

Klimabedingungen bei Wildtierüberführungen in Holzbauweise

Schlussbericht



Datum 15.12.2022

Fördermittelgeber Bundesamt für Umwelt – BAFU
Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
Projektnummer 2020.08

Forschungsstelle Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Antragsteller Prof. Dipl.-Ing. Andreas Müller
Leiter Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Verfasser Dr. Karim Ghazi Wakili, Projektleiter BFH
Marcus Schiere, WM
Sébastien Bonifacio, Wiss. Ass
Ulrich Kauz, Jan, Maurer, Assistenten BFH

Projektpartner Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG
Häring AG/Roth Burgdorf AG,
terra vermessungen ag,
Lignum Holzwirtschaft Schweiz

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Projektes	1
2	Monitoring der Holzfeuchte (AP1)	1
2.1	Holzfeuchte, Niederschlag	1
2.2	Holzfeuchte und Koinzidenz von Verkehr und Niederschlag	6
2.3	Klima in der Überführung und Meteo-Daten	8
3	Laboruntersuchungen (AP2)	9
4	Numerische Simulationen CFD (AP3)	12
5	Schlussfolgerungen (AP4)	16
6	Referenzen	16

1 Ziel des Projektes

Ziel des Projektes ist, die klimatischen Rahmenbedingungen durch eine umfassende Klima- und Feuchteüberwachung (Monitoring) im Bauwerk der Wildtierüberführung Rynetel Suhr (AG) über die Autobahn A1 (Zürich-Bern) zu erfassen und wissenschaftlich auszuwerten. Dabei wird dem Einfluss des Verkehrs besondere Beachtung geschenkt. Durch Sprühnebel wird die Holzkonstruktion mit grösseren Mengen an Wasser beaufschlagt. Andererseits wirkt sich der Verkehr positiv auf den Luftwechsel im Bauwerk und damit auf das Austrocknungsvermögen der Konstruktion aus. In einem weiteren Schritt soll untersucht werden wie die Querschnittsform und die Konstruktionsweise der tunnelähnlichen Brückkonstruktion die Geschwindigkeit der Auffeuchtung und Abtrocknung der Holzkonstruktion beeinflusst. Die Ergebnisse sollen in Form eines anwendungsorientierten Forschungsberichts mit Hinweisen zu konstruktiven AusAbbildung von Wildtierüberführungen in Holz kommuniziert werden.

Diese Aufgaben sind in vier Arbeitspakete aufgeteilt:

- AP1: Monitoring der Holzfeuchte und Klimabedingungen in der Wildtierüberführung Rynetel Suhr (AG) unter Berücksichtigung von Verkehrseinflüssen
- AP2: Laboruntersuchungen zur Ermittlung von zusätzlichen Materialkennwerten
- AP3: Numerische Simulation von Verkehrs- und Klimaeinflüsse
- AP4: Empfehlungen und Hinweise für zukünftige Projekte

2 Monitoring der Holzfeuchte (AP1)

In diesem Abschnitt werden über eine Periode von 20 Monaten (Okt.2020 - Aug.2022) die aussagekräftigsten Resultate zusammengefasst und erläutert. Eine detaillierte Übersicht zu den installierten Sensoren, die parallel dazu evaluierten Verkehrsdaten des schweizerischen Bundesamtes für Strassenbau (ASTRA) und die Daten der nahe gelegenen MeteoSchweiz Messstation «Buchs» befindet sich im «Zwischenbericht für Meilenstein MS1,Erfassung Messdaten» vom 04.11.2021.

2.1 Holzfeuchte, Niederschlag

Eine Übersicht der Stellen an denen Temperatur und Feuchtesensoren an der Innenseite der Wildtierüberführung angebracht sind, ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Sensoren sind an der Holzkonstruktion am Eingang (Richtungen Bern und Zürich), in der Mitte (Richtung Zürich) und am Ausgang (Richtung Zürich) der Überführung angebracht.

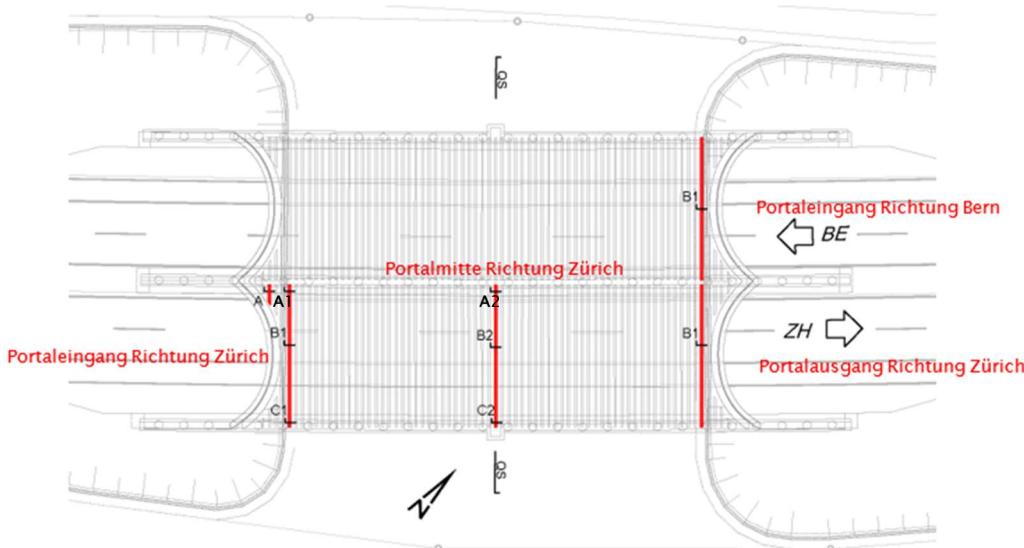


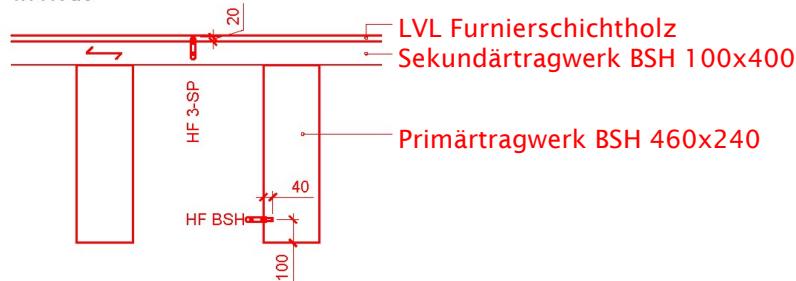
Abbildung 2.1 Übersicht der Messstellen an denen die Sensoren für Holzfeuchte in der Tragkonstruktion der Überführung Rynetel (AG) angebracht sind

Die Sensoren (Abbildung 2.1) sind in drei verschiedenen Bauteilen der Holzkonstruktion installiert. Im Primärtragwerk (BSH 460x240 mm), im Sekundärtragwerk (BSH 100x 400 mm) und in der Überdachung aus LVL (Furnierschichtholz). Abbildung 2.2 zeigt eine detaillierte Übersicht der Platzierung der Sensoren in den drei Teilen der Holz Konstruktion.

Schnitt A 1:25

2x Holzfeuchtesensor (HF)

1x Node

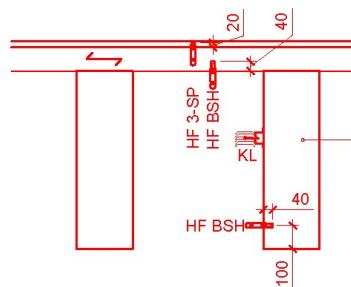


Schnitt B1 1:25

3x Holzfeuchtesensor (HF)

1x Aussenklimasensor (KL)

2x Node



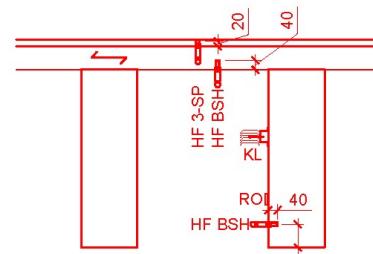
Schnitt B2 1:25

3x Holzfeuchtesensor (HF)

1x Aussenklimasensor (KL)

1x Regensensor + Oberflächetemp (RO)

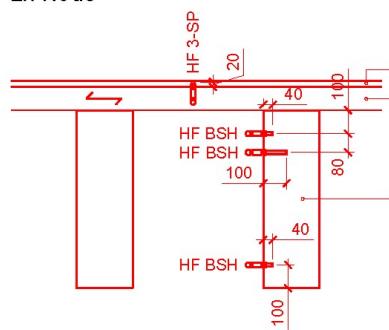
3x Node



Schnitt C1 1:25

4x Holzfeuchtesensor (HF)

2x Node



Schnitt C2 1:25

4x Holzfeuchtesensor (HF)

1x Regensensor + Oberflächetemp (RO)

1x Windgeschwindigkeit (WI)

4x Node

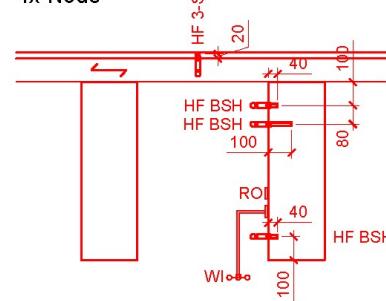


Abbildung 2.2 Detaillierte Übersicht der Platzierung der Sensoren in den drei Teilen der Holz Konstruktion

Der einzelne Sensor und dessen Einbau in die Holzkonstruktion ist im Abbildung 2.3 dargestellt. Anhand der gemessenen Luft-Temperatur T [°C] und relative Luft-Feuchte h [0 bis 1] im kleinen Volumen worin der Sensor liegt, kann mit Hilfe der Sorptionsisotherme für Holz die Holzfeuchte u [M%] bestimmt werden.

Für die folgende Auswertung wurde das Modell von Simpson (1973) verwendet. Dabei wurde die Sorptions-isotherme von unbehandeltem Holz (Fichte) verwendet.

$$u = \frac{1800}{M_p} \cdot \left(\frac{K_1 h}{1 - K_1 h} + \frac{K_2 K_1 h + 2K_3 K_2 K_1^2 h^2}{1 + K_2 K_1 h + K_3 K_2 K_1^2 h^2} \right)$$

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

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

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

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

mit u : Holzfeuchte [M%] h : rel. Luftfeuchte [-] T : Temperatur [°C]

Hinweis: Die Holzfeuchte ist das Verhältnis der im Holz enthaltenen Wassermasse zur Trockenmasse des Holzes in Prozent.

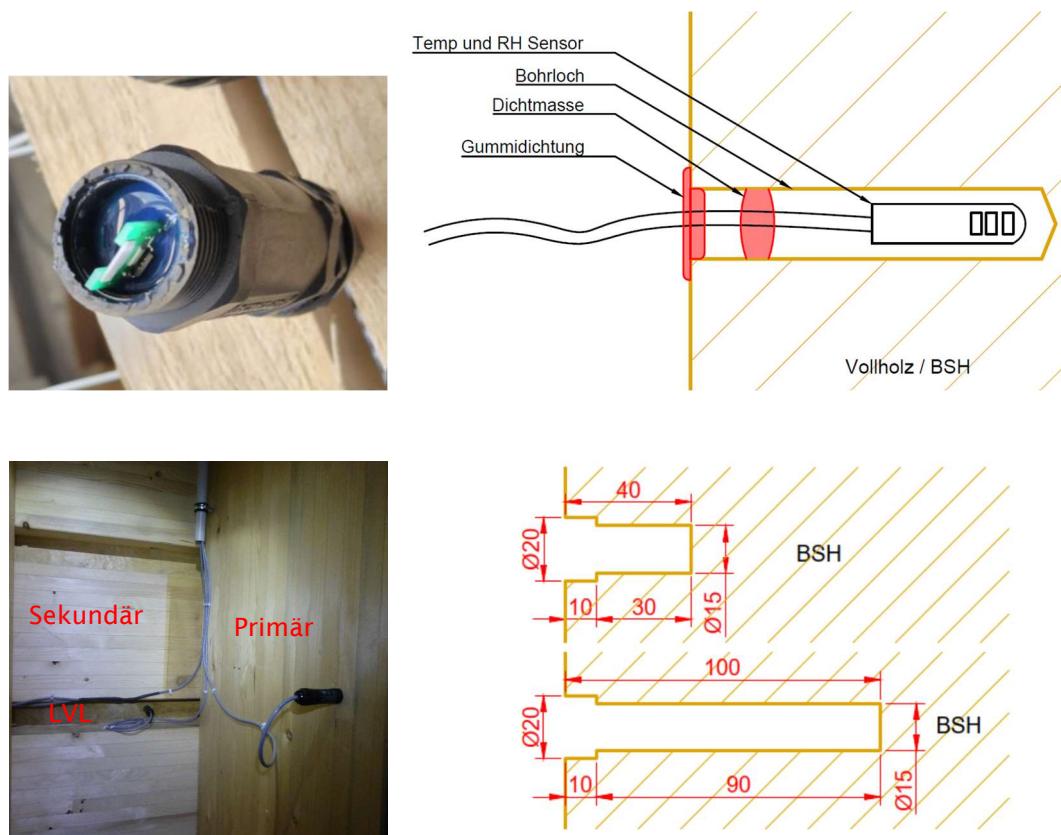


Abbildung 2.3 Detail eines Sensors (oben links), Prinzip des Einbaus (oben links), in den drei Bauteilen des Tragwerkes (unten links) und Masse der Bohrlöcher (unten rechts).

Der gemessene Verlauf der Holzfeuchte an verschiedenen Stellen der drei Bauteile der Holz Konstruktion ist für verschiedenen Tiefen 20, 40 und 100 mm in den Abbildungen 2.4, 2.5 und 2.6 für die gesamte Messperiode von 22 Monaten, d.h. vom Oktober 2020 bis Juli 2022 dargestellt.

Keine dieser Feuchten deutet auf ein Aufschwingen oder kontinuierliche Zunahme der Holzfeuchte hin. Dadurch kann eine Ansammlung von Feuchte über diese Periode unter den vorhandenen klimatischen Bedingungen ausgeschlossen werden. In den Sommermonaten ist eine leichte Abnahme und in den Wintermonaten eine leichte Zunahme zu verzeichnen. Man kann von einem quasi-eingeschwungenen Zustand ausgehen. Da der diffusiven Feuchtetransport ein langsamer Vorgang ist, wird ein gänzlich eingeschwungener Zustand bei gleichbleibenden klimatischen Bedingungen erst über mehrere Jahre eintreten. Die kleineren Schwankungen sind durch die täglichen Temperaturschwankungen verursacht.

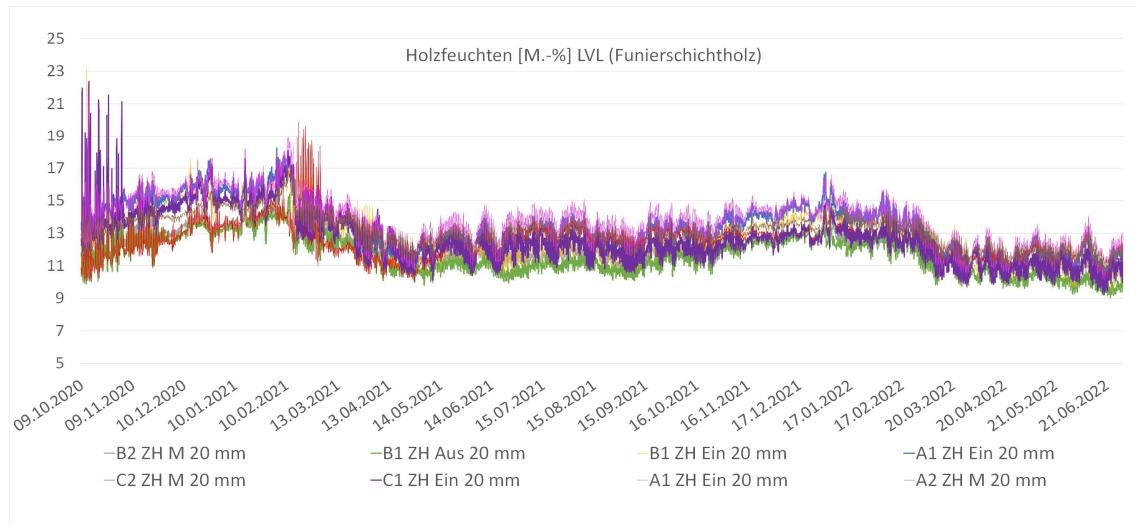


Abbildung 2.4 Verlauf der Holzfeuchte in einer Tiefe von 20 mm an 8 verschiedenen Stellen in der LVL Schicht des Holzkonstruktion über eine Periode von 20 Monaten ab Installation

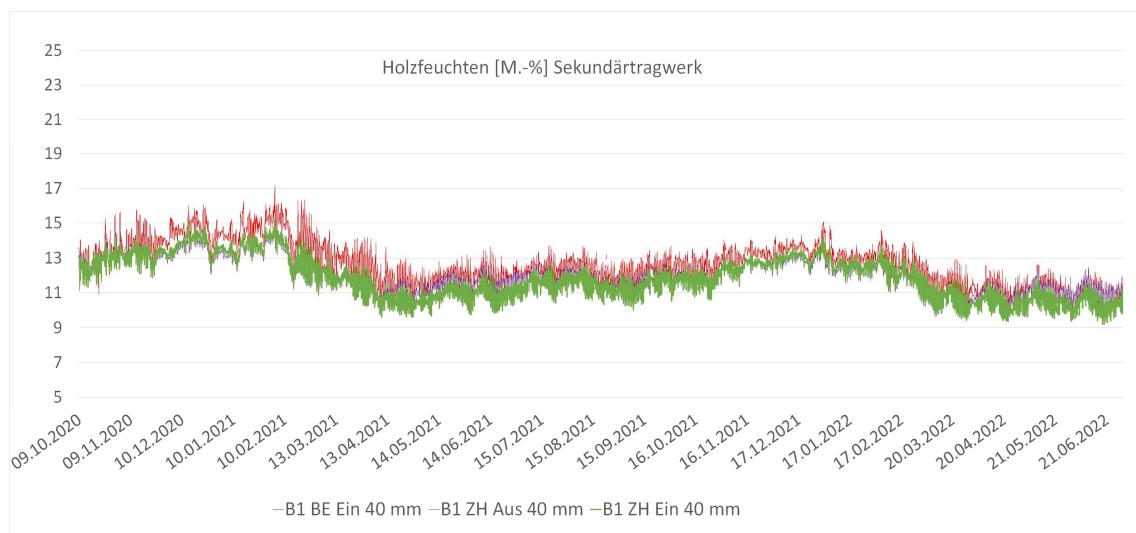


Abbildung 2.5 Verlauf der Holzfeuchte in einer Tiefe von 40 mm an 3 verschiedenen Stellen des Sekundärtragwerks der Holzkonstruktion in den Portalen Richtung Zürich und Bern über eine Periode von 20 Monaten ab Installation

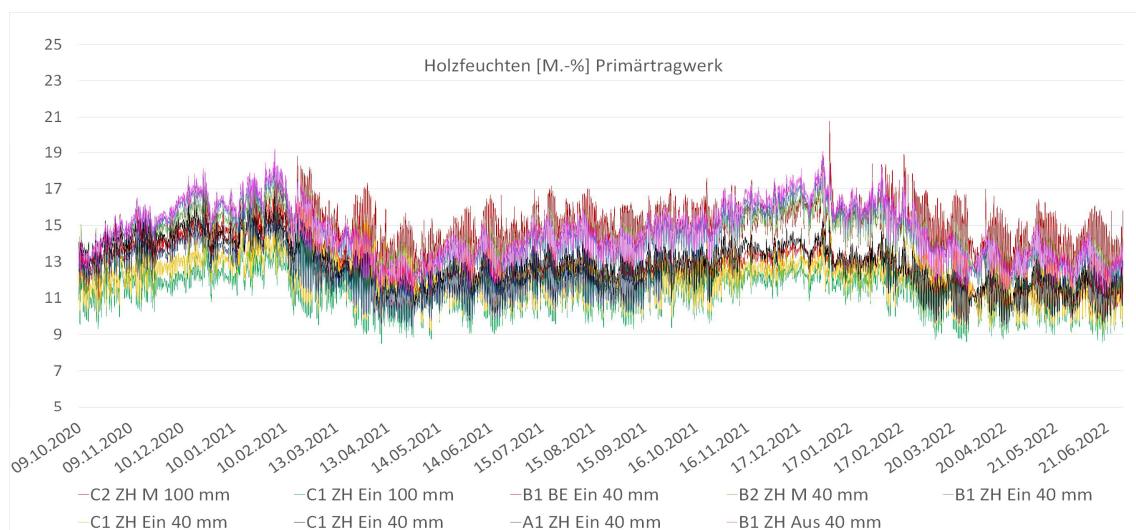


Abbildung 2.6 Verlauf der Holzfeuchte in 40mm und 100 mm Tiefe 9 verschiedenen Stellen des Primärtragwerks der Holzkonstruktion über eine Periode von 20 Monaten ab Installation

Um einen eventuellen Einfluss des Niederschlages auf die Messwerte der Holzfeuchte feststellen zu können, wurden diese beiden Größen gleichzeitig dargestellt (Abbildungen 2.7, 2.8 und 2.9). Der Niederschlag ist stets auf der rechten y-Achse aufgetragen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Spitzenwerten des Niederschlags (aus der nahegelegenen Meteo-Messstation) und der Zunahme in der niedrigsten Tiefe (20 mm) ist nicht erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die vom Niederschlag bedingte Zunahme der Luftfeuchtigkeit örtlich verteilt und zeitlich verzögert in der Holzkonstruktion aufgenommen wird und dadurch keine sofortige Effekte aufweist. Dies gilt am Portaleingang (Abbildung 2.7), wo die Luft am feuchtesten ist wie auch in der Portalmitte (Abbildung 2.8), wo das Außenklima schwächer einwirkt.

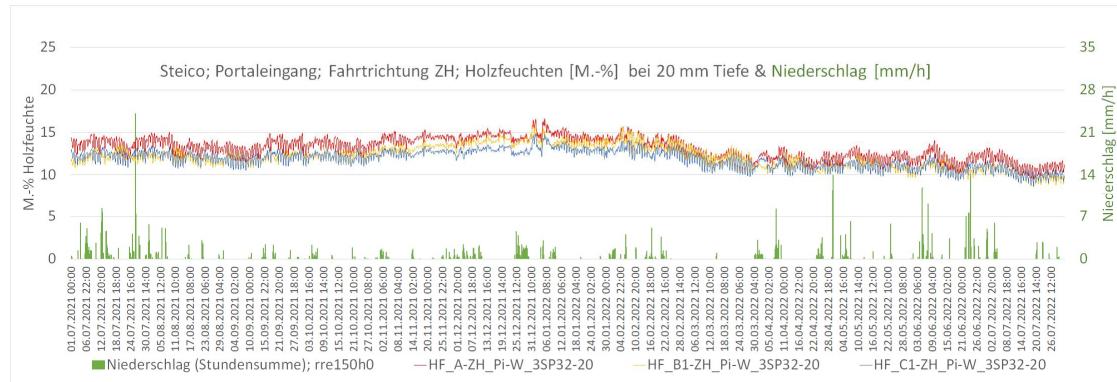


Abbildung 2.7 Verlauf der Holzfeuchte am **Portaleingang** Fahrtrichtung Zürich und gemessener Niederschlag (grün) in einer Tiefe von **20 mm** im Holz Tragwerk über eine Periode von 22 Monaten

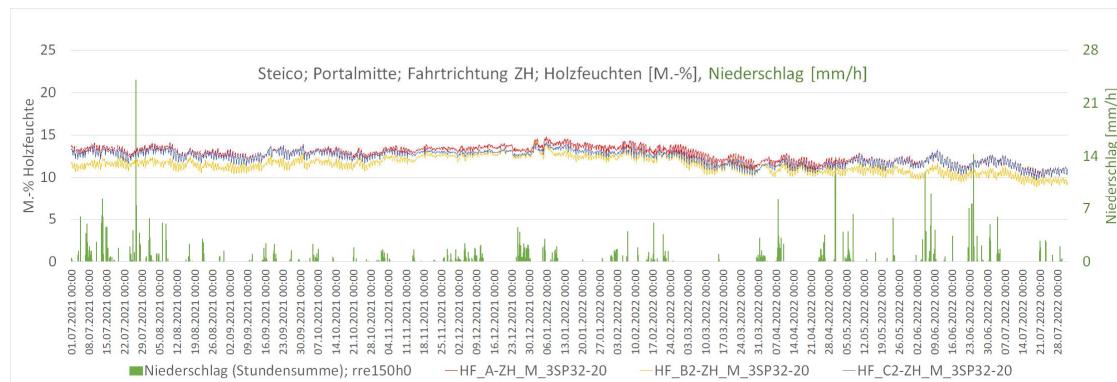


Abbildung 2.8 Verlauf der Holzfeuchte an der **Portalmitte** Fahrtrichtung Zürich und gemessener Niederschlag (grün) in einer Tiefe von **20 mm** im Holz Tragwerk über eine Periode von 22 Monaten

Für die Holzfeuchte in tieferen Lagen (40 und 100 mm) gilt erwartungsgemäß das obige auch wie es aus Abbildung 2.9 ersichtlich ist.

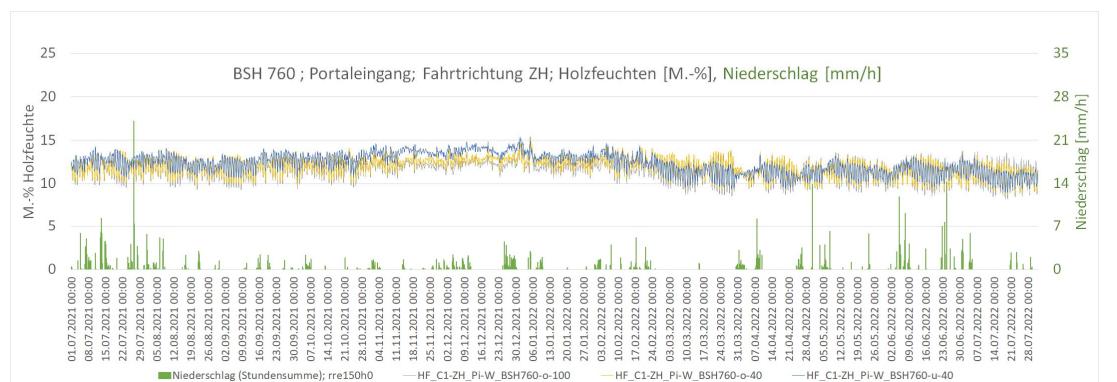


Abbildung 2.9 Verlauf der Holzfeuchte am **Portaleingang** Fahrtrichtung Zürich und gemessener Niederschlag (grün) in einer Tiefe von **40 und 100 mm** im Holz Tragwerk über eine Periode von 22 Monaten

2.2 Holzfeuchte und Koinzidenz von Verkehr und Niederschlag

Eine Möglichkeit die vom Niederschlag bedingte höhere Feuchtelast in die Holzkonstruktion zu tragen, besteht in der Aufwirbelung der Nässe und dessen Transport in das Innere der Überführung durch den Strassenverkehr. Um diesen Umstand zu untersuchen, wurde für 12 einzelne Monate ab Juli 2021 bis Juli 2022 ein Diagramm zur Aufdeckung der Koinzidenz von Holzfeuchte (20mm Tiefe), hohe Anzahl durchgefahrener Fahrzeuge (Daten von Astra) und Niederschlag erstellt (Meteo-Messstation). Aus diesen 12 Diagrammen wurden diejenigen ausgesucht (Abbildung 2.10), die eine oder mehrere solcher Koinzidenzen vorkommen. Der Grund für die Aufteilung in einzelne Monate ist die Lesbarkeit der Kurven im Format des vorliegenden Berichtes. Es wurde die kleinste Tiefe gewählt, weil diese am ehesten auf eine Zunahme der Luftfeuchte in der Überführung reagiert als die Messstellen mit grösserer Tiefe.

Im Juli 21 sind am 07.07. 08.07, 13.07 und 14.07 gleichzeitig Niederschlag (orange) und hoher Verkehr (graublau) feststellbar. Ähnliche Koinzidenzen sind im Oktober 21 am 06.10, 07.10 und 21.10, im Dezember 21 am 08.12, 09.12, 11.12 und 29.12 und im Februar 22 am 03.02, 07.02, 12.02, 18.02 und 21.02 zu beobachten. Die restlichen Monate wurden nicht aufgeführt da diese keine oder nur sehr schwache Koinzidenzen von Verkehr und Niederschlag aufweisen und für die vorliegende Argumentation irrelevant sind.

Bei den oben erwähnten Ereignissen beobachtet man ein leichten Einfluss auf die gemessene Holzfeuchte, indem die folgenden Minima der täglichen Schwankungen weniger tief ausfallen. Im Abbildung 2.10 sind diese mit Pfeilen gekennzeichnet. Damit kann plausibel gezeigt werden, dass das gleichzeitige Auftreten des Verkehrs und des Niederschlages in dieser Wildtierüberführung keinen relevanten Einfluss auf die Feuchte im Holz Tragwerk induziert.

Die obige Betrachtung berücksichtigte nur die in einer Tiefe von 20mm gemessene Holzfeuchte in der LVL-Schicht. Im Primärtragwerk ist die niedrigste Tiefe 40 mm. Da aber dieser Bereich der Holzkonstruktion bedingt durch die Bogenform des Bauwerks einen geringeren Abstand zur Fahrbahn aufweist und dementsprechend der von den Fahrzeugen eingetragene Feuchte mehr ausgesetzt ist, wurde im Abbildung 2.11 dieselbe Darstellung für einen solchen Sensor (C1) gewählt. Auch diesen Sensor zeigt keinen nennenswerten Einfluss der Koinzidenzen auf die Holzfeuchte.

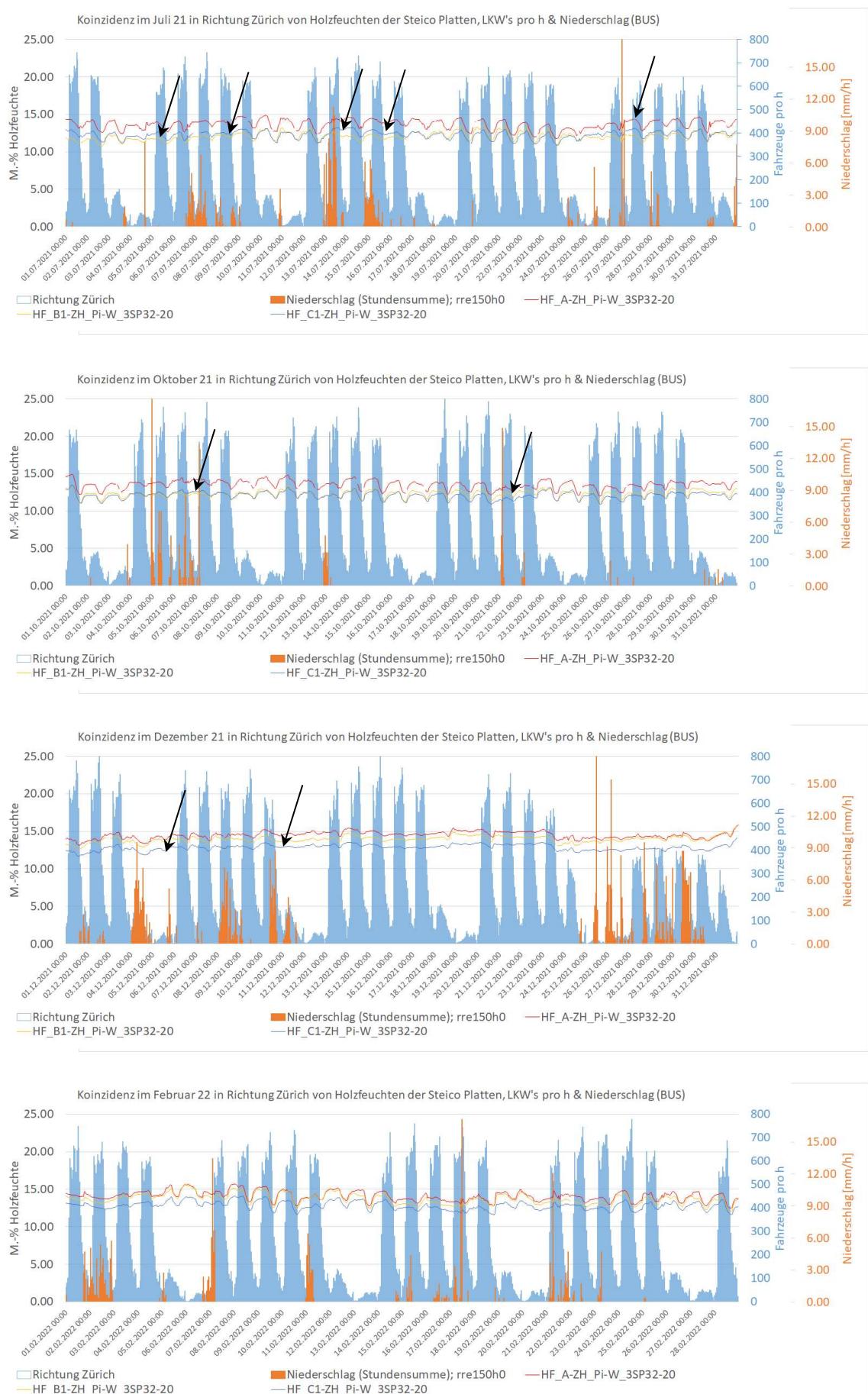


Abbildung 2.10 Koinzidenz von Holzfeuchte (LVL), Verkehrsaufkommen und Niederschlag für die Monate Juli 2021, Oktober 2021, Dezember 2021 und Februar 2022 (von oben nach unten)

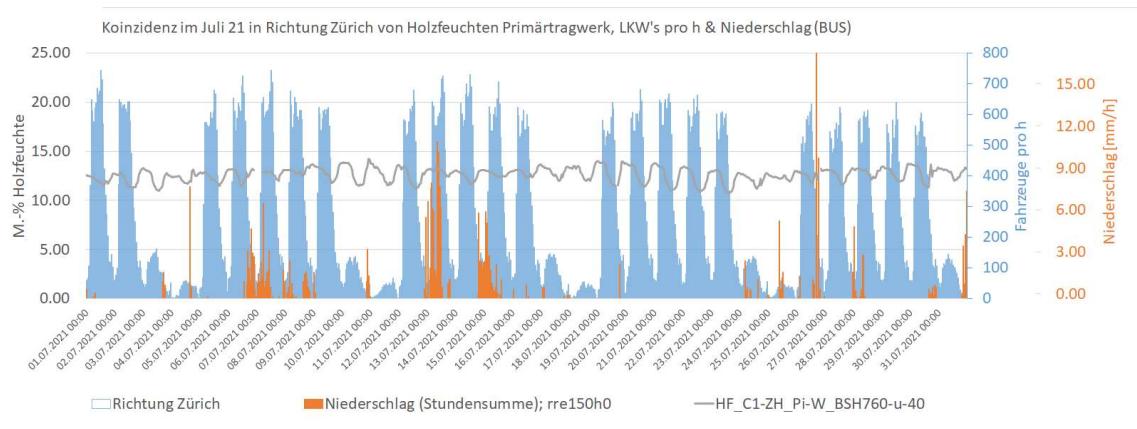


Abbildung 2.11 Koinzidenz von Holzfeuchte (Primärtragwerk, 40 mm Tiefe), Verkehrsaufkommen und Niederschlag für den Monat Juli 2021

2.3 Klima in der Wildtierüberführung und Meteo-Daten

In den Abbildungen 2.11 und 2.12 sind die gemessenen Lufttemperaturen bzw. Luftfeuchten in der Überführung (vier Messstellen) und von der Meteo-Station (Messtelle Buchs, gelb) erhaltenen Werte verglichen. Während der kälteren Jahreszeit wird an einigen Stellen in der Wildtierüberführung eine etwas kühlere Temperatur und dementsprechend auch eine höhere relative Luftfeuchte gemessen.

Die Fluktuationen der relativen Luftfeuchte in der Wildtierüberführung sind deutlich kleiner als diejenigen der Messstation. Dies ist nachvollziehbar da die Messstellen der Wetterstation sehr exponiert sind im Vergleich zum Raum unterhalb der Überführung.

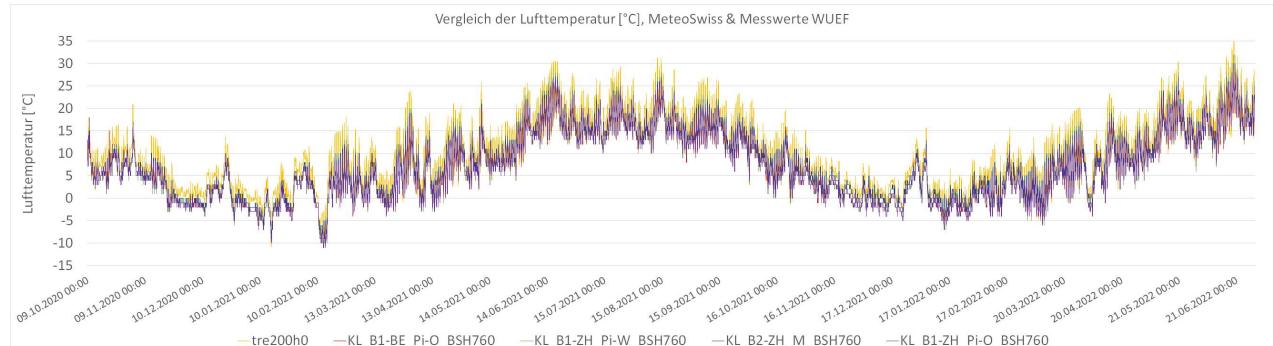


Abbildung 2.11 Verlauf der gemessenen Lufttemperatur im Inneren der Wildtierüberführung und der nahe gelegenen Meteo Station (2m über Boden) für die gesamte Periode von 22 Monaten.

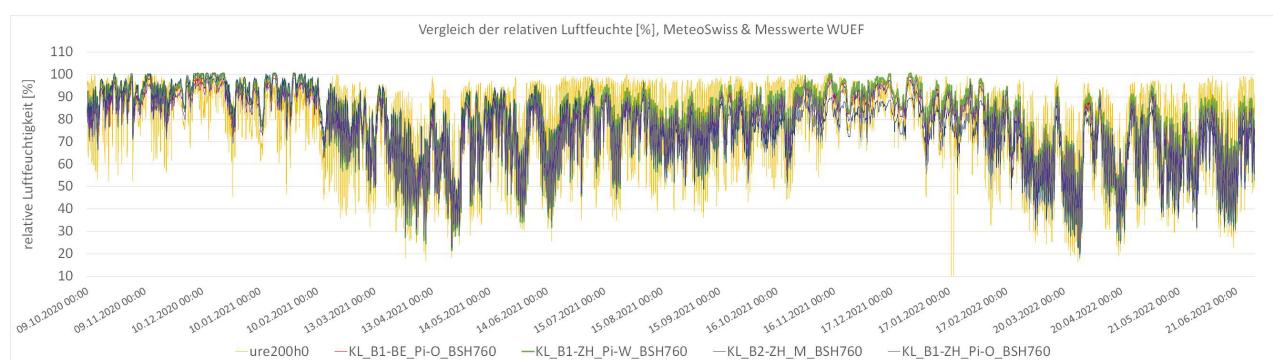


Abbildung 2.12 Verlauf der gemessenen Luftfeuchte (rel.) im Inneren der Wildtierüberführung und der nahe gelegenen Meteo Station (2m über Boden) für die gesamte Periode von 22 Monaten.

3 Laboruntersuchungen (AP2)

Die Laboruntersuchungen an diversen Holzproben wurden bereits in einem separaten Bericht (Meilenstein 2 vom 30.09.2021) ausführlich dargestellt. In diesem Abschnitt des Schlussberichtes werden die wichtigsten Resultate kurz zusammengefasst.

Die Versuche wurden durchgeführt, um die hydrothermischen Eigenschaften des Holzes nach der Kesseldruckimprägnierung zu bestimmen und diese mit Literaturwerten für unbehandeltes Holz in Relation zu setzen. Hierbei handelt es sich um die Bestimmung der zwei wichtigsten Größen, die Kurven der Ausgleichsfeuchte bzw. Sorptionsisotherme sowie der Wasserdampfdiffusionswiderstand, der sogenannte μ -Wert ($s_d = \mu \times d$). Da man zu Beginn nicht wusste, ob die Kesseldruckimprägnierung völlig gleichmäßig und unabhängig von der Holztiefe stattgefunden hatte, wurden für sämtliche Versuche Proben aus verschiedenen Bereichen der unverklebten BSH-Trägerlamellen und Furnierschichtplatten herausgeschnitten. Abbildung 3.1 zeigt das Sägeraster einer Lamelle (links) und den Zuschnitt der Proben (rechts) für die Bestimmung der Sorptionsisotherme.



Abbildung 3.1 Sägeraster einer Lamelle (links) und Zuschnitt der Proben aus der Lamelle A (rechts) für die Messung der Sorptionsisotherme

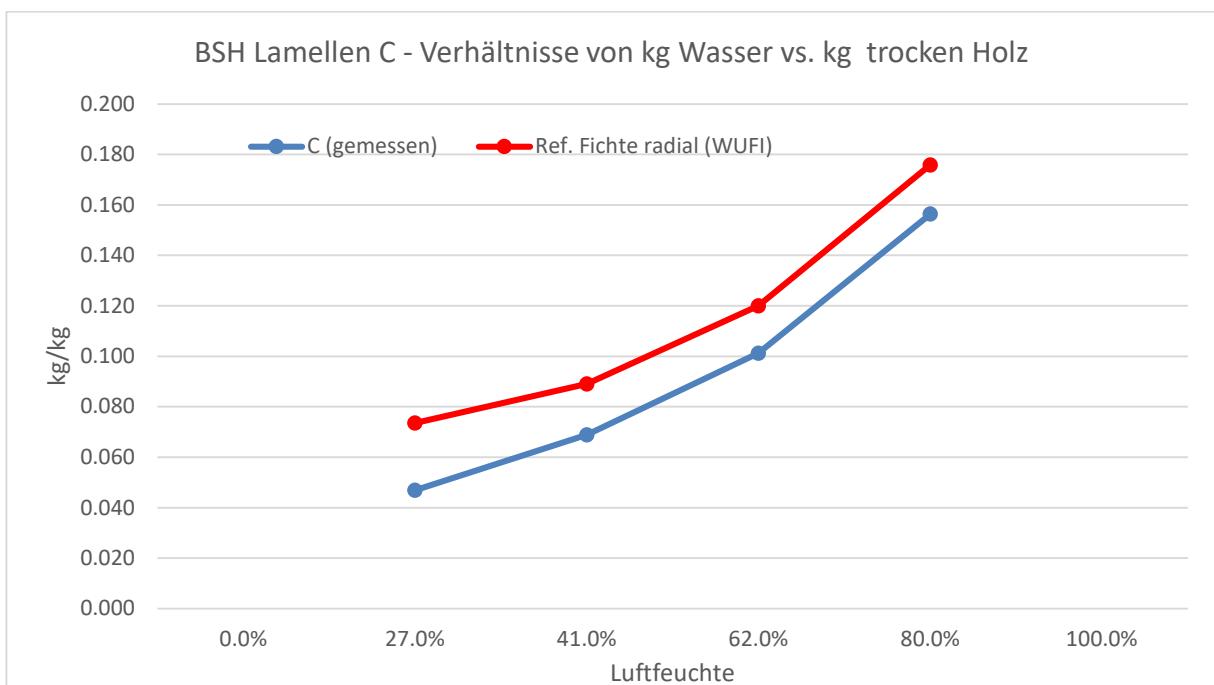


Abbildung 3.2 Vergleichende Darstellung der Sorptionsisotherme der Probenkörper aus den BSH Lamellen

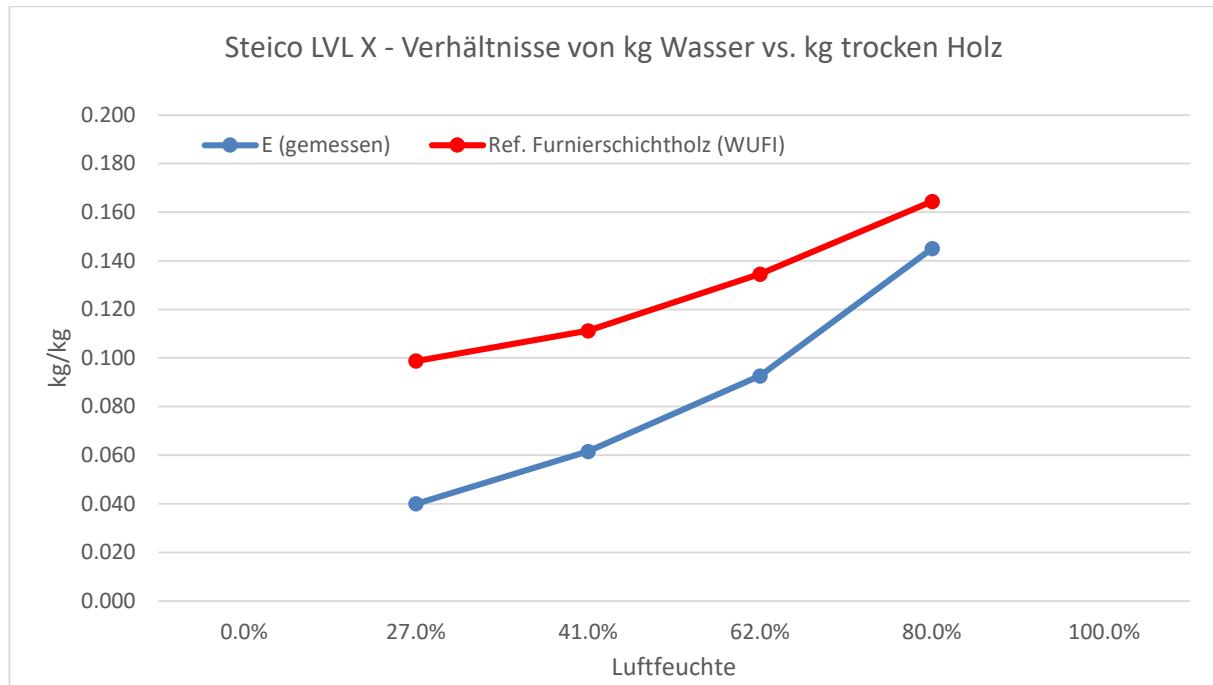


Abbildung 3.3 S Vergleichende Darstellung der Sorptionsisotherme der Probenkörper aus den Steico LVL X

Aus den beiden Abbildungen 3.2 und 3.3 ist zu erkennen, dass sich die Ausgleichsfeuchte der kesseldruckimprägnierten Proben stets unter denen der Literaturwerte für Fichte und Furnierschichtholz befindet. Vor allem bei niedrigen Umgebungsfeuchten ist die geringere Wasseraufnahme deutlich zu erkennen. Bei höheren Luftfeuchten nähern sich die Ausgleichsfeuchten an, bleiben jedoch deutlich unter denen der Referenzmaterialien. Die Ermittlung der Sorptionsisotherme hat somit bestätigt, was schon im Antrag für das Forschungsvorhaben vermutet wurde.

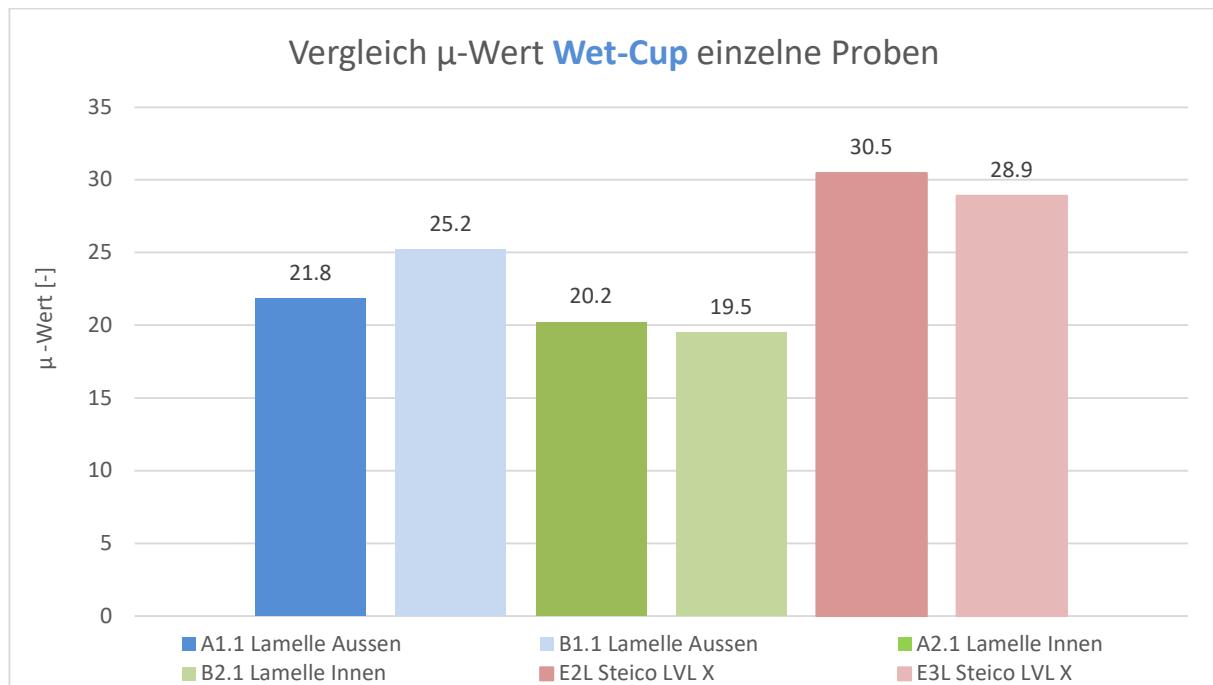


Abbildung 3.4 Wasserdampfdiffusionswiderstand im feuchten Bereich für verschiedene Lamellen

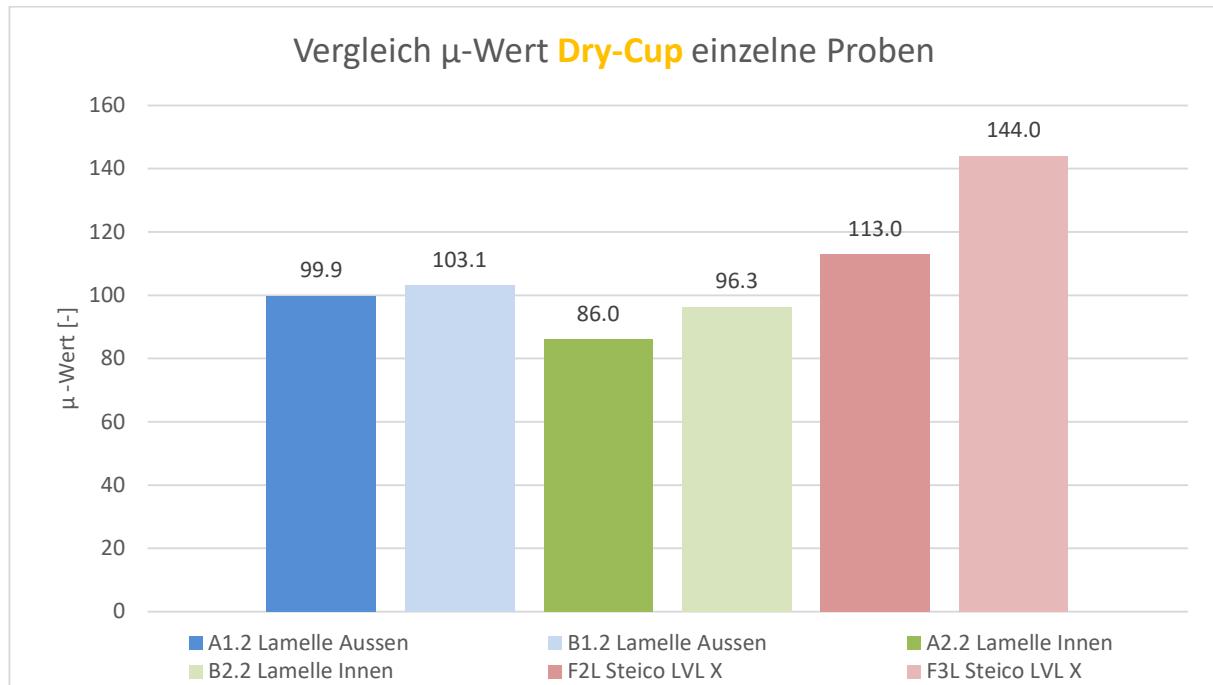


Abbildung 3.5 Wasserdampfdiffusionswiderstand im trockenen Bereich für verschiedene Lamellen

Aus den Resultaten der Dampfdiffusionsmessungen im trockenen und im feuchten Zustand, Abbildungen 3.4 und 3.5 ist eine gute Übereinstimmung der Werte der Probenkörper, aus den BSH Lamellen, mit den Literaturwerten zu entnehmen. Allerdings sind bei den Werten der Steico LVL X und dem Literaturwert für Furnierschichthölzer eine grössere Abweichung zu erkennen, wobei die Literaturwerte selbst auch stark streuen.

Für die Berechneten Holzfeuchten wurde, die im vorigen Kapitel erwähnte Sorptionsisotherme für unbehandeltes Holz verwendet. Dies ist eine konservative Bewertung da die Kesseldruckimpregnierung zu einer leicht niedrigeren Sorption der feuchte im behandelten Holz führt, wie die beiden Abbildungen 3.2 und 3.3 zeigen. Damit ist die gesamte Auswertung der Holzfeuchtekonservativ auf der sicheren Seite.

4 Numerische Simulationen CFD (AP3)

Die Luftgeschwindigkeit und deren Verwirbelung ist von zentraler Bedeutung für die Durchlüftung im Deckenbereich der Wildtierüberführung. Diese beeinflusst ihrerseits das Austrocknen der Holzkonstruktion während des Betriebes und bewirkt das die durch Niederschlag erzeugte hohe Luftfeuchte so schnell wie möglich aus dem «Tunnel» der Wildtierüberführung hinausgetragen wird und somit dem Holz keine Feuchtelast auferlegt.

Es gibt eine Vielzahl von Parametern die die Geschwindigkeit im Inneren der Überführung beeinflussen. Diese sind zwar miteinander verknüpft können aber in einer fluiddynamischen Simulation (CFD) nicht gleichzeitig betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt eine Gruppe von Parametern ausgesucht, die vom konstruktiven Standpunkt am aufschlussreichsten erkannt wurden. Die folgende Simulationen sind als ersten Schritt zur Lösung des komplexeren Sachverhaltes zu verstehen. Weitergehende Untersuchungen benötigen die Formulierungen eines Folgeprojektes.

Abbildung 4.1 stellt die oben genannten Parameter schematisch dar. Die Geometrie ist durch die Breite (W), die Höhe (H) und die Länge (L) der Überführung gegeben. Ein weiterer Parameter ist die mittlere Luftgeschwindigkeit (v_{avg}) am Eingang des Tunnels. Für die nachfolgenden Berechnungen wurden diese als fest vorgegeben wobei deren Werte die vorliegende Situation der gebauten Überführung in Suhr (AG) entsprechen. Im unteren Teil der Abbildung 4.1 ist ein Teil des Querschnittes des Holz-Tragwerkes der Überführung vereinfacht dargestellt. Hierbei sind die drei Parameter A (Abstand zwischen den Balken) B (Breite des einzelnen Balken) und D (Höhe der Balken = Tiefe des Lufthohlraumes) als variierende Größen angenommen.

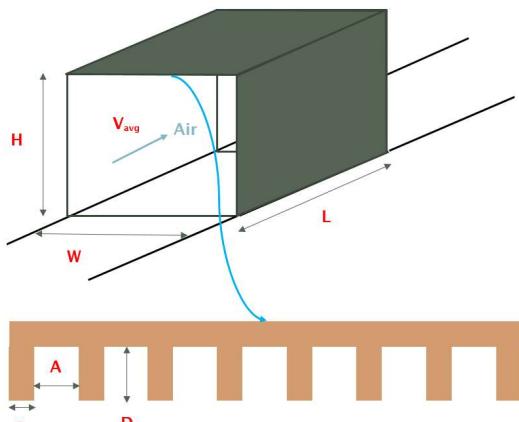


Abbildung 4.1 Schematische Darstellung der Parameter für die CFD-Simulationen

Das Modell für die fluiddynamischen Berechnungen (CFD) mit Massangaben ist im Abbildung 4.2 dargestellt. Die Masse entsprechen denjenigen der Überführung von Suhr. Es ist zu beachten, dass aus Gründen der geometrischen Symmetrie nur die halbe Breite (8 m statt 16 m) modelliert wurde, um Rechenzeit sparen zu können. Das graue Gebiet sowie die Rillen an der Decke stellen den Luftraum dar. Die Querbalken sind auf dem Abbildung nicht dargestellt.

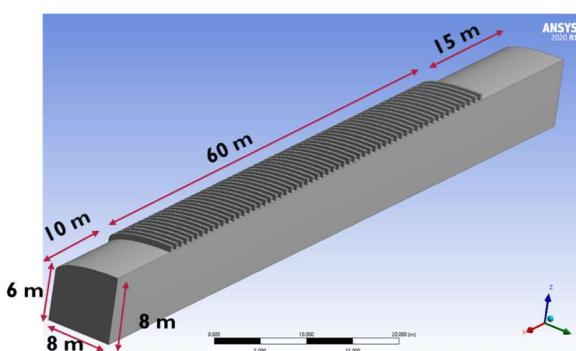


Abbildung 4.2. Modell für die CFD-Berechnungen Anhand der Masse der Überführung in Suhr (AG).

Der Einfachheit halber, wurden für jeden der drei Parameter A, B und D drei verschiedene Werte als realitätsnahe Stützpunkte angenommen (Tabelle 4.1). Dies ergibt eine Anzahl von 27 Kombinationen (Szenarien), für welche die CFD- Simulationen durchgeführt wurden, um deren Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit an der Decke der Überführung zu quantifizieren.

Parameter	Werte [m]		
A	0.25	0.5	0.75
B	0.25	0.5	0.75
D	0.75	1	1.25

Tabelle 4.1- Werte für die drei Parameter A, B und D der Holz Tragwerkes gemäss Abbildung 4.1

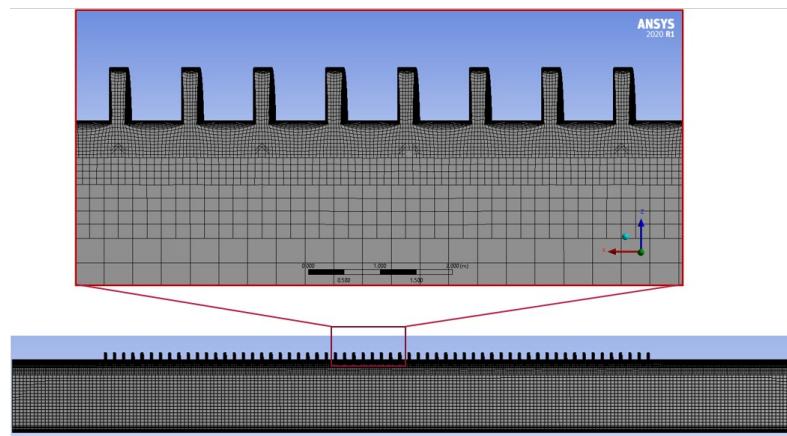


Abbildung 4.3 Das Maschennetz der CFD- Simulation für den Lufthohlraum über die ganze Länge (unten) und vergrösserter Ausschnitt (oben). Das Holz Tragwerk ist nicht dargestellt.

Das Resultat der Berechnungen ist vielseitig. Zunächst ist in der Tabelle 4.2 die berechnete mittlere Geschwindigkeit für die 27 verschiedenen Szenarien dargestellt. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass die höchsten mittleren Geschwindigkeiten in den Lufthohlräumen für die Szenarien 6, 15 und 24 erreicht wurden.

Sze- nario	A (m)	B (m)	D (m)	Mittlere Ge- schw. (m/s)	Sze- nario	A (m)	B (m)	D (m)	Mittlere Ge- schw. (m/s)
0	0.75	0.25	0.75	0.0431445	14	0.5	0.5	1.25	0.0473998
1	0.75	0.25	1	0.0350043	15	0.5	0.75	0.75	0.0995629
2	0.75	0.25	1.25	0.0298246	16	0.5	0.75	1	0.0868654
3	0.75	0.5	0.75	0.0743071	17	0.5	0.75	1.25	0.0709749
4	0.75	0.5	1	0.0570099	18	0.25	0.25	0.75	0.0331268
5	0.75	0.5	1.25	0.0484445	19	0.25	0.25	1	0.0272935
6	0.75	0.75	0.75	0.101834	20	0.25	0.25	1.25	0.0234119
7	0.75	0.75	1	0.0880424	21	0.25	0.5	0.75	0.0690473

8	0.75	0.75	1.25	0.0712316	22	0.25	0.5	1	0.055146
9	0.5	0.25	0.75	0.0377783	23	0.25	0.5	1.25	0.0542996
10	0.5	0.25	1	0.0309743	24	0.25	0.75	0.75	0.0970468
11	0.5	0.25	1.25	0.0265025	25	0.25	0.75	1	0.085889
12	0.5	0.5	0.75	0.0715238	26	0.25	0.75	1.25	0.0714535
13	0.5	0.5	1	0.0556407					

Tabelle 4.2 - Resultate für die berechnete mittlere Luft-Geschwindigkeit der 27 Szenarien

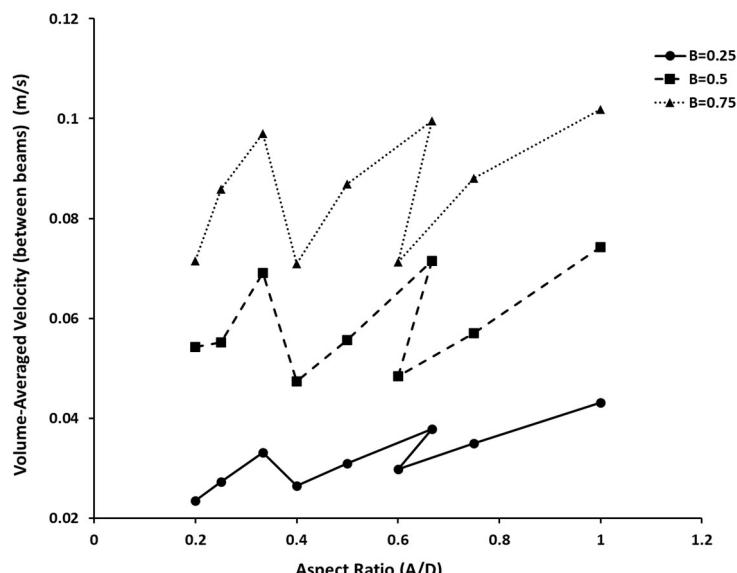


Abbildung 4.4 Volumen gemittelte Geschwindigkeit für drei verschiedene Balkenbreiten B in Abhängigkeit des Verhältnisses der beiden anderen Parameter A/D

Eine andere Darstellung der genannten 27 Szenarien ist im Abbildung 4.4 in drei Kurven für drei verschiedene Werte des Parameters B (Breite des einzelnen Balkens) dargestellt. Diese Darstellung zeigt wie empfindlich die berechnete mittlere Luftgeschwindigkeit auf die Änderungen des Verhältnisses A/D reagiert. Dieser Umstand hilft bei zukünftigen Vorhaben je nach Vorgaben zu den einzelnen Bauteile die bestmögliche Kombination der beiden anderen Parameter zu bestimmen.

Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Szenarien visualisieren zu können wurden drei davon ausgesucht. Das Szenario 6 ($A=B=D=0.75$ m) als das Beste, das Szenario 13 ($A=B=0.5$, $D=1$) als ein mittleres und Szenario 20 ($A=B=0.25$, $D=1.25$) als das schlechteste im Hinblick auf die Luftgeschwindigkeit. Abbildung 4.5 zeigt die vektorielle Darstellung der Geschwindigkeit auf der Symmetrie-Ebene für diese drei Fälle am Eingang in der Mitte und am Ende des Tunnels. Beim Szenario 6 nimmt die Geschwindigkeit in den Ecken ab und es ist kein nennenswerter Einfluss der Länge des Tunnels auf das Vektorbild zu erkennen. Beim Szenario 13 nimmt die Geschwindigkeit oben auf der horizontalen Decke deutlich ab und der Einfluss der Länge des Tunnels macht sich durch Turbulenzen in den Eckbereichen bemerkbar. Schliesslich zeigt das Szenario 20 erwartungsgemäss niedrige Geschwindigkeiten und schwache Luftströmung in den zu engen und zu hohen Lufthohlräumen.

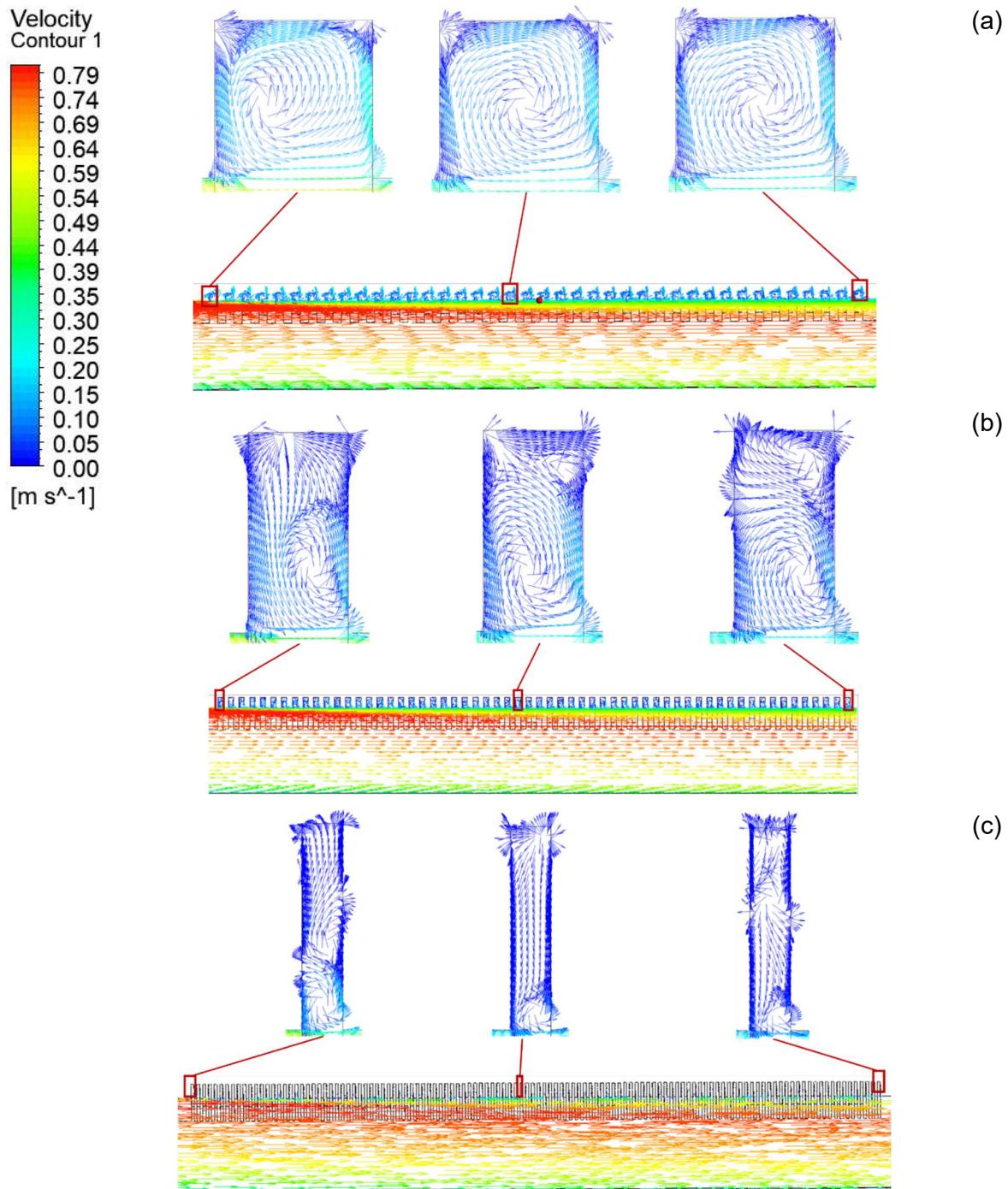


Abbildung 4.5 Vektorielle Darstellung der Geschwindigkeit auf den symmetrie-Ebenen für den Fall 6
 (a) Fall 13 (b) und Fall 20 (c)

Die dargestellten Simulationen wurden von Prof. Dr. P. Mirzaei (University of Nottingham) einem Spezialisten in Fluidodynamik in Gebäuden im Auftrag und mit Begleitung der BFH durchgeführt. Ein ausführlicher wissenschaftlicher Bericht hierzu ist vorhanden und wird als separater Bericht erscheinen und gilt als Einstieg in weitere Untersuchungen im Rahmen eines Folgeprojektes.

5 Schlussfolgerungen (AP4)

Basierend auf den zuvor zusammengefassten Ergebnissen der durchgeföhrten Untersuchungen können folgende Aussagen getroffen werden:

- Während der untersuchten Periode sind keine nennenswerten Korrelationen zwischen Niederschlag und Feuchtezunahme im Holztragwerk feststellbar.
- Es konnten auch bei Koinzidenz von grossem Niederschlag und hohes Verkehrsaufkommen keine nennenswerte Zunahme der Feuchte im Holztragwerk während der untersuchten Periode festgestellt werden. Dies auf Grundlage einer eher konservativer Betrachtung bei welcher der Einfluss der Kesseldruckimprägnierung (niedrigere Sorptionsisotherme) vernachlässigt wurde.
- Die Messung der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Verhältnisse der Luftgeschwindigkeit am Ort der Überführung, zeigen eine leichte Abweichung von den entsprechenden Daten der nahe gelegenen Meteo-Station. Für ein genaues Monitoring ist die Messung vor Ort am Bauwerk den Daten einer Meteo-Messstation vorzuziehen.
- Die Imprägnierung der Holzteile bewirkt zwar tendenziell eine niedrigere Ausgleichsfeuchte bei trockener Luft, nähert sich aber mit zunehmender Luftfeuchte an die Werte des nicht behandelten Holzes an. Angesichts der gemessenen Holzfeuchte an repräsentativen Stellen und verschiedenen Tiefen im Holztragwerk der Wildtierüberführung kann davon ausgegangen werden, dass unter den gegebenen klimatischen Bedingungen des Standortes auch für unbehandeltes Holz keine kritische Feuchte zu erwarten ist.
- Die Simulationsrechnungen zeigen, dass als geometrischen Parameter sehr hohe Konstruktionshöhen des Primärtragwerks und geringe Abstände der Bauteile, sich negativ auf die Luftzirkulation im inneren des Tunnels auswirken. Erfreulicherweise kann der bestmögliche Abstand bei konstruktiv vorgegebenen Dimensionen des Balkens anhand der CFD-Berechnungen bestimmt werden. Die Öffnung, d.h. Höhe und Breite des Bauwerks selbst sind weitere Parameter deren Einfluss mit dem vorgestellten Modell in einem Folgeprojekt untersucht werden kann. Ein weitere Parameter für die Simulationen ist die simultane Betrachtung von Luftgeschwindigkeit und Transport von Wasser Tröpfchen an die Decke der Überführung.
- Die Sensoren sowie die Datenlogger des Monitoring Systems sind von der BFH (AHB Labor) übernommen worden. Das Monitoring sollte weitergeführt, um möglichst Langzeitdaten in Bezug auf Klimaveränderungen sammeln zu können. Hiermit kann auch ein eventuelles langsame Driften der Feuchtefühler detektiert werden.
- Das Primärtragwerk und das Sekundärtragwerk wurden hydrophobiert. Da eine Hydrophobierung nur in der ersten 2 bis 3 Jahren zur Verlangsamung der Feuchteaufnahme wirksam ist, würde eine Weiterführung des Monitorings eine noch höhere Sicherheit über die Unbedenklichkeit der Holzfeuchte ermöglichen.

6 Referenzen

W. Simpson, «Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models,» *Wood and Fiber*, Bd. 5(1), pp. 41-49, 1973.

Zwischenbericht für Meilenstein MS1, Erfassung Messdaten, vom 04.11.2021.

Zwischenbericht für Meilenstein MS2, Laboruntersuchungen, vom 30.09.2021.