung der Temperatur und Luftfeuchte in einen kleinen Hohlraum, vgl. Tabelle 4. Für die Planung, Umsetzung und Auswertung eines Monitoringsystems sollte ein Austausch mit entsprechenden Experten erfolgen. Die Anwendung von flächendeckenden Monitoringsystemen im Bereich von Brückentragwerken ist Gegenstand der Forschung. Lösungen im Bereich der Überwachung von Flachdächern sind bereits kommerziell verfügbar.

Hinweise zur Inspektion von Holztragwerken

- Generell sind alle Tragwerke/Bauteile handnah und visuell zu prüfen. Eine vorhandene Bepankung sollte demontierbar sein; Gerüste und Hubbühnen sind für die Zugänglichkeit zu verwenden.
- Berücksichtigung von Regentagen zur Feststellung von vorhandenen Leckagen und Wegen, die das Wasser tatsächlich nimmt
- Für Eishallen sollten zwei Zeitpunkte für die Inspektion berücksichtigt werden:
 - in den Sommermonaten sind in der Regel oberflächennahe Risse durch die trockenere Jahreszeit geöffnet und vollständig in der Grösse erfassbar
 - während der Eisperiode und in den Wintermonaten ist neben der visuellen Begutachtung der Holzoberflächen (mögl. Tauwasserbildung), der Holzfeuchtegehalt zu prüfen

Weitere Hinweise zu Inspektionen:

- Franke B., Franke S. (eds.) (2013) COST Workshop – Highly performing timber structures: Reliability, Assessment, Monitoring and Strengthening, Bern University of Applied Sciences, Biel, ISBN 978-3-9523787-3-1
- Steiger R. (2000) Kontrolle, Überwachung und Unterhalt von Holzbrücken, EMPA/HSR Fortbildungskurs
- Simon A., Arndt R. W., Jahreis M. G., Koch J. (2018) Muster-Prüfhandbuch für Holzbrücken, Forschungsprojekt ProTimB, Fachhochschule Erfurt.
- Simon A., Arndt R. W., Jahreis M. G., Koch J. (2018) Muster-Wartungshandbuch für Holzbrücken, Forschungsprojekt ProTimB, Fachhochschule Erfurt.
- Schickhofer G., Unterwieser H. (2005) Wartungsmanual für Holzbrücken – Ein Leitfaden zur Brückenüberwachung, Technische Universität Graz

Monitoring der Holzfeuchte

- Die Messung der Holzfeuchte ist eine zerstörungsfreie Prüfung und für gängige Holzarten und Holzwerkstoffe einsetzbar.
- Die Messdaten können online übertragen und ausgewertet werden.
- Die Messung der Holzfeuchte kann sehr gut als Frühwarnsystem für die Qualitätssicherung eingesetzt werden.

Tabelle 4: Messmethoden zur Holzfeuchte

| | Elektrische Widerstandsmethode | Hohlraummethode |
|-------------------|---|---|
| Messung | Holzfeuchte, Temperatur | Temperatur und Luftfeuchte |
| Messdaten | Temperaturkompensation | Berechnung Luftfeuchte anhand Sorptionsisothermen, Simpson (1973) |
| Messmittel | Messnadeln oder Schrauben (paarweise) Temperatursensor Klimasensor (optional) | Hohlraum mit hygroskopischem Sensor Klimasensor (optional) |
| Datenübertragung | Funkdatenübertragung | |
| Anwendungsbereich | Temperatur > 5 °C | Temperatur -20 °C < T < 50 °C |
| Genauigkeit | ± 2 M% | ± 2 M% |

8 Literaturverzeichnis und weiterführende Veröffentlichungen

- Burkart H., Dyken T. (2017) Design flaws on Norwegian Timber Bridges, In: 3rd International Conference on Timber Bridges, Skellefteå, Schweden.
- Burkart H., Kleppe O. (2017) Learning Experiences from Norwegian Timber Bridges, In: 3rd International Conference on Timber Bridges, Skellefteå, Schweden.
- Dietsch P., Jiang Y., Winter S. (2018) Landwirtschaftliches Bauen mit Holz – vorbeugender chemischer Holzschutz zwangsläufig notwendig?, 24.Internationales Holzbau-Forum IHF, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland.
- Dietsch P. (2017) Auswirkung der Gebäudenutzung auf Holzfeuchten in Hallentragwerken, S-Win Tagung, Weinfelden.
- Dietsch P., Gamper A., Merk M., Winter S. (2015) Gebäudeklima – Auswirkungen auf Konstruktion und Dauerhaftigkeit von Holzbauwerken, Holzbau Die neue Quadriga, 6/2015, 28-34.
- Dietsch P., Franke S., Franke B., Gamper A., Winter S. (2014) Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts, Journal of Civil Structural Health Monitoring 5, 115-127.
- DIN EN 1995-2/NA:2011 Nationaler Anhang, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- Franke B, Franke S, and Müller A. (2015) Case studies: long-term monitoring of timber bridges, Journal of Civil Structural Health Monitoring 5, 195-202.
- Franke B., Franke S., Müller A., Schiere M. (2016a) Long-term behaviour of moisture content in timber constructions – Relation to service classes. INTER, Graz.
- Franke B., Franke S., Schiere M., Müller A. (2016b) Moisture diffusion in wood – Experimental and numerical investigations, WCTE, Vienna.
- Franke B., Müller A., Franke S., Magniere N. (2016c) Langzeituntersuchung zu den Auswirkungen wechselnder Feuchtegradienten in blockverleimten Brettschichtholzträgern, Forschungsbericht WHFF 2013.06, ISBN 978-3-9523787-7-9.
- Franke B., Schiere M., Franke S., Müller A. (2019) Quality assurance of timber structures, Forschungsbericht WHFF 2016.17, Berner Fachhochschule, Biel/Bienne, ISBN 978-3-906878-04-1.
- Gamper A., Dietsch P., Merk M., Winter S. (2014) Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen, Abschlussbericht, Fraunhofer IRB Verlag 2015, ISBN 978-3-8167-9518-6
- Goulet M. (1960) Die Abhängigkeit der Querzugfestigkeit von Eichen-, Buchen- und Fichtenholz von Feuchtigkeit und Temperatur im Bereich von 0° bis 100°C, Holz als Roh- und Werkstoff (18), 325-331.
- Keylwerth R., Noack D. (1964) Die Kammertrocknung von Schnittholz, Holz als Roh- und Werkstoff (22), 29-36.
- Koch J., Arndt R. W., Simon A., Jahreis M.G. (2017): Moisture monitoring of nine protected timber bridges in Germany. In: 3rd International Conference on Timber Bridges, Skellefteå, Schweden.
- Kretschmann D.E. (2010) Mechanical Properties of wood. In: Wood Handbook- Wood as an Engineering Material, Forest Products Laboratory · United States Department of Agriculture Forest Service · Madison, Wisconsin.
- Pollmeier Massivholzbau (2018) BauBuche Broschüre – Bauphysik, Kreuzburg, Deutschland, <https://www.pollmeier.com/de/downloads-im-ueberblick/Broschueren.html> (07.02.2019)
- Niemz P., Sonderegger W. (2017) Holzphysik – Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Carl Hanser Verlag München, Deutschland.
- Niklewski J., Frühwald Hansson E., Pousette A., Fjällström P. (2016) Durability of rain exposed timber bridges joints and components, WCTE 2016, Vienna, Austria.
- Müller A., Franke B., Schiere M., Franke S. (2017). Advantages of moisture content monitoring in timber bridges. In: 3rd International Conference on Timber Bridges, Skellefteå, Schweden
- Schiere M. (2016) Moisture diffusion and moisture induced stresses in glulam cross sections, Master Thesis, Bern University of Applied Sciences, Switzerland.
- Schiere M., Franke B., Franke S. (2018) Antworten zur Tragfähigkeit infolge dynamischer Klimawechsel, S-WIN Tagung Von der Forschung zur Praxis, Biel/Bienne, Schweiz.
- SIA 265:2012 Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz, 2012.
- SIA 265/1:2009 Holzbau – Ergänzende Festlegungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz, 2012.
- Simpson W. (1973) Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models, Wood and Fiber, 5 (1), 41-49.
- SN EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- SN EN 1995-2:2004 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- SN EN 1995-2/NA:2014 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken – Nationaler Anhang, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.
- SN 640451:2009 Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz; Systemaufbauten, Anforderungen und Ausführung, Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.

Berner Fachhochschule

Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur IHTA
Solothurnstrasse 102
Postfach 6096
CH-2500 Biel 6

Telefon +41 32 344 03 41

fe.ahb@bfh.ch
ahb.bfh.ch

Förderung

Bundesamt für Umwelt
Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
Projekt 2016.17 Qualitätssicherung von Holztragwerken

ISBN 978-3-906878-03-4

