

Feuchtemonitoring an neun geschützten Holzbrücken in Deutschland

Verfasser

Die Planung, Durchführung und Auswertung des Feuchtemonitorings an neun geschützten Holzbrücken erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung einheitlicher Richtlinien für den Entwurf, den Bau, die Überwachung und Prüfung geschützter Holzbrücken – Protected Timber Bridges (ProTimB)“. Das Projekt wurde finanziert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, den Firmen der Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V. und dem Ingenieurbüro Setzpfandt Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG.

Projektleitung und Forscherteam:

Prof. Dr.-Ing. Antje Simon	Fachhochschule Erfurt
Prof. Dr.-Ing. Ralf Arndt	Fachhochschule Erfurt
Dr.-Ing. Markus Jahreis	Fachhochschule Erfurt
Johannes Koch	Fachhochschule Erfurt

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	2
2	Untersuchte Bauwerke	2
3	Messmethode und Messgeräte	3
3.1	Holzfeuchtebestimmung anhand der elektrischen Widerstandsmessmethode	3
3.2	Aufzeichnung der Bauteiltemperatur	4
3.3	Aufzeichnung des Klimas und Ermittlung der Ausgleichsfeuchte	4
3.4	Messgeräte	4
4	Applikation der Messgeräte	5
5	Ergebnisse und Diskussion	7
5.1	Funktionsfähigkeit des konstruktiven Holzschutzes	7
5.2	Einfluss eines Gewässers auf die Holzfeuchteentwicklung	8
5.3	Einfluss von Sprühnebel auf die Holzfeuchteentwicklung	9
6	Zusammenfassung und Ausblick	9
7	Literatur	10
	Anhang A – Dokumentation der untersuchten Bauwerke	
	Anhang B – Installationspläne	
	Anhang C – Ergebnisse der Monitorings	

1 Ziel

Im Rahmen des Forschungsprojektes „ProTimB“ wurde die Holzfeuchteentwicklung an neun geschützten Holzbrücken in Deutschland über einen Zeitraum von 2,5 bis 3,8 Jahren aufgezeichnet und ausgewertet. Die Durchführung des Monitorings erfolgte mit dem Ziel der Untersuchung folgender Aspekte:

- Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Maßnahmen des konstruktiven Holzschutzes
- Einfluss der Gewässernähe auf die Dauerhaftigkeit geschützter Holzbrücken
- Einfluss von Sprühnebel auf die Dauerhaftigkeit geschützter Holzbrücken

Im Folgenden werden Konzept, Durchführung und Auswertung des Feuchtemonitorings erläutert.

2 Untersuchte Bauwerke

Für das Monitoring wurden neun geschützte Holzbrücken in verschiedenen Teilen Deutschlands ausgewählt (Abbildung 1). Als Holz-Beton-Verbund- (HBV), Deck-, Trog-, Bogen- und Fachwerkbrücken repräsentieren die einbezogenen Bauwerke die Bandbreite der relevanten Konstruktionstypen (Abbildung 2). Das Haupttragsystem sämtlicher Brücken ist durch konstruktive Maßnahmen vor direkter Bewitterung geschützt. Anhand der Messdaten kann die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen des konstruktiven Holzschutzes beurteilt werden. Alle Brücken führen über ein Fließgewässer, um den Einfluss der Gewässernähe auf die Holzfeuchteentwicklung quantifizieren zu können. Ein Bauwerk unterliegt zusätzlich der Sprühnebelexposition einer Bundesstraße. Weitere Bauwerksinformationen können Anhang A entnommen werden.

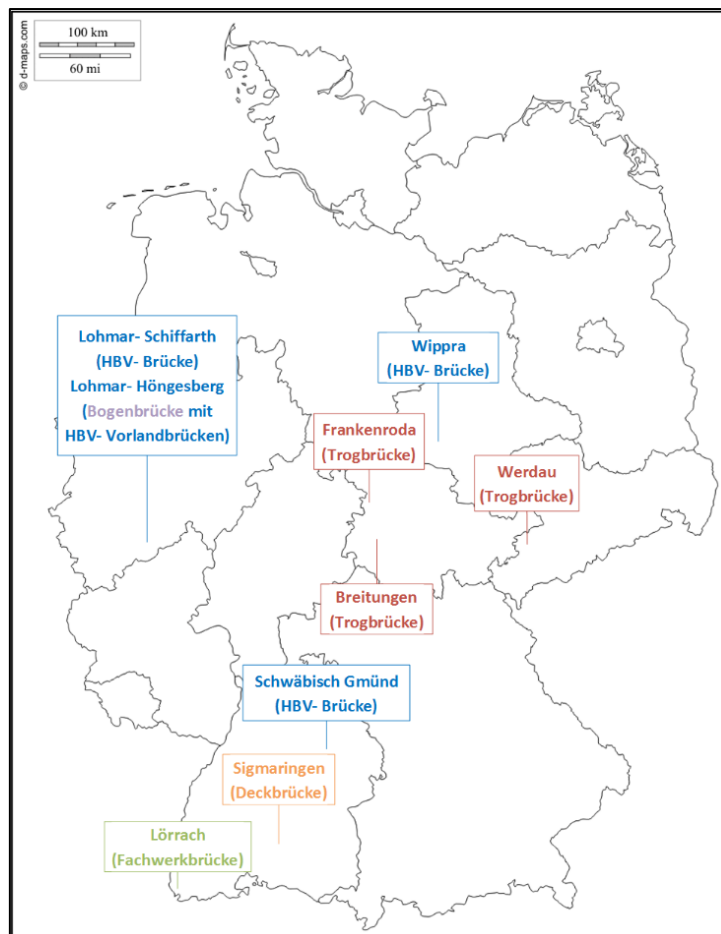


Abbildung 1: Brückenstandorte und Konstruktionstypen

Die erste Brücke wurde im August 2015 in Lohmar Höngesberg mit einem Messsystem ausgestattet. Im Oktober und November 2016 erfolgte die Installation der Messsysteme an den anderen acht Bauwerken.

An der Brücke über die Wiese in Lörrach wurde unabhängig von ProTimB ein zusätzliches Monitoringsystem im Februar 2018 als Ergänzung zum bereits installierten System eingebaut. Eine Erweiterung dieses zweiten Systems wurde im März 2019 vorgenommen. Die Messdaten des zweiten Systems sind im vorliegenden Bericht ebenfalls enthalten.

Mit Beendigung des Forschungsprojektes ProTimB wurden im Mai und Juni 2019 an fünf Brücken die Messsysteme zurück gebaut. Zum Ausbau der wissenschaftlichen Datenbasis wird in Abstimmung mit den jeweiligen Bauherren an den Brücken Lohmar-Höngesberg, Wippra, Breitungen und Lörrach die Holzfeuchteüberwachung fortgeführt.

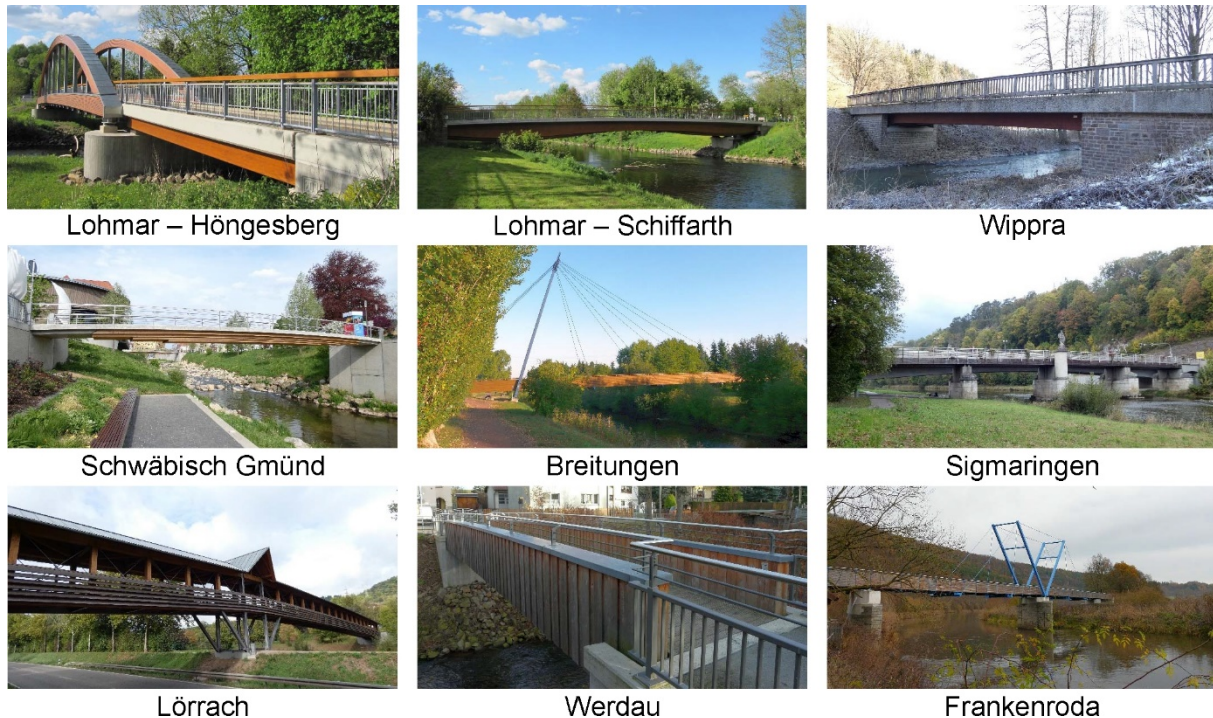


Abbildung 2: Übersicht zu den untersuchten Bauwerken

3 Messmethode und Messgeräte

3.1 Holzfeuchtebestimmung anhand der elektrischen Widerstandsmessmethode

Die Bestimmung der Holzfeuchte basiert auf dem Prinzip der elektrischen Widerstandsmessmethode. Dazu wird über zwei Elektroden eine Spannung am Holz angelegt und der elektrische Widerstand gemessen. Dieser Widerstand korreliert mit der Holzfeuchte. Die Vorgehensweise zur Abschätzung des Feuchtegehaltes für Schnittholz nach diesem Verfahren ist genormt [1]. Die Holzfeuchte wird stets auf die Masse des darr getrockneten Holzes bezogen und daher in der Einheit Masseprozent (M%) angegeben.

Der elektrische Widerstand definiert, welche elektrische Spannung erforderlich ist, um einen bestimmten elektrischen Strom durch einen elektrischen Leiter fließen zu lassen. Nach dem Ohm'schen Gesetz kann durch Messung des Spannungsabfalls bei gleichbleibender Stromstärke der Widerstand eines elektrischen Leiters bestimmt werden. Darrtrockenes Holz ist ein Isolator. Wird Wasser aufgenommen, steigt die Leitfähigkeit mit zunehmendem Wassergehalt an. Der Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Holzfeuchte kann durch experimentelle Ermittlung von Referenzkurven beschrieben werden.

Da Holzinhaltsstoffe die Leitfähigkeit beeinflussen, muss für jede Holzart eine eigene Referenzkurve vorliegen. Bei den hier beschriebenen Bauwerken sind die meisten der untersuchten Bauteile aus Fichtenholz (*Picea abies*) gefertigt. Lediglich an den Brücken Breitungen und Werdau bestehen die untersuchten Haupttragelemente aus Lärchenholz (*Larix decidua*).

Auch die Bauteiltemperatur beeinflusst die Messung [2]. Deshalb ist die Aufzeichnung der Holztemperatur und eine anschließende Kompensation der ermittelten Rohdaten der Holzfeuchte erforderlich.

Weiterhin beeinflussen auch Dichteunterschiede, Äste, Risse, Harzeinschlüsse, Klebefugen, Keilzinkenstößen u. ä. den Stromfluss zwischen den Elektroden und damit das Messergebnis. An den Brücken wurden die Elektroden so platziert, dass derartige Störungen so weit wie möglich vermieden wurden. Ganz ausgeschlossen werden können diese Einflüsse jedoch nicht, da Holzfehler, Äste u. ä. an der Holzoberfläche ggf. nicht sichtbar, im Bereich der Elektroden spitzen in der Tiefe des Bauteils jedoch vorhanden sind.

3.2 Aufzeichnung der Bauteiltemperatur

Die Temperatur der Bauteile wurde im Bereich der Feuchtemessstellen für die erforderliche Temperaturkompensation der Rohdaten der Holzfeuchte aufgezeichnet. Dies erfolgte mittels NTC-Temperatursensoren, welche auch als Heißleiter bezeichnet werden.

3.3 Aufzeichnung des Klimas und Ermittlung der Ausgleichsfeuchte

Ergänzend zur Holzfeuchte wurde auch das Umgebungsklima aufgezeichnet. Hierzu wurden mit einem kapazitiven Sensor die relative Luftfeuchte und mit einem Bandlückensensor die Lufttemperatur ermittelt.

Aus der gemessenen relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur wird die Ausgleichsfeuchte nach dem zweischichtigen Hailwood-Horrobin-Sorptionsmodell [3] mit den Materialparametern von Simpson (1973) [4] berechnet. Die Ausgleichsfeuchte definiert einen theoretischen Feuchtwert an der Bauteiloberfläche. Der Bestimmungsgleichung (1) liegt ein mathematisches Modell für hygroskopische Stoffe zugrunde, das auf der Wasserdampfadsorption in Polymeren basiert und damit für die Zellulose des Holzes gilt.

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

In Formel (1) ist AF die Ausgleichsfeuchte, M_p das Molekulargewicht des Holzes, K, K_1 und K_2 Gleichgewichtskonstanten des hydratisierten und nichthydratisierten Holzes und h die relative Luftfeuchte. M_p , K, K_1 und K_2 sind abhängig von der Lufttemperatur und der Holzart.

3.4 Messgeräte

Für die Monitorings wurden Messgeräte der Firma Scantronik Mugrauer GmbH verwendet. Die Ermittlung der Holzfeuchte erfolgte mit dem *Materialfeuchte Gigamodul*. Der Messgerätehersteller gibt den Messbereich des Gerätes mit „unter 10 kOhm bis über 100 GOhm“ an, was einer Holzfeuchte von unter 6 M% bis über 90 M% entspricht [6]. Eine Überprüfung der Messgenauigkeit des *Materialfeuchte Gigamoduls* fand im Frühjahr und Herbst 2018 sowie zum Abschluss des Projekts mit Hilfe von Festwiderständen statt.

Das Klima zeichneten kabelgebundene oder Funk übertragende *Thermo-Hygro-Sensoren* auf. Die Fehlertoleranz des Klimasensors gibt der Messgerätehersteller mit $\pm 1,8 \%$ für die relative Luftfeuchtigkeit und $\pm 0,3 \text{ °C}$ für die Temperatur an [6]. Die Holzfeuchte- und Klimadaten wurden ebenso wie die Bauteiltemperaturen aus den *externen Temperatur-Sensoren* in Datenloggern *Thermofox Universal* gespeichert.

An acht der neun Brücken konnten die Messdaten mittels Datenfernübertragung per mobilem Internet als E-Mail Anhang in einem wöchentlichen Turnus zur Auswertung versendet werden. Dafür wurde das Gerät *Remotefox* der Firma Scantronik Mugrauer GmbH verwendet. An der

Birkbergbrücke bei Wippra war die Fernübertragung aufgrund einer mangelnden Netzabdeckung nicht möglich. Die Daten wurden an dieser Brücke etwa halbjährlich manuell ausgelesen.

Sämtliche Messgeräte und Datenlogger verfügten über eine Feuchteschutzlackierung und waren mit den Übertragungsgeräten zentral in einem feuchteisolierten Installationskasten untergebracht (Abbildung 3).



Abbildung 3: Innenansicht eines Installationskastens (li. obere Ebene, re. untere Ebene)

4 Applikation der Messgeräte

Die Installation des Monitoringsystems wurde aufgrund der konstruktiven Besonderheiten und speziellen Standortbedingungen für jede der neun Brücken separat angepasst. Im Anhang A sind alle Bauwerke inklusive Fotodokumentation zu den Messstellen beschrieben. Anhang B enthält die Installationspläne der Monitoringsysteme. An jeder Brücke befanden sich zwei bis drei Messstellen, vorrangig an den Haupttragelementen. Zur Verifizierung des Einflusses der Gewässernähe wurde eine Messstelle stets über dem Gewässer und die zweite Messstelle über dem Vorland eingerichtet.

An der Brücke Lörrach befindet sich zusätzlich zu den Messstellen über Gewässer und Vorland eine dritte Messstelle über einer Bundesstraße, um den Einfluss der Sprühnebelexposition zu erfassen. An der Brücke Werdau war eine dritte Messstelle an einem Bohlenbelagsträger eingerichtet worden, um zu untersuchen, ob die Feuchtebelastung dieses unzureichend geschützten Bauteils größer ist als die des konstruktiv geschützten Hauptträgers. In der Regel war jede Messstelle mit zwei bis vier Feuchtemesspunkten, einem Bauteiltemperaturmesspunkt und einem Klimamesspunkt ausgestattet. Abweichend davon wurden an der Birkbergbrücke Wippra ein zusätzlicher Klimamesspunkt über dem Gelände inmitten üppiger Vegetation und, aufgrund der räumlichen Nähe, ein gemeinsamer Klimamesspunkt für Vorland- und Gewässerbereich eingerichtet.

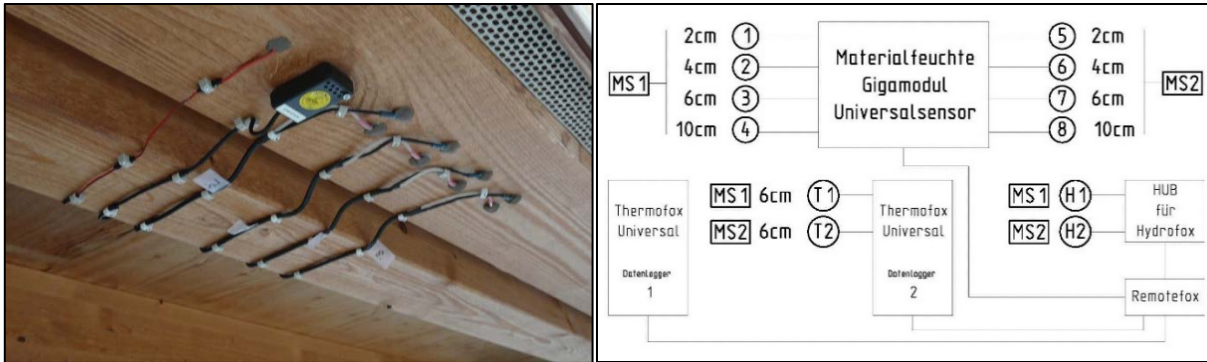


Abbildung 4: Messstelle über dem Gewässer (links) und Schema Messplan (rechts) an der Brücke Frankenroda

Abbildung 4 zeigt den typischen Aufbau einer Messstelle. Als Elektroden für die Holzfeuchtemessung dienten schaftisolierte Edelstahlschrauben. Vier Elektrodenpaare ermittelten in diesem Beispiel den Widerstand in den Messtiefen 2, 4, 6 und 10 cm.

Die Installation der Elektroden bedarf besonderer Sorgfalt, um systematische Messfehler auszuschließen. Es ist darauf zu achten, dass die Isolierung der Schraubenschäfte nicht beschädigt wird und die Elektroden spitzen fest im Holz sitzen. Um einen Austausch der Klimata zwischen Bohrlochinnerem und Außenbereich zu unterbinden, ist das Bohrloch sauber abzudichten. Die Elektrodenköpfe dürfen keinen Kontakt zur Holzoberfläche haben und müssen ebenfalls abgedichtet werden, um Messfehler infolge von Oberflächen-Kriechströmen (z. B. durch Einwirkung von Kondenswasser, Sprühnebel, Verunreinigungen, Salzen oder Spinnweben) zu verhindern [7]. In Abbildung 5 ist ein geöffnetes Modell zu sehen, welches die installierten Elektroden in der Form darstellt, wie sie an den Brücken eingebracht wurden. Abbildung 4 zeigt weiterhin den Bauteiltemperatursensor (rotes Kabel) in einer Messtiefe von 6 cm und den Klimasensor (schwarzes Kunststoffgehäuse).

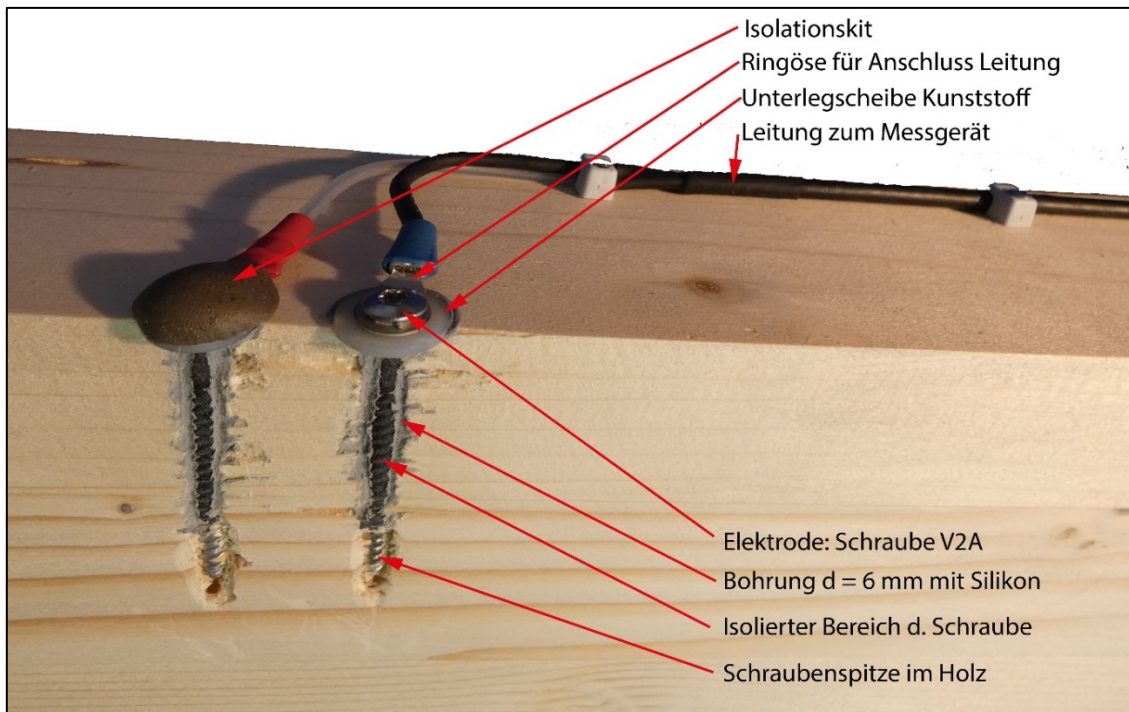


Abbildung 5: Modellhafte Darstellung der installierten Elektroden

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Funktionstüchtigkeit des konstruktiven Holzschutzes

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass die Holzfeuchte im Messzeitraum an acht der neun Brücken sowohl im Bereich über dem Vorland als auch über dem Gewässer im Mittel weniger als 20 M% betrug.

Tabelle 1: Mittelwerte der Holz- und Ausgleichsfeuchten je Messstelle an den neun Bauwerken

Brücke	Zeitraum	Holzfeuchte über Vorland	Holzfeuchte über Gewässer	Ausgleichs- feuchte ü. Vorland	Ausgleichs- feuchte ü. Gewässer
		[M%]			
Höngesberg	19.08.2015- 18.06.2019	18,1	17,1	16,3	16,5
Schiffarth	21.10.2016- 18.06.2019	16,0	15,9	16,5	15,7
Wippra	13.10.2016- 18.06.2019	18,1	17,7	17,9 ^a (18,8) ^b	
S. Gmünd	28.10.2016- 30.04.2019	15,7	16,1	14,7	15,3
Breitungen	26.10.2016- 27.05.2019	15,8	15,9	16,6	15,9
Sigmaringen	04.11.2016- 14.05.2019	16,6	15,9	16,5	16,4
Lörrach	03.11.2016- 12.06.2019	20,3 (13,8) ^c	21,4 (16,4) ^e	15,6 (14,3) ^d	16,2
Werdau	24.11.2016- 06.06.2019	16,0	15,7	16,3	16,0
Frankenroda	23.11.2016- 27.05.2019	16,5	16,7	16,7	15,9

^a Ausgleichsfeuchte wird für beide Messstellen (Vorland und Gewässer) aus den Werten von nur einem Klimasensor unter der Brücke berechnet.

^b Wert in Klammern stellt das Ergebnis der Ausgleichsfeuchteberechnung für die Klimamessstelle über dem Vorland inmitten üppiger Vegetation dar.

^c Wert in Klammern stellt das Ergebnis der Holzfeuchtemessung für die Messstelle über der Bundesstraße dar.

^d Wert in Klammern stellt das Ergebnis der Ausgleichsfeuchteberechnung für die Messstelle über der Bundesstraße dar.

^e Wert in Klammern stellt das Ergebnis der Holzfeuchtemessung für die Messstelle über dem Gewässer dar, welche mit dem zweiten Messsystem eingerichtet wurde.

Diese Holzfeuchtwerte unter 20 M% sind im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Brücken grundsätzlich positiv zu bewerten, ein Pilzwachstum ist unter diesen Bedingungen nicht zu erwarten [8], [9]. Da jedoch auch geringere Zeiträume hoher Holzfeuchten zum Pilzwachstum führen können, ist eine genauere Betrachtung der Holzfeuchteentwicklung notwendig.

Bei Betrachtung der einzelnen Diagramme der Bauwerke und Messstellen im Anhang C ist zu erkennen, dass die Holzfeuchte an den Brücken in Lohmar-Schiffarth, Schwäbisch Gmünd, Breitung, Werdau und Frankenroda die Grenze von 20 M% nicht erreichte oder nur sehr kurzzeitig geringfügig überschritt. Im Praxiskommentar zu DIN 68800 [10] wird ein maximaler Zeitraum von vier Monaten angegeben, in dem eine Holzkonstruktion erfahrungsgemäß auch unter einer höheren Feuchtebelastung schadfrei bleibt. Bei den Brücken in Wippra und Sigmaringen wurde die 20 M%-Grenze regelmäßig für einige Wochen im Winter überschritten. Dies ist unkritisch, da der Zeitraum der Überschreitung kürzer als vier Monate war und eine Rücktrocknung im Frühjahr erfolgte.

Einen Sonderfall stellt die Brücke in Lohmar-Höngesberg dar. Gleich zu Beginn der Messungen wurden immer wieder deutliche Überschreitungen der 20 M% Grenze an der Messstelle über dem Vorland festgestellt. Die Ursache hierfür war eine defekte Übergangskonstruktion. Aufgrund des Defektes lief regelmäßig Niederschlagswasser direkt über die Messstelle. Der Bauherr wurde umgehend über den Schaden informiert. Nachdem als kurzfristige Schutzmaßnahme eine zusätzliche Verschalung am Hirnholz angebracht worden war, sanken die Messwerte der Holzfeuchte deutlich. Trotzdem traten auch in den Folgejahren Überschreitungen des Grenzwertes in den Wintermonaten auf. Obwohl auch hier eine Rücktrocknung erfolgte (Diagramm C1), wurde dem Bauherren die Instandsetzung der Fahrbahnübergangskonstruktion dringend empfohlen.

An der Brücke über die Wiese und die Bundesstraße 317 in Lörrach wurden ebenfalls hohe Holzfeuchten festgestellt (Diagramme C15 und C16). Gemäß der aktuellen Normung [11] gilt ein Bauteil als geschützt, sofern Abdeckungen/Dächer mindestens so weit überstehen, dass ein unter 30° einfallender Regen das zu schützende Bauteil nicht erreicht. Trotz vorbildlich geplanter und sorgfältig ausgeführter Holzschutzmaßnahmen in Form eines nach den Regeln der Normung überstehenden Daches und einer seitlichen Lamellenverschalung drang regelmäßig Niederschlag in die Konstruktion ein und verursachte langanhaltend hohe Holzfeuchten. Standortbedingt waren die ergriffenen konstruktiven Holzschutzmaßnahmen mit Einhaltung des 30°-Winkels für den Regeneinfall hier nicht ausreichend. Nach aktuellem Kenntnisstand war die Ursache für den eindringenden Niederschlag eine starke Windströmung, welche orthogonal zur Brückenlängsrichtung im Wiesetal verlief. Der starke Wind trieb den Niederschlag über die Verschalung in die Tragkonstruktion der Brücke. Der auftretende Regeneinfallwinkel war folglich deutlich größer als in der Norm angegeben. Um weitere Bereiche des Tragwerkes überwachen zu können, wurde im Auftrag des Bauherren das Monitoring um ein zweites System erweitert (Diagramm C17). Das neue System zeichnete bisher geringere Feuchtwerte als an den Messstellen des Messsystems I auf.

5.2 Einfluss eines Gewässers auf die Holzfeuchteentwicklung

Tabelle 1 zeigt, dass bezogen auf die Durchschnittswerte der Holzfeuchte, an nur einer Brücke Werte oberhalb der 20 M% Grenze ermittelt wurden. Die speziellen, standortbedingten Ursachen hierfür wurden bereits erläutert. Da alle Brücken im Bereich von Gewässern liegen und bis auf eine Abweichung keine erhöhten Holzfeuchten aufweisen, belegen die Messergebnisse, dass sich aus der Gewässernähe keine Gefahr für die Dauerhaftigkeit der Holzkonstruktion ergibt.

Des Weiteren zeigt der Vergleich der Mittelwerte der Holzfeuchten zwischen den Messbereichen über dem Gewässer und über dem Vorland gemäß Tabelle 1, dass die Differenz je nach Brücke maximal rund 1 M% beträgt. Diese Differenz liegt im Bereich der üblichen Messabweichungen der angewandten Messmethode. Auch die Ausgleichsfeuchte, welche aus den gemessenen Klimadaten errechnet wurde, weist eine Differenz zwischen den Messbereichen je nach Brücke von maximal 1 M% auf. Die Messdaten belegen, dass sich an konstruktiv gut geschützten Brücken im Bereich von Gewässern keine kritischen Holzfeuchten (> 20 M%) einstellen.

5.3 Einfluss von Sprühnebel auf die Holzfeuchteentwicklung

An der Brücke Lörrach wurden nicht nur Messbereiche über dem Gewässer und dem Vorland eingerichtet, sondern ein weiterer Messbereich über der hochfrequentierten Bundesstraße B 317. Entgegen den Erwartungen ist die Holzfeuchte der Konstruktion trotz Sprühnebelbeaufschlagung infolge des Kraftverkehrs auf der Straße relativ niedrig und geringer als an den anderen Messstellen (vergleiche Tabelle C1 Messstelle MS1 mit Messstellen MS2 und MS3; Diagramm C14).

Eine Ursache hierfür könnte in der Installation der Sensoren liegen. Im Bereich des Gewässers und des Vorlandes befinden sich die Sensoren seitlich im Untergurt, über der Straße wurden die Sensoren von unten eingebracht. Eindringender Schlagregen erreicht vor allem die seitlichen Sensoren, während er vor den von unten eingebrachten Sensoren über der Straße abtropft.

Der Überbau befindet sich zudem etwa 5 m oberhalb des Straßenniveaus. Eine Untersuchung aus der Schweiz [12] zeigt, dass sich der Sprühnebel infolge Kraftverkehr in dieser Höhe kaum noch auf die Holzfeuchte der betrachteten Konstruktion auswirkt. Während der Installation und der Wartung des Monitoringsystems wurde außerdem beobachtet, dass bei hohem Verkehrsaufkommen der Verkehrsfluss verlangsamt und infolgedessen die Sprühnebelbildung deutlich eingeschränkt ist. Weiterhin trägt der regelmäßige Luftstrom, den die Fahrzeuge beim Passieren der Brücke erzeugen, zu einer schnellen Rücktrocknung bei.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der Monitoringdaten bestätigt die Wirksamkeit der Maßnahmen des konstruktiven Holzschutzes als Grundvoraussetzung für die Dauerhaftigkeit von Holzbrücken. Die Messwerte der Holzfeuchte lagen bei allen Brücken (mit Ausnahme von Lörrach) im Mittel unter den als kritisch eingestuften 20 M%. Geringfügige Überschreitungen blieben auf kurze Zeiträume in den Wintermonaten beschränkt, ausreichend lange Rücktrocknungsphasen in den Sommermonaten folgten. An den Brücken in Lohmar-Höngesberg und Lörrach wurde nachgewiesen, dass ein Monitoringsystem eine sinnvolle Ergänzung zum Holzschutzkonzept ist. Schäden bzw. Schwachstellen konnten frühzeitig detektiert und infolgedessen behoben werden, bevor gravierende Folgeschäden eingetreten wären. In Auswertung der Erkenntnisse an der Brücke Lörrach sollten in Zukunft standortbezogene Besonderheiten – sofern sie bekannt sind – in die Planung der Holzschutzmaßnahmen einbezogen werden. Bei offenen Fachwerkbrücken sollte die Option einer Erweiterung des konstruktiven Holzschutzes bereits in der Planung statisch und konstruktiv berücksichtigt werden.

Die Auswertung des Monitorings zeigt, dass geschützte Holzbrücken im Bereich von Gewässern keiner besonderen Gefährdung hinsichtlich der Entwicklung kritischer Holzfeuchten unterliegen. Vielmehr deuten die Messergebnisse darauf hin, dass andere Einflussgrößen, wie beispielsweise eine starke Windexposition, umgebende Vegetation, Verschattung, Belüftung etc., relevanter sind. Eine hohe Dauerhaftigkeit wird erzielt, wenn durch konstruktive Schutzmaßnahmen die direkte Bewitterung verhindert und durch eine gute Belüftung des Überbaus eine schnelle Rücktrocknung ermöglicht wird. Ein ausreichender Abstand zum unterführten Gelände (mind. 1,0 m) und das regelmäßige Zurückschneiden der umgebenden Vegetation garantieren die notwendige Luftzirkulation. Weiterhin sind eine regelmäßige Wartung und die turnusmäßige Durchführung der Bauwerksprüfung Voraussetzungen für eine lange Nutzungsdauer der Holzbrücken.

Im Abschnitt 3.2 der RI-EBW-PRÜF [13] wird eine jährliche Hauptprüfung oder eine Gefährdungsanalyse mit Reduzierung der Prüfintervalle für geschützte Holzbrücken im Bereich von Gewässern gefordert. Die Ergebnisse des Monitorings beweisen, dass die Gewässernähe für geschützte Holzbrücken kein erhöhtes Gefährdungspotential darstellt. Auf Basis der Messdatenanalyse wird dringend empfohlen, den entsprechenden Passus der RI-EBW-PRÜF zu überarbeiten, da er geschützte Holzbrücken über Gewässern im Vergleich zu Brücken aus anderen Baustoffen unzulässig benachteiligt. Die jährliche Hauptprüfung ungeschützter Brücken sollte

jedoch weiterhin gefordert werden, da infolge direkter Bewitterung hohe Holzfeuchten und biogener Befall mit gravierenden Tragwerksschädigungen auftreten können.

Die Untersuchungen zum Einfluss von Sprühnebel an einer Brücke lassen keine erhöhte Gefährdung für Holzbauteile im Bereich über einer Straße erkennen, sofern der Abstand zwischen Holzkonstruktion und Fahrbahn ausreichend groß ist. Zur Quantifizierung dieser Exposition werden weiterführende Untersuchungen empfohlen.

7 Literatur

- [1] DIN EN 13183-2:2002-07: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren; Deutsche Fassung EN 13183-2:2002.
- [2] 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.
- [3] Hailwood A. J., Horrobin S.: Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. Transactions of the Faraday Society, Volume 42B, pp. 84-92, 1946.
- [4] Simpson W.T.: Prediction equilibrium moisture content of wood by mathematical model. Wood and Fiber, Volume 5, No. 1, pp. 41-49, 1973.
- [5] U. S. Department of Agriculture: Wood Handbook - Agriculture Handbook No. 72, Basic Information on Wood as a material of Construction with Data for its use in design and specification, Forest Products Laboratory, Forest Service, Washington D. C, 1955.
- [6] Internetquelle: <http://www.scantronik.de/> (zuletzt aufgerufen am 25.06.2019)
- [7] Jiang Y., Gamper A., Dietsch P., Oberhardt F., Simon J., Winter S.: Landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz (Gebrauchsklasse 0 (GK 0)) - Besondere bauliche Maßnahmen in Anlehnung an DIN 68800, Zwischenbericht, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2016.
- [8] Graf, E.; Meili, M.: Holzerstörende Pilze und Insekten - Analyse, Prognose, Bekämpfung. Lignatec: EMPA/LIGNUM-Richtlinie 14, Lignum, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz (Hg.), Zürich, 2001.
- [9] Mohrmann, M; Wiegand, T: holzbau handbuch. Informationsdienst Holz (Reihe 5, Teil 2, Folge 1) Holzschutz bei Ingenieurholzbauten. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (Hg.), Düsseldorf, 2015.
- [10] Marutzky, R.; Willeitner, H.; Radovic, B.; Hertel, H.; Grosser, D.: Holzschutz - Praxiskommentar zu DIN 68800 Teile 1 bis 4, 2., vollst. überarb. Aufl., Beuth Verl., Berlin, 2013.
- [11] DIN EN 1995-2:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 2: Brücken; Deutsche Fassung EN 1995-2:2004.
- [12] Finger, A.; Sell, J.: Bewitterungsversuch an Holzfachwerk. Prüfbericht Nr. 414433, EMPA, Dübendorf, 29. Oktober 2002.
- [13] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 - RI-EBW-PRÜF, Stand 22.02.2017, Berlin, 2017.

Anhang A – Dokumentation der untersuchten Bauwerke

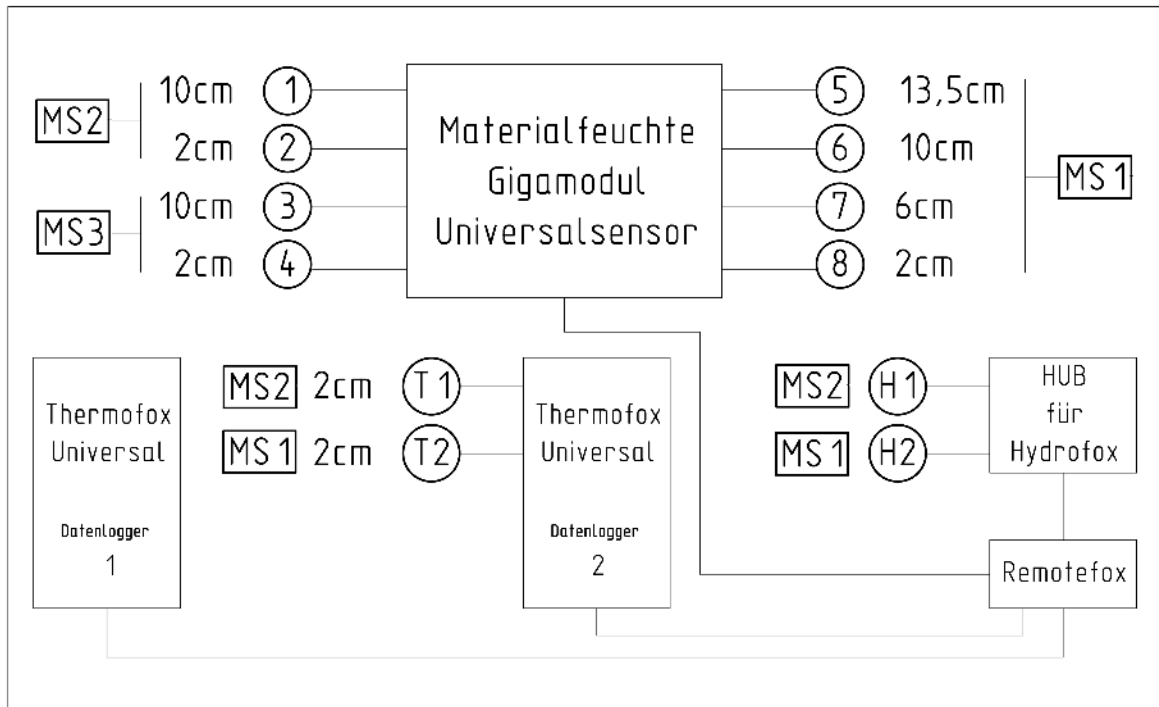
Inhaltsverzeichnis

Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg.....	A-2
Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth.....	A-4
Birkbergbrücke (Straßenbrücke) über die Wipper bei Wippra.....	A-6
Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd.....	A-8
Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitung.....	A-10
Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen.....	A-12
Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach.....	A-14
Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger über die Pleiße in Werdau.....	A-16
Werratal-Radwegbrücke über die Werra zwischen Ebenshausen und Frankenroda.....	A-18

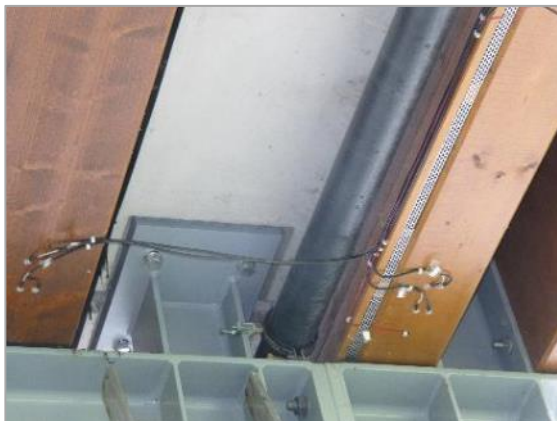
Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg



Ortslage	Höngesberg; Kreuznaaf B484
Baujahr	2014
Statisches System	Bogen- mit 2 Deckbrücken, 3-Feld-System
Brückenart	HBV und Holzbrücke
Funktion	Straßenbrücke
Lage/Hindernis	Bogenbrückenteil über Gewässer (Agger), Vorlandbrücken ü. Gelände
Maße: Länge/Breite	66,50m / 3,00m
Material Tragsystem	Bogen: BSH Fichte GL 32c; Vorland: BSH Fichte GL 28c
Fahr-/Gehbahn	Gussasphalt
Holzschutz	konstruktiv: Titanzinkblech oberseitig; seitliche Verschalung der äußeren Hauptträger mit Lärchenholz
Messstellen (MS)	MS1: Mittleres Brückenfeld (über Gewässer), Unterseite innenliegender Zangenträger MS2: Mittleres Brückenfeld, Unterseite Fahrbahnplatte MS3: nördliches Zwischenlager, Vorlandbrücke, im Hirnholz
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 10cm; FMP2: 2cm; TMP1: 2cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP3: 10cm; FMP4: 2cm; MS3: FMP5: 13,5cm; FMP6: 10cm; FMP7: 6cm; FMP8: 2cm; TMP2: 2cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	19.08.2015
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



re.: Messstelle MS1; li: Messstelle MS2



Messstelle MS3

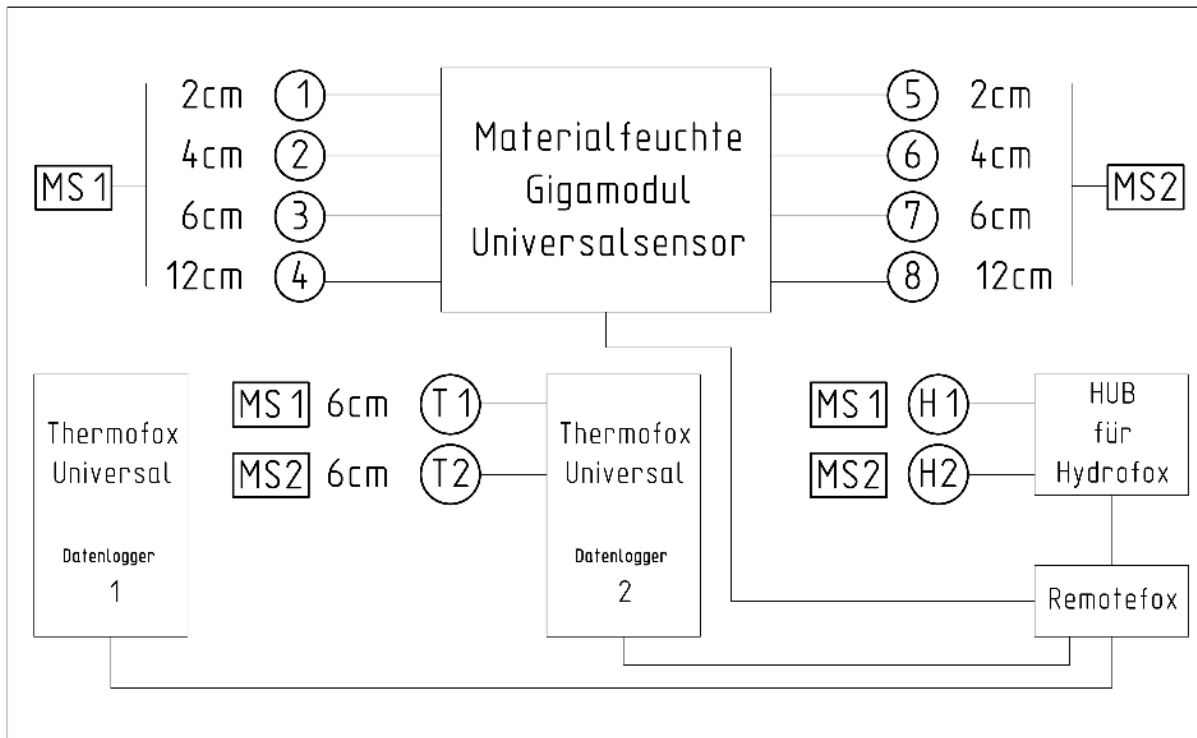


Installationskasten verschlossen

Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth



Ortslage	Schiffarth; Wahlscheid
Baujahr	2014
Statisches System	Deckbrücke, 3-Feld-System
Brückenart	Holz-Beton-Verbund
Funktion	Straßenbrücke
Lage/Hindernis	Außenfelder über Vorland, Mittelfeld über Gewässer (Agger)
Maße: Länge/Breite	39,93m / 4,75m
Material Tragsystem	Längsträger: BSH Fichte GL 32c, abgetrept
Fahr-/Gehbahn	Gussasphalt
Holzschutz	konstruktiv: Überstand der Fahrbahnplatte
Messstellen (MS)	MS1: Vorland, Innenseite Blockträger Oberstrom MS2: Brückenmitte (über Gewässer), Innenseite Blockträger Oberstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 6cm; FMP4: 12cm; TMP1: 6cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP5: 2cm; FMP6: 4cm; FMP7: 6cm; FMP8: 12cm TMP2: 6cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	20.10.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2



Installationskasten geöffnet

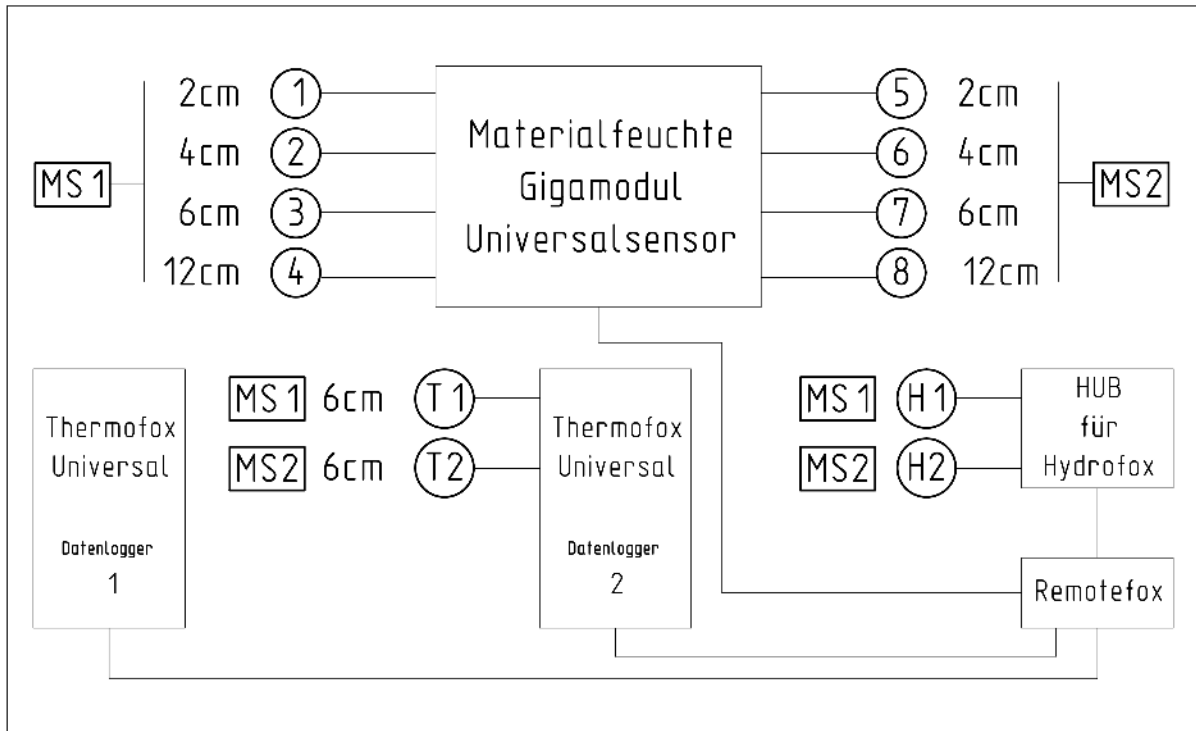


Installationskasten geschlossen

Birkbergbrücke (Straßenbrücke) über die Wipper bei Wippra



Ortslage	Wippra; Forstweg
Baujahr	2008
Statisches System	Deckbrücke, 1-Feld-System
Brückenart	Holz-Beton-Verbund
Funktion	Straßenbrücke, Forst
Lage/Hindernis	über Gewässer (Wipper)
Maße: Länge/Breite	15,20m / 4,50m
Material Tragsystem	Längsträger: BSH Fichte GL 32h
Fahr-/Gehbahn	Gussasphalt
Holzschutz	konstruktiv: Überstand der Fahrbahnplatte
Messstellen (MS)	MS1: 0,5m vom südl. Auflager, Innenseite Blockträger Oberstrom MS2: 5,5m vom südl. Widerlager (über Gewässer), Innenseite Blockträger Oberstrom MS3: Baum, 5m von Fluss entfernt
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 6cm; FMP4: 12cm; TMP1: 6cm MS2: FMP5: 2cm; FMP6: 4cm; FMP7: 6cm; FMP8: 12cm; TMP2: 6cm; KMP1: Oberfläche MS3: KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	12.10.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	manuell, halbjährlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2



Messstelle MS3

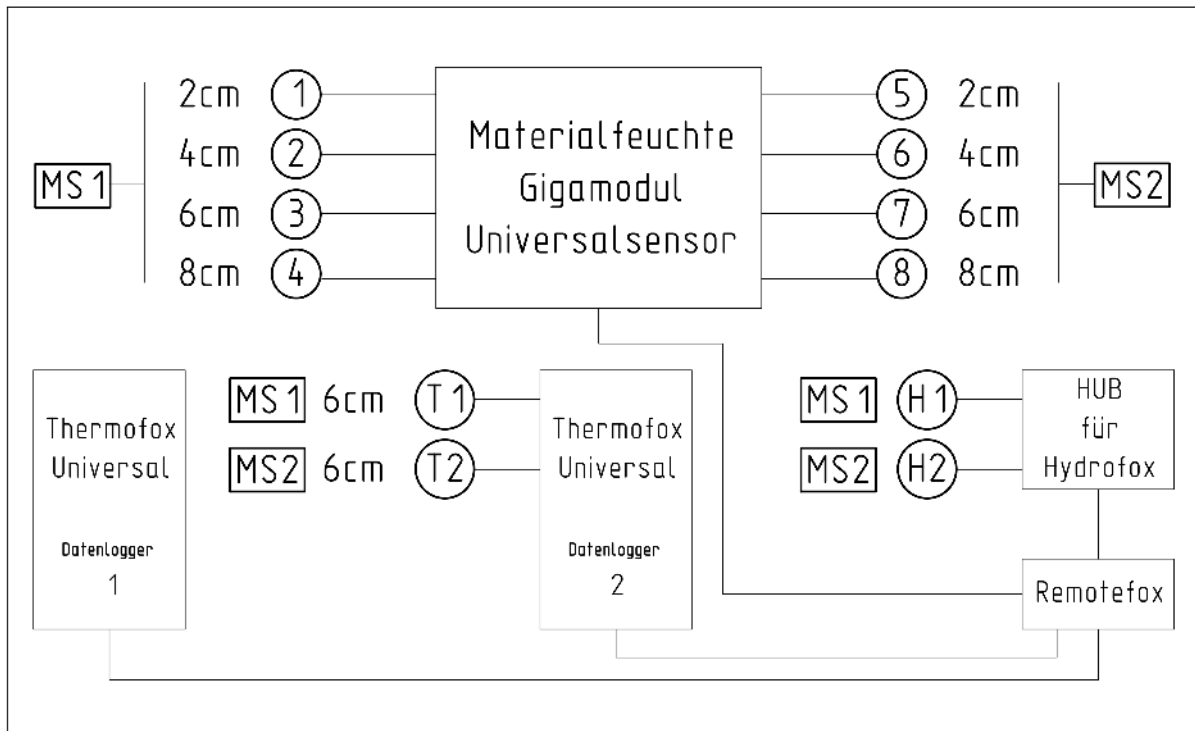


Installationskasten und Messstelle MS1

Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd



Ortslage	Stadtgarten
Baujahr	2012
Statisches System	Deckbrücke, 1-Feld-System
Brückenart	Holz-Beton-Verbund
Funktion	Geh- u. Radwegbrücke
Lage/Hindernis	über Gewässer (Rems)
Maße: Länge/Breite	25,29m / 2,50m
Material Tragsystem	Träger: BSH Fichte GL 32c, abgetrept
Fahr-/Gehbahn	Epoxydharzbeschichtete Stahlbetonplatte
Holzschutz	konstruktiv: Überstand der Fahrbahnplatte
Messstellen (MS)	MS1: Vorland, 3,5m vom nördlichen Widerlager, abgestufter Holzträger Unterstrom MS2: 16m vom nördlichen Widerlager (über Gewässer), abgestufter Holzträger Unterstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 6cm; FMP4: 8cm TMP1: 6cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP5: 2cm; FMP6: 4cm; FMP7: 6cm; FMP8: 8cm TMP2: 6cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	27.10.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2

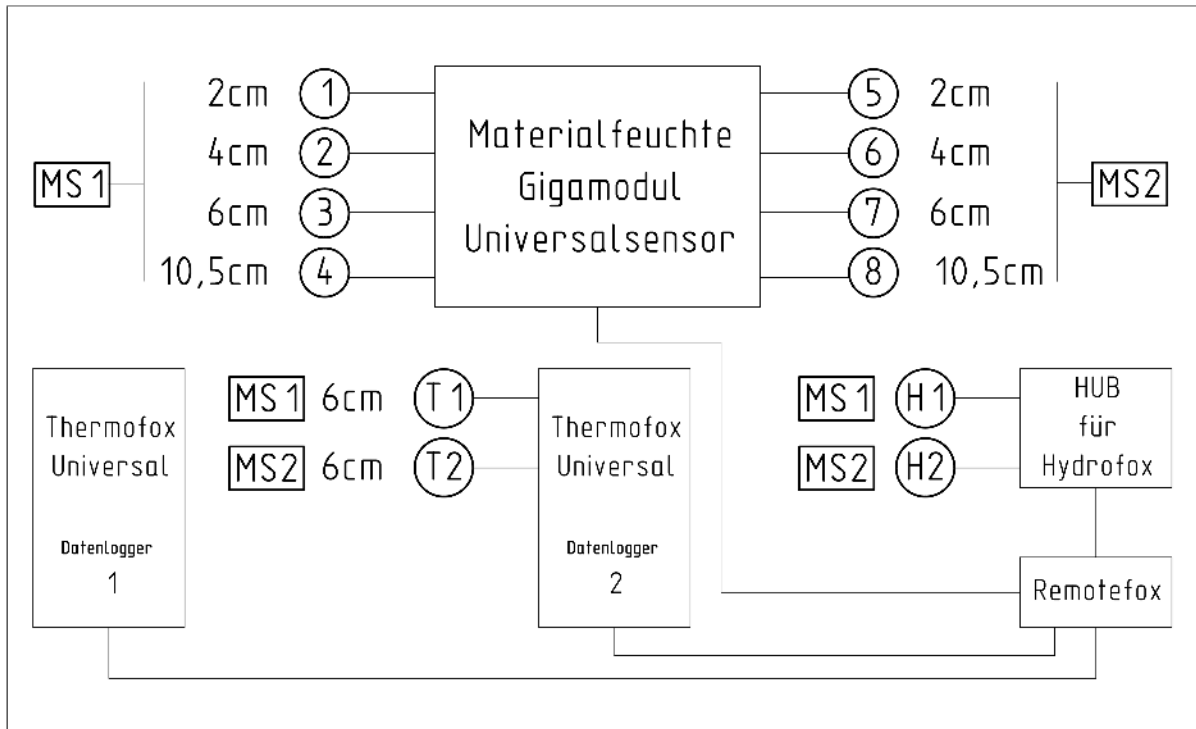


Installationskasten geöffnet

Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitung



Ortslage	Jugendfreizeitplatz; Nürnberger Straße
Baujahr	2002
Statisches System	Pylonbrücke, Trogbrücke, 3-Feld-System
Brückenart	Holzbrücke
Funktion	Geh- u. Radwegbrücke
Lage/Hindernis	Außenfelder über Vorland, Mittelfeld über Gewässer (Werra)
Maße: Länge/Breite	74,20m / 2,50m
Material Tragsystem	Träger: BSH Lärche GL 14h
Fahr-/Gehbahn	offener Bohlenbelag, LH Eiche
Holzschutz	konstruktiv: Verblendung der Hauptträger durch NH Brettschalung aus Lärche
Messstellen (MS)	MS1: Vorland, 13m vom nordöstl. Widerlager, Innenseite Hauptträger Oberstrom MS2: Brückenmittelfeld (über Gewässer), 39m vom nordöstl. Widerlager, Innenseite Hauptträger Oberstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 6cm; FMP4: 10,5cm TMP1: 6cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP5: 2cm; FMP6: 4cm; FMP7: 6cm; FMP8: 10,5cm TMP2: 6cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	25.10.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2



Installationskasten verschlossen

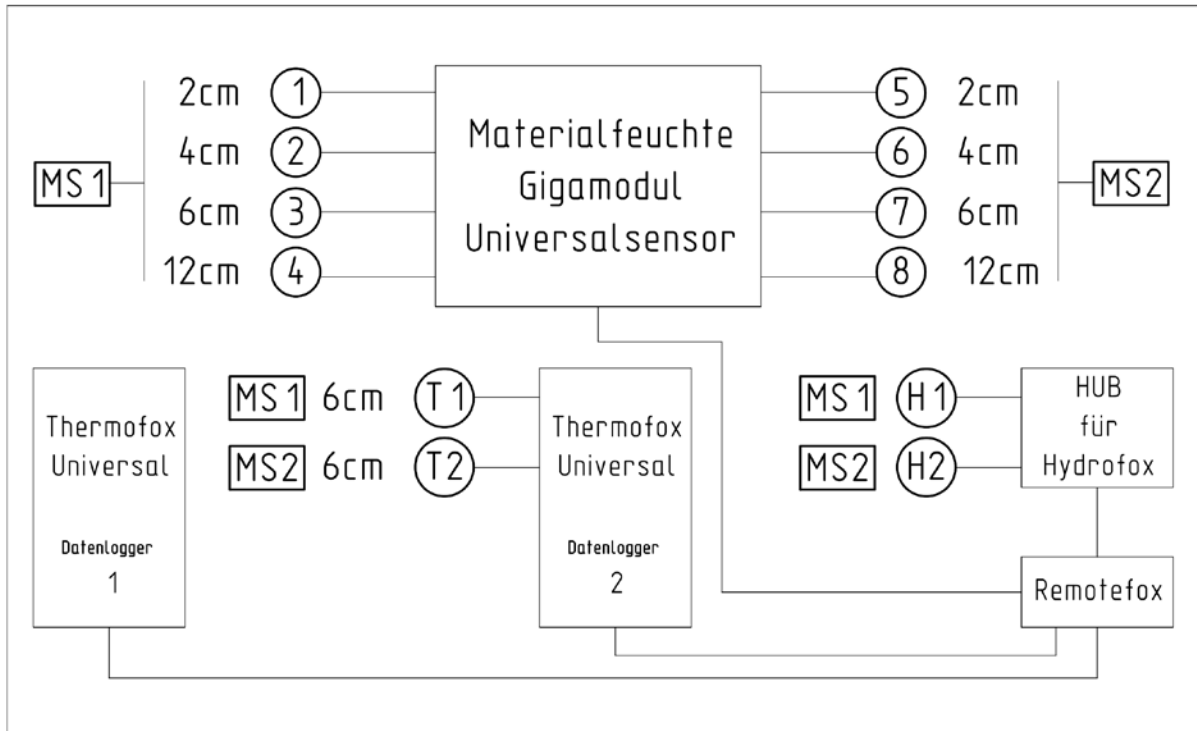


Installationskasten geöffnet

Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen



Ortslage	B32; Zentrum
Baujahr	1997
Statisches System	Deckbrücke, 4-Feld-System
Brückenart	Holzbrücke
Funktion	Geh- u. Radwegbrücke
Lage/Hindernis	südl Außenfeld über Vorland, 3 Felder über Gewässer (Donau)
Maße: Länge/Breite	61,40m / 5,70m
Material Tragsystem	Träger: BSH Fichte
Fahr-/Gehbahn	Seit 2012 Gussasphalt
Holzschutz	konstruktiv: seitliche Verschalung der äußeren Hauptträger, Rotkernholz
Messstellen (MS)	MS1: 1m südl. mittlerer Brückenpfeiler (über Gewässer), Innenseite Träger Unterstrom MS2: 2m nördl. vom südl. Widerlager, Innenseite Träger Unterstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 6cm; FMP4: 12cm TMP1: 6cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP5: 2cm; FMP6: 4cm; FMP7: 6cm; FMP8: 12cm TMP2: 6cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	03.11.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2

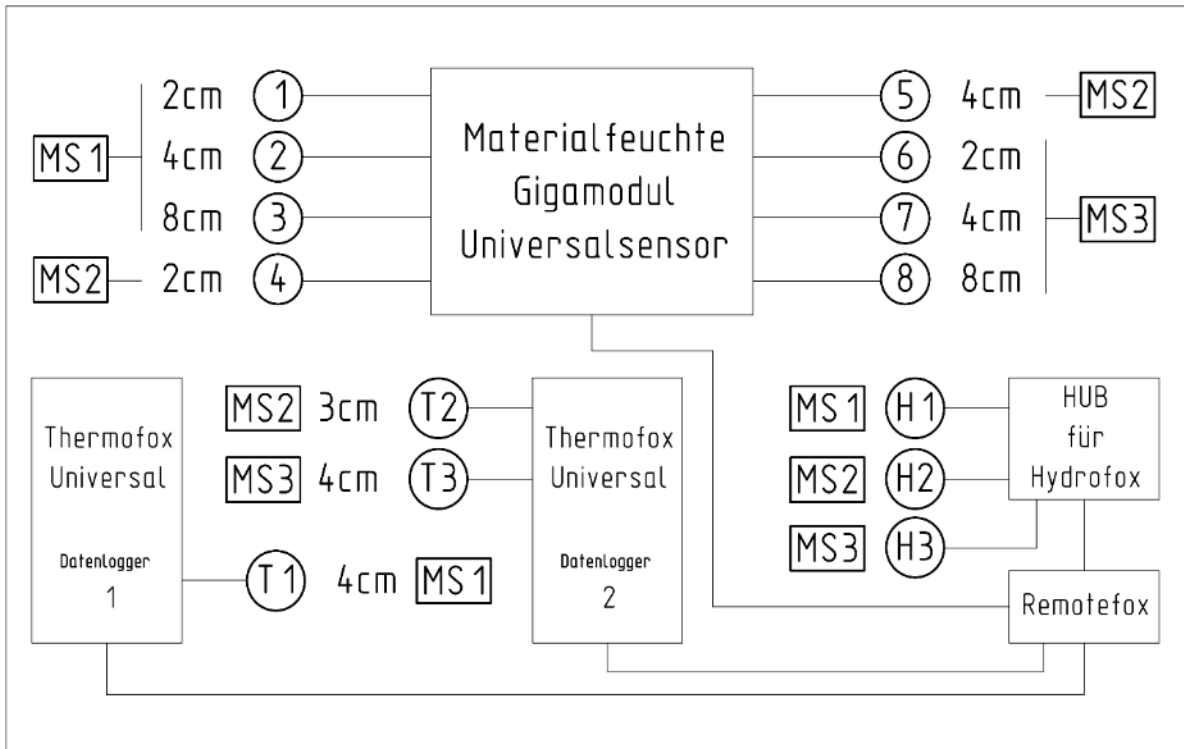


Installationskasten geöffnet

Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach



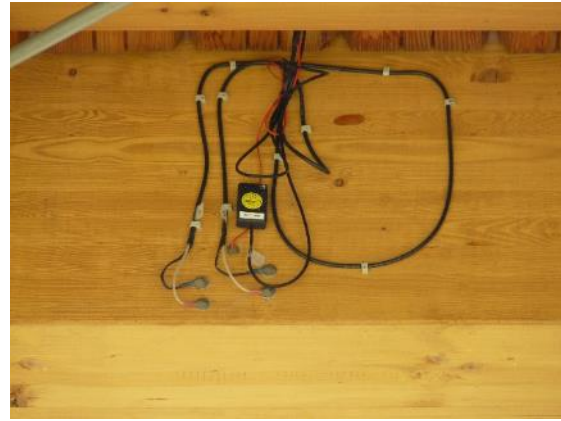
Ortslage	OT Grütt; Röttler-Straße
Baujahr	2016
Statisches System	gedeckte Fachwerk-Brücke als 3-Feld-System
Brückenart	Holzbrücke
Funktion	Geh- u. Radwegbrücke
Lage/Hindernis	südwestl. Brückenfeld über B317, nordöstl. Feld über Gewässer (Wiese)
Maße: Länge/Breite	85,53m / 2,80m
Material Tragsystem	Träger: BSH Fichte
Fahr-/Gehbahn	offener Bohlenbelag, NH Lärche
Holzschutz	konstruktiv: Dachüberstand, seitliche Verschalung der äußeren Hauptträger mit
Messstellen (MS)	MS1: über B317, Oberstrom, Unterseite Untergurt MS2: Vorland, Innenseite Untergurt, nordöstl. Brückenseite, Oberstrom MS3: Gewässer, Innen-seite Untergurt, nordöstl. Brückenseite, Oberstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 8cm; TMP1: 4cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP4: 2cm; FMP5: 4cm; TMP2: 3cm; KMP2: Oberfläche MS3: FMP6: 2cm; FMP7: 4cm; FMP8: 8cm; TMP3: 4cm; KMP3: Oberfläche
Beginn der Messungen	02.11.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2



Messstelle MS3

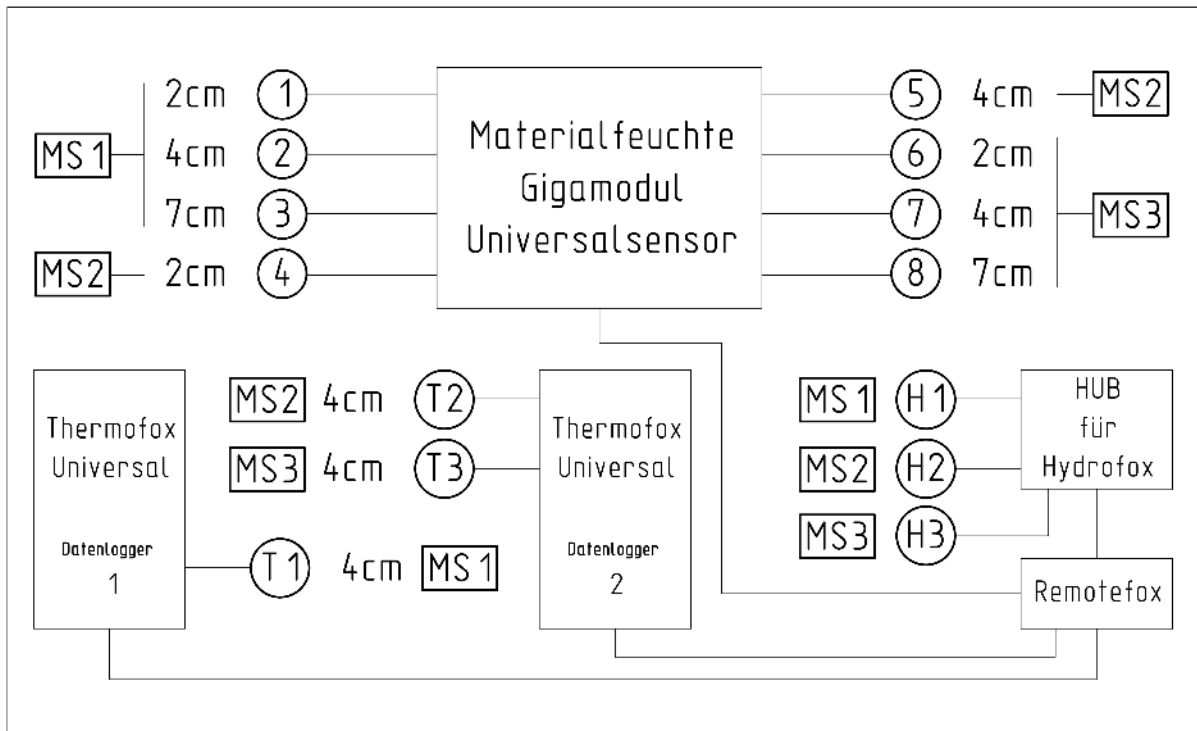


Installationskasten verschlossen

Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger über die Pleiße in Werdau



Ortslage	Oberer Anger; Dorfstraße
Baujahr	2013
Statisches System	Trogbrücke, 1-Feld-System
Brückenart	Holzbrücke
Funktion	Geh- u. Radwegbrücke
Lage/Hindernis	über Gewässer (Pleiße)
Maße: Länge/Breite	16m / 2m
Material Tragsystem	Träger: BSH Lärche
Fahr-/Gehbahn	offener Bohlenbelag, LH Eiche
Holzschutz	konstruktiv: Verblendung der Hauptträger durch NH Brettschalung
Messstellen (MS)	MS1: 1m vom westl. Widerlager, Innenseite nördl. Hauptträger Unterstrom MS2: 1,2m vom westl. Widerlager, Innenseite nördl. Längsträger Unterstrom MS3: Flussmitte, Innenseite nördl. Hauptträger Unterstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 7cm; TMP1: 4cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP4: 2cm; FMP5: 4cm; TMP2: 4cm MS3: FMP6: 2cm; FMP7: 4cm; FMP8: 7cm TMP3: 4cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	23.11.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



unten: Messstelle MS1; oben: Messstelle MS2



Messstelle MS3

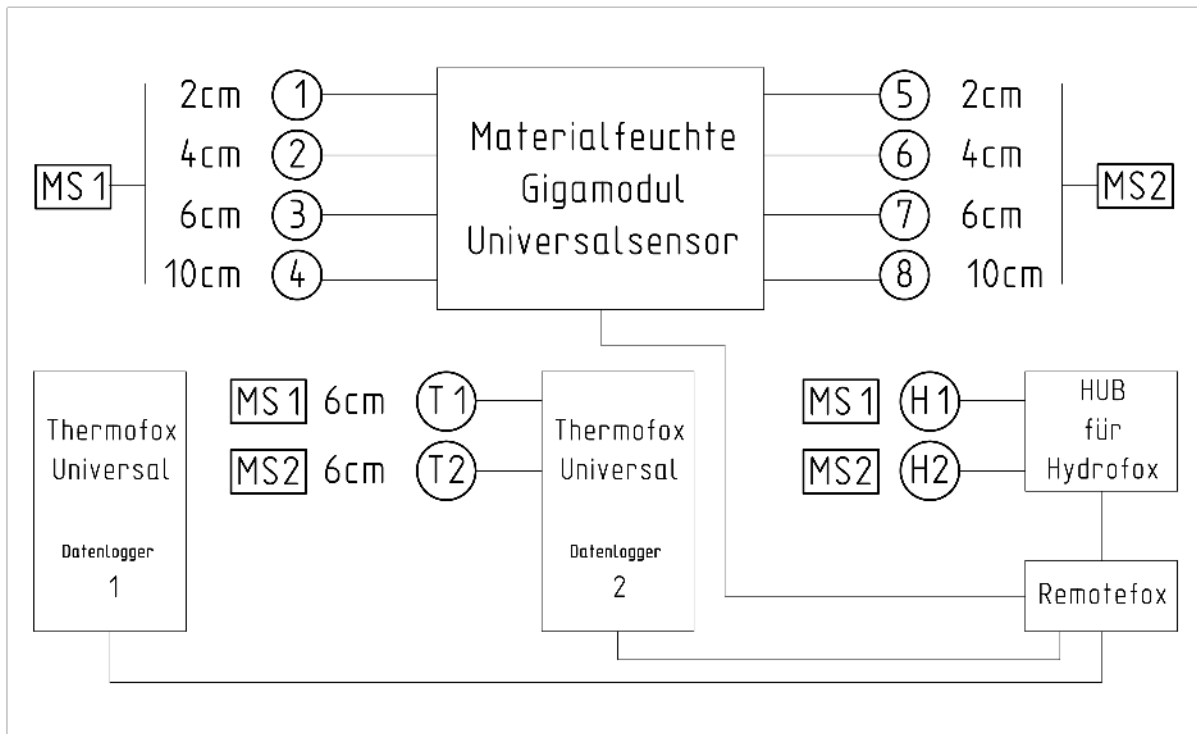


Installationskasten geöffnet

Werratal-Radwegbrücke über die Werra zwischen Ebenshausen und Frankenroda



Ortslage	Ebenshausen; Frankenroda
Baujahr	2012
Statisches System	Pylonbrücke, Trogbrücke, 4-Feld-System
Brückenart	Holzbrücke
Funktion	Geh- u. Radwegbrücke
Lage/Hindernis	1., 3. und 4. Feld über Vorland, 2. Feld über Gewässer (Werra)
Maße: Länge/Breite	105m / 3m
Material Tragsystem	Träger: BSH Fichte
Fahr-/Gehbahn	Gussasphalt
Holzschutz	konstruktiv: Verblendung der Hauptträger durch Stülpchalung, sibirische Lärche
Messstellen (MS)	MS1: Vorland 2,5m vom östl. Widerlager, Unterseite Hauptträger Unterstrom MS2: 16m vom östl. Widerlager in Brückenmitte (über Gewässer), Unterseite Hauptträger Unterstrom
Messpunkte, Messtiefe	(FMP: Feuchtemesspunkt; TMP: Temperaturmesspunkt; KMP: Klimamesspunkt) MS1: FMP1: 2cm; FMP2: 4cm; FMP3: 6cm; FMP4: 10cm TMP1: 6cm; KMP1: Oberfläche MS2: FMP5: 2cm; FMP6: 4cm; FMP7: 6cm; FMP8: 10cm TMP2: 6cm; KMP2: Oberfläche
Beginn der Messungen	22.11.2016
Messintervall	stündlich
Datenübermittlung	E-Mail, wöchentlich



Schematische Darstellung der Messgeräte und Messstellen



Messstelle MS1



Messstelle MS2



Installationskasten geöffnet



Installationskasten verschlossen

Anhang B – Installationspläne

Inhaltsverzeichnis

Installationsplan Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg	B-2
Installationsplan Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth.....	B-3
Installationsplan Birkbergbrücke (Straßenbrücke) über die Wipper bei Wippra.....	B-4
Installationsplan Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd	B-5
Installationsplan Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitungon	B-6
Installationsplan Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen	B-7
Installationsplan Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach	B-8
Installationsplan Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger über die Pleiße in Werdau	B-10
Installationsplan Werratal-Radwegbrücke über die Werra zwischen Ebenshausen und Frankenroda.....	B-11

Die Installationspläne stehen den jeweiligen Bauherren der Brücken zur Verfügung, sie werden aus rechtlichen Gründen nicht veröffentlicht.

Anhang C – Ergebnisse der Monitorings

Inhaltsverzeichnis

Tabelle C1 Teil 1: Mittel-, Minimal-, und Maximalwerte sowie Varianz je Messpunkt	C-2
Tabelle C1 Teil 2: Mittel-, Minimal-, und Maximalwerte sowie Varianz je Messpunkt	C-3
Diagramm C1: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg Messstelle 1	C-4
Diagramm C2: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg Messstelle 2	C-5
Diagramm C3: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg Messstelle 3	C-6
Diagramm C4: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth Messstelle 1	C-7
Diagramm C5: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth Messstelle 2	C-8
Diagramm C6: Birkbergbrücke über die Wipper bei Wippra Messstelle 1	C-9
Diagramm C7: Birkbergbrücke über die Wipper bei Wippra Messstelle 2	C-10
Diagramm C8: Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd Messstelle 1	C-11
Diagramm C9: Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd Messstelle 2	C-12
Diagramm C10: Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitung Messstelle 1	C-13
Diagramm C11: Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitung Messstelle 2	C-14
Diagramm C12: Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen Messstelle 1	C-15
Diagramm C13: Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen Messstelle 2	C-16
Diagramm C14: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem I Messstelle 1	C-17
Diagramm C15: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem I Messstelle 2	C-18
Diagramm C16: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem I Messstelle 3	C-19
Diagramm C17: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem II Messbereich Wiese	C-20
Diagramm C18: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem II Messbereich Testfelder	C-21
Diagramm C19: Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger in Werdau Messstelle 1	C-22
Diagramm C20: Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger in Werdau Messstelle 2	C-23
Diagramm C21: Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger in Werdau Messstelle 3	C-24
Diagramm C22: Werratal-Radwegbrücke zwischen Ebenshausen und Franken- roda Messstelle 1	C-25
Diagramm C23: Werratal-Radwegbrücke zwischen Ebenshausen und Franken- roda Messstelle 2	C-26

Feuchtemonitoring an neun geschützten Holzbrücken in Deutschland

Tabelle C1 Teil 1: Mittel-, Minimal-, und Maximalwerte sowie Varianz je Messpunkt

Brücke	Zeitraum	Mess- stelle	Messtiefe [cm]	Holzfeuchte [Masse-%]			
				Mittel	Min	Max	Varianz
Höngesberg	19.08.2015- 30.06.2019	MS1	2	17,6	15,1	23,8	8,7
			10	16,8	14,6	23,2	8,6
		MS2	2	17,0	13,8	25,4	11,6
			10	17,2	13,9	24,4	10,5
		MS3	2	18,2	14,2	39,3	25,2
			4	19,4	14,7	28,2	13,5
			10	17,9	14,1	27,2	13,1
			13,5	17,1	12,7	25,9	13,1
Schiffarth	21.10.2016- 18.06.2019	MS1	2	16,5	14,2	18,4	4,1
			4	16,5	14,8	18,8	3,9
			6	16,2	14,6	17,8	3,2
			12	14,9	13,6	17,9	4,3
		MS2	2	16,2	14,0	19,5	5,5
			4	16,2	14,3	19,3	5,0
			6	15,9	14,2	18,6	4,4
			12	15,2	13,9	18,7	4,7
Wippra	13.10.2016- 18.06.2019	MS1	2	18,3	15,5	23,0	7,4
			4	18,0	15,6	21,8	6,2
			6	17,9	16,0	21,5	5,4
			12	18,1	16,5	24,0	7,5
		MS2	2	18,1	15,4	23,7	8,3
			4	17,9	15,7	22,4	6,7
			6	17,7	16,0	22,1	6,1
			12	17,1	16,1	19,1	3,0
Schwäbisch Gmünd	28.10.2016- 30.04.2019	MS1	2	15,5	12,6	19,1	6,5
			4	15,5	13,2	18,2	5,1
			6	15,9	13,8	21,2	7,4
			8	15,7	13,9	18,7	4,8
		MS2	2	15,7	11,6	18,4	6,8
			4	16,0	10,8	19,6	8,7
			6	16,7	14,7	21,4	6,7
			8	16,0	12,1	18,6	6,5
Breitungen	26.10.2016- 27.05.2019	MS1	2	15,6	13,0	18,2	5,1
			4	15,4	13,6	17,6	4,0
			6	16,3	14,9	19,2	4,3
			10	16,1	15,0	17,3	2,3
		MS2	2	15,7	13,0	18,4	5,4
			4	15,9	13,0	19,0	6,0
			6	16,1	14,3	18,1	3,8
			10	15,9	14,8	17,6	2,8

Feuchtemonitoring an neun geschützten Holzbrücken in Deutschland

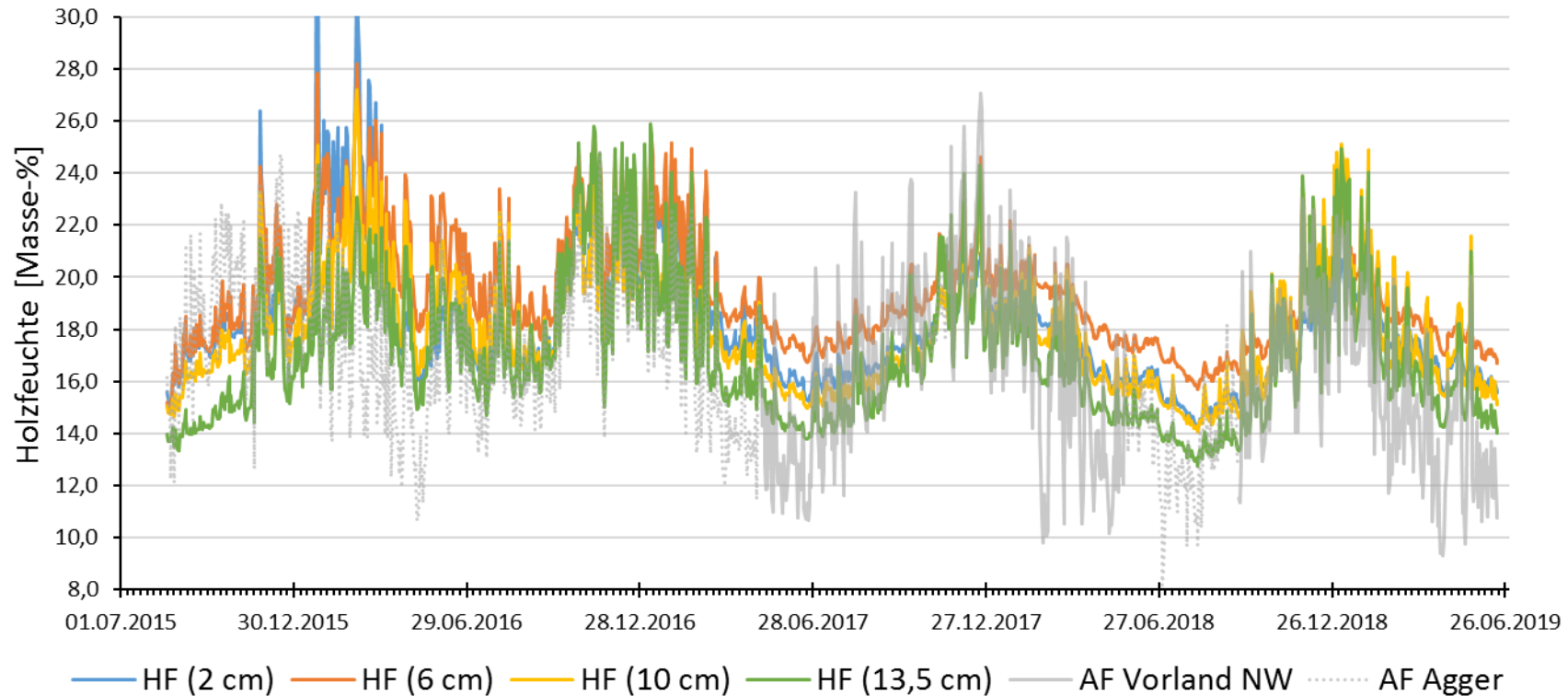
Tabelle C1 Teil 2: Mittel-, Minimal-, und Maximalwerte sowie Varianz je Messpunkt

Brücke	Zeitraum	Mess- stelle	Messtiefe [cm]	Holzfeuchte [Masse-%]			
				Mittel	Min	Max	Varianz
Sigma- ringen	04.11.2016- 14.05.2019	MS1	2	16,8	14,2	22,6	8,4
			4	16,3	14,0	21,4	7,3
			6	16,6	14,4	20,8	6,4
			12	16,8	14,2	20,8	6,6
		MS2	2	16,7	12,6	22,4	9,8
			4	15,6	13,1	18,5	5,4
			6	15,7	12,8	17,6	4,8
			12	15,8	13,2	19,1	5,9
Lörrach Mess- system I	03.11.2016- 12.06.2019	MS1	2	13,6	8,3	19,2	10,9
			4	13,6	7,4	19,0	11,6
			8	14,2	9,3	18,9	9,6
		MS2	2	20,7	14,6	43,7	29,2
			4	19,9	14,4	51,4	37,0
		MS3	2	22,6	14,2	60,1	45,8
			4	20,2	15,1	51,2	36,1
			8	21,3	15,8	62,1	46,3
		Lörrach Messsys- tem II	01.02.2018- 12.06.2019	MBW	5	16,7	14,2
1,5	16,6				12,8	20,0	7,1
5	16,3				14,2	19,3	5,1
15.03.2019- 12.06.2019	BMT		5	16,2	14,2	18,6	4,4
			2,5	15,8	15,2	16,7	1,5
			2,5	16,0	15,4	16,8	1,5
Werdau	24.11.2016- 06.06.2019	MS1	2	15,8	13,6	18,1	4,5
			4	15,8	14,1	17,9	3,8
			7	16,4	14,7	18,4	3,7
		MS2	2	16,2	13,4	19,1	5,7
			4	17,0	14,4	19,4	5,0
		MS3	2	15,5	13,2	18,0	4,8
			4	15,9	12,7	18,5	5,9
			7	15,7	10,0	18,1	8,2
Franken- roda	23.11.2016- 27.05.2019	MS1	2	17,1	13,9	19,6	5,8
			4	16,6	14,2	18,7	4,5
			6	16,3	12,9	18,5	5,5
			10	16,2	8,7	19,2	10,5
		MS2	2	16,7	14,0	19,2	5,2
			4	16,6	14,3	18,8	4,4
			6	16,8	14,4	20,0	5,6
			10	16,6	14,7	19,6	4,8

Diagramm C1: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg Messstelle 1

Messzeitraum: 19.08.2015 - 18.06.2019

Messstelle MS1 über dem Pfeiler auf dem nordwestlichen Vorland im stromabwärts liegenden Hauptträger der Vorlandbrücke



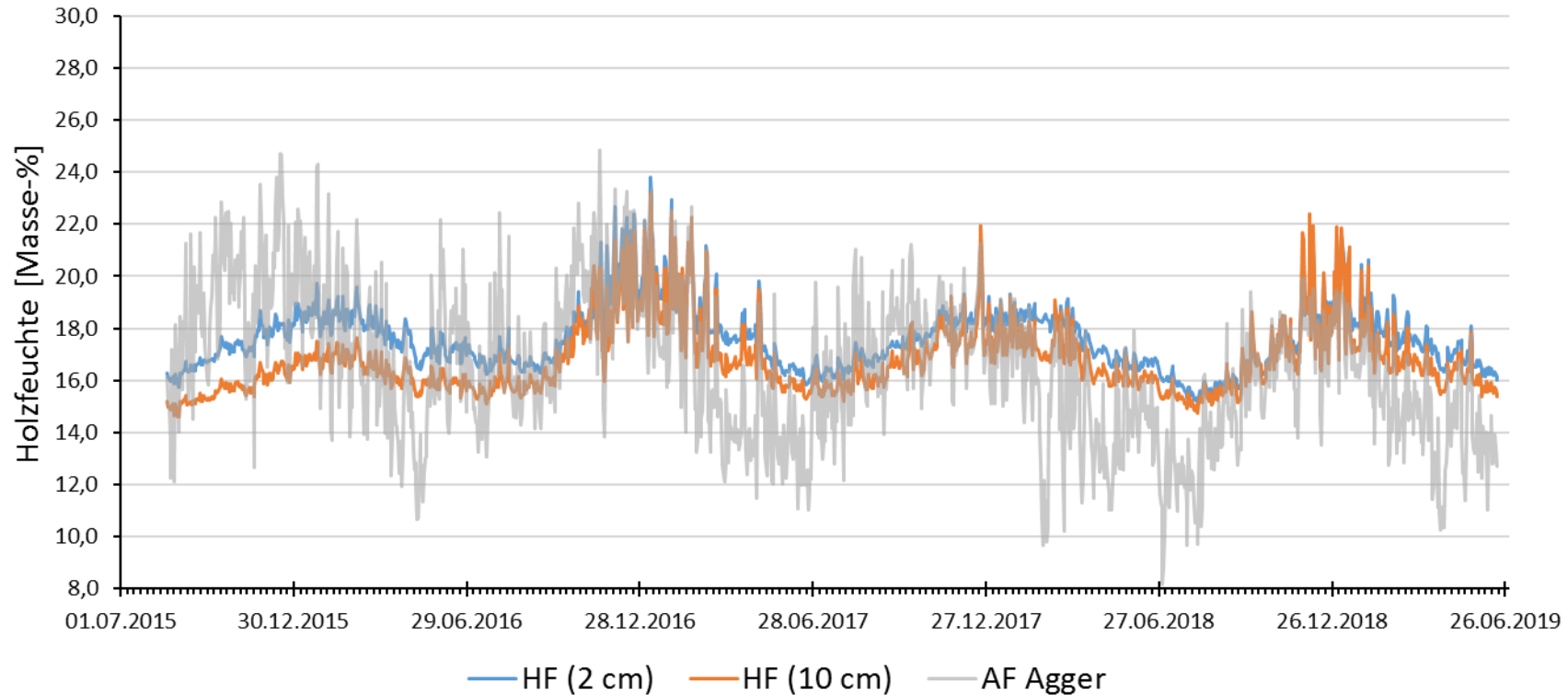
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- AF Fluss Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima) über dem Gewässer (Agger)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C2: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg Messstelle 2

Messzeitraum: 19.08.2015 - 18.06.2019

Messstelle MS2 über dem Gewässer nahe des nordwestlichen Ufers im stromabwärts liegenden Zangenträger (Zuband des Bogens)



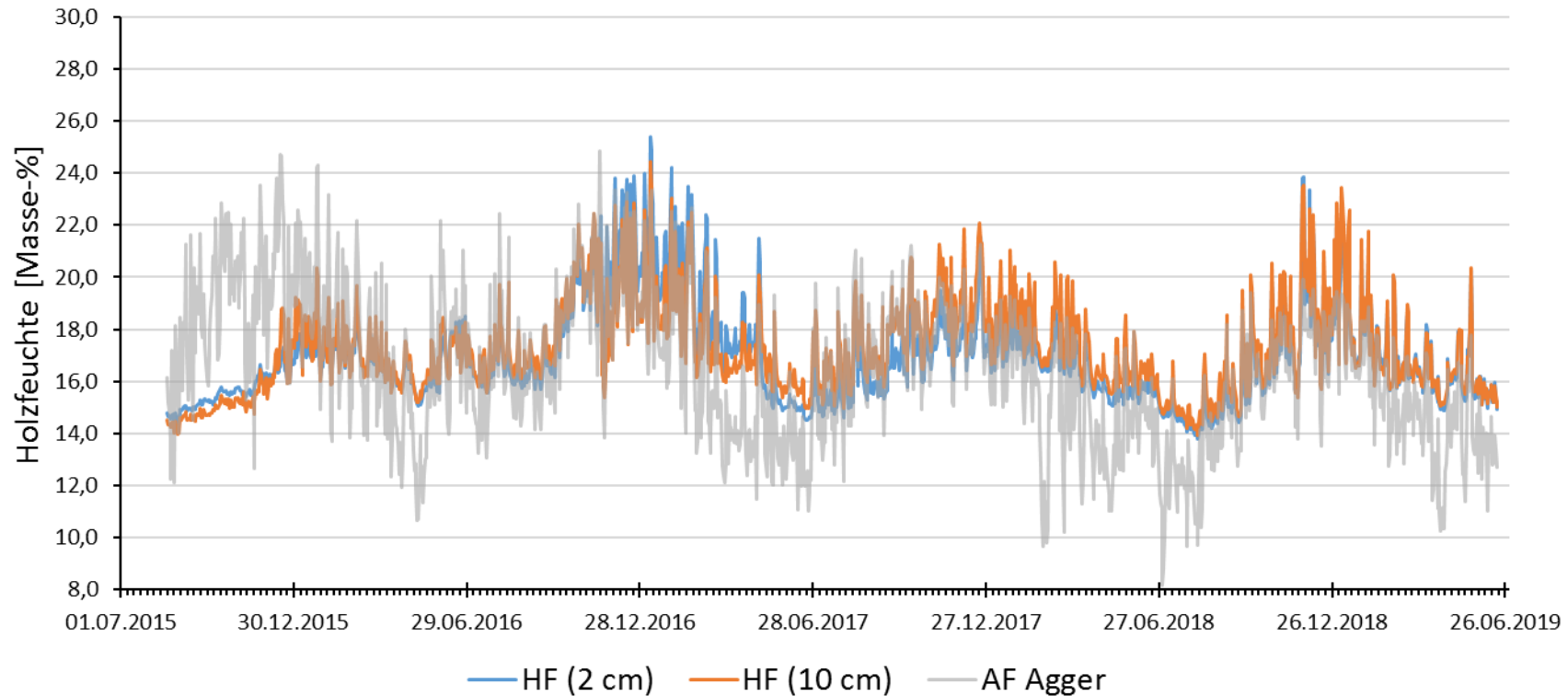
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C3: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Höngesberg Messstelle 3

Messzeitraum: 19.08.2015 - 18.06.2019

Messstelle MS3 über dem Gewässer nahe des nordwestlichen Ufers in der Unterseite der Fahrbahnplatte



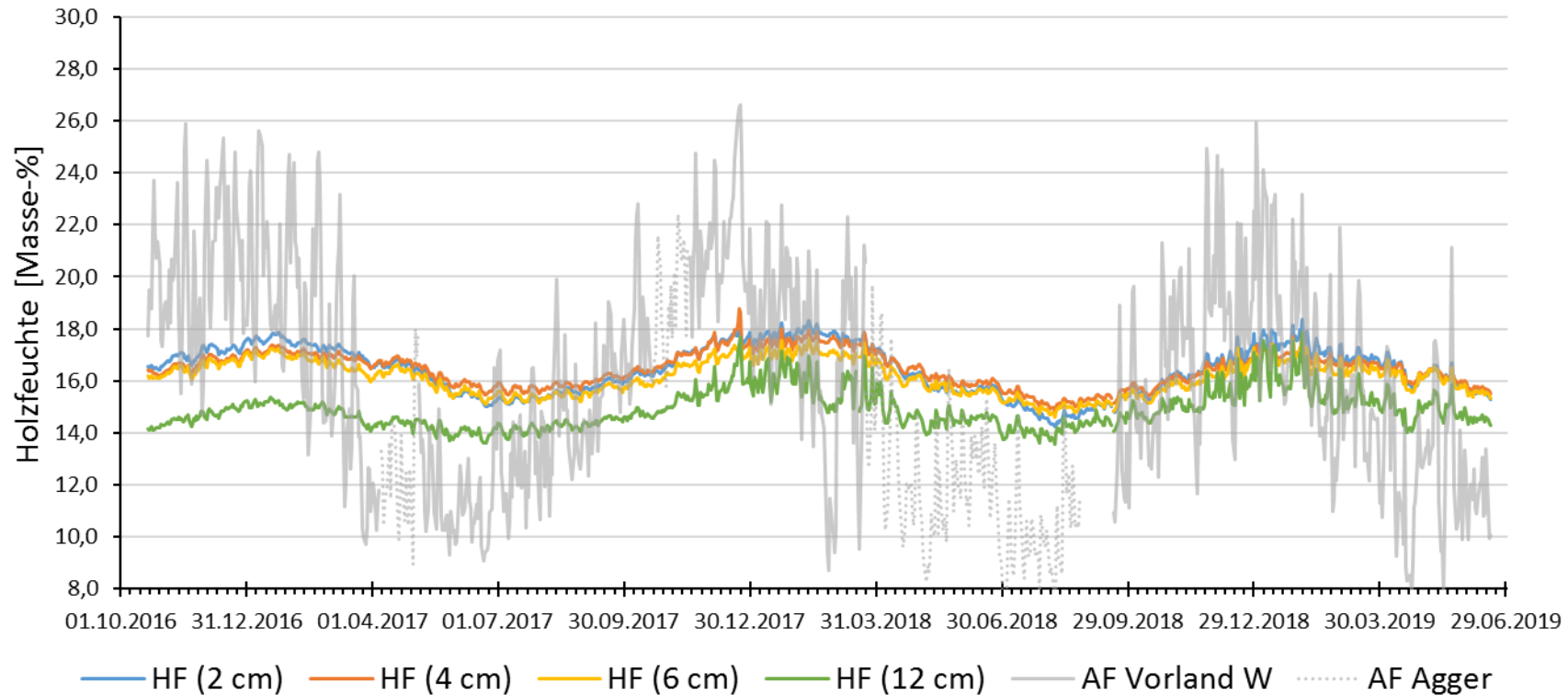
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C4: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth Messstelle 1

Messzeitraum: 21.10.2016 - 18.06.2019

Messstelle MS1 nahe des westlichen Widerlagers auf dem westlichen Vorland im stromaufwärts liegenden Hauptträger auf der Innenseite



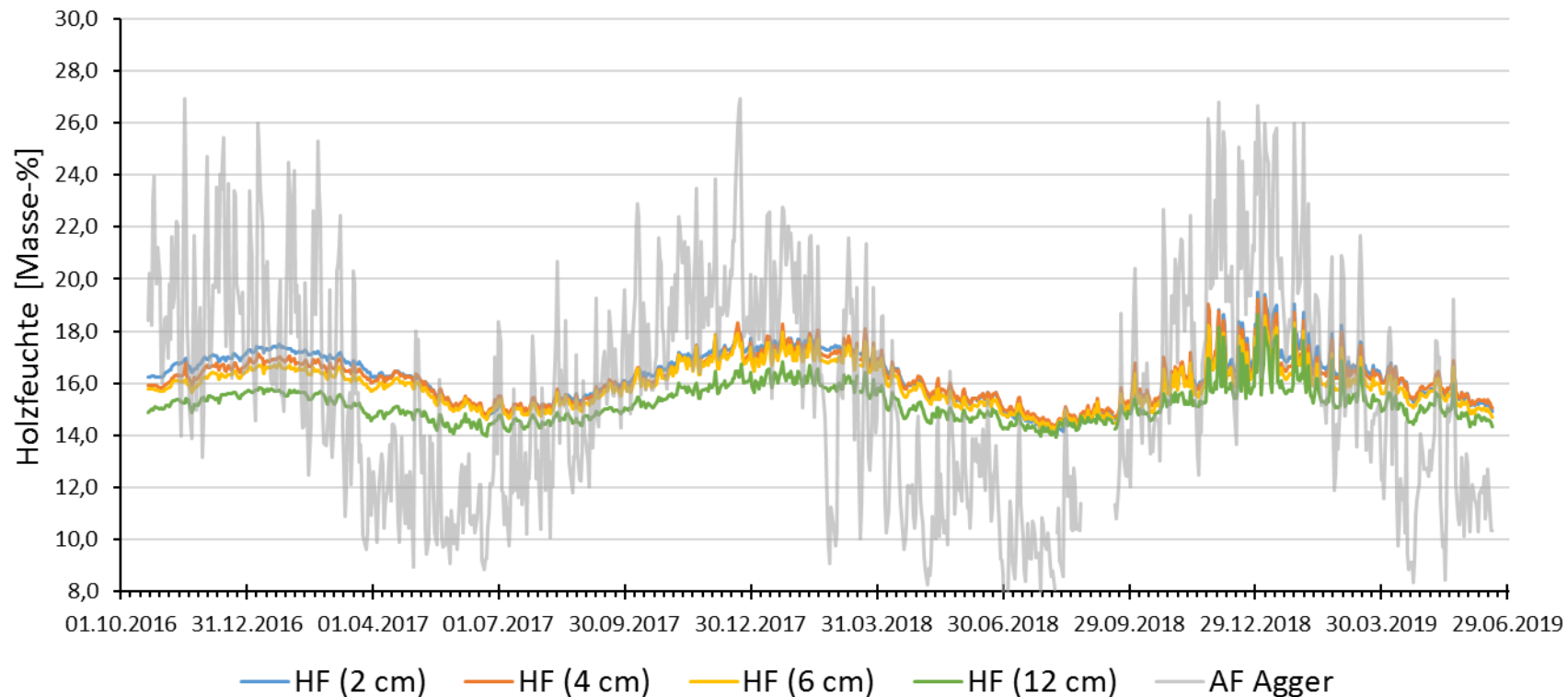
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C5: Straßenbrücke über die Agger in Lohmar/Schiffarth Messstelle 2

Messzeitraum: 21.10.2016 - 18.06.2019

Messstelle MS2 nahe der Brückenmitte über der Agger im stromaufwärts liegenden Hauptträger auf der Innenseite



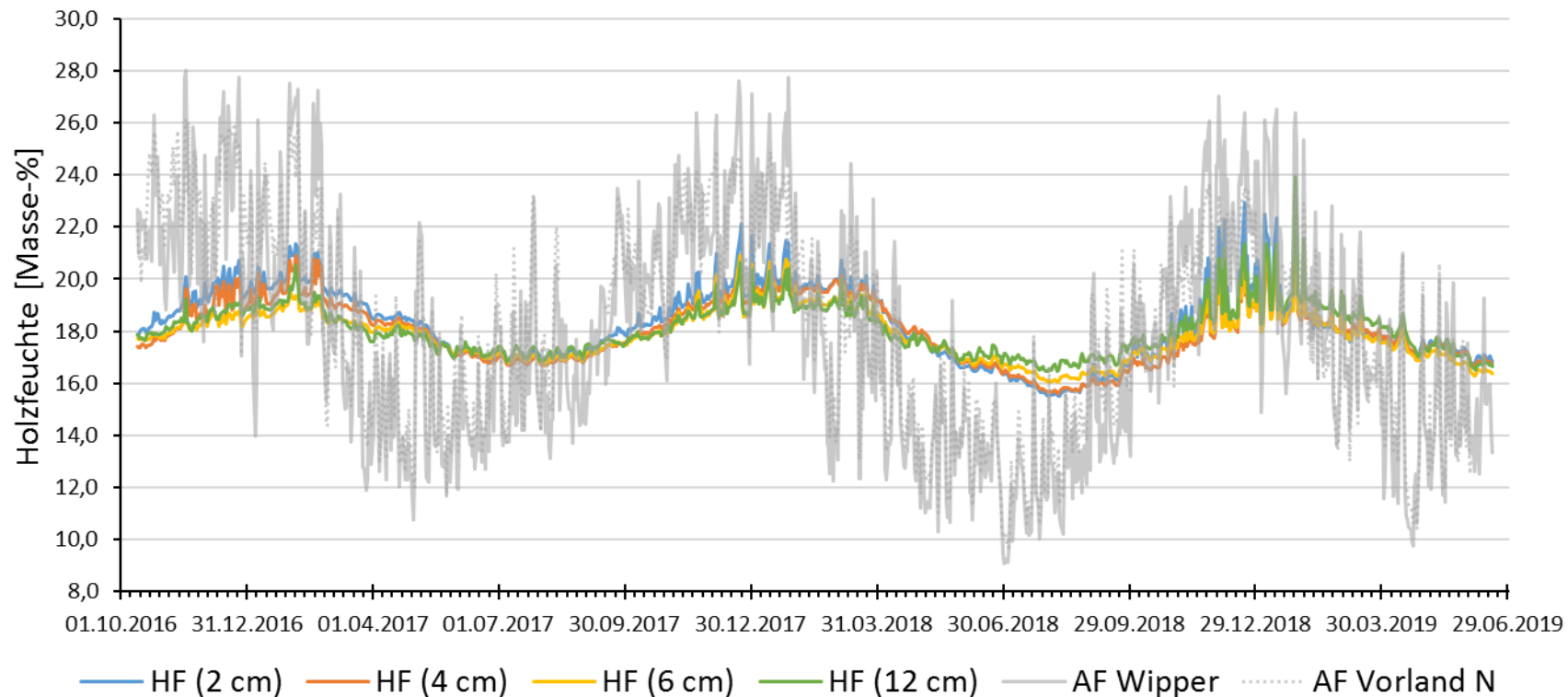
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C6: Birkbergbrücke über die Wipper bei Wippra Messstelle 1

Messzeitraum: 13.10.2016 - 18.06.2019

Messstelle MS1 nahe des südlichen Widerlagers im stromaufwärts liegenden Hauptträger



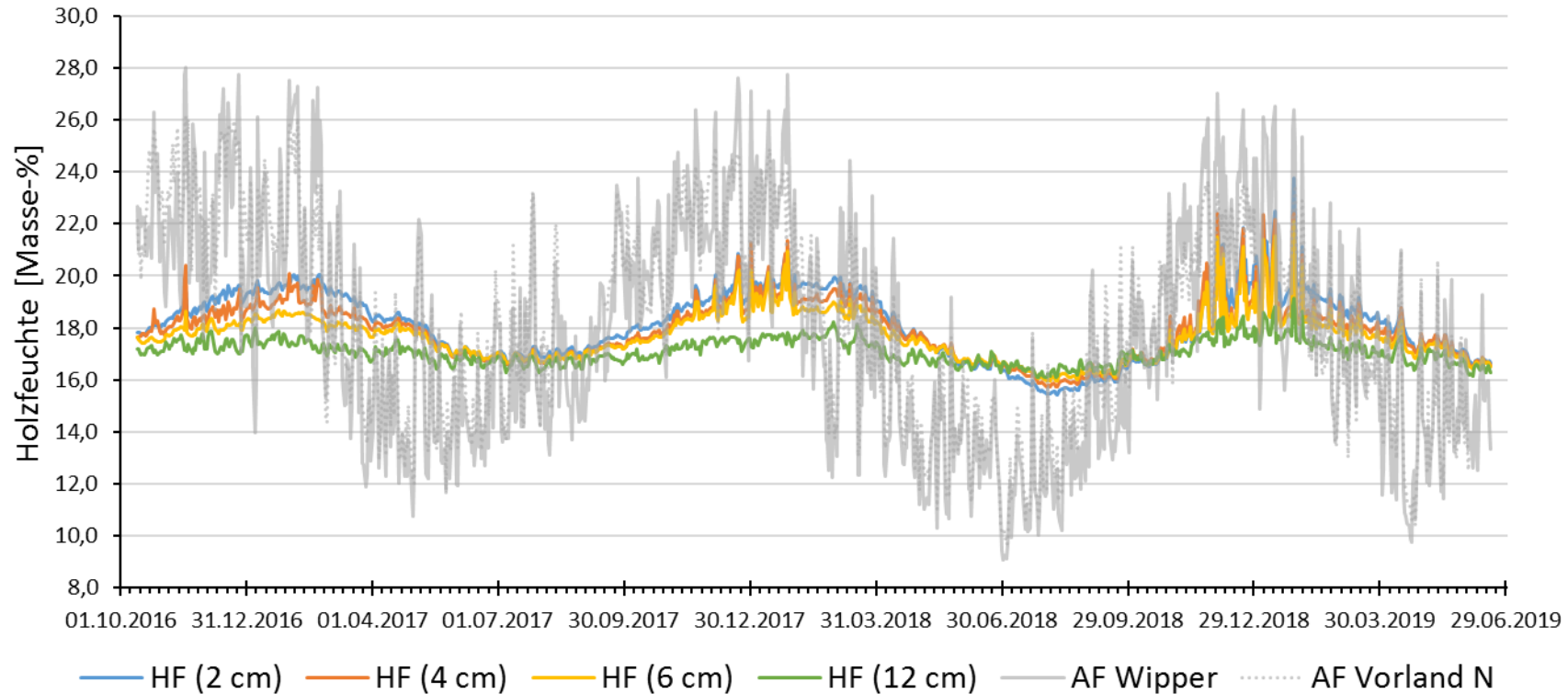
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C7: Birkbergbrücke über die Wipper bei Wippra Messstelle 2

Messzeitraum: 13.10.2016 - 18.06.2019

Messstelle MS2 über dem Gewässer im stromaufwärts liegenden Hauptträger

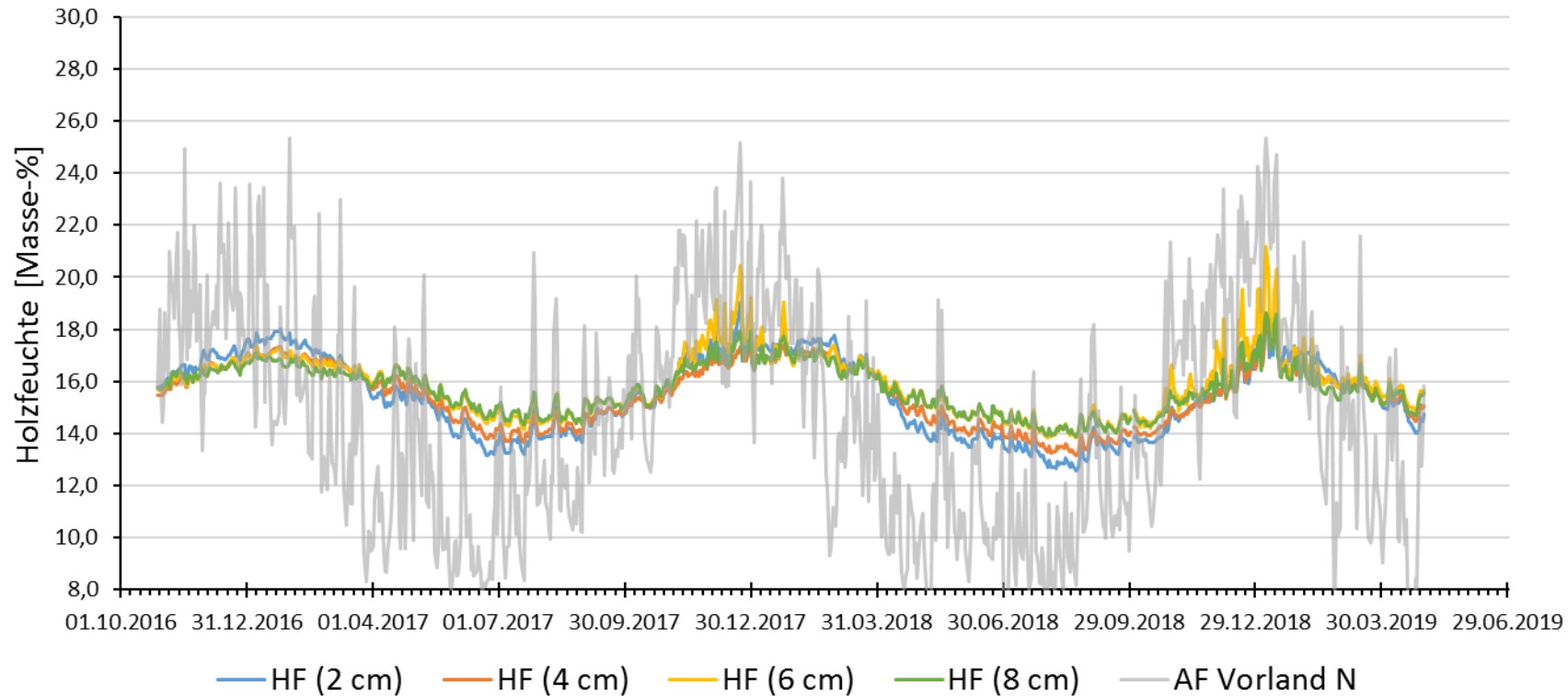


HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C8: Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd Messstelle 1

Messzeitraum: 28.10.2016 - 30.04.2019

Messstelle MS1 über dem nördlichen Vorland im Hauptträger



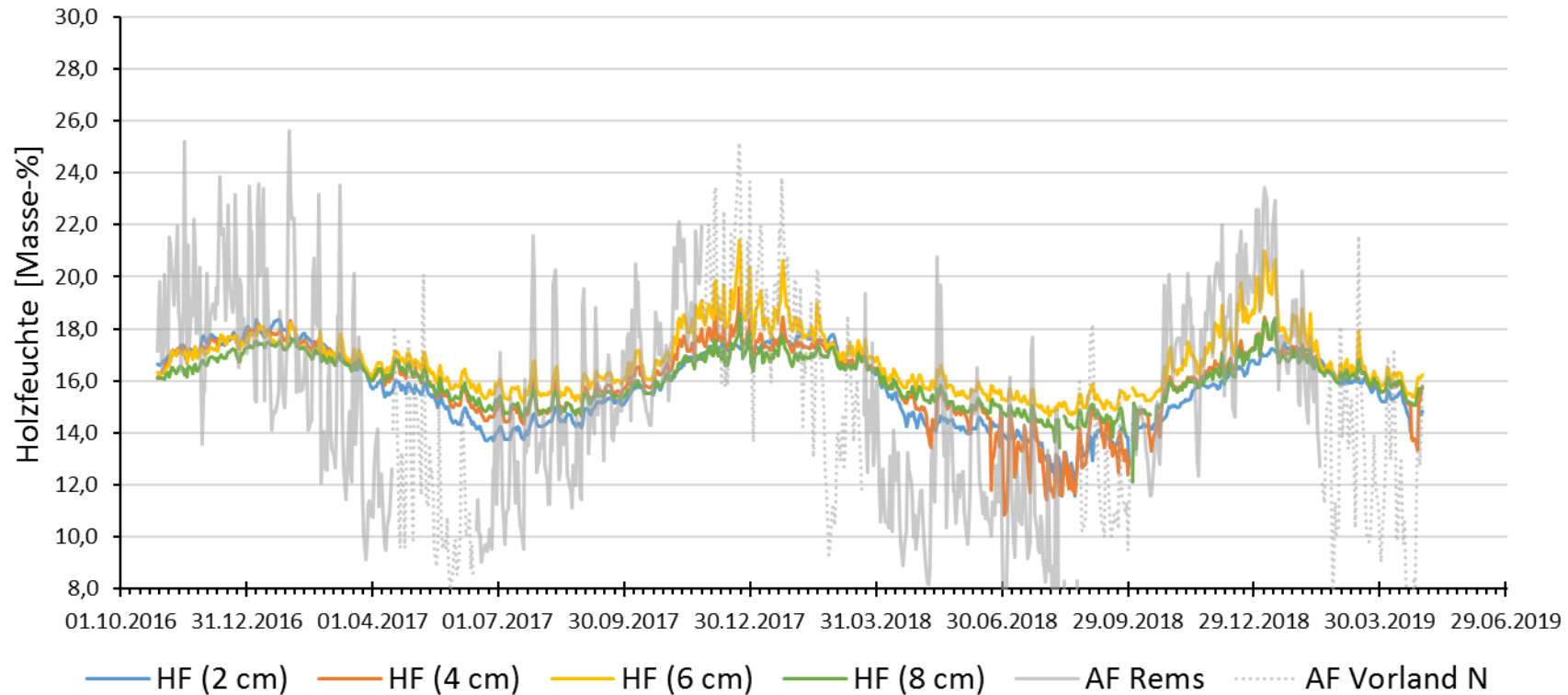
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C9: Rokokobrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Rems in Schwäbisch Gmünd Messstelle 2

Messzeitraum: 28.10.2016 - 30.04.2019

Messstelle MS2 etwa in der Mitte über dem Gewässer im Hauptträger



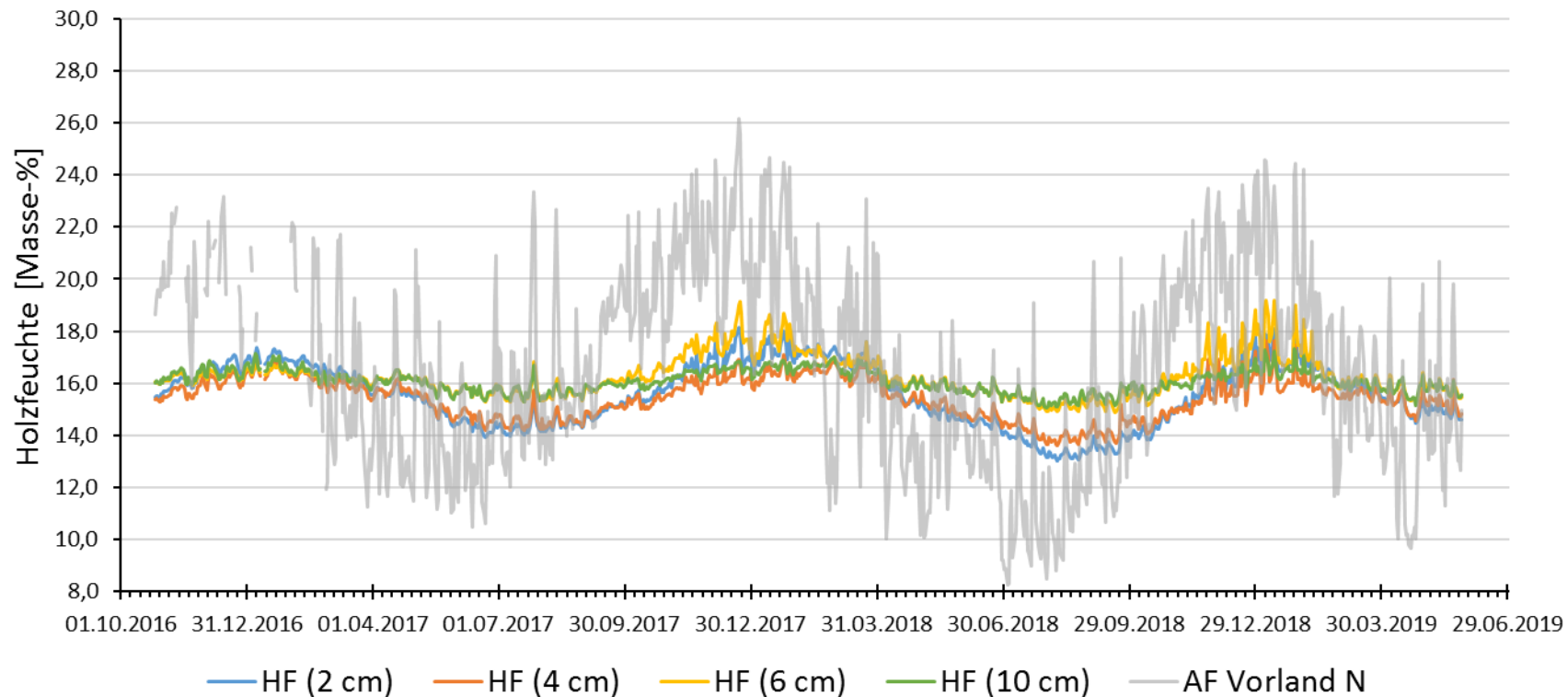
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C10: Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitungen Messstelle 1

Messzeitraum: 26.10.2016 - 27.05.2019

Messstelle MS1 nahe des Pfeilers auf dem nördlichen Vorland im stromaufwärts liegenden Hauptträger



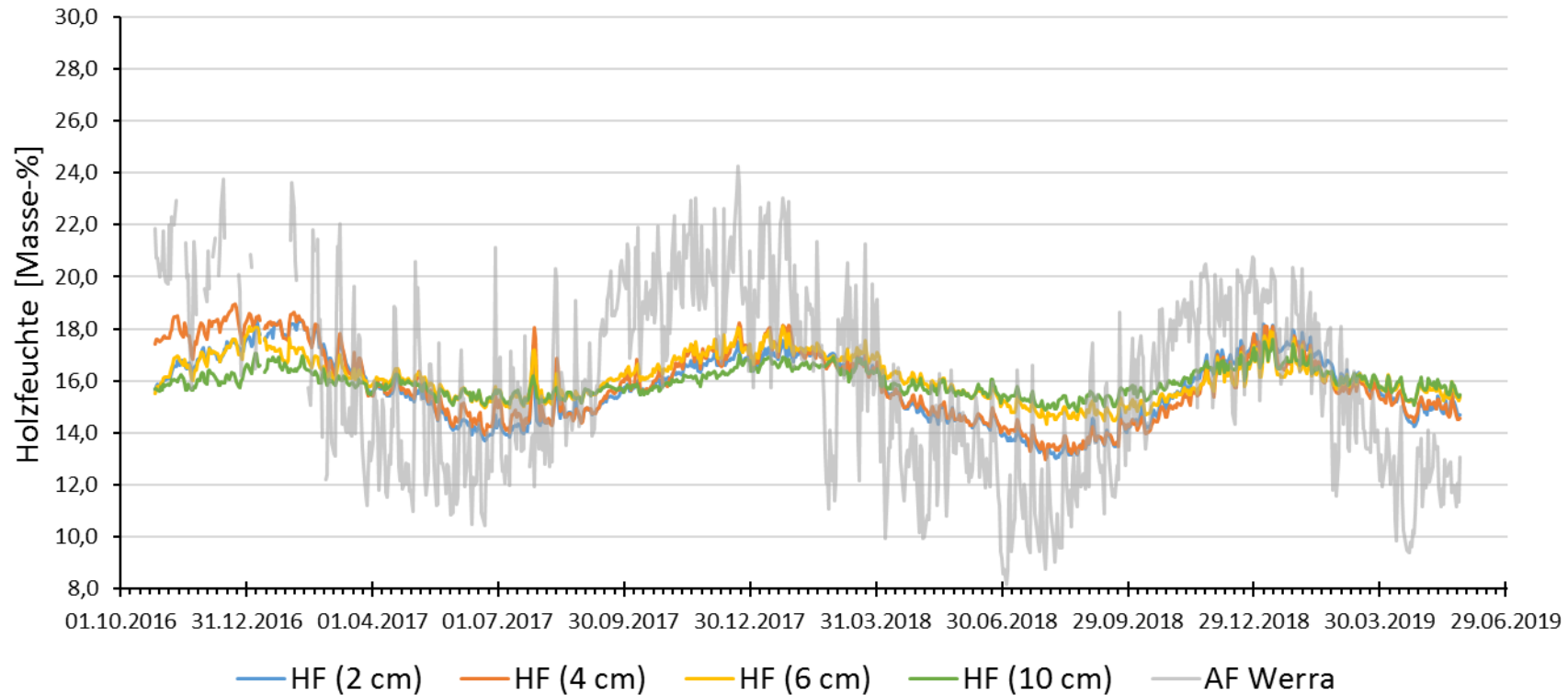
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C11: Geh- und Radwegbrücke über die Werra in Breitungen Messstelle 2

Messzeitraum: 26.10.2016 - 27.05.2019

Messstelle MS2 über dem Gewässer nahe des nördlichen Ufers im stromaufwärts liegenden Hauptträger



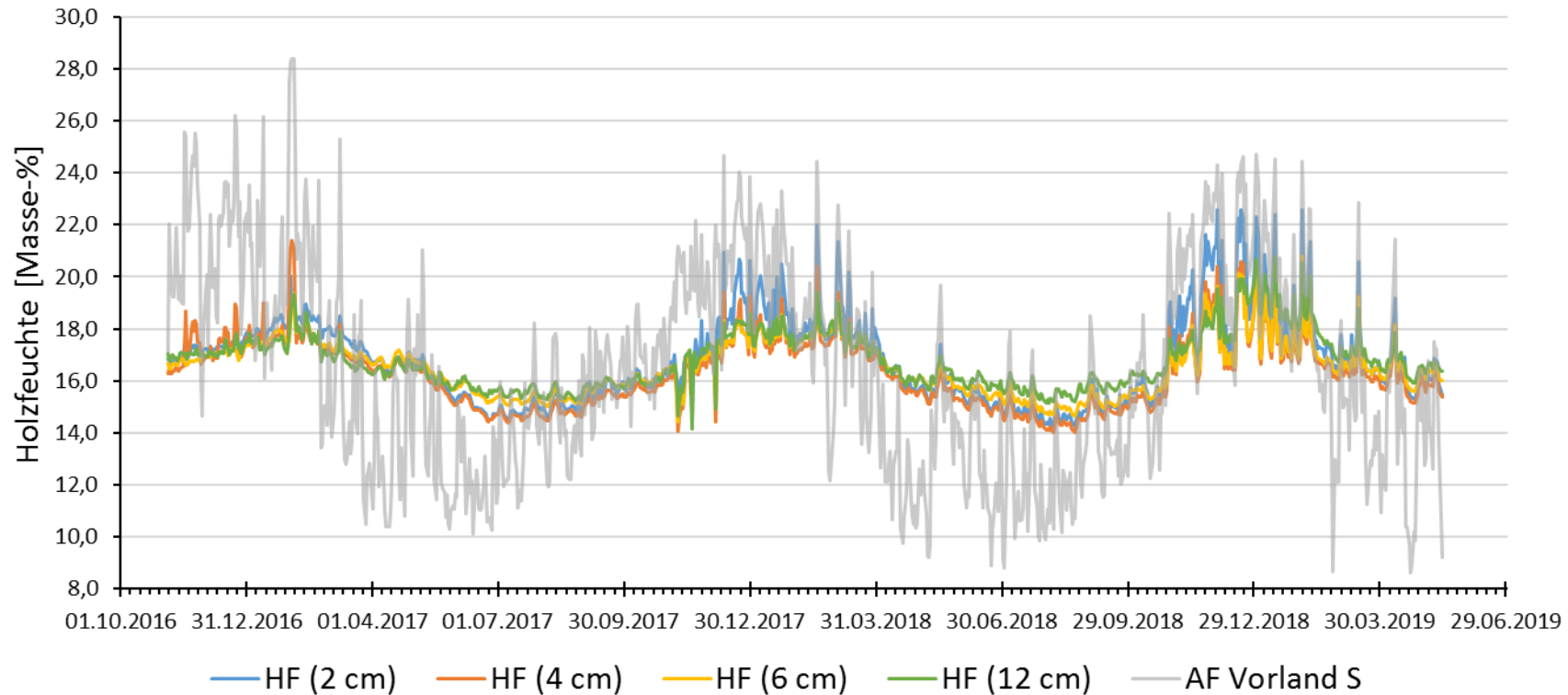
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C12: Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen Messstelle 1

Messzeitraum: 04.11.2016 - 14.05.2019

Messstelle MS1 nahe des Widerlagers über dem südlichen Vorland im stromabwärts liegenden äußeren Hauptträger



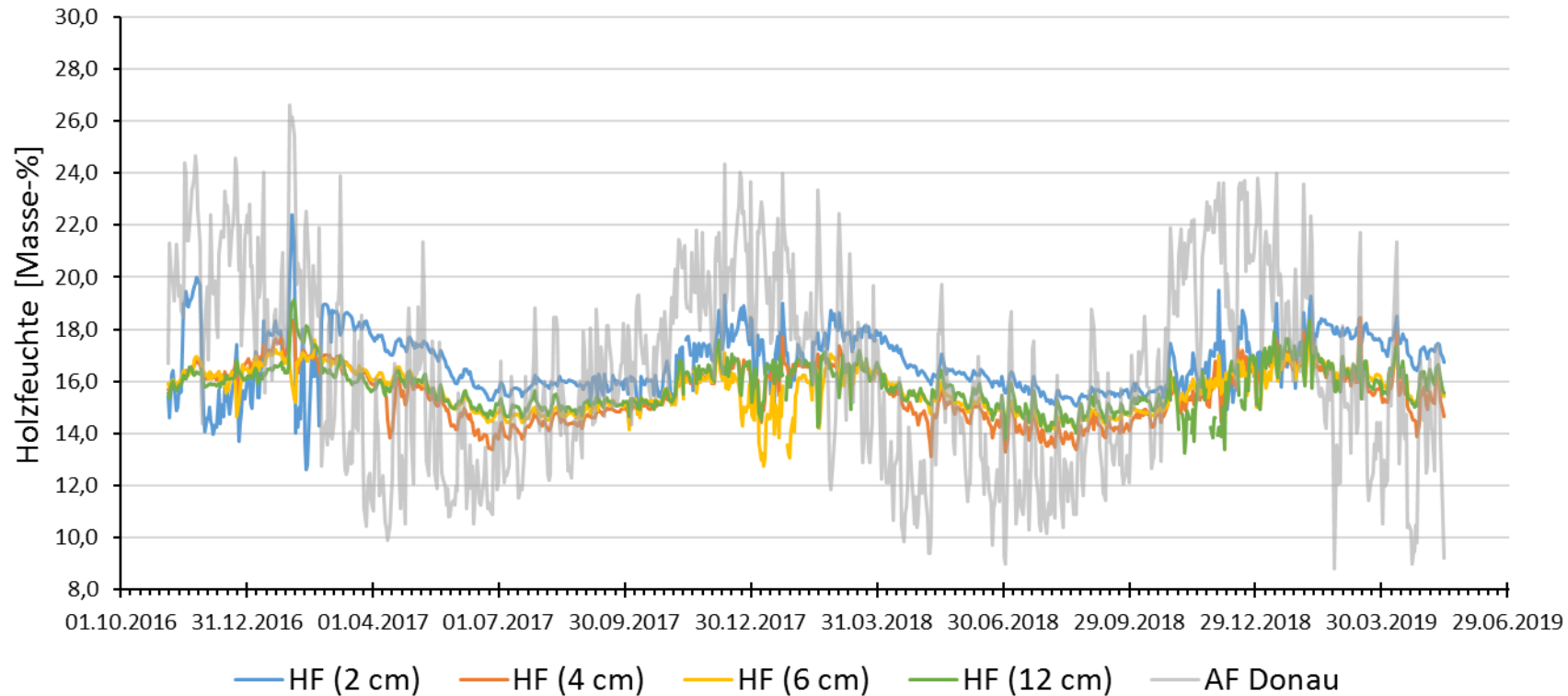
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C13: Nepomukbrücke (Geh- und Radwegbrücke) über die Donau in Sigmaringen Messstelle 2

Messzeitraum: 04.11.2016 - 14.05.2019

Messstelle MS2 nahe des Pfeilers mit Nepomuk-Statue über der Donau im stromabwärts liegenden äußeren Hauptträger



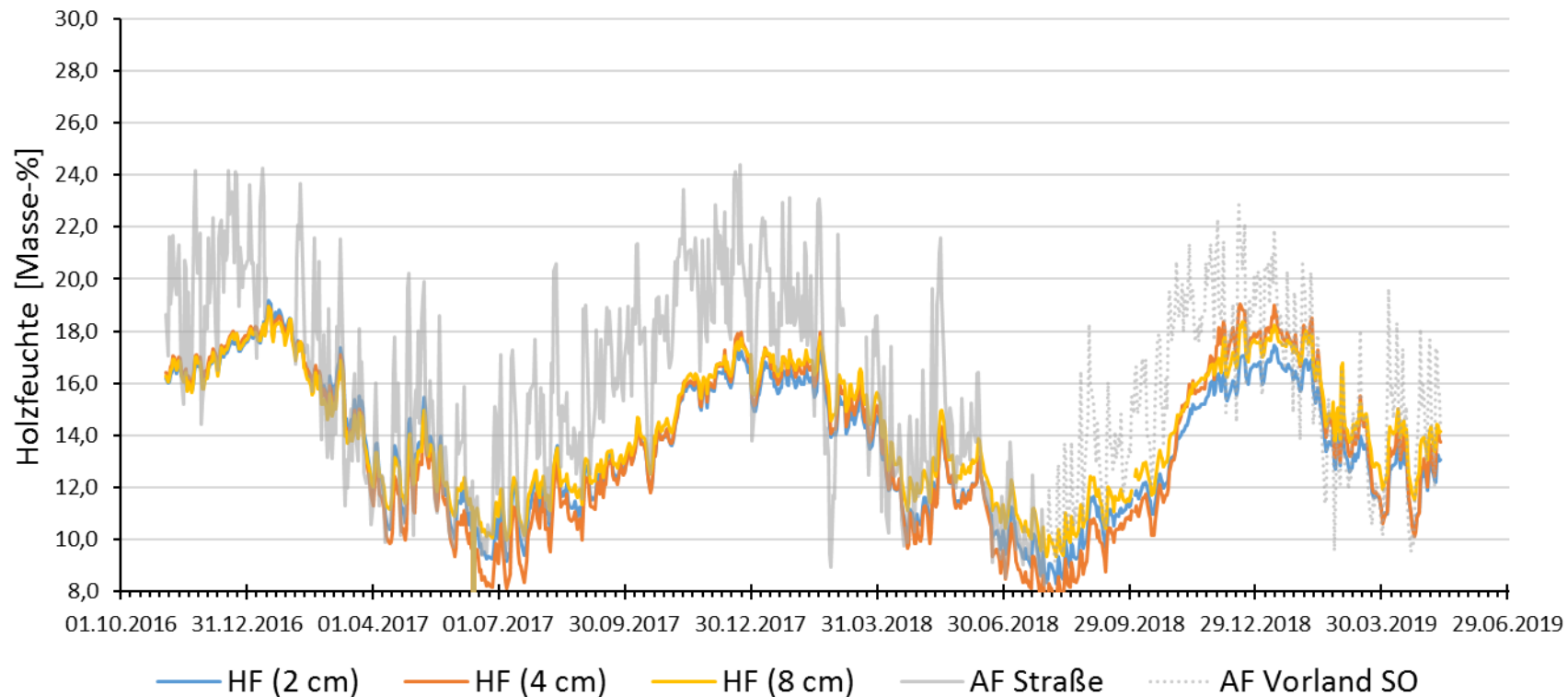
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C14: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem I Messstelle 1

Messzeitraum: 03.11.2016 - 12.05.2019

Messstelle MS1 in der Mitte über der B 317 im stromaufwärts liegenden Untergurt auf der Unterseite



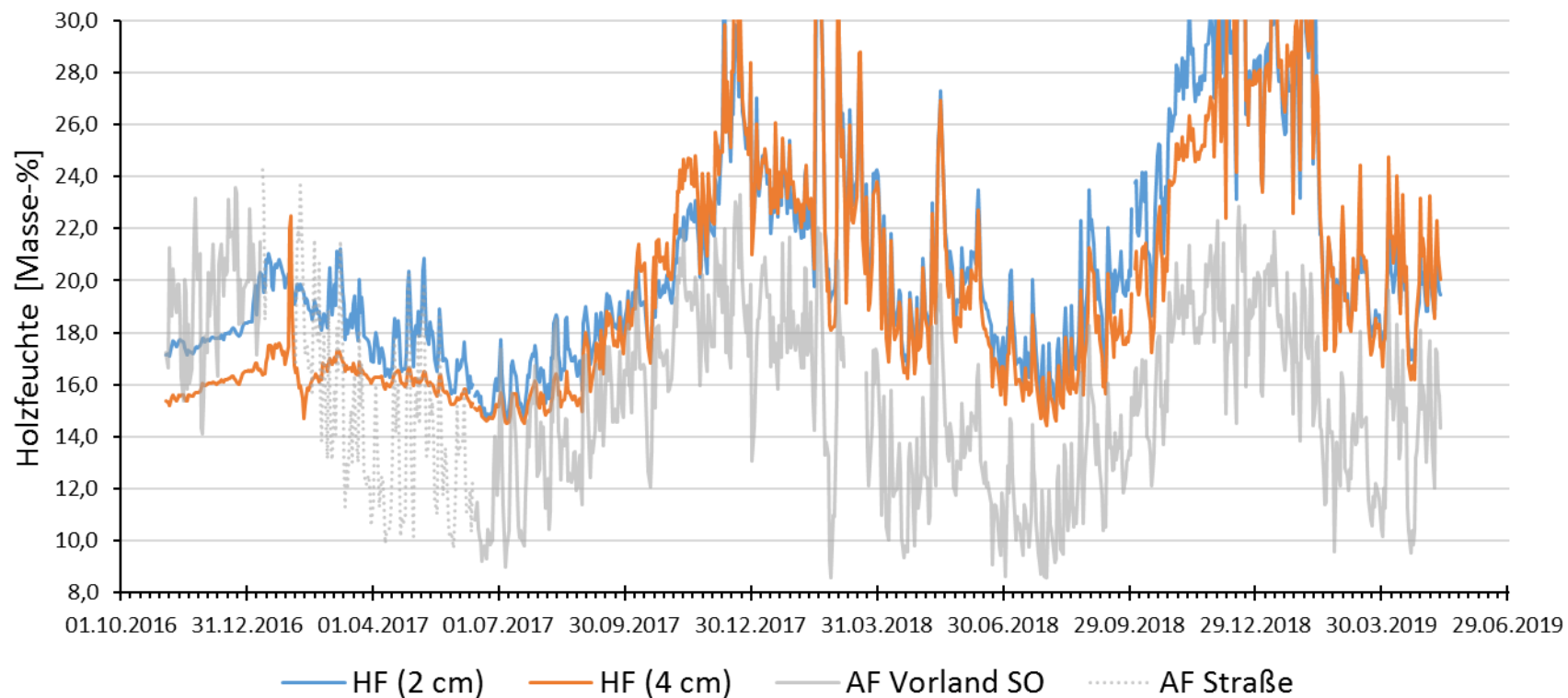
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C15: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem I Messstelle 2

Messzeitraum: 03.11.2016 - 12.05.2019

Messstelle MS2 etwa in der Mitte über dem südöstlichen Vorland im stromaufwärts liegenden Untergurt auf der Innenseite



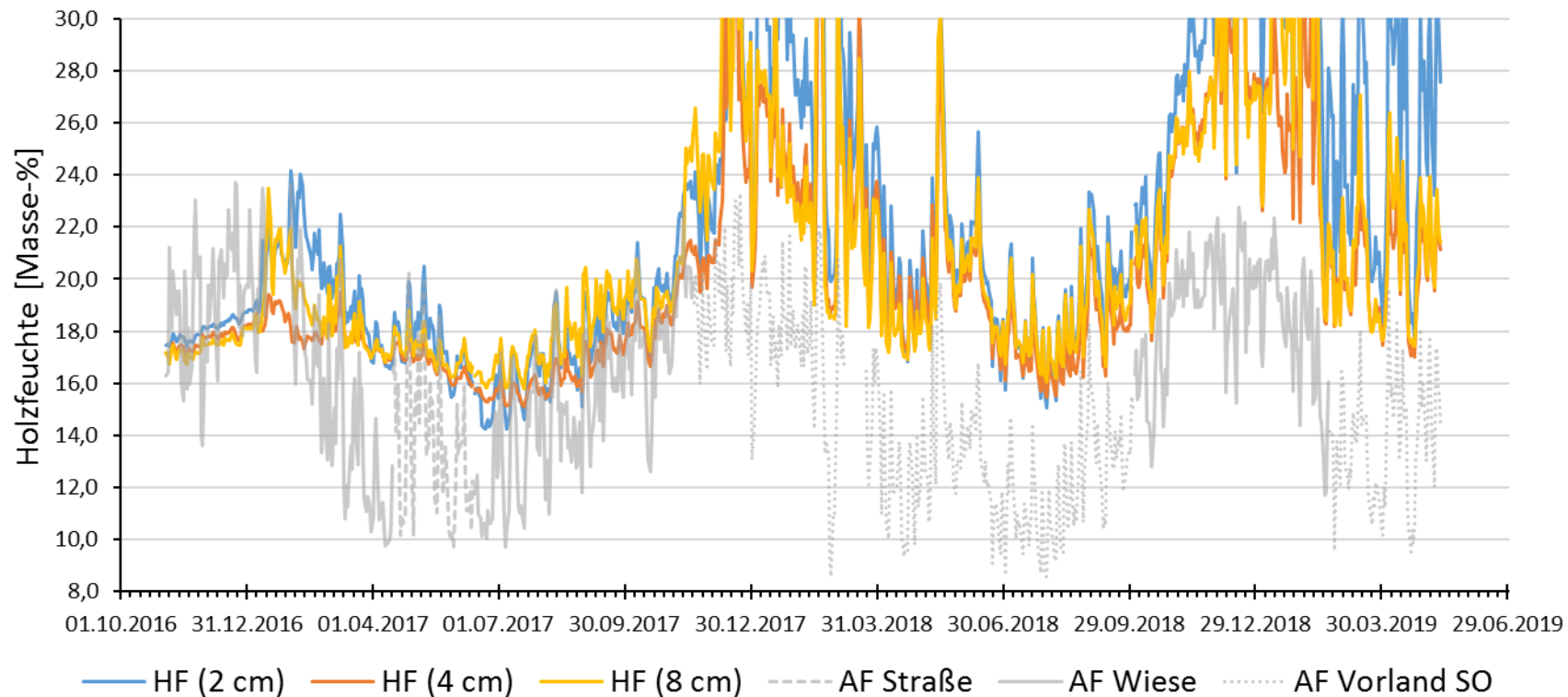
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C16: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem I Messstelle 3

Messzeitraum: 03.11.2016 - 12.05.2019

Messstelle MS3 über der Wiese nahe des südöstlichen Ufers im stromaufwärts liegenden Untergurt auf der Innenseite



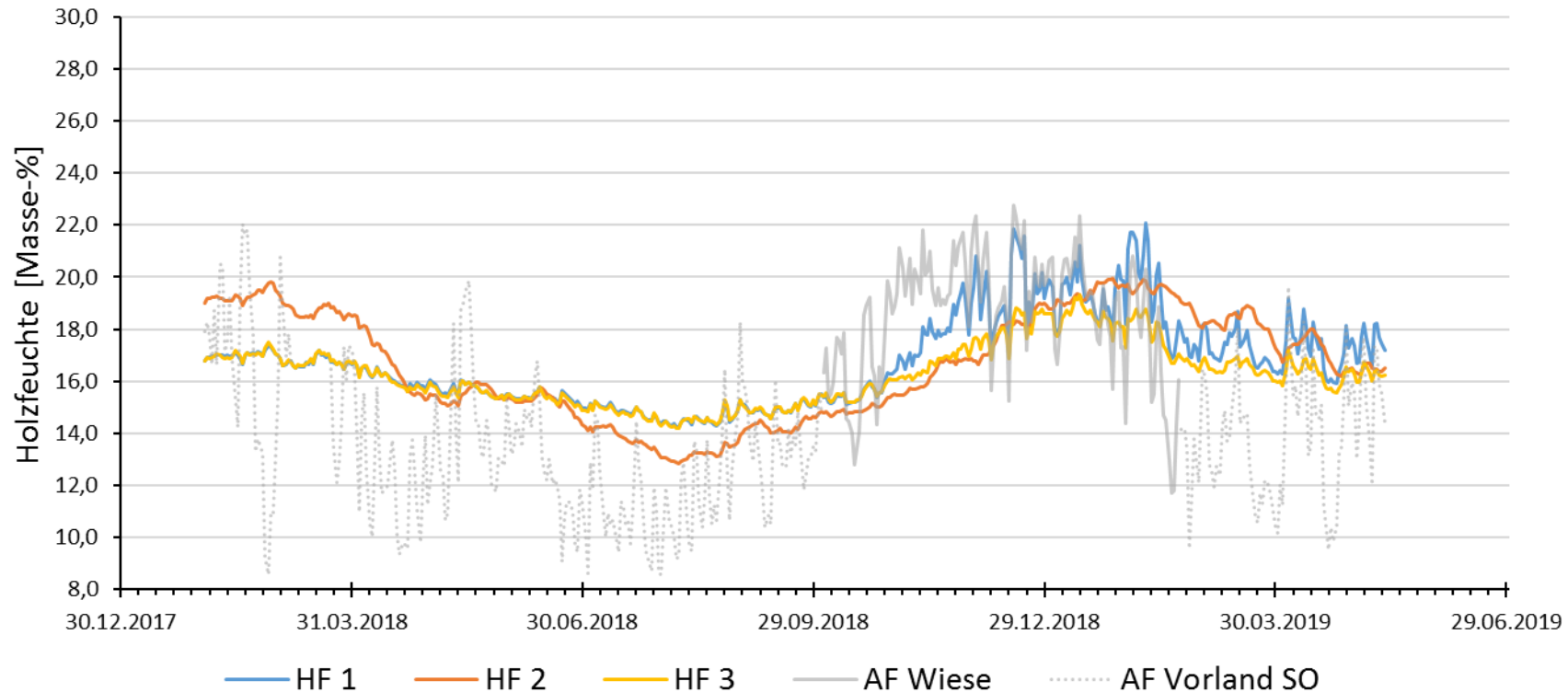
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C17: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem II Messbereich Wiese

Messzeitraum: 01.02.2018 - 12.05.2019

Messbereich MBW etwa in der Mitte über der Wiese



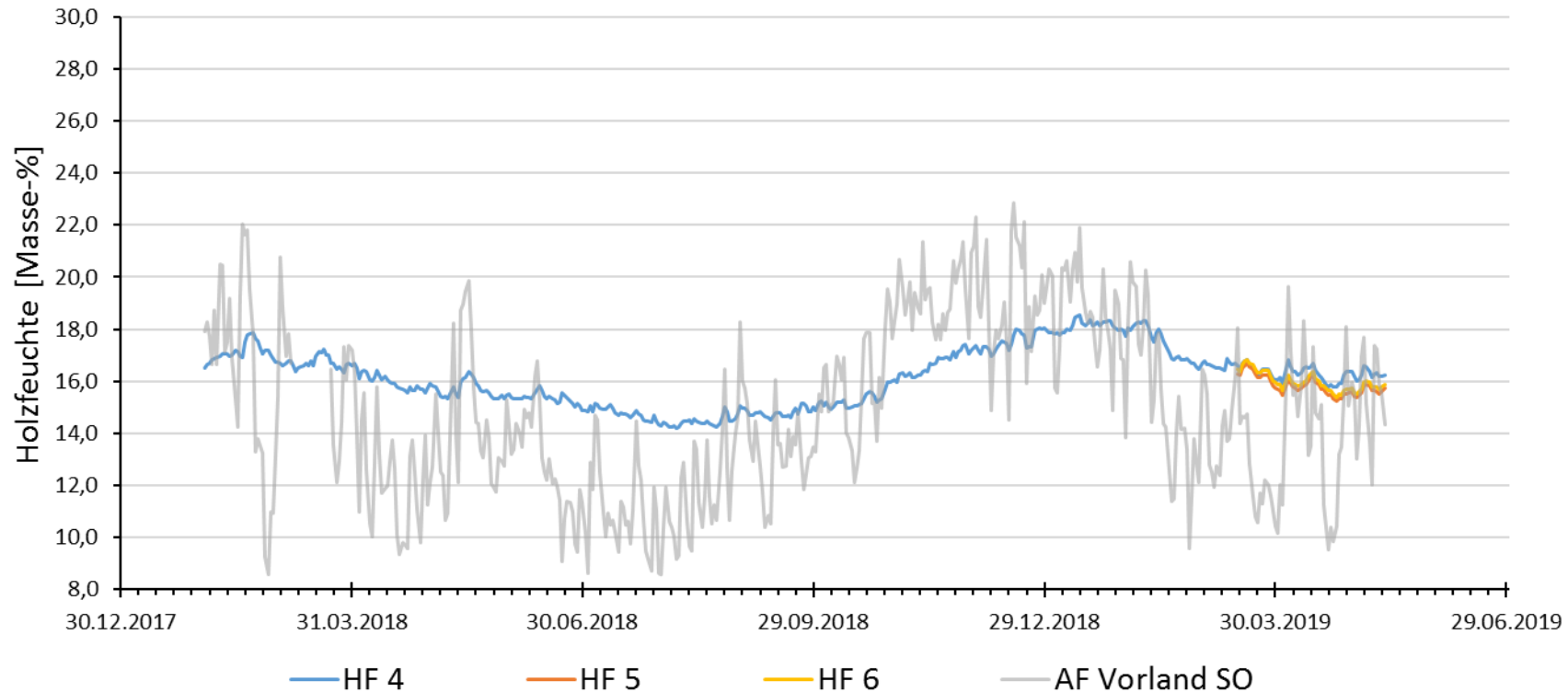
Legende:

- HF 1 Holzfeuchte* im stromabwärts liegenden Untergurt zwischen Achse 170/180 in 5 cm Tiefe ab Bauteiloberfläche
- HF 2 Holzfeuchte* im stromabwärts liegenden Pfosten in Achse 170 in 1,5 cm Tiefe ab Bauteiloberfläche
- HF 3 Holzfeuchte* im stromaufwärts liegenden Untergurt zwischen Achse 170/180 in 5 cm Tiefe ab Bauteiloberfläche
- * temperaturkompensierter Messwert
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)

Diagramm C18: Geh- und Radwegbrücke über die Wiese und die B 317 in Lörrach Messsystem II Messbereich Testfelder

Messzeitraum: 01.02.2018 - 12.05.2019 bzw. 15.03.2019 - 12.05.2019

Messbereich MBT über dem südöstlichen Vorland im Bereich der Testfelder des Wetterschutzes



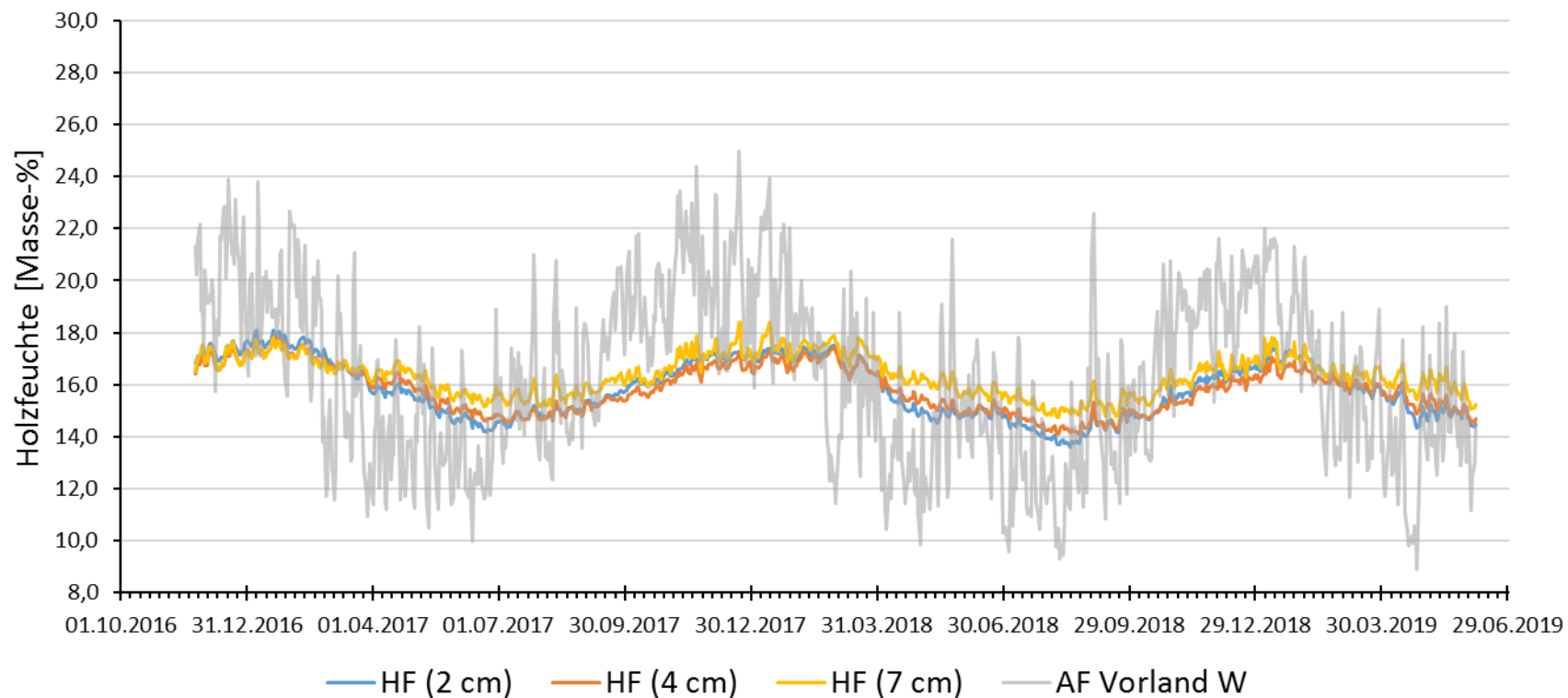
Legende:

- HF 4 Holzfeuchte* im stromabwärts liegenden Untergurt zwischen Achse 130/140 in 5 cm Tiefe ab Bauteiloberfläche
- HF 5 Holzfeuchte* im stromaufwärts liegenden Untergurt zwischen Achse 110/120 in 2,5 cm Tiefe ab Bauteiloberfläche
- HF 6 Holzfeuchte* im stromabwärts liegenden Untergurt zwischen Achse 110/120 in 2,5 cm Tiefe ab Bauteiloberfläche
- * temperaturkompensierter Messwert
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)

Diagramm C19: Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger in Werdau Messstelle 1

Messzeitraum: 24.11.2016 - 06.06.2019

Messstelle MS1 nahe des westlichen Widerlagers im stromaufwärts liegenden Hauptträger



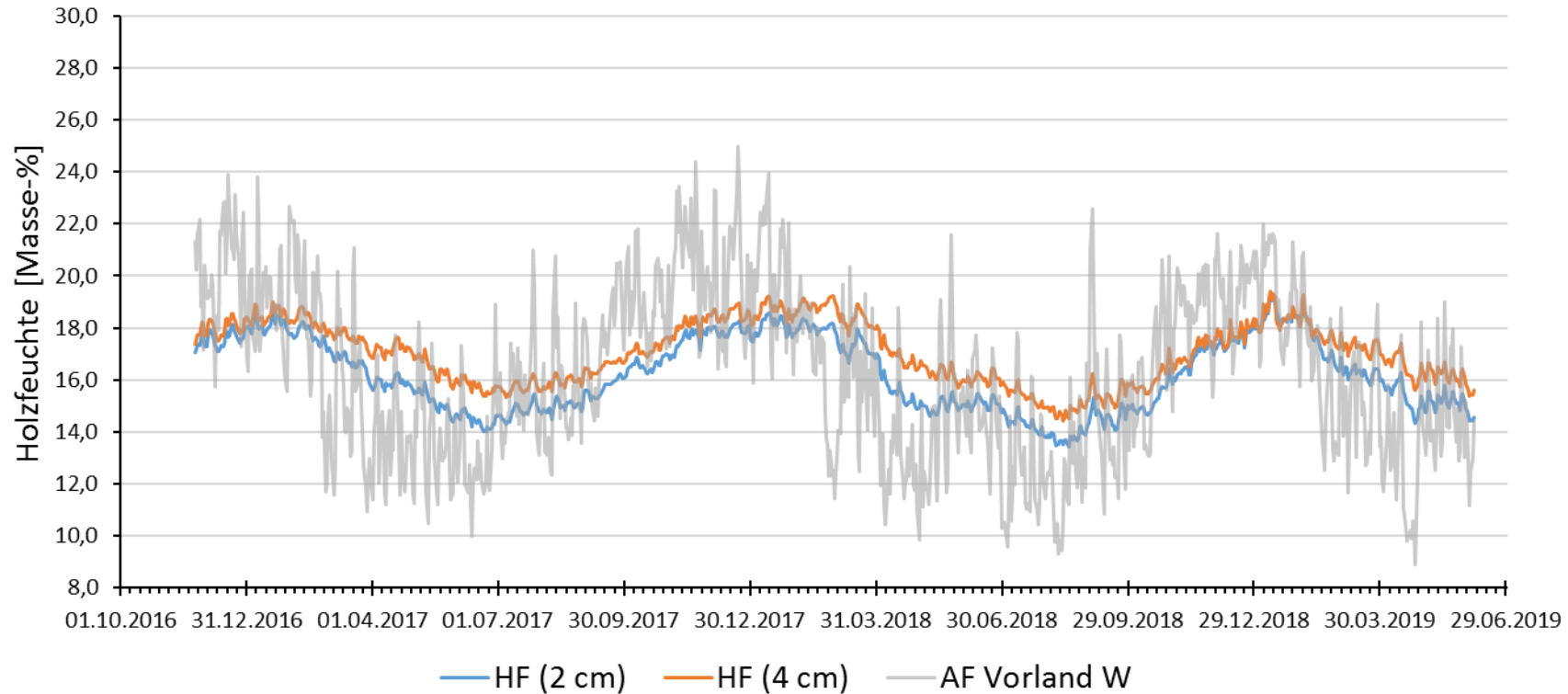
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C20: Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger in Werdau Messstelle 2

Messzeitraum: 24.11.2016 - 06.06.2019

Messstelle MS2 nahe des westlichen Widerlagers im stromaufwärts liegenden Bohlenbelagträger



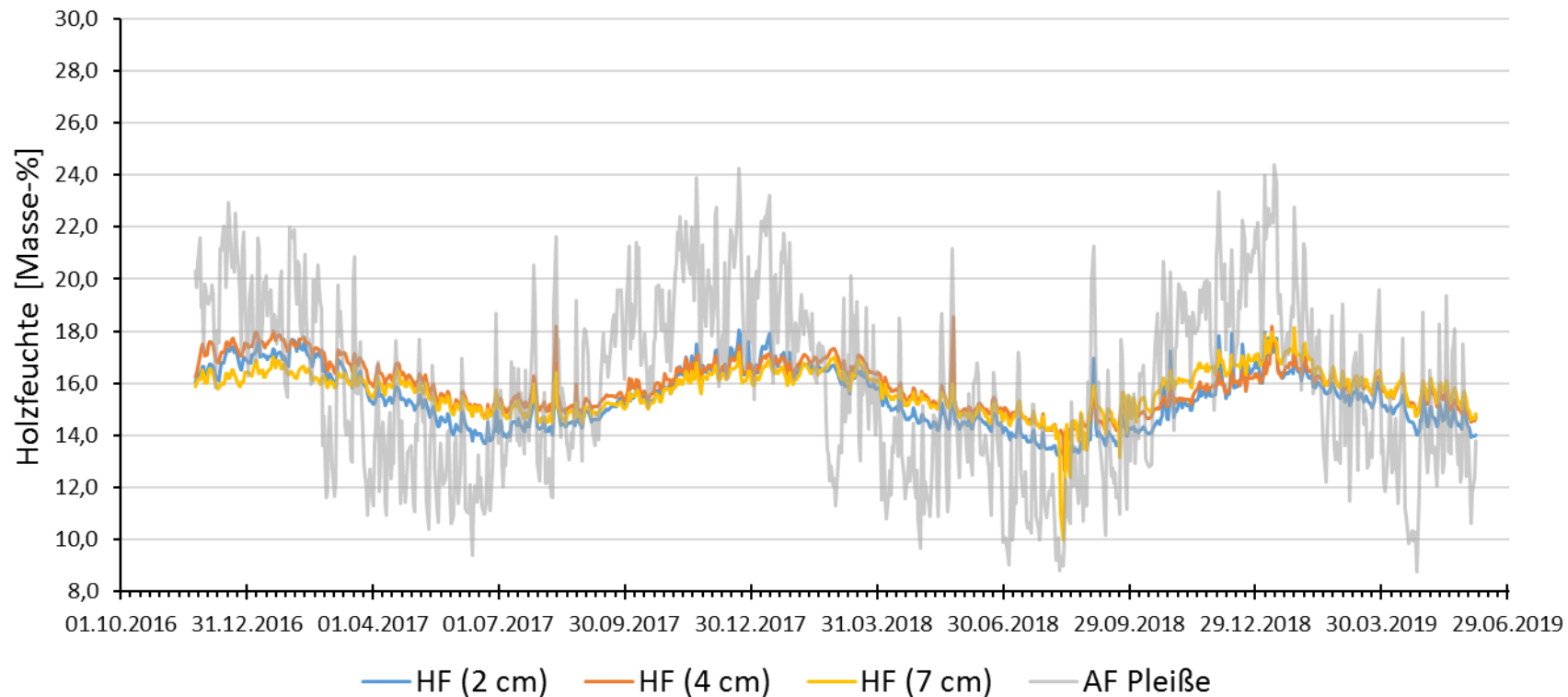
Legende:

HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
 AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
 (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C21: Geh- und Radwegbrücke Oberer Anger in Werdau Messstelle 3

Messzeitraum: 24.11.2016 - 06.06.2019

Messstelle MS3 etwa in der Mitte über der Pleiße im stromaufwärts liegenden Hauptträger



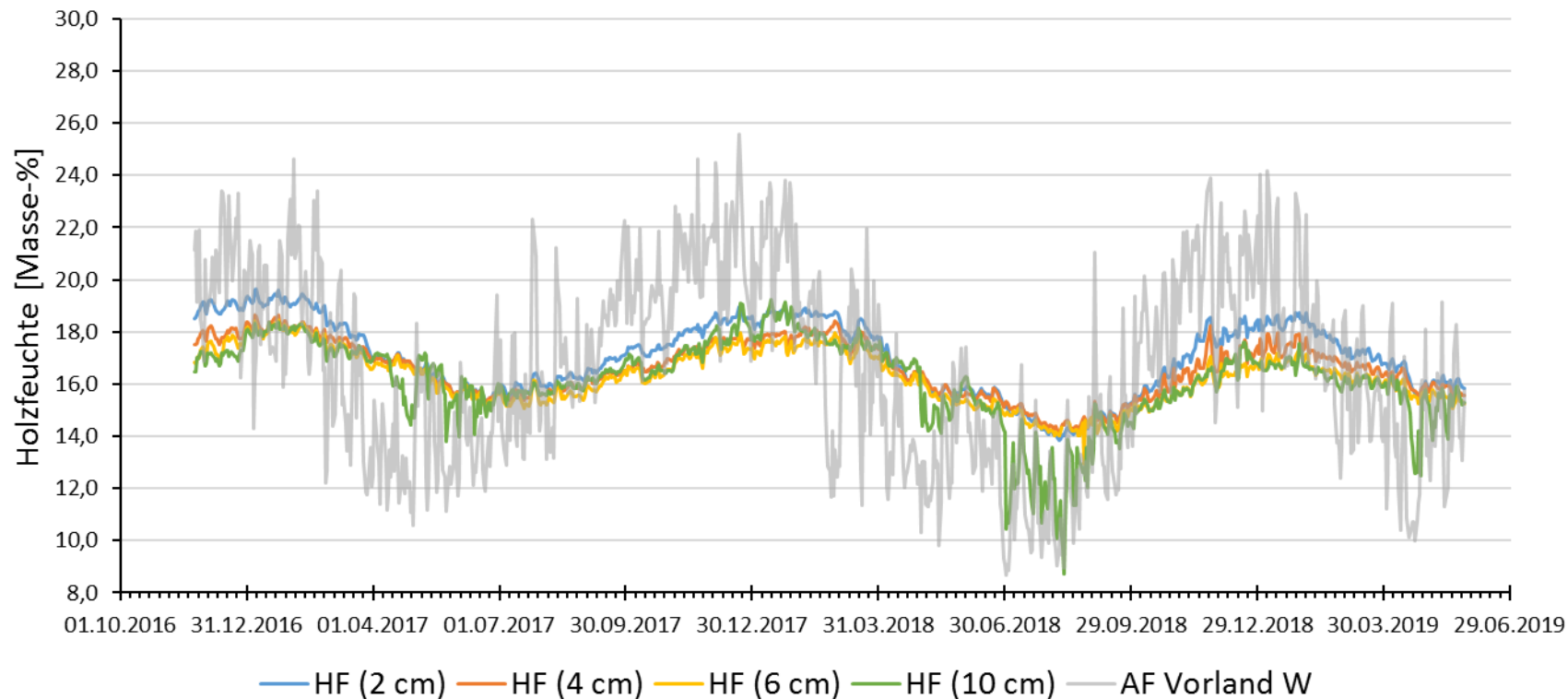
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C22: Werratal-Radwegbrücke zwischen Ebenshausen und Frankenroda Messstelle 1

Messzeitraum: 23.11.2016 - 27.05.2019

Messstelle:MS1 nahe des westlichen Widerlagers über dem Vorland im stromabwärts liegenden Hauptträger



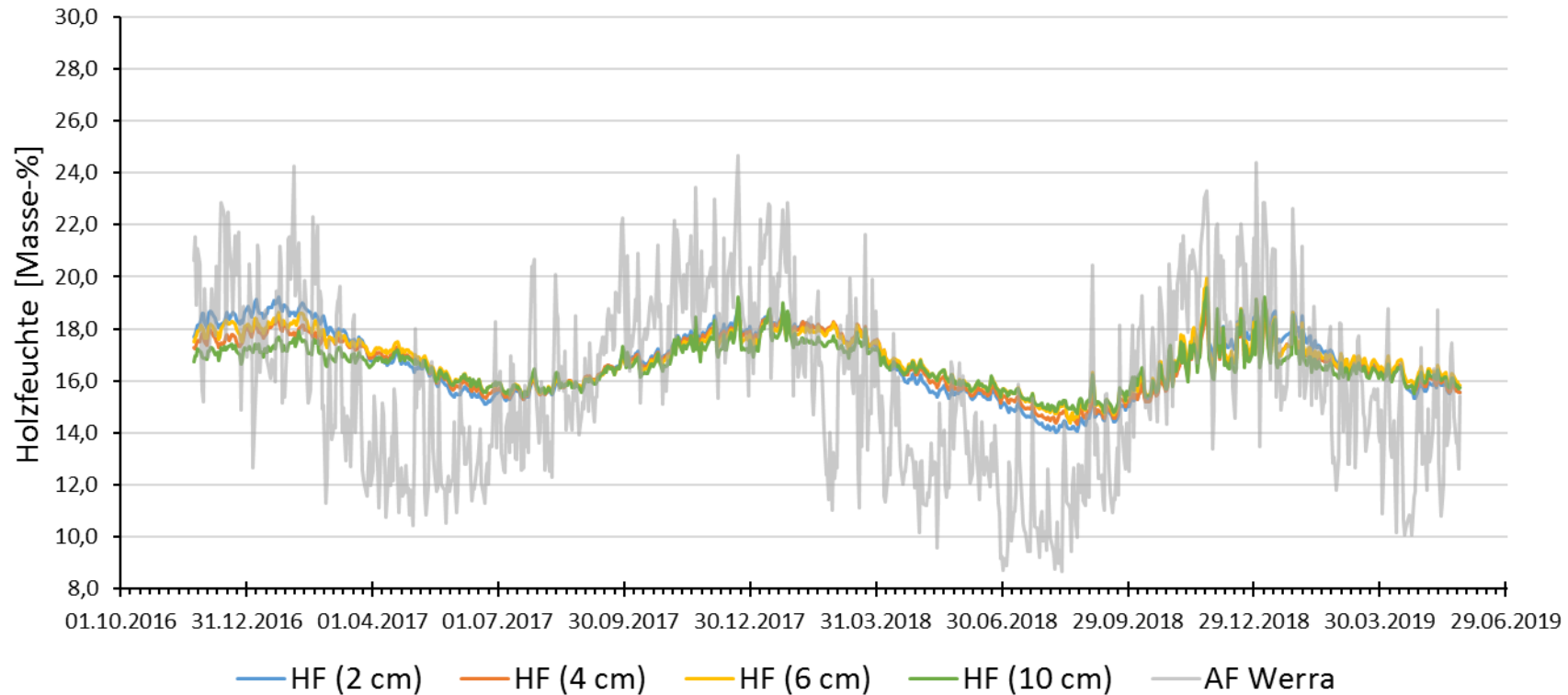
Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche

Diagramm C23: Werratal-Radwegbrücke zwischen Ebenshausen und Frankenroda Messstelle 2

Messzeitraum: 23.11.2016 - 27.05.2019

Messstelle MS2 nahe des westlichen Ufers über der Werra im stromabwärts liegenden Hauptträger



Legende:

- HF Holzfeuchte (temperaturkompensierter Messwert)
- AF Ausgleichsfeuchte (theoretischer Wert, berechnet aus dem Umgebungsklima)
- (X cm) Messtiefe ab Bauteiloberfläche