

ProTimB - Monitoring von konstruktiv geschützten Holzbrücken

Johannes KOCH¹, Ralf ARNDT¹, Antje SIMON¹, Markus JAHREIS¹
¹ Fachhochschule Erfurt Fakultät Bauingenieurwesen und Konservierung /
Restaurierung, Erfurt

Kontakt E-Mail: ralf.arndt@fh-erfurt.de

Kurzfassung. Der Holzbrückenbau hat eine jahrtausendealte Tradition in Europa. Im Zuge der Industrialisierung sind jedoch zunehmend andere Baumaterialien beliebter geworden. Um langlebige, beständige und damit konkurrenzfähige Brücken aus Holz zu bauen, müssen sie vor allem gegen Niederschlag und Feuchteintrag geschützt sein. Denn ein niedriger Feuchtegehalt ist der Schlüssel zu dauerhaften Holzkonstruktionen mit einer langen Nutzungsdauer. So sollten alle tragenden Bauteile von Holzbrücken konstruktiv geschützt sein, um eine ständige Durchfeuchtung der Bauteile und einen daraus resultierenden Befall durch Holz zerstörende Pilze zu verhindern [1].

Um die Effizienz von konstruktiven Holzschutzmaßnahmen unter realen Bedingungen zu evaluieren, wurden Feuchtemonitorings an neun geschützten Holzbrücken initiiert. Neben dem Feuchtegehalt werden auch die klimatischen Bedingungen der Umgebung aufgezeichnet.

Das Paper beschreibt den Aufbau und die Anwendung des Monitoringsystems. Erste Messergebnisse und Schlussfolgerungen werden präsentiert.

Einführung

Holzbrücken werden in den letzten Jahren in Deutschland immer seltener gebaut. Bauherren haben oft erhebliche Vorbehalte, in Holzbrücken zu investieren. Hohe Wartungskosten sowie eine geringe Dauerhaftigkeit und kurze Lebensdauer werden häufig als Gründe benannt. Die Verwendung des nachhaltigen Baustoffs Holz bietet jedoch entscheidende Vorteile. Denn es ist der einzige nachwachsende Rohstoff für Ingenieurbauwerke und wird durch eine nachhaltige Forstwirtschaft auch in Zukunft in ausreichender Menge verfügbar sein. Ein weiterer großer Vorteil ist die Fähigkeit zur Kohlenstoffspeicherung über die gesamte Nutzungsdauer eines Bauwerks. Diese Eigenschaft kann dazu beitragen, dem globalen Klimawandel entgegenzuwirken.

Die Dauerhaftigkeit sollte für Holzbrücken kein Problem darstellen, sofern die Bauteile konstruktiv vor Feuchteeinwirkung geschützt werden. Dieses Prinzip hat sich im deutschsprachigen Raum als moderne und ökologische Methode zur Konstruktion von Holzbrücken ohne chemische Schutzmaßnahmen etabliert. Auch der deutsche nationale Anhang zum Eurocode 5, Teil 2 [1] fordert den konstruktiven Schutz der Haupttragelemente von Holzbrücken. Bauliche Schutzmaßnahmen sind etwa Dächer und Dachüberstände sowie Verkleidungen und Abdeckungen, von denen Beispiele in Abb. 1 zu sehen sind.

Um zu zeigen, dass die Aspekte der Dauerhaftigkeit, Nutzungsdauer und Wartungskosten für konstruktiv geschützte Holzbrücken kein Problem sind und um die



Akzeptanz des natürlichen Baustoffs Holz als echte Option für neue Brückenbauwerke zu erhöhen, wurde ein Monitoring-Programm, im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten FHprofUnt Projektes "Entwicklung einheitlicher Richtlinien für den Entwurf, den Bau, die Überwachung und Prüfung geschützter Holzbrücken" (ProTimB), initiiert.



Abb. 1. Beispiele für konstruktive Schutzmaßnahmen - Dach, Einhausung, Verkleidung, Blechabdeckung, Dachüberstand und Holz- Beton- Verbundkonstruktion.

1. Überwachung von neun geschützten Holzbrücken

1.1 Initiierung eines Monitoring-Programms

Das wichtigste Ziel des Monitoring-Programms ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit von gut geschützten Holzbrücken. Deshalb wurden neun baulich geschützte Holzbrücken mit einem Überwachungssystem zur Messung von Feuchtegehalt und Umgebungsklima ausgerüstet, ausgelegt auf einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren.

Grundlage des Monitoringkonzepts ist es, die Dauerhaftigkeit auf Basis der langfristigen Holzfeuchteentwicklung zu bewerten. Hintergrund dafür ist die Tatsache, dass ein hoher Feuchtegehalt oberhalb des Fasersättigungspunktes (um 30 Masse-%) für Holz dramatische Folgen haben kann, da ein Pilzbefall nicht ausgeschlossen werden kann. Bereits geringere Feuchtigkeitsgehalte von mehr als 20 Masse-%, insbesondere ca. 25 Masse-%, über einen längeren Zeitraum können hier problematisch sein [2]. Im Umkehrschluss ist ein Pilz- und Schädlingsbefall unwahrscheinlich bis unmöglich, bei einem Feuchtigkeitsgehalt der ständig niedriger ist als 20 Masse-%. Die Brücke wird dauerhaft und eine lange Nutzungsdauer kann vorausgesetzt werden.

Ein weiteres Ziel des Monitorings ist die Untersuchung des Einflusses bestimmter örtlicher Klimata auf den Holzfeuchtegehalt. Die Nähe zu Gewässern und Sprühnebelbereiche über Straßen oder bei Wasserfällen könnten extreme klimatische Bedingungen darstellen. Es wird untersucht, um wie viel der Feuchtegehalt infolge dieser Einflüsse im Gegensatz zu anderen Orten ohne diese Einflüsse zunimmt.

1.2 Funktionsprinzip des Monitoringsystems

Das Monitoringsystem nutzt das Prinzip der elektrischen Widerstandsmessmethode und wurde bereits in anderen Forschungsprojekten erfolgreich eingesetzt [3], [4], [5]. Diese Methode basiert auf der Abhängigkeit von elektrischem Widerstand und Materialfeuchte. Der elektrische Widerstand nimmt ab, wenn der Feuchtegehalt zunimmt und umgekehrt.

Um den Feuchtegehalt zu messen, müssen Elektroden in den Holzbauteilen der Brücken installiert werden. Die Elektroden bestehen aus unterschiedlich langen Edelstahlschrauben. In Vorversuchen wurden auch andere Arten von Elektroden getestet. Es stellte sich jedoch heraus, dass Schrauben im Vergleich zu angespitzten Gewindestangen und eingeklebten Stahlseilen exaktere und nachvollziehbarere Ergebnisse liefern [6], [7]. Die

Schrauben sind zum Teil mit einem Schrumpfschlauch isoliert, um den Feuchtegehalt in einer definierten Tiefe des Querschnitts messen zu können.

Ziel ist es, mehr Informationen über die Feuchteverteilung im Querschnitt zu erhalten da vorausgesetzt wird, dass sich eine aktive und eine passive Feuchtezone in den Holzbauteilen einstellt. In der inneren passiven Zone gibt es eine geringe Änderung des Feuchtegehalts, während die äußere aktive Zone durch einen sich stärker ändernden Feuchtegehalt gekennzeichnet ist. Infolge dieses Verhaltens können hohe Spannungsdifferenzen auftreten und daraus resultierende Risse in den Bauteilen nicht ausgeschlossen werden [8].

Auch die Holzarten beeinflussen die Messergebnisse. Daher sind Kalibrierkurven für jede Holzart erforderlich. Sieben der neun Brücken, die Teil des Monitoring- Programms sind, wurden mit Brettschichtholz aus Fichte gebaut. Zwei Brücken sind aus Lärche. Ein weiterer relevanter Einflussfaktor ist die Temperatur des Materials [9]. Daher werden zusätzliche Sensoren verwendet, um die Holztemperatur in der Nähe der Elektroden zu messen. Dies ermöglicht eine Kompensation der gemessenen Holzfeuchtwerte.

Zur Untersuchung der lokalen Klimabedingungen wurden zusätzlich Klimasensoren installiert. Diese Sensoren wurden in der Nähe der Feuchte- und Temperaturmessstellen der meisten Messbereiche platziert. Alle Messwerte werden von Dataloggern gespeichert und Woche für Woche von einem Datenfernübertragungsgerät über das Mobilfunknetz versendet. Für eine der Brücken ist diese Art der Datenfernübertragung unmöglich, da sie sich in einem Gebiet mit unzureichender Netzabdeckung befindet. In diesem Fall werden die Daten zwei bis dreimal jährlich manuell ausgelesen.

1.3 Überwachte Brücken im Monitoring-Programm

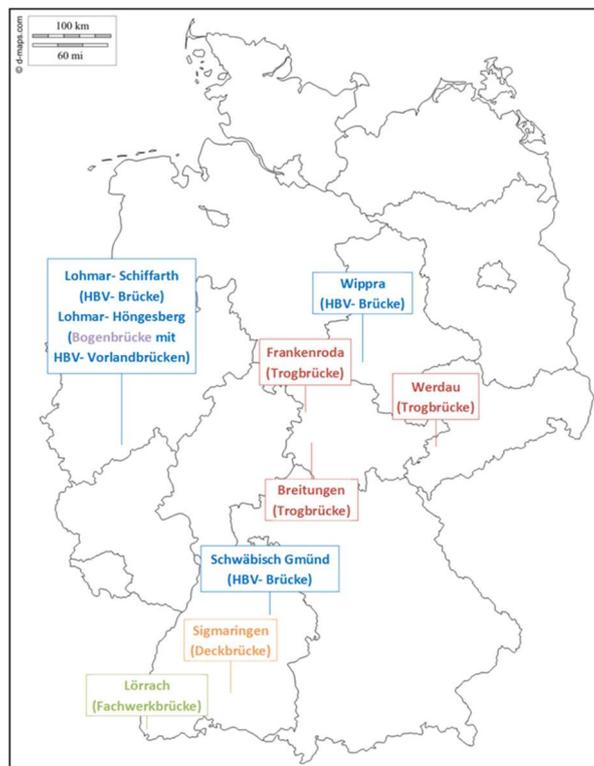


Abb. 2. Lage und Konstruktionstyp der überwachten Brücken.

Die neun ausgewählten Brücken sind, wie in Abb. 2 dargestellt, über ganz Deutschland verteilt. Darüber hinaus werden unterschiedliche Konstruktionstypen untersucht, wie etwa Holz-Beton-Verbundbrücken (HBV), Trogbrücken, Bogenbrücken, Fachwerkbrücken und

Deckbrücken. Diese sind in Abb. 2 durch verschiedene Farben dargestellt. Die Brücken in Höngesberg, Schiffarth und Wippra sind Straßenbrücken. Die anderen Brücken sind Fußgänger- und Radwegbrücken. Alle Brücken überspannen Flüsse oder Bäche, die Fachwerkbrücke in Lörrach, überspannt zusätzlich eine Straße. Diese Standorte wurden ausgewählt, um die Feuchteexposition infolge Gewässer und Straßenverkehr zu untersuchen.

1.4 Implementierung des Systems

Die erste Brücke (Lohmar Höngesberg) wurde im August 2015 mit einem Monitoringsystem ausgestattet. Die anderen Brücken wurden im Oktober und November 2016 ausgerüstet.

Jede Brücke verfügt über mindestens zwei Messbereiche an tragenden Bauteilen. Ein Messbereich wurde immer über dem Gewässer platziert. Der zweite Messbereich wurde über dem Vorland eingerichtet, üblicherweise in der Nähe des Widerlagers. Diese Anordnung ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der Gewässernähe auf die klimatischen Umgebungsbedingungen und infolge dessen auf den Holzfeuchtegehalt. Bei einigen Brücken wurde ein dritter Messbereich an interessanten Stellen der Konstruktion implementiert, z.B. an tragenden Bauteilen unterhalb des offenen Brückenbelags oder oberhalb einer Straße im Sprühnebelbereich.

Die Messbereiche wurden in ähnlicher Weise ausgestattet, wie in Abb. 3 gezeigt. Zwei bis vier Elektrodenpaare wurden in mehreren Tiefen eingebracht. In Abb. 3 sind vier Elektrodenpaare zu sehen. Die Messtiefen betragen in diesem Beispiel 20, 40, 60 und 100 mm. Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird normalerweise ein Temperatursensor (rotes Kabel) in der Nähe der Elektroden implementiert. Die letzte Komponente ist der Sensor zur Messung der Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit). In Abb. 3 ist das der kleine Kasten zwischen den Elektroden und dem Temperatursensor.



Abb. 3. Beispiel eines Messbereichs an einer Radwegbrücke in Frankenroda.

1.5 Datenauswertung

Die gesammelten Daten werden in mehreren Schritten analysiert. Zunächst wird der Holzfeuchtegehalt aus dem gemessenen elektrischen Widerstand unter Verwendung der Kalibrierkurve für die jeweilige Holzart berechnet. Der zweite Schritt ist die Temperaturkompensation, um den Feuchtegehalt zu korrigieren.

Die Klimabedingungen werden als berechnete Gleichgewichtsfeuchte angezeigt, der sich aufgrund des hygrokopischen Verhaltens von Holz theoretisch auf der Oberfläche der Bauteile ergibt. Die Berechnung der Gleichgewichtsfeuchte basiert auf einem mathematischen Modell von A. J. Hailwood und S. Horrobin (Gleichung 1) [10] in Kombination mit den materialspezifischen Parametern von W. T. Simpson von 1973 (Gleichungen 2 bis 5) [11]:

$$u = \frac{1800}{M_p} \cdot \left[\frac{K \cdot h}{1 - K \cdot h} + \frac{K_1 \cdot K \cdot h + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot h^2}{1 + K_1 \cdot K \cdot h + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot h^2} \right] \quad (1)$$

$$M_p = 330 + 0,452 \cdot T + 0,00415 \cdot T^2 \quad (2)$$

$$K = 0,791 + 0,000463 \cdot T - 0,000000844 \cdot T^2 \quad (3)$$

$$K_1 = 6,17 + 0,00313 \cdot T - 0,0000926 \cdot T^2 \quad (4)$$

$$K_2 = 1,65 + 0,0202 \cdot T - 0,0000934 \cdot T^2 \quad (5)$$

wobei h = relative Luftfeuchte und T = Umgebungstemperatur.

2. Erste Ergebnisse an der Pilotbrücke

Eine Straßenbrücke, die den kleinen Fluss Agger überspannt, wurde bereits im August 2015 mit einem Monitoringsystem ausgestattet. Die Brücke befindet sich in Lohmar Höngesberg bei Köln in Nordrhein-Westfalen und wurde 2014 errichtet. Sie ist eine vollständig geschützte Holzbogenbrücke mit zwei Holz- Beton- Verbundvorlandbrücken. Alle Holzbauteile der Tragkonstruktion bestehen aus Fichtenbrettschichtholz (Abb.4).



Abb. 4. Straßenbrücke in Lohmar Höngesberg.

Drei Messbereiche wurden implementiert, wobei zwei davon dicht beieinander über dem Fluss liegen. Der erste Messbereich wurde an dem Zugband des Bogens eingerichtet, der aus Brettschichtholz besteht. Zwei Elektrodenpaare wurden eingebracht, um den Feuchtegehalt in Tiefen von 20 und 100 mm zu messen. Derselbe Aufbau wurde am zweiten Messbereich gewählt. Dieser wurde an der Unterseite der Fahrbahnplatte installiert, die ebenfalls aus Brettschichtholz besteht. Außerdem wurden ein Temperaturmesspunkt und ein Klimamesspunkt platziert. Beide Messbereiche sind in Abb. 5 zu sehen.



Abb. 5. Zwei Messbereiche über dem Fluss an der Unterseite der Fahrbahnplatte (links) und dem Zugband des Bogens (rechts).

Der dritte Messbereich wurde oberhalb des Vorlandes im Hirnholz eines Hauptträgers platziert. Die Holzfeuchte wird in Tiefen von 20, 60, 100 und 135 mm gemessen, ein Temperatursensor wurde in der Nähe installiert. Im Oktober 2016 wurde ein Klimasensor eingerichtet.

Die Zwischenergebnisse des Monitorings sind in den Diagrammen der Abb. 6 bis 8 dargestellt. Diese zeigen die Holzfeuchte in den verschiedenen Messtiefen und die Gleichgewichtsfeuchte, die aus den klimatischen Umgebungsbedingungen berechnet wurde. Es wird ein dreitägiger gleitender Durchschnitt der ermittelten Holzfeuchte und der Gleichgewichtsfeuchte dargestellt. Einerseits wurde dieser Durchschnitt gewählt, um die Tag- und Nachtschwankungen und sehr kurze Perioden extremer klimatischer Bedingungen, die für die langfristige Entwicklung nicht relevant sind, zu glätten. Andererseits wurde das Intervall des gleitenden Durchschnitts so kurz wie möglich gewählt, um unerwartete Spitzen zu erfassen, z.B. als Folge von eindringendem Wasser.

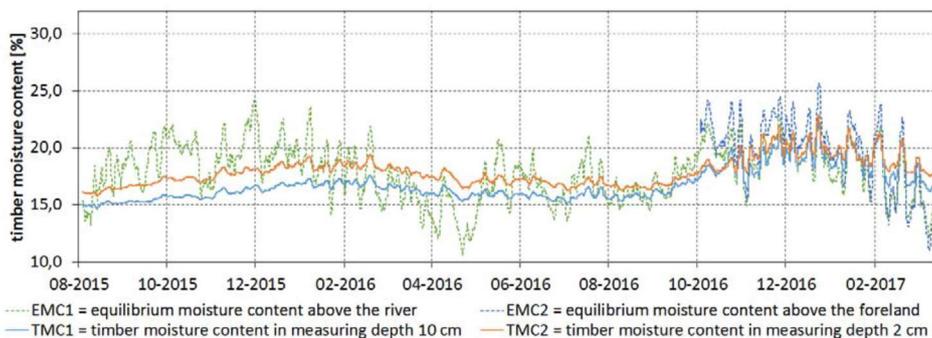


Abb. 6. Messergebnisse des Messbereichs am Zugband über dem Fluss.

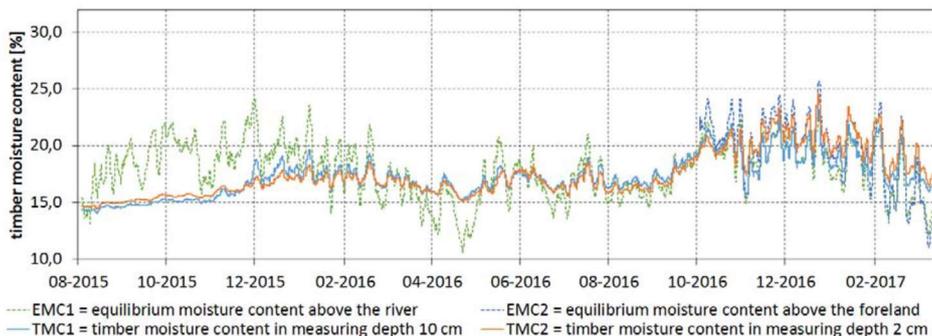


Abb. 7. Messergebnisse des Messbereichs an der Fahrbahnplatte über dem Fluss.

Die Messergebnisse der Messbereiche über dem Fluss sind in Abb. 6 und 7 dargestellt. Es stellte sich heraus, dass die Holzfeuchte in den ersten 14 Monaten die Grenze von 20 Masse-% nicht überschritten hat. Im Winter 2015/16 wurde ein mittlerer Anstieg von 3 Masse-% festgestellt. Im Winter 2016/2017 war es viel kälter als im Jahr zuvor. Als Ergebnis stieg der Feuchtegehalt teilweise auf bis zu 24 Masse-% an. Die meiste Zeit verblieb die Feuchte jedoch auf einem Niveau von ca. 20 Masse-%. Eine ähnliche Entwicklung im zweiten Winter wurde über dem Vorland beobachtet. Dieses Verhalten muss im Weiteren ständig beobachtet werden. Die durchschnittliche Holzfeuchte beträgt für die gesamte betrachtete Messdauer beider Messbereiche und beider Messtiefen über dem Gewässer ca. 17,4 Masse-%. Dies liegt nahe am Durchschnitt der berechneten Gleichgewichtsfeuchte oberhalb des Flusses, der etwa 17,8 Masse-% beträgt. Nach gegenwärtigen Kenntnisstand ist daher davon auszugehen, dass die konstruktiven Schutzmaßnahmen die Erwartungen erfüllen.

Abb. 8 zeigt die Entwicklung der Holzfeuchte der Messstelle über dem Vorland. Der Feuchtegehalt stieg im November 2015 und im ersten Quartal 2016 stark an. Es stellten sich Feuchtwerte oberhalb des Fasersättigungspunktes ein. Eine Inspektion ergab, dass die Übergangskonstruktion genau über dem Messbereich undicht war. Deshalb drang Regenwasser in die Konstruktion ein und lief über den Messbereich. Eine hinterlüftete Verkleidung wurde am Hirnholz der Hauptträger angebracht, um sie vor dem eindringenden Wasser zu schützen. Die Arbeiten dazu wurden im April 2016 durchgeführt und es zeigt sich, dass die Holzfeuchte im Sommer abnimmt. Dies zeigt die Wichtigkeit von baulichen Schutzmaßnahmen für einen niedrigen Holzfeuchtegehalt. Bereits der einfache Einbau einer Verkleidung verbesserte die Situation erheblich.

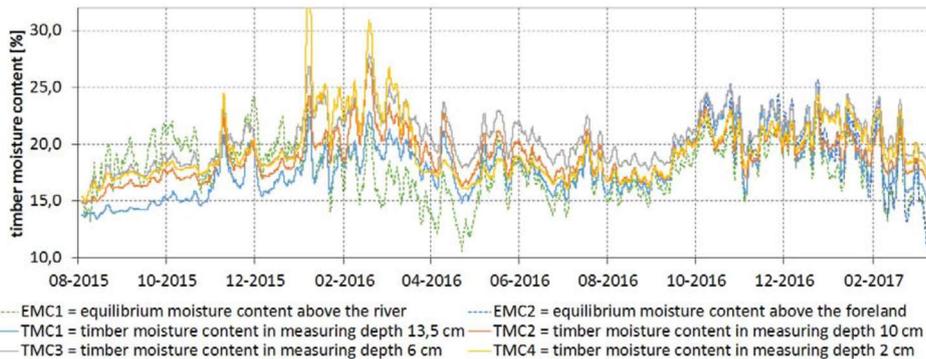


Abb. 8. Messergebnisse des Messbereichs an einem Hauptträger über dem Vorland.

3. Weitere Ergebnisse

Ein weiterer Indikator für die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen ist durch den Mittelwert der gemessenen Holzfeuchte für die verschiedenen Messbereiche an allen Brücken gegeben. Der hier betrachtete Auswertungszeitraum der Ergebnisse vom Monitoring in Höngesberg beträgt mehr als anderthalb Jahre von August 2015 bis März 2017. Der Auswertungszeitraum der anderen Brücken beträgt etwa ein halbes Jahr von Oktober oder November 2016 bis März 2017.

Die niedrigsten Mittelwerte stellten sich in Schiffarth und Breitung bei 16,3 Masse-% ein und der höchste in Höngesberg bei 19,2 Masse-%, wobei die extrem hohen Werte mit berücksichtigt wurden, welche durch eindringenden Niederschlag verursacht worden waren. Es wird ersichtlich, dass die Holzfeuchte im Allgemeinen an allen Brücken unter der kritischen Grenze von 20 Masse-% liegt. Ein relevanter Unterschied zwischen der gemessenen Holzfeuchte über dem Vorland und dem jeweiligen Gewässer wird im Bewertungszeitraum nicht festgestellt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Monitoring- Programmes im Rahmen von ProTimB ist es, den Einfluss bestimmter örtlicher Klimata auf den Holzfeuchtegehalt und die Wirksamkeit von konstruktiven Holzschutzmaßnahmen auf die Holzfeuchte und letztlich die Dauerhaftigkeit von Holzbrücken zu untersuchen. Dazu wurden neun Holzbrücken mit Monitoringsystemen ausgestattet, welche den Holzfeuchtegehalt und die klimatischen Umgebungsbedingungen aufzeichnen. Unterschiedliche Konstruktionstypen und unterschiedliche klimatische Umgebungsbedingungen charakterisieren diese Brücken. Acht von ihnen wurden im Oktober

und November 2016 mit den Geräten ausgestattet. Für eine Brücke, die im August 2015 ausgerüstet wurde, liegen die Ergebnisse einer längeren Auswertungszeit vor.

Erste Ergebnisse zeigen, dass bauliche Schutzmaßnahmen einen akzeptablen Holzfeuchtegehalt garantieren können. Weiterhin wurde ein Problem an einer undichten Übergangskonstruktion festgestellt. Eine hinterlüftete Verkleidung wurde eingebaut, um die betroffenen Bauteile vor eindringendem Niederschlag zu schützen, bevor sich schwerwiegende Sekundärschäden am Holztragwerk einstellen können. Dies zeigt auch das Potenzial von Monitoringsystemen zur Vermeidung kostspieliger Schäden.

Derzeit wird eine große Menge an Daten gesammelt. Die Messung und Auswertung dieser läuft mindestens bis Herbst 2018, wenn das Forschungsprojekt abgeschlossen wird.

Danksagung

Für die Förderung von ProTimB gilt unser Dank dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Unternehmen der Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e. V.: Schaffitzel Holzindustrie GmbH + Co. KG, Schmees & Lühn Holz- und Stahlingenieurbau GmbH, Grossmann Bau GmbH & Co.KG sowie Setzpfandt Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG.

Referenzen

- [1] DIN EN 1995-2/NA:2011-08, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken.
- [2] Graf E., Meili M.: “Holzerstörende Pilze und Insekten - Analyse, Prognose, Bekämpfung”, Lignum, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz (Ed.), Lignatec: Die technischen Informationen der Lignum EMPA/LIGNUM-Richtlinie 14. CH-Zurich, 2001.
- [3] Brischke C., Rapp A. O., “Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufs an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing”, Arbeitsbericht Nr. 2007/2, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Holzbiologie und Holzschutz, DE-Hamburg, 2007.
- [4] Franke B., Müller A., Vogel M., Tannert T., “Langzeitmessung der Holzfeuchte und Dimensionsänderung an Brücken aus blockverleimtem Brettschichtholz”, Forschungsbericht, Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, CH-Biel, 2012.
- [5] Gamper A., Dietsch P., Merk M., Winter S., “Building Climate – Long-term measurements to determine the effect on the moisture gradient in timber structures”, Final report, TU München, DE-München, 2014.
- [6] Koch J., “Feuchtemonitoring an geschützten Holzbrücken - Planung, Durchführung und Auswertung” Master Thesis, Fachhochschule Erfurt - University of Applied Sciences, DE-Erfurt, 2015.
- [7] Koch, J.; Simon, A.; Arndt, R. W.: “Monitoring of moisture content of protected timber bridges”, CD-ROM Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), AT-Vienna, August 22-25, 2016.
- [8] Franke B., Franke S., Schiere M., Müller A., “Moisture diffusion in wood – Experimental and numerical investigations”, CD-ROM Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), AT-Vienna, August 22-25, 2016.
- [9] Keylwerth, R., Noack, D., Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip, Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 14, No. 5, 1956, pp. 162-172.
- [10] Hailwood A. J., Horrobin S.: “Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model”, Transactions of the Faraday Society, Vol. 42B, 1946, pp. 84-92.
- [11] Simpson W. T.: “Prediction equilibrium moisture content of wood by mathematical model”, Wood and Fiber, Vol. 5, No. 1, 1973, pp. 41-49.