



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz

**Système d'étanchéité et revêtements bitumineux sur ponts
avec tabliers en bois**

**Sealing systems and bituminous layers on bridges with
timber roadway slabs**

**Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau
Prof. Andreas Müller
Solothurnstrasse 102, 2500 Biel/Bienne**

**IMP Bautest AG
Christian Angst
Oberbuchsiten, Murten und Basel**

**Forschungsprojekt VSS 2016/326 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Oktober 2022

1735

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz

**Système d'étanchéité et revêtements bitumineux sur ponts
avec tabliers en bois**

**Sealing systems and bituminous layers on bridges with
timber roadway slabs**

**Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau
Prof. Andreas Müller
Solothurnstrasse 102, 2500 Biel/Bienne**

**IMP Bautest AG
Christian Angst
Oberbuchsiten, Murten und Basel**

**Forschungsprojekt VSS 2016/326 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Oktober 2022

1735

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Andreas Müller

Mitglieder

Christian Angst

Corinne Amstutz

Sébastien Bonifacio

Nicolas Bueche

Daniel Büttner

Liliane Huber

Marcus Schiere

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Fred Stalder-de Marco

Mitglieder

Jean-Marc Waeber

Heinz Aeschlimann

Daniel Schmid

Urs Bürgi

Thorsten Rucktäschel

Lukas Rüeegsegger

Kurt von Felten

Andrea Bernasconi

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4	
Zusammenfassung	9	
Résumé	11	
Summary	15	
1	Schlussbericht	19
1.1	Problemstellung	19
1.2	Einbautemperaturen und Belagsaufbauten	19
1.3	Blasenbildung im Belag.....	20
1.4	Abdichtungsebene	20
1.5	Instandsetzung und Erhaltung	20
1.6	Forschungsauftrag	21
2	Ausgangslage	23
2.1	Fahrbahnbeläge bei Holzbrücken	23
2.1.1	Holz/Bohlen	23
2.1.2	Flüssig-Kunststoff-Beschichtungssysteme als direkt begeh- und befahrbare Nutzbeläge auf Holz- und Holzwerkstoffen (Direktbeschichtungen).....	24
2.1.3	Ultrahochleistungsfaserverbundbaustoff (UHFB)	25
2.1.4	Asphaltbeläge.....	26
2.2	Systemaufbauten	28
2.2.1	Systemaufbauten ohne Verbund.....	28
2.2.2	Systemaufbauten mit Verbund	29
2.3	Holzuntergrund.....	30
2.3.1	Fahrbahnplatten aus Holz	31
2.3.2	Holzfeuchte	32
2.4	Abdichtungssysteme im Verbund.....	33
2.4.1	Versiegelung aus Epoxidharz	33
2.4.2	Abdichtung aus Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD)	34
2.4.3	Abdichtung aus PMMA-Membrane	35
2.4.4	Abdichtung aus Asphaltmastix	35
2.5	Asphaltbeläge.....	35
2.5.1	Grundsätze	35
2.5.2	Schichten aus Gussasphalt.....	35
3	Versuchsreihen zum Systemaufbau mit Verbund	37
3.1	Versuchsaufbauten und verwendete Materialien	37
3.2	Grundplatten.....	39
3.2.1	Versiegelung und Abdichtungen	39
3.2.2	Gussasphalt	43
3.2.3	Rohdichte und Klimatisierung der Grundplatten	43
3.2.4	Prüfkörperentnahme	45
3.3	Erste, zweite, und dritte Prüfserie	46
3.4	Temperaturmessungen	48
3.4.1	Materialtemperatur	48
3.4.2	Temperaturverläufe anhand Messungen in Platten P31 und P32 (Prüfserie 02)	51
3.4.3	Einfluss der Holzfeuchte auf die Oberflächentemperatur	53
3.4.4	Vergleich von Temperaturen, die an den Oberflächen gemessen wurden	55
3.5	Holzfeuchtemessungen.....	56
3.5.1	Messtechnik und Methode	56
3.5.2	Gemessene Feuchteverläufe während Applikation des Asphalts.....	57
3.5.3	Verlauf der Holzfeuchten während den Versuchen	58
3.6	Haftzugversuche	59
3.6.1	Bereits bekannte Daten und Vorgehen.....	59

3.6.2	Abhängigkeit der Holzfeuchte	60
3.6.3	Haftzugversuche an Grundplatten	61
3.6.4	Ergebnisse	61
3.7	Schubsteifigkeit und -festigkeit nach AST	63
3.7.1	Bereits bekannte Schubfestigkeitswerte aus der Literatur	63
3.7.2	Leutner und Advanced Shear Test	64
3.7.3	Einfluss der Versuchsparameter	66
3.7.4	Korrektur für effektive Scherfläche	67
3.7.5	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	69
3.8	Schubschwellversuche	72
3.8.1	Stand der Technik und Vorgehen	72
3.8.2	Ergebnisse	73
3.9	Blasenbildung	74
3.9.1	Blasenbildung während der Herstellung der Platten	75
3.9.2	Langzeit-Blasenbildung im Labor	77
3.9.3	Rechnerische Modelle zur Blasenbildung bei Fahrbahnplatten in Holz	80
3.10	Asphalt	82
3.11	Diskussion und Schlussfolgerungen	82
3.11.1	Fahrbahnaufbauten	82
3.11.2	Temperatur- und Feuchteverlauf	83
3.11.3	Haftzugversuche	83
3.11.4	Scherversuche	83
3.11.5	Blasenbildung	84
4	Bauwerksmonitoring	85
4.1	Stand der Technik	86
4.1.1	Messverfahren	86
4.1.2	Flächige Messverfahren für Abdichtungen	88
4.1.3	Die kapazitive Methode mittels Radio Frequency Identification (RFID)-Tags	90
4.2	Flächige Leckage-Erkennung bei Abdichtungssystemen mit Verbund	91
4.2.1	Eignung leitfähiger Glasvliese zur Überwachung von Leckagen bei Aufbauten im Verbund	91
4.2.2	Versuche zur Messung des elektrischen Widerstands und Simulation einer Leckage in der Abdichtung	92
4.2.3	Versuche zur Messung der Eigenschaften mit und ohne Epoxidharz	94
4.3	Monitoring von einer Fuss- und Radwegbrücke	94
4.3.1	Instrumentierung Brücke B 8025a	95
4.3.2	Sensorausstattung für Temperaturmessungen während des Einbaus des Gussasphalts	96
4.3.3	Sensoren für die Langzeitmessung und zur Überwachung der Abdichtung	96
4.3.4	Einbau der Sensoren auf der Fahrbahnplatte	97
4.3.5	Messeinheit und Sensoren am Auflager Auenstein	100
4.3.6	Kontrolle während des Einbaus der Sensorbänder	101
4.3.7	Temperaturmessungen unter der PBD Bahn während der Gussasphalt-Einbau	102
4.3.8	Inbetriebnahme des Monitoringsystem	103
4.4	Untersuchung von RFID-Tags zur Bestimmung der Holzfeuchte	103
4.4.1	RFID-Tags von der Firma Smartrac	103
4.4.2	Definition der Prüfkörper und Einbau RFID Tags	106
4.4.3	Klimatisierung der Prüfkörper	107
4.4.4	Masseermittlung und Bestimmung der Holzfeuchte	110
4.4.5	Messung und Auslesung der RFID-Tag Code	111
4.4.6	Allgemeine Beurteilung der Handhabung der RFID-Tags	111
4.4.7	Beurteilung der besten Position der RFID-Tag	112
4.4.8	Temperaturabhängigkeit der RFID-Tags Messungen	114
4.4.9	Korrelation zwischen Tag-Code und Holzfeuchte	114
4.4.10	Versuche zur Haftung der Tags auf der Holzoberfläche	119
4.5	Diskussion und Schlussfolgerungen	119
5	Anschlüsse von Brückenabdichtungen	121
5.1	Publizierte Detaillösungen im Brückenbau	121

5.1.1	Detaillösungen im Holzbrückenbau.....	121
5.1.2	Beispiele aus Betonbrücken:.....	122
5.2	Anwendung und Ziele der Aufstellung von Basisdetails	123
5.3	Basisdetails der Fahrbahnübergänge (FÜ).....	123
5.3.1	Allgemein.....	123
5.3.2	Geschlossene Fahrbahnübergänge.....	125
5.3.3	Offene Fahrbahnübergänge.....	126
5.4	Basisdetails der Randanschlüsse und Schrammborde	127
5.4.1	Allgemein.....	127
5.4.2	Randanschlüsse ohne Schrammbord.....	128
5.4.3	Randanschlüsse mit Schrammbord	129
5.5	Entwässerungen	129
5.6	Diskussion und Schlussfolgerungen	130
6	Instandsetzungs- und Sanierungssysteme	131
6.1	Geplante Instandsetzungsmassnahmen.....	131
6.1.1	Entfernen und Ausbau der Schichten	132
6.1.2	Neuaufbau der Abdichtung im Verbund	136
6.2	Temperatur- und Feuchtemonitoring	140
6.3	Diskussion und Schlussfolgerungen	143
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Norm VSS-40451	145
7.1	Systemaufbauten mit Verbund auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz	145
7.2	Feuchtemonitoring	146
7.3	Detaillösungen.....	147
7.4	Instandstellungen und Sanierungssysteme	147
7.5	Weiterer Forschungsbedarf.....	147
	Glossar	149
	Literaturverzeichnis	151
	Projektabschluss	153

Zusammenfassung

Im Jahre 2009 wurde die Norm SN (6)40 451 "Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz" erstmalig publiziert. Da keine ausreichenden Erkenntnisse und Erfahrungen über Systemaufbauten mit Verbund vorlagen, konnte bis heute nur ein Systemaufbau ohne Verbund als Standardaufbau auf Holzbrücken normiert werden. Der Einfluss der wechselnden Holzfeuchten in den Fahrbahnplatten war unzureichend bekannt. Ferner konnten keine Flüssigkunststoffabdichtungen (FLK) berücksichtigt werden.

Die SN 640 451:2009 wird mit unverändertem Inhalt seit 2019 als VSS 40451:2019 geführt. Da insbesondere bei Strassenbrücken aus Beton, Systemaufbauten mit Verbund die Regel sind (VSS 40450), ist die Erarbeitung von Anforderungen und Ausführungsbedingungen auch für Strassenbrücken mit Fahrbahnplatten aus Holz notwendig. Die Ausführung von Systemaufbauten mit Verbund ist für den zukünftigen Holzbrückenbau relevant.

Im Rahmen des 2018 bewilligten Projekts VSS 2016/326 'Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz' erforschte die Berner Fachhochschule gemeinsam mit IMP-Bautest AG (Oberbuchsiten, SO), die Herstellung von Systemaufbauten im Verbund auf Fahrbahnplatten aus Holz. Die Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten sind die Grundlage für die Normierungs- und Forschungskommission NFK 3.10 „Abdichtungssysteme“ bei einer erneuten Überarbeitung der Norm VSS 40 451.

Im Projekt konnte der Nachweis erbracht werden, dass ein Systemaufbau mit Verbund auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz möglich ist und bei der zukünftigen Überarbeitung der VSS 40451 als Standardaufbau integriert werden kann.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass nach heutigem Erkenntnisstand nur ein Aufbau unter Verwendung von Epoxidharz für die Grundierung und Versiegelung, sowie Polymerbitumen-Dichtungsbahnen für die Abdichtung zu der geforderten geringen Blasenbildung und einer sehr guten Verbundfestigkeit führen.

Die Verwendung von niederviskosen (modifizierten) Gussasphalten mit einer max. Einbautemperatur von max. 200 °C ist bei Holzbrücken Standard. Im Projekt konnte der Nachweis erbracht werden, dass gegenüber den heutigen Empfehlungen in der Fachliteratur, der Einbau der Schutzschicht mit einer Dicke von 35 mm (MA 11) problemlos möglich ist. Der damit verbundene grösseren Wärmeeintrag in das Abdichtungssystem führt zu einer vernachlässigbaren maximalen Differenz von 5°C im Vergleich zu der Temperatur bei einer Schichtdicke von 25 mm (MA 8).

In dem Forschungsprojekt konnte klar aufgezeigt werden, dass die Oberflächenqualität der Holzplatte einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundwirkung (Haftung der Versiegelung) hat. Bei Platten aus Furnierschichtholz (LVL) und Brettschichtholzelementen (für quervorgespannt Fahrbahnplatten) reicht meist die von den Herstellern angebotene Industriequalität aus. Bei Brettsperrholzplatten (CLT) ist die üblicherweise gelieferte Industriequalität infolge der Harzgallen und Äste nicht ausreichend. Hier muss die Oberfläche verspachtelt und geschliffen sein.

Der Einfluss der Holzfeuchte ist geringer als ursprünglich vermutet. Mit Holz- bzw. Ausgleichsfeuchten bis zu 18% konnte kein nachteiliger Einfluss auf die Haftzugfestigkeit festgestellt werden. Darüber hinaus ist ein Einfluss erkennbar. Dies ist insbesondere bei Instandstellungen von Abdichtungssystemen von Bedeutung. Die im aktuellen Entwurf der VSS 40451 genannte Obergrenze der Holzfeuchte von 15% wurde durch das Projekt bestätigt.

Der Einbau von Feuchteüberwachungssystemen ist heute bei Holzbrücken Standard. Langjährige Untersuchungen u.a. der BFH zeigen, dass bei den heute üblichen «geschützten Holzbrücken» eine Ausgleichsfeuchte von 18M% +-2% zu erwarten ist. Da dieser günstige Wert auch bei besonderen örtlichen Klimabedingungen nur unwesentlich überschritten wird ist das besondere Augenmerk beim Unterhalt von Holzbrücken auf (unerwartet) eintretende Staunässe z. B. durch Leckagen in der Abdichtung oder im

Bereich der mechanisch hoch beanspruchten Fahrbahnübergänge oder Randanschlüsse an den Schrammborden zu legen.

Im Projekt konnte erfolgreich aufgezeigt werden, dass die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung heute zuverlässig mit leitfähigem Glasvlies oder mit Bandsensoren überwacht werden kann. In Abhängigkeit von dem gewählten Systemaufbau (mit/ohne Verbund) sind unterschiedliche Systeme notwendig.

Bei einem Aufbau mit Verbund, verursacht die Leckage eine lokale Erhöhung der Holzfeuchte in der Trägerplatte. Der Verbund zwischen Abdichtung und Unterlage verhindert die Ausbreitung des eindringenden Wassers unter der Abdichtung. Die Eignung von leitfähiger Glasvliese und deren Einbau und Funktionstüchtigkeit in der Epoxidharz-Versiegelung wurde erbracht und steht so für erste Anwendungen zur Verfügung.

Bei einem Aufbau ohne Verbund kann sich die eindringende Feuchtigkeit in der Trennlage (oft aus mehrlagigen Glasvliesbahnen) verteilen. Eine Erhöhung der Holzfeuchte über eine grössere Fläche der Fahrbahnplatte ist die Folge. Weist die Fahrbahnplatte ein (Quer-) Gefälle auf, reicht es Bandsensoren unterhalb der Abdichtung entlang der Brückenränder einzubauen.

Die Herstellung der Fahrbahnaufbauten ist in der Fläche bei der Verwendung von robusten Systemen meist unproblematisch und kann in der Regel in hoher Qualität dauerhaft hergestellt werden. Erfahrungen aus Inspektionen und von der Instandhaltung von bestehenden Holzbrücken zeigen, dass die seitlichen Anschlüsse der Abdichtungssysteme an den Fahrbahnübergängen, an den Schrammborden und an den Entwässerungssystemen (Abläufen) wesentliche Schlüsselemente für die Dauerhaftigkeit sind.

Mit der Erarbeitung von Basisdetails stehen sehr gute Grundlagen für die darauf aufbauende individuellen Planung für Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz zur Verfügung. Dies erhöht signifikant die Wirtschaftlichkeit sowohl im Planungsprozess wie auch bei der Ausführung und stellt ein hohes Qualitätsniveau sicher.

Die Basisdetailösungen bieten den Ingenieuren sehr anwendungsorientierte Hinweise und Regeln, wie die Haltbarkeit über die gesamte Lebensdauer sichergestellt werden kann. Gleichzeitig sind diese so gestaltet, dass die Ingenieure genügend Freiraum für Weiterentwicklungen und standortangepasste Lösungen haben. Es wird empfohlen diese Detailösungen in die VSS 40451 aufzunehmen.

In allen aufgeführten Detailösungen werden auf Fahrbahnplatten aus Holz als Systemaufbau sowohl mit Verbund wie auch ohne Verbund in der Fläche Polymerbitumen-Dichtungsbahnen als Abdichtung und für die Schutzschicht und Decke Gussasphalt verwendet.

Gleichwohl ist die regelmässige (periodische) Wartung und der Unterhalt in Verantwortung des Eigentümers unverzichtbar.

Ein Systemaufbau im Verbund ist auch bei Instandstellungen unter Verwendung von Epoxidharzversiegelung möglich. Durch die Absperrwirkung ist auch bei hohen Holzfeuchten > 15 M% keine Blasenbildung zu verzeichnen. Selbst die Erhöhung der Dicke der Schutzschicht auf 35 mm hat in den Feldversuchen zu hervorragenden Resultaten geführt.

Eine hohe Oberflächenqualität der Fahrbahnplatte muss auch im Instandstellungsfall gewährleistet werden. Zur Vermeidung von grösseren Sanierungsmassnahmen der Oberfläche z.B. durch mehrlagige Kratzspachtelung muss das Entfernen der Versiegelung durch Schleifen erfolgen. Das bei Fahrbahnplatten aus Beton übliche Sandstrahlen führt zu einem «Ausfasern der Oberflächenstruktur der Holzplatte und ist somit nicht empfehlenswert.

Résumé

La norme SN (6)40 451 "Systèmes d'étanchéité et couches bitumineuses sur les ponts avec tabliers en bois" a été publiée pour la première fois en 2009. En l'absence de connaissances et d'expériences suffisantes sur les structures de systèmes avec adhérence, seule une structure de système sans adhérence a pu être normalisée à ce jour comme structure standard sur les ponts en bois. L'influence des variations de l'humidité du bois dans les tabliers n'était pas suffisamment connue. En outre, il n'était pas possible de prendre en compte les étanchéités synthétiques liquides (FLK).

Depuis 2019, la SN 640 451:2009, dont le contenu n'a pas été modifié, est devenue la VSS 40451:2019.

Comme les structures composites sont la règle, en particulier pour les ponts routiers en béton (VSS 40450), il est nécessaire d'élaborer des exigences et des conditions d'exécution également pour les ponts routiers avec tablier en bois. L'exécution de structures modulaires avec adhérence est pertinente pour la construction future de ponts en bois.

Dans le cadre du projet VSS 2016/326 'Systèmes d'étanchéité et couches bitumineuses sur les ponts avec tabliers en bois', approuvé en 2018, la Haute école spécialisée bernoise a étudié, en collaboration avec IMP-Bautest AG (Oberbuchsiten, SO), la réalisation de structures système composites sur des tabliers en bois. Les résultats des travaux de recherche servent de base à la commission de normalisation et de recherche NFK 3.10 "Systèmes d'étanchéité" lors d'une nouvelle révision de la norme VSS 40 451.

Le projet a permis de démontrer qu'une structure de système avec adhérence sur des ponts avec des tabliers en bois est possible et peut être intégrée comme structure standard lors de la future révision de la norme VSS 40451.

Il s'est toutefois avéré qu'en l'état actuel des connaissances, seule une structure utilisant de la résine époxy pour la couche de fond et le scellement, ainsi que des lés d'étanchéité en bitume polymère pour l'étanchéité, permettait d'obtenir la faible formation de bulles requise et une très bonne résistance de la liaison.

L'utilisation d'asphaltes coulés à faible viscosité (modifiés) avec une température de pose maximale de 200 °C est standard pour les ponts en bois. Dans le cadre du projet, il a été possible de prouver que, par rapport aux recommandations actuelles de la littérature spécialisée, la pose de la couche de protection d'une épaisseur de 35 mm (MA 11) ne pose aucun problème. L'apport de chaleur plus important qui en résulte dans le système d'étanchéité entraîne une différence maximale négligeable de 5°C par rapport à la température obtenue avec une couche de 25 mm d'épaisseur (MA 8).

Le projet de recherche a clairement démontré que la qualité de la surface du panneau de bois a une influence essentielle sur l'effet composite (adhérence du scellement). Pour les panneaux en bois lamellé-collé (LVL) et les éléments en bois lamellé-collé (pour les panneaux de chaussée précontraints transversalement), la qualité industrielle proposée par les fabricants est généralement suffisante. Pour les panneaux en bois lamellé-croisé (CLT), la qualité industrielle habituellement livrée n'est pas suffisante en raison des poches de résine et des nœuds. Dans ce cas, la surface doit être mastiquée et poncée.

L'influence de l'humidité du bois est moins importante qu'on ne le pensait à l'origine. Avec des humidités du bois ou des humidités d'équilibre allant jusqu'à 18%, aucune influence négative sur la résistance à la traction par adhérence n'a pu être constatée. Au-delà, une influence est perceptible. Ceci est particulièrement important lors de la remise en état des systèmes d'étanchéité. La limite supérieure de l'humidité du bois de 15% mentionnée dans le projet actuel de la norme VSS 40451 a été confirmée par le projet.

L'installation de systèmes de surveillance de l'humidité est aujourd'hui standard pour les ponts en bois. Des études menées depuis de nombreuses années, entre autres par la BFH, montrent que pour les "ponts en bois protégés" courants aujourd'hui, on peut s'attendre à une humidité d'équilibre de 18M% \pm 2%. Comme cette valeur favorable n'est que peu dépassée, même dans des conditions climatiques locales particulières, il convient de prêter une attention particulière, lors de l'entretien des ponts en bois, à l'apparition (inattendue) d'humidité stagnante, par exemple en raison de fuites dans l'étanchéité ou dans la zone des jonctions de voies de circulation fortement sollicitées mécaniquement ou des raccords de bordures sur les bordures grattées.

Le projet a permis de démontrer avec succès que le bon fonctionnement de l'étanchéité peut aujourd'hui être surveillé de manière fiable à l'aide d'un voile de verre conducteur ou de capteurs à bande. Différents systèmes sont nécessaires en fonction de la structure du système choisie (avec/sans adhérence).

Dans le cas d'une structure avec adhérence, la fuite provoque une augmentation locale de l'humidité du bois dans la plaque de support. La liaison entre l'étanchéité et le support empêche la propagation de l'eau qui s'infiltré sous l'étanchéité. L'aptitude du voile de verre conducteur, son installation et son fonctionnement dans le scellement à la résine époxy ont été démontrés et sont ainsi disponibles pour les premières applications.

Dans le cas d'une structure sans adhérence, l'humidité qui pénètre peut se répartir dans la couche de séparation (souvent constituée de lés de voile de verre multicouches). Il en résulte une augmentation de l'humidité du bois sur une plus grande surface du tablier. Si le tablier présente une pente (transversale), il suffit d'installer des capteurs en bande sous l'étanchéité le long des bords du pont.

La réalisation des structures de chaussée ne pose généralement pas de problème en surface en cas d'utilisation de systèmes robustes et peut généralement être réalisée de manière durable et de haute qualité. L'expérience acquise lors des inspections et de l'entretien des ponts en bois existants montre que les raccords latéraux des systèmes d'étanchéité aux jonctions du tablier, aux bordures de protection et aux systèmes de drainage (écoulements) sont des éléments clés essentiels pour la durabilité.

Avec l'élaboration des détails de base, on dispose de très bonnes bases pour la planification individuelle des ponts avec des tabliers en bois. Cela augmente significativement la rentabilité, tant dans le processus de planification que dans l'exécution, et garantit un niveau de qualité élevé.

Les solutions détaillées de base offrent aux ingénieurs des conseils et des règles très orientés sur l'application pour garantir la durabilité pendant toute la durée de vie. En même temps, elles sont conçues de manière à laisser aux ingénieurs une marge de manœuvre suffisante pour des développements ultérieurs et des solutions adaptées au site. Il est recommandé d'intégrer ces solutions détaillées dans la VSS 40451.

Dans toutes les solutions détaillées mentionnées, des lés d'étanchéité en bitume polymère sont utilisés comme étanchéité sur les plaques de roulement en bois, que ce soit avec ou sans adhérence, et de l'asphalte coulé est utilisé pour la couche de protection et le revêtement.

Néanmoins, l'entretien régulier (périodique) et la maintenance sous la responsabilité du propriétaire sont indispensables.

Une structure de système composite est également possible pour les remises en état avec l'utilisation d'un scellement en résine époxy. Grâce à l'effet d'arrêt, aucune formation de bulles n'est constatée, même en cas d'humidité élevée du bois $>$ 15 M%. Même l'augmentation de l'épaisseur de la couche de protection à 35 mm a donné d'excellents résultats lors des essais sur le terrain.

Une qualité de surface élevée du tablier doit également être garantie en cas de réfection. Afin d'éviter des mesures de rénovation plus importantes de la surface, par exemple par un enduit gratté multicouche, l'élimination de la vitrification doit se faire par ponçage. Le sablage, habituel pour les tabliers de chaussée en béton, entraîne un "effilochage de la structure de surface du panneau de bois et n'est donc pas recommandé.

Summary

In 2009, the standard SN (6)40 451 "Waterproofing systems and bituminous layers on bridges with wooden deck slabs" was published for the first time. Since there was insufficient knowledge and experience about system structures with bond, only a system structure without bond could be standardized as a standard structure on wooden bridges until today. The influence of the changing wood moisture content in the deck slabs was insufficiently known. Furthermore, liquid plastic waterproofing (FLK) could not be considered.

SN 640 451:2009 has been listed as VSS 40451:2019 with unchanged content since 2019. Since system superstructures with composite are the rule, especially for concrete road bridges (VSS 40450), the development of requirements and execution conditions is also necessary for road bridges with wooden deck slabs. The execution of system superstructures with composite is relevant for future timber bridge construction.

As part of the VSS 2016/326 project 'Waterproofing systems and bituminous layers on bridges with wooden deck slabs' approved in 2018, the Bern University of Applied Sciences together with IMP-Bautest AG (Oberbuchsitzen, SO), researched the production of composite system superstructures on wooden deck slabs. The results from the research work are the basis for the standardization and research committee NFK 3.10 "Waterproofing systems" in a new revision of the standard VSS 40 451.

In the project, it was possible to prove that a system structure with composite on bridges with wooden deck slabs is possible and can be integrated as a standard structure in the future revision of VSS 40451.

However, it has been shown that, according to current knowledge, only a structure using epoxy resin for the primer and sealer, and polymer bitumen waterproofing membranes for the waterproofing result in the required low blistering and very good bond strength.

The use of low-viscosity (modified) mastic asphalts with a max. installation temperature of max. 200 °C is standard for wooden bridges. In the project, it was possible to prove that, compared to the current recommendations in the technical literature, the installation of the protective layer with a thickness of 35 mm (MA 11) is possible without any problems. The associated greater heat input into the waterproofing system leads to a negligible maximum difference of 5°C compared to the temperature at a layer thickness of 25 mm (MA 8).

The research project clearly demonstrated that the surface quality of the wood panel has a significant influence on the bonding effect (adhesion of the sealant). For panels made of laminated veneer lumber (LVL) and glulam elements (for cross-tensioned roadway panels), the industrial quality offered by the manufacturers is usually sufficient. In the case of cross laminated timber (CLT) panels, the industrial quality usually supplied is not sufficient due to the resin pockets and knots. Here, the surface must be filled and sanded.

The influence of wood moisture is less than originally assumed. With wood or compensation moisture contents of up to 18%, no detrimental influence on the adhesive tensile strength could be detected. Beyond that, an influence can be detected. This is of particular importance for repairs of waterproofing systems. The upper limit of wood moisture of 15% mentioned in the current draft of VSS 40451 was confirmed by the project.

The installation of moisture monitoring systems is now standard for timber bridges. Long-term investigations by BFH, among others, show that a compensation moisture content of 18M% \pm 2% can be expected for the "protected timber bridges" commonly used today. Since this favorable value is only slightly exceeded even under special local climatic conditions, special attention must be paid during the maintenance of wooden bridges to (unexpectedly) occurring waterlogging, e.g. due to leaks in the waterproofing or in the area of the mechanically highly stressed deck transitions or edge connections at the scraper curbs.

The project successfully demonstrated that the functionality of the waterproofing can now be reliably monitored using conductive glass fleece or belt sensors. Depending on the selected system structure (with/without bond), different systems are required.

In the case of a structure with bond, the leakage causes a local increase in the wood moisture in the substrate. The bond between the waterproofing and the substrate prevents the spread of the penetrating water under the waterproofing. The suitability of conductive glass fleece and its installation and functionality in the epoxy sealant has been demonstrated and is thus available for initial applications.

In the case of a structure without bond, the penetrating moisture can distribute itself in the separating layer (often made of multilayer glass fleece sheets). This results in an increase in the wood moisture content over a larger area of the deck. If the deck has a (transverse) slope, it is sufficient to install strip sensors below the waterproofing along the edges of the bridge.

The production of the roadway superstructure is usually unproblematic in the area when robust systems are used and can usually be permanently produced in high quality. Experience from inspections and from the maintenance of existing timber bridges shows that the lateral connections of the waterproofing systems at the roadway transitions, at the scraper curbs and at the drainage systems (drains) are essential key elements for durability.

The development of basic details provides a very good basis for the individual planning of bridges with wooden deck slabs. This significantly increases cost-effectiveness both in the planning process and in execution and ensures a high level of quality.

The basic detail solutions provide engineers with very application-oriented information and rules on how to ensure durability over the entire service life. At the same time, they are designed in such a way that engineers have sufficient freedom for further developments and site-adapted solutions. It is recommended that these detailed solutions be included in VSS 40451.

In all the detailed solutions listed, polymer bitumen waterproofing membranes are used as the waterproofing layer on wooden roadway slabs as the system structure, both with bond and without bond in the surface, and mastic asphalt is used for the protective layer and ceiling.

Nevertheless, regular (periodic) maintenance and upkeep is indispensable under the responsibility of the owner.

A composite system construction is also possible for repairs using epoxy resin sealant. Due to the barrier effect, no blistering is observed even at high wood moisture contents > 15 M%. Even increasing the thickness of the protective layer to 35 mm gave excellent results in the field tests.

A high surface quality of the roadway slab must also be guaranteed in the case of rehabilitation. To avoid major rehabilitation of the surface, e.g. by multi-layer scratch filling, the removal of the sealant must be done by grinding. Sandblasting, which is common for concrete roadway slabs, leads to "fraying" of the surface structure of the wooden slab and is therefore not recommended.

Vorwort

Das vorliegende Forschungsprojekt ist aus dem Bedürfnis von Planenden, Ingenieuren und Baurägerschaften der öffentlichen Hand entstanden, welche sich mit dem Neubau und der Instandstellung von Holzbrücken für den Verkehrswegbau auseinandersetzen.

Als Folge des zunehmenden Baus von zweispurigen Holzbrücken auch auf den Hauptstrassennetzen ist das Begehren entstanden, für Fahrbahnplatten aus Holz dieselben Abdichtungssysteme und Belagsaufbauten im Verbund einsetzen zu können wie dies bei Betonfahrbahnplatten möglich ist. Bisher existiert in der Schweiz für Fahrbahnplatten aus Holz nur die Norm VSS 40 451: 2019, und diese behandelt das System für Abdichtungen und Beläge ohne Verbund.

Trotzdem sind in der Schweiz im letzten Jahrzehnt einige gedeckte und ungedeckte Holzbrücken mit einem Systemaufbau im Verbund ausgeführt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass mit den Erfahrungen aus dem Betonbrückenbau einiger Belagsspezialfirmen, ein grosses Wissenspotential vorhanden ist, das sich auch im Holzbrückenbau anwenden lässt.

Naturgemäss sind Beton und Holz physikalisch sehr unterschiedliche Materialien. Sie zeigen bei der Einwirkung von statischen und dynamischen Kräften ein differentes Verhalten. Die Werte der erreichbaren Restfeuchte bei Holz und Beton vor dem Aufbringen der Abdichtung, liegen weit auseinander und die beiden Baustoffe reagieren bei der Einwirkung von hohen Temperaturen sehr unterschiedlich. Ein Grund also, all diesen Unterschieden nachzugehen und zu erforschen wo sind brauchbare Verfahren, die sowohl auf Beton wie auch auf Holz anwendbar sind und welche Anwendungen sind nicht einsetzbar.

Diesen und vielen weiteren Fragen ist das Projektteam mit Berechnungen und Versuchen nachgegangen und hat nach Antworten gesucht und sie auch gefunden. Zum einen sind Modellrechnungen erstellt worden, zum andern sind die Resultate an vielen Versuchsflächen ausgewertet worden.

Dank grosszügiger Unterstützung einer Spezialfirma für Gussasphalt hat eine Vielzahl der erstellten Versuchsflächen in der gedeckten und belüfteten Umgebung ihrer Werkhallen erstellt werden können. Diese Möglichkeit hat die Qualität und das Zeitprogramm des Forschungsprojektes positiv beeinflusst. Trotz der schwierigen Zeit während der Pandemiejahre 2020 – 2021, ist die Forschungsarbeit auch in reduzierter Form weitergeführt worden.

Weiter hat sich die Gelegenheit für die Durchführung von Feldversuchen an einer im Jahr 2007 erstellten ungedeckten Holzbrücke ergeben, bei der Abdichtung und Belag nach dem Verbundsystem eingebaut worden sind. Diese Feldversuche sind ursprünglich nicht im Forschungsprogramm aufgeführt gewesen. Doch dank der Tatsache, dass die Baurägerschaft notwendige Instandstellungsarbeiten geplant hat, ist die Möglichkeit entstanden mit diesem Projekt einige Kurzzeitversuche in situ durchführen zu können.

Eine tragende Funktion haben neben den beteiligten Projektpartnern auch die Mitglieder der Begleitkommission übernommen. Mit regelmässigen Kommissionssitzungen und Workshops ist die Kommission stark in das Forschungsprojekt eingebunden gewesen.

Das Resultat der Forschungsarbeit ist erfreulich und zeigt klar auf, dass eine Verbundlösung für Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz machbar ist.

Fred Stalder-de Marco, Präsident der Begleitkommission

Avant-propos

Le présent projet de recherche est né des besoins des planificateurs, des ingénieurs et des maîtres d'ouvrage publics qui s'occupent de la construction et de la remise en état de ponts en bois pour la construction de voies de communication.

Suite à la construction croissante de ponts en bois à deux voies, y compris sur les réseaux routiers principaux, le souhait s'est fait jour de pouvoir utiliser pour les tabliers en bois les mêmes systèmes d'étanchéité et les mêmes structures de revêtement en adhérence que pour les tabliers en béton. Jusqu'à présent, il n'existe en Suisse que la norme VSS 40 451 : 2019 pour les dalles en bois, et celle-ci traite du système d'étanchéité et de revêtement sans adhérence.

Malgré cela, quelques ponts en bois, couverts ou non, ont été réalisés en Suisse au cours de la dernière décennie avec une structure de système en adhérence. Il s'est avéré que l'expérience acquise dans la construction de ponts en béton par certaines entreprises spécialisées dans les revêtements permettait de disposer d'un grand potentiel de connaissances pouvant également être appliquées à la construction de ponts en bois.

Par nature, le béton et le bois sont des matériaux très différents sur le plan physique. Ils se comportent différemment sous l'effet des forces statiques et dynamiques. Les valeurs d'humidité résiduelle pouvant être atteintes par le bois et le béton avant l'application de l'étanchéité sont très éloignées et les deux matériaux de construction réagissent très différemment sous l'effet de températures élevées. C'est donc une raison d'étudier toutes ces différences et de rechercher où sont les procédés utilisables, applicables aussi bien au béton qu'au bois, et quelles applications ne peuvent pas être utilisées.

L'équipe du projet s'est penchée sur ces questions et sur bien d'autres, en effectuant des calculs et des essais, et a cherché et trouvé des réponses. D'une part, des modèles de calcul ont été établis et, d'autre part, les résultats ont été évalués sur de nombreuses surfaces d'essai.

Grâce au soutien généreux d'une entreprise spécialisée dans l'asphalte coulé, un grand nombre de surfaces d'essai ont pu être réalisées dans l'environnement couvert et ventilé de leurs ateliers. Cette possibilité a eu une influence positive sur la qualité et le calendrier du projet de recherche. Malgré la période difficile des années de pandémie 2020 - 2021, le travail de recherche a été poursuivi sous une forme réduite.

En outre, l'occasion s'est présentée de réaliser des essais sur le terrain sur un pont en bois non couvert construit en 2007, dont l'étanchéité et le revêtement ont été installés selon le système composite. Ces essais sur le terrain ne figuraient pas initialement dans le programme de recherche. Mais grâce au fait que le maître d'ouvrage a planifié des travaux de remise en état nécessaires, il a été possible de réaliser quelques essais de courte durée in situ dans le cadre de ce projet.

Outre les partenaires impliqués dans le projet, les membres de la commission d'accompagnement ont également joué un rôle important. La commission s'est fortement impliquée dans le projet de recherche en organisant régulièrement des réunions et des ateliers.

Le résultat du travail de recherche est réjouissant et montre clairement qu'une solution composite pour les ponts avec tablier en bois est réalisable.

Fred Stalder-de Marco, président de la commission d'accompagnement

1 Schlussbericht

1.1 Problemstellung

Im Jahre 2009 wurde die Norm SN (6)40 451 "Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz" publiziert. Diese Norm regelte erstmalig Systemaufbauten für die Abdichtung und bitumenhaltigen Schichten (Asphaltbeläge) auf Holzbrücken. Sie gilt jedoch nur für Abdichtungssysteme ohne Verbund, da zum damaligen Zeitpunkt keine ausreichenden Erkenntnisse und Erfahrungen über Systemaufbauten mit Verbund vorlagen. Der Einfluss der wechselnden Holzfeuchten in den Fahrbahnplatten war unzureichend bekannt. Ferner konnten keine Flüssigkunststoffabdichtungen (FLK) berücksichtigt werden. Die SN 640 451:2009 wird mit unverändertem Inhalt seit 2019 als VSS-40451:2019 geführt. Da insbesondere bei Strassenbrücken aus Beton, Systemaufbauten mit Verbund die Regel sind (VSS-40450), werden im vorliegenden Forschungsprojekt, Anforderungen und Ausführungsbedingungen auch für Strassenbrücken mit Fahrbahnplatten aus Holz erarbeitet. Die Ausführung von Systemaufbauten mit Verbund ist für den zukünftigen Holzbrückenbau relevant.

Die Ausführung von Abdichtungssysteme mit Verbund bieten folgende Vorteile gegenüber Fahrbahnaufbauten ohne Verbund (Milbrandt und Schellenberg, 1998):

- In einem Fahrbahnaufbau in Verbund werden Brems- und Beschleunigungskräfte direkt auf die unterliegende Konstruktion der Fahrbahnplatte übertragen.
- In Brücken mit Fahrbahnneigungen von mehr als 6% wird ein Fahrbahnaufbau im Verbund empfohlen
- Im Verbund ist die Lebensdauer durch eine geringere Materialermüdung des Asphaltbelags grösser. Im Verbund mit der Unterlage werden die Asphaltsschichten vor allem unter Druck beansprucht, während bei Aufbauten ohne Verbund Biegebeanspruchungen entstehen.

1.2 Einbautemperaturen und Belagsaufbauten

Gussasphalt (GA) wurde bis vor wenigen Jahren generell bei Temperaturen bis zu 230°C, auf Brücken eingebaut; heute liegt der Trend in der Senkung der Temperaturen in einen Bereich von 200°C. Bei den derzeit verwendeten bewährten Systemaufbauten mit Abdichtungen ohne Verbund, wird die Schutzschicht in der Regel mit einer Dicke von 25 mm (MA 8) eingebaut, um Blasenbildung durch Wasserdampf zu reduzieren (VSS-40451:2019). Für die erforderliche Gesamtschichtdicke der MA-Schichten von ≥ 75 mm, muss ein 3-schichtiger Aufbau geplant werden. Obwohl Milbrandt und Schellenberg (1998) davon abgeraten haben, sind auf Holzbrücken in der Schweiz bereits zweischichtige Belagsaufbauten (mit je 35 mm MA 11) erfolgreich ausgeführt worden (TBA Bern, 2007 und Nievergelt, 2020). Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird überprüft, ob bei Systemaufbauten mit Abdichtungen im Verbund, ohne ein erhöhtes Risiko von Blasenbildung eine grössere Schichtdicke der Schutzschicht gegenüber den heute üblichen Aufbauten möglich wäre. Aufgrund der heute möglichen niedrigeren MA-Temperaturen sind dickere Schutzschichten ausführbar geworden.

Die Systemaufbauten mit Verbund wurden bislang nur auf Fahrbahnplatten aus quervorgespanntem Brettschichtholz ausgeführt. Erfahrungen auf Fahrbahnplatten aus Brettsperrholz oder Furnierschichtholz fehlen noch. Aus diesem Grund müssen die Systemaufbauten auf unterschiedlichen Holzwerkstoffen angewendet und die Auswirkung auf die Blasenbildung und auf den Verbund untersucht werden.

1.3 Blasenbildung im Belag

Bei der Blasenbildung wird zwischen einer Kurzzeit- und einer Langzeit-Blasenbildung unterschieden. Bei Betonbrücken entsteht Blasenbildung durch Wärmeeintrag z.B. durch Sonneneinstrahlung in den Fahrbahnaufbau. Kurzzeit-Blasenbildung entsteht i.d.R. während des Einbaus der Schutzschicht. Langzeit-Blasenbildung wird durch Wärmezyklen infolge Sonneneinstrahlung verursacht. Beide Erscheinungen führen zu Schäden in den Fahrbahnplatten, welche durch zeit- und kostenintensive Instandstellungsmassnahmen behoben werden müssen. Das Risiko und die Folgen von Langzeit-Blasenbildung auf Fahrbahnplatten aus Holz sind noch unbekannt. Planer nehmen deshalb häufig Abstand Fahrbahnplatten im Verbund auf Holzbücken auszuführen. Holzwerkstoffe werden mit einer Feuchtigkeit von 12 Massenprozenten (M%) produziert; im Gegensatz dazu werden Abdichtungen im Verbund auf Betonunterlagen bei einem Feuchtegehalt von < 3 M% eingebaut.

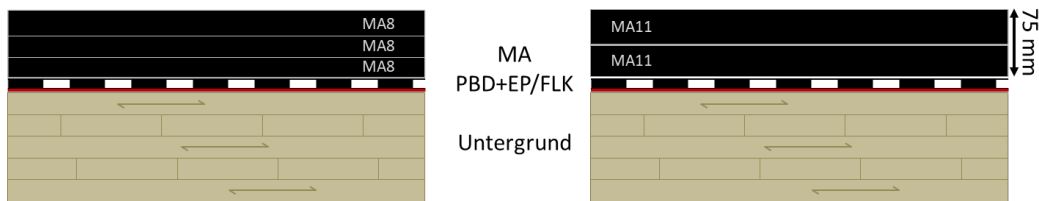


Abbildung 1: Darstellung des Fahrbahnaufbaus mit Verbund mit drei 25mm-dicken MA 8-Schichten und mit zwei 35mm-dicken MA 11-Schichten. Der Untergrund besteht aus einer Brettsperrholzplatte auf welche das Abdichtungssystem appliziert wurde

1.4 Abdichtungsebene

Die Verarbeitung der Abdichtungsebene in der Fläche ist meist unproblematisch und kann in hoher Qualität dauerhaft hergestellt werden. Die seitlichen Anschlüsse z.B. an der Schrammborde, an den Fahrbahnübergängen und an den Entwässerungssystemen (Abläufen) sind jedoch oft problematisch. Leckagen sind an diesen Anschlüssen meist nur schwer erkennbar und können bei Fahrbahnplatten aus Holz sehr schnell zu unkontrolliertem Feuchteintritt führen.

Hierfür stehen bislang keine gesicherten Standardlösungen zur Verfügung. Obwohl sich bei einer Vielzahl von gebauten Holzbrückenprojekten wichtige Detaillösungen bereits bewährt haben, werden von den Planern immer wieder neue individuelle Lösungen erarbeitet. Eine Zusammenfassung von bewährten Detaillösungen wäre für die Planung von Holzbrücken sehr hilfreich.

1.5 Instandsetzung und Erhaltung

Instandstellungen von Brücken sind sehr oft mit hohen Kosten verbunden. Durch die Entwicklung von standardisierten Lösungen können die Planungskosten verringert, die Qualität und Dauerhaftigkeit der Anlage jedoch erhöht werden. Die oft durch Leckagen in der Abdichtungsebene verursachte hohe Holzfeuchte in der Fahrbahnplatte aus Holz (Holzfeuchte an der Oberfläche der Platte oft über 30%), erschwert das Aufbringen der Grundierung/Versiegelung (Nasshaftung) und ruft eine verstärkte Blasenbildung beim Einbau des heissen Asphalts hervor. Aus diesem Grund wird bei der Erneuerung meist ein Gesamtaufbau ohne Schubverbund gewählt. Die 2-lagige Glasvliesbahn unter der Abdichtung wirkt dabei als Dampfdruckausgleichs- bzw. -Verteilschicht. Die Abdichtungsentlüftungen durch Bohrungen in der Fahrbahnplatte aus Holz können dabei zur Dampfdruckentspannung aktiviert werden. Nach dem Entfernen der Abdichtung ist die Oberfläche meist beschädigt. Ausgerissene Holzfasern, Beschädigung durch Werkzeuge beim Entfernen etc., erfordern oft eine aufwändige Sanierung der Oberfläche.

1.6 Forschungsauftrag

Im Rahmen des 2018 bewilligten Projekts VSS 2016/326 'Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz' erforscht die Berner Fachhochschule gemeinsam mit IMP-Bautest AG (Oberbuchsitzen, SO), die Herstellung von Systemaufbauten im Verbund auf Fahrbahnplatten aus Holz. Eine Begleitkommission von acht Experten begleitet die Forschungsarbeiten und unterstützt das Projektteam mit ihrer Praxiserfahrung. Die Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten sind die Grundlage für die Normierungs- und Forschungskommission NFK 3.10 „Abdichtungssysteme“ bei einer erneuten Überarbeitung der Norm VSS 40 451.

Durch die Erarbeitung von weiteren, abgesicherten Systemlösungen für Abdichtungssysteme und Asphaltbeläge auf Fahrbahnplatten aus Holz sowie den zusätzlichen Muster-/ Regeldetaillösungen für z.B. Randanschlüsse und Fahrbahnübergänge, kann die Dauerhaftigkeit der Holzbrücken weiter erhöht und der Wartungsaufwand signifikant reduziert werden. Diese Erarbeitung wird mittels den folgenden Arbeitspaketen (AP) realisiert:

- AP1: Schubfester Gesamtaufbau unter Einsatz von Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD)
- AP2: Schubfester Gesamtaufbau unter Einsatz von Flüssigkunststoffabdichtungen (FLK)
- AP3: Messmethoden und Langzeit-Monitoring
- AP4: Anschlüsse von Brückenabdichtungen
- AP5: Instandsetzungs- und Sanierungssysteme

2 Ausgangslage

Holzbrücken haben eine lange Tradition. Brücken für Verkehr wurden auch schon in der Römerzeit aus Holz und Stein gebaut. Die älteste und bekannteste Holzbrücke der Schweiz ist die im Jahr 1333 erbaute Kapellbrücke in Luzern eine Fussgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 222 Meter (Buholzer und Fuchs, 2019). Die Schweiz verfügt auch über eine grosse Anzahl historische Brücken (z.B. in Aarberg, Andelfingen, Wangen an der Aare), welche heute noch für den (einspurigen) Strassenverkehr genutzt werden.

Die Website Swiss Timber Bridges (swiss-timber-bridges.ch), bietet ausführliche Informationen zum Holzbrückenbau bis zum Jahr 2010.

Bachofer und Konzett (2013) bieten in ihrer Forschungsarbeit 'Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen' eine aktuelle Übersicht des Holzbrückenbaus in der Schweiz. Für den Zeitraum der Jahre 1300 bis 2010 wurden insgesamt 340 Holzbrücken erfasst. Interessant ist die statistische Analyse der Holzbrücken. Bemerkenswert ist, dass zwischen 1930 und 1950 insgesamt 35 Holzbrücken dokumentiert wurden. Diese relativ hohe Anzahl wird in der Literatur auf einen Mangel an Stahl zurückgeführt (Quartier, 2013). In den Jahren 1980 bis 2010 wurden je ca. 4-5 Holzbrücken pro Jahr gebaut.

Holzbrücken wurden traditionell zum konstruktiven Schutz tragender Teile vor Witterungseinflüssen mit einem Dach gebaut und mit einer Holzschalung bekleidet. Die ersten «neuzeitlichen» Holzbrücken ohne Dach wurden ab 1960 gebaut. Der Schutz der Holzbauteile wird hier durch die Abdichtung der Fahrbahnplatte sichergestellt. Zwischen 2000 und 2010 sind bereits 75% der Brücken ohne Dach gebaut worden. Im Rahmen eines Wettbewerbs zur Erneuerung von vier Holzbrücken im oberen Emmental (Stalder und CC, 2000) wird bereits zwischen Holzbrücken ohne Dach und Holzbrücken mit Dach unterschieden. Da auch bei Strassenbrücken mit Dach eine funktionsfähige Abdichtung der Fahrbahn zum Schutz der darunterliegenden Bauteile vor Aufweitung notwendig ist und zusätzlich auch die Holzkonstruktion des Haupttragwerkes aufwändig geschützt werden müssen, ist ein Dach bei Holzbrücken in Frage zu stellen. Es verursacht hohe Zusatzkosten und ist als prägendes Element im Ortsbild oder in der Landschaft oft auch unerwünscht.

Die meisten Holzbrücken wurden für Fuss- und Radwege gebaut. Durchschnittlich werden nach Bachofer und Konzett (2013) 12 Holzbrücken pro Jahr gebaut, wovon 1/3 ein- bzw. zweispurige Strassenverkehrsbrücken sind. Bachofer und Konzett (2013) stellen fest, dass genügend Wissen vorhanden ist, um zukünftig verstärkt auch Brücken mit einer Länge von 50 Metern zu bauen. In den Skandinavischen Ländern werden Strassenbrücken auch in den Hauptverkehrsachsen mit einer Selbstverständlichkeit in Holz gebaut. Die längste Holzbrücke ist möglicherweise die 70-Meter lange «Flisa Brücke» in Norwegen. Das zukünftige Potential für Holz bei Infrastrukturbauten ist gross und muss im Zusammenhang mit der Klimaentwicklung gefördert und genutzt werden.

2.1 Fahrbahnbeläge bei Holzbrücken

2.1.1 Holz/Bohlen

Fahrbahnen aus Holz eignen sich für langsam fahrenden Verkehr, Fuss und Radwegbrücken, oder Brücken mit wenig Verkehrsbewegungen (Pousette, 1997). Die neue Wührbrücke, bei Horrenbach-Buchen (2017), welche für 32 Tonnen Verkehrslasten ausgelegt worden ist, stellt ein solches Beispiel dar. Hier laufen die Bohlen quer zur Fahrtrichtung des Verkehrs. Wegen der Lastverteilung sind meist mehrlagige Bohlenbeläge notwendig. In der Ramserenbrücke, bei Langnau im Emmental (1793) laufen die Bohlen der Nuttschicht längs zur Fahrtrichtung.



Abbildung 2: Beispiele von Brücken mit Holz als Fahrbahnbelag (Links ist die neue Wühribrücke (Quelle: timbatec.com) und rechts die Ramserenbrücke abgebildet (Quelle: Thomas Peter, bernerzeitung.ch))

2.1.2 Flüssig-Kunststoff-Beschichtungssysteme als direkt begeh- und befahrbare Nutzbeläge auf Holz- und Holzwerkstoffen (Direktbeschichtungen)

Im Zuge des Forschungsprojektes «Flüssig-Kunststoff-Beschichtungssysteme als direkt begeh- und befahrbare Nutzbeläge auf Holz- und Holzwerkstoffen» (Innosuisse Projekt-Nr.: 39303.1 IP-EE) an der BFH, konnten bei den durchgeführten Laborversuchen hervorragende Eigenschaften auch auf Holzwerkstoffen, dieses bei Fahrbahnplatten aus Beton insbesondere in Parkhäusern gut bewährten Systems, ermittelt werden.

Die verwendeten Polyurea-Beläge haben hervorragende Dehnfähigkeiten und können die Verformungen/Formänderungen der relativ «weichen» Brückenkonstruktion sehr gut aufnehmen. Bedenken hinsichtlich der besonderen mechanischen Beanspruchung z.B. durch Spikesbereifung der Fahrzeuge, konnten durch in Schweden geforderte und durchgeführte spezielle Spiketests ausgeräumt werden.

Diese Art von Fahrbahnbelägen finden gerade bei historischen Holzbrücken immer mehr Verwendung, da mit diesen eine deutliche Gewichtseinsparung gegenüber Asphaltbelägen möglich ist.

Als Beispiel kann hier die historische Holzbrücke in Andelfingen aufgeführt werden. In der Thurbrücke (Andelfingen, ZH) wurde im Zuge der Instandstellungsarbeiten im Jahr 2018 eine Direktbeschichtung aus PMMA auf einer an den Stößen keilverzinkten Fahrbahnplatte aus Furnierschichtholz appliziert.



Abbildung 3 : Bilder der Direktbeschichtungen mit PMMA und Bitumen in der historischen Thurbrücke in Andelfingen (ZH) links und Schüpbachbrücke in Schüpbach (BE) rechts

2.1.3 Ultrahochleistungsfaserverbundbaustoff (UHFB)

Die Materialkombination Holz mit Fahrbahnplatten aus Ultrahochleistungsfaserverbundbaustoff (UHFB) nach SIA 2052 wurde, insbesondere im Schubverbund (Holz-UHFB-Verbundbau) beim Neubau von Holzbrücken, bereits mehrfach eingesetzt (2018 Gletschersandbrücke in Grindelwald, 2020 Fruttlibrücke bei Rigi Fruttli, Arth SZ).

Die UHFB-Schicht dient im Gegensatz zu dem Gussasphaltaufbau im Verbund zur Steigerung der Tragfähigkeit der Fahrbahnplatte. Mit einer Fahrbahnplatte aus UHFB können 3 Schichten (Abdichtung, Schutzschicht, Deckschicht) ersetzt werden. Mit einer UHFB-Schichtdicke von 30 mm ist laut (Brühwiler 2017) bis zu einer Dehnung von 1.2‰ «flüssigkeitsdicht». Zurzeit fehlen Langzeiterfahrungen mit dieser Bauweise, welche kontrovers diskutiert wird. Insbesondere bei der Frage der Ausbildung der Randanschlüsse mit einer Abdichtung besteht noch Klärungsbedarf.

Die Rückbaubarkeit ist mit im Betonbau üblichen Werkzeugen durch Schneiden und Brechen möglich.

In Fachkreisen werden dieser Bauart im Holzbrückenbau gute Marktchancen eingeräumt, da die beschriebenen Vorteile neben der erhöhten Leistungsfähigkeit auch die Dauerhaftigkeit durch Schutz der darunterliegenden Holzkonstruktion und damit auch die Wirtschaftlichkeit von Holzbrücken signifikant verbessert werden kann.

Gerade im Umgang mit historischen Holzbrücken ist die Verwendung dieses Hochleistungsbaustoffs angemessen. Mit einer sehr geringen Schichtdicke kann eine bestehende Fahrbahnplatte signifikant verstärkt und durch die spezifischen Materialeigenschaften dieses Baustoffs als wasserdichte Fahrbahnplatte direkt befahren werden.



Abbildung 4: Neue Fruttlibrücke in Arth (SZ) links und der neue Fussgängersteg über die Sure in Oberwil (BL) (Quellen: Edgar Kälin und Hecht Holzbau AG)

2.1.4 Asphaltbeläge

Asphaltbeläge sind insbesondere bei durch (Fahrzeug)-Verkehr beanspruchten Holzbrücken der Regelfall. Als Schutz- und Deckschicht wird bei Fahrbahnplatten aus Holz meist Gussasphalt eingesetzt (VSS-40451). Bei Verwendung von Gussasphalt wird die zusätzliche Abdichtungswirkung der Fahrbahnkonstruktion durch den Belag geschätzt.

Im Gegensatz dazu gilt Walzasphalt (Asphaltbeton AC) als nicht wasserdicht und muss zusätzlich maschinell verdichtet werden. Bei Holzbrücken wird von Asphaltbeton abgeraten, da die notwendige Verdichtungsenergie infolge der geringeren Steifigkeit bzw. des dynamischen Verhaltens (Dämpfung) der Fahrbahnplatten aus Holz nicht aufgebracht werden kann (Milbrandt und Schellenberg, 1998). Die für einen dauerhaften Gesamtaufbau notwendiger Verdichtungsgrad (>97%) und ein geringer Hohlraumgehalt (3-6%) wird oft nicht erreicht. Ein Gussasphalt-Belag (MA) ist hingegen selbstverdichtend und grundsätzlich besser geeignet.

Die Bestandsaufnahme und Beurteilung des Zustandes von Asphaltbelägen im Zuge von durchgeführten Forschungsprojekten bestätigen diese These (Milbrandt und Schellenberg, 1998 und Scharmacher und Müller, 2013).

Insbesondere bei historischen Holzbrücken, wurden zur Gewichtseinsparung, teilweise sehr dünne Gussasphaltschichten, ohne zusätzliche Abdichtung direkt auf die Holzbohlen der Verschleisschicht aufgebracht. Diese Belagsaufbauten haben sich nicht bewährt. Der geforderte Schutz der darunterliegenden Holzbauteile der hist. Brückenkonstruktion wird damit nicht dauerhaft sichergestellt, wie z.B. an der Schüpbachbrücke (Schüpbach, BE).

Momentan ist für Fahrbahnplatten aus Holz in der Schweiz nur ein Systemaufbau ohne Verbund in der VSS-40451 normiert. Systemaufbauten mit Verbund gelten als Sonderbauweise.

Bei mehreren Holzbrücken in der Schweiz (in Europa ist dies Standard) wurden dennoch Systemaufbauten im Verbund realisiert. So konnten erste Erfahrungen bei Holzbrücken mit Systemaufbauten mit Verbund gesammelt werden. Diese Aufbauten eignen sich für Brücken mit einer hohen Verkehrsbelastung oder einer hohen Längs- und Querneigung.

In Tabelle 1 sind als Referenz die Obermattbrücke in Lauperswil, die Ova da Bernina in Pontresina und Isalas in Celerina aufgeführt (TBA Bern, 2007 und Nievergelt, 2020).

Table 1 : Ausführung von Aufbauten mit Verbund auf unterschiedlichen Brücken (TBA Bern, 2007 und Nievergelt, 2020)

Brücke	Obermatt	Ova da Bernina	Isalas
Standort	Lauperswil (BE)	Pontresina (GR)	Celerina (GR)
Baujahr	2007	2020	2020
Brückenlänge [Meter]	31	22	20
Brückenbreite	6.1	6.5	5 m
Verkehrslast [Tonnen]	40	40	10
Untergrund	Liegende BSH-Träger (quervorgespannt) 120 mm	Liegende BSH Träger 220 mm (quervorgespannt) u. Furnierschichtholzplatte 51 mm (geschliffen)	Liegende BSH Träger 160 mm und OSB/3 Platte 25 mm (geschliffen)
Siegel und Abdichtung	Epoxidharz und aufgeflamte PBD-Bahn	Epoxidharz und aufgeflamte PBD Bahn	Epoxidharz und aufgeflamte PBD Bahn
Belagsschicht	Schutzschicht MA 11 Deckschicht MA 11 (Gesamtdicke 60 mm (Mitte) bis 80 mm (Rand))	Schutzschicht GA MA 11 (30mm) mit Deckschicht GA MA11 (35 mm) Beide 200 °C	Schutzschicht GA MA 11 (30mm) mit Deckschicht GA MA 11 (30mm) Beide 200 °C

Im Jahr 2007 wurde auf der Deckschicht der Obermattbrücke, heller Keramik-Splitter gestreut, mit dem Ziel, sehr hohe Temperaturen im Asphalt während der Sommermonate zu vermeiden bzw. die Temperatur zu verringern. Im Asphaltbelag ist keine Langzeitblasenbildung erkennbar. Auch während der Applikation des Belags haben sich keine Blasen gebildet. Nach 13 Jahren sind Verschleisspuren sichtbar, welche bei anstehenden Sanierungsarbeiten am Fahrbahnübergang beseitigt werden können.



Abbildung 5 : Obermattbrücke (Lauperswil, BE) mit einem Detail des Randanschlusses und Fahrbahnübergangs

Es wurden weder bei der Brücke Ova da Bernina, noch bei der Isalasbrücke, Meldungen von Blasenbildung während der Applikation von der Schutzschicht gemacht.

2.2 Systemaufbauten

Der Fahrbahnaufbau wird mit den Fahrbahnplatten, dem Abdichtungssystem und den Asphaltsschichten als Gesamtsystem betrachtet. Um einen robusten Gesamtaufbau zu gewährleisten, müssen diese Elemente aufeinander abgestimmt werden (SN 40 450). Grundsätzlich wird zwischen Systemaufbauten mit Verbund und ohne Verbund unterschieden.

Im Rahmen des Projekts VSS 2016/326 'Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz' wird die Herstellung von Systemaufbauten im Verbund auf Fahrbahnplatten aus Holz bearbeitet. Dabei wird aus den in 2.1.2 beschriebenen Gründen Gussasphalt für die Schutz- und Deckschicht verwendet.

2.2.1 Systemaufbauten ohne Verbund

Aufbauten ohne Verbund werden bei Geh- und Radwegbrücken oder bei Brücken mit eingeschränkter Verkehrsbelastung bevorzugt, da weder die Abdichtung noch die Asphaltbeläge der unvermeidbaren Formänderung der Holzwerkstoffe ausgesetzt sind. In der Schweiz werden in einzelnen Kantonen (z.B. Kanton Aargau) auch Aufbauten ohne Verbund standardmässig bei Verkehrsbrücken eingesetzt. Die Längs- und Querneigung sollte dabei ca. 6% nicht überschreiten. Bei einem Systemaufbau ohne Verbund, sind die Fahrbahnplatte und die Abdichtung durch eine meist mehrlagige Trennschicht z.B. aus Glasvlies voneinander getrennt. Die Abschottung unter Abdichtungen ohne Verbund verhindert das Ausbreiten von Wasser/Feuchtigkeit und ermöglicht das Lokalisieren von Leckagen.

Bei Instandstellungen wurden teilweise auch Holzbrücken, welche zunächst mit Verbund ausgeführt waren, neu ohne Verbund ausgeführt, i.B. wenn, wie am Beispiel der Bubeneibrücke (Schüpbach, BE), durch Leckagen in der Abdichtung die Fahrbahnplatte aus Holz eine unzulässig hohe Holzfeuchte (> 15M%) aufweist.



Abbildung 6 : Brücken mit einem schwimmenden Fahrbahnbelag (links: Bubeneibrücke und rechts südliche Auenparkbrücke während des Verlegens des Glasvlieses und PBD Bahn)

Systemaufbauten ohne Verbund sind in der VSS-40451 gut geregelt und haben sich auf Holzbrücken langjährig bewährt. Aus diesem Grund wird auf diesen Aufbau im Projekt VSS

2016/326 'Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz' nicht weiter eingegangen.

2.2.2 Systemaufbauten mit Verbund

Gemäss VSS-40451: (Entwurf 2021), gelten Systemaufbauten mit Verbund weiterhin als Sonderbauweise mit dem Hinweis, «Holz enthält oft relativ viel Feuchtigkeit und ist zudem ein guter Wärmeisolator. Die Kombination dieser beiden Eigenschaften bewirkt eine starke (Wasser-) Dampfbildung, sodass bereits beim Einbau der Abdichtungen Mängel im Verbund entstehen können. Dem Langzeitverbund ist durch geeignete Materialwahl Rechnung zu tragen. Die Kompatibilität einer allfälligen Behandlung der Oberfläche des Holzes mit der Grundierung ist zu verifizieren. Dieses Projekt soll nachfolgend hierfür die Grundlage schaffen».

Bei Strassenbrücken aus Beton sind Systemaufbauten mit Verbund die Regel (SN 40 450). Diese Erfahrung wird auch mit materialspezifischen Anpassungen auf Fahrbahnplatten mit Holz zur Herstellung des Verbunds genutzt. Wird die Abdichtung auf den Untergrund verklebt, spricht man in der Praxis von «verklebter Abdichtung»: PBD-Bahnen werden geschweisst und FLK-Membrane aufgerollt/gespritzt. Vor dem Aufschweissen der PBD-Bahnen, wird der Untergrund entweder mit einem bituminösen Primer behandelt oder versiegelt (Epoxidharz oder PMMA). Diese Schicht dient als Haftvermittler zwischen PBD-Bahn und Untergrund.

Die Versiegelung beeinflusst gleichzeitig durch ihre „Sperrwirkung“ auch den Feuchtetransport i.B. beim Einbau der heissen Asphaltsschichten bei Fahrbahnplatten aus Holz.

Sie verhindert, dass Wasserdampf aus der Holz- oder Betonkonstruktion in die Abdichtung aufsteigen kann. Das verringert die Blasenbildung während der Applikation der Schutzschicht (Kurzzeit-Blasenbildung) und den Wärmezyklen durch z.B. Sonneneinstrahlung (Langzeit-Blasenbildung).

Die Herstellung von Systemaufbauten im Verbund bei Fahrbahnaufbauten auf Holz wurde in mehreren Forschungsprojekten bearbeitet und die Machbarkeit durch erste Versuche belegt:

- 'Wearing Surfaces for Timber Bridges' von Pousette (1997)
- 'Eignung von bituminösen Belägen für Holzbrücken' von Milbrandt und Schellenberg (1998)
- 'Asphaltbeläge auf Holzbrücken Untersuchung bituminöser Fahrbahnbeläge auf Strassenbrücken mit Holztragwerk' von Scharmacher und Müller (2013)

Im Forschungsbericht von Pousette (1997) werden Fahrbahnen aus Asphalt für Brücken mit schnelfahrendem Verkehr, viel Verkehrsbewegungen und Schwerlastverkehr empfohlen. Pousette stellt ferner fest, dass der Untergrund (Fahrbahnplatte) relativ steif sein muss. Hierfür eignen sich z.B. quervorgespannte Platten aus Vollholz bzw. Brettschichtholz.

Die wichtigsten Feststellungen sind:

- Die Oberflächenbehandlung/-qualität (gehobelt, gesägt, geschliffen) hat weder einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit von PBD-Bahnen, noch auf die Scherfestigkeit zur Dichtungsbahn. Es wird jedoch empfohlen, die Oberfläche zu hobeln oder zu schleifen.
- Blasen unter der Abdichtung können auch vor der Applikation der Schutzschicht entstehen. Es ist deshalb wichtig, die Abdichtung gegen grossen Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung zu schützen.
- Je dicker der Gesamtaufbau der Asphaltsschichten, umso tiefer werden auch die Temperaturen durch die «Dämmwirkung» an der Grenzschicht zur Fahrbahnplatte.

Im Forschungsbericht von Milbrandt und Schellenberg (1998) werden ausführlich die Eigenschaften des Asphalts beschrieben und ihre Eignung für Holzbrücken untersucht. Im Projekt wurden Versuche durchgeführt, um einen Schubverbund zwischen Holz und Asphalt herzustellen. Obwohl in dieser etwas älteren Arbeit Bauweisen untersucht wurden, welche heute nicht mehr verwendet werden, sind folgende, allgemeingültigen Folgerungen festzuhalten:

1. Mit zunehmender Feuchte nimmt auch das Risiko der Blasenbildung zu. Selbst bei einer Holzfeuchte in der Fahrbahnplatte unter 13 M% ist eine Blasenbildung nicht ganz auszuschliessen.
2. Die Dicke der Asphaltschicht ist entscheidender als die Holzfeuchte der Fahrbahnplatte. Empfohlen wurde, mit Schichtdicken von maximal 25 mm in der Schutzschicht zu arbeiten. Dickere Lagen führen bei den untersuchten Aufbauten zu Blasen.
3. Das Unterwandern der Feuchte über grosse Flächen bei schwimmenden Aufbauten, kann durch stellenweises Verkleben der Asphaltschicht auf der Holzfahrbahnplatte vermieden werden. Dank diesen Abschottungen können allfällige Schäden in deren Ausbreitung eingegrenzt werden.

Im Forschungsbericht von Scharmacher und Müller (2013) wurde ebenfalls die Herstellung des «Schubverbundes» untersucht. Abdichtungssysteme und Belagsaufbauten aus dem Betonbrückenbau wurden übernommen und die Betonunterlage durch eine Furnierschichtholz- oder Brettsperrholzplatte ersetzt. Als Referenz wurden Aufbauten im Verbund auf Stahl- und Betonplatten geprüft. Neu waren auch erste Versuche unter Verwendung von Flüssigkunststoffabdichtungen. Die Grösse der Prüfkörper betrug 200 x 200 mm. Die wichtigsten Feststellungen waren:

1. Ein Systemaufbau bestehend aus Holz, Epoxidharz, Bitumenschweissbahn und Gussasphalt kann zuverlässig eingebaut werden, ohne dass es zu einer Blasenbildung kommt.
2. Bei Abdichtungen aus Flüssigkunststoffen (PMMA, Eliminator) kommt es vermehrt zu Blasenbildung. Die Schubfestigkeit wird hier, infolge der Blasenbildung, um 15% reduziert. Das Bruchverhalten ist spröde, die Schubfestigkeit jedoch höher als auf PBD-Abdichtungen.
3. Schubfestigkeiten mit verklebten Aufbauten auf Holz führen zu vergleichbaren Werten wie auf Stahl- und Betonuntergrunde.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Schubsteifigkeiten und -festigkeiten von Abdichtungen aus Flüssigkunststoffe deutlich höher sind als jene von PBD-Bahnen. Flüssigkunststoffe haben ein temperatur-unabhängiges, elastisch-sprödes Verhalten, PBD-Bahnen hingegen verhalten sich temperaturabhängig «visko-plastisch».

Bei Holzbrücken wird heute i.d.R. Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD) als Abdichtung verwendet. Abdichtungen im Verbund unter Verwendung von Flüssigkunststoff (FLK) wurden bislang nur in Einzelfällen angewendet.

2.3 Holzuntergrund

Bei der Wahl der Systemaufbauten bei Fahrbahnplatten aus Holz, müssen entsprechend den physikalischen Eigenschaften des Baustoffes Holz berücksichtigt werden. Dies gilt besonders bei Brücken mit Schwerverkehr. Die Verformungen und die Feuchtigkeit müssen dabei besondere Beachtung geschenkt werden (Zitat Fred Stalder Leiter der BK).

2.3.1 Fahrbahnplatten aus Holz

Die Steifigkeit der Fahrbahnplatte aus Holz ist für die Dauerhaftigkeit der Asphaltbeläge von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund werden heute bei Holzbrücken neben den bewährten quervorgespannten Fahrbahnplatten aus z.B. Brettschichtholz auch Fahrbahnplatten aus mehrlagigem Furnierschichtholz (LVL) und Brettsperrholz (CLT, BSP) eingesetzt.

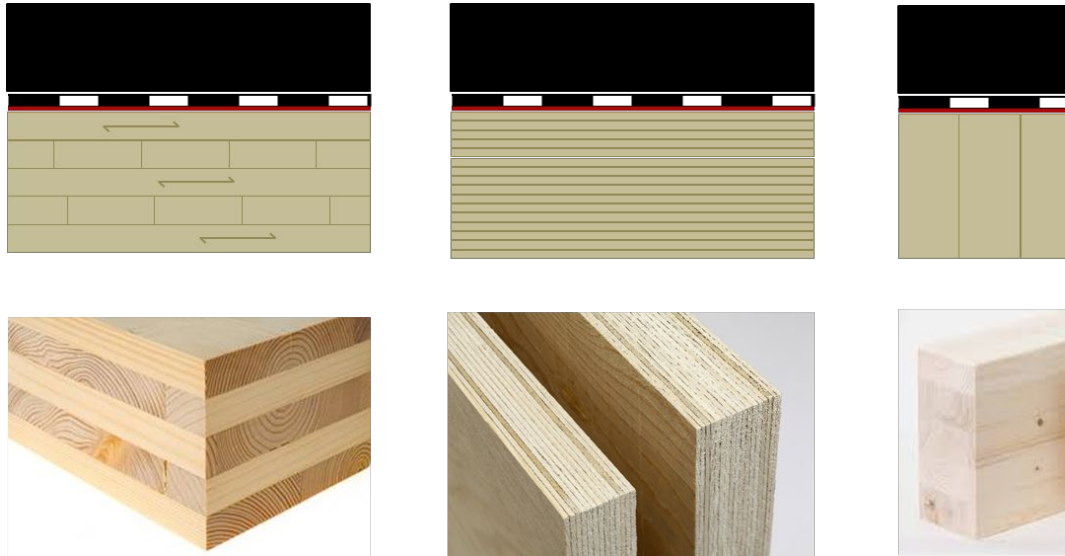


Abbildung 7: Verschiedene Grundplatten aus Holz mit Brettsperrholz, Furnierschichtholz, und Brettschichtholz (von links nach rechts)

Brettsperrholzplatten und Brettschichthölzer können in unterschiedlichen Qualitäten der Oberfläche bezogen werden. Im Holzbrückenbau wird meist Industriequalität verwendet. Als Richtwert könnten folgende Qualitäten bestellt werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Qualitäten von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich eingestuft werden:

- Industriequalität, gehobelt aber nicht notwendigerweise geschliffen
- Verspachtelt, geschliffen
- Sichtqualität (wenig Äste, Harzgallen, etc.)

In Industriequalität sind folgenden Fehlstellen möglich:

- Harzgallen
- Lebende Äste (mit Harz)
- Tote Äste (mit Rinde)
- Astlöcher
- Rindeneinwuchs
- Baumkanten
- Markröhre
- Leimreste (schäumende PUR)
- Risse

Diese Fehlstellen können den Verbund der Versiegelung mit der Holzstruktur beeinflussen und müssen so, vor Auftrag der Versiegelung, durch eine Kratzspachtelung oder andere Methoden verschlossen werden.

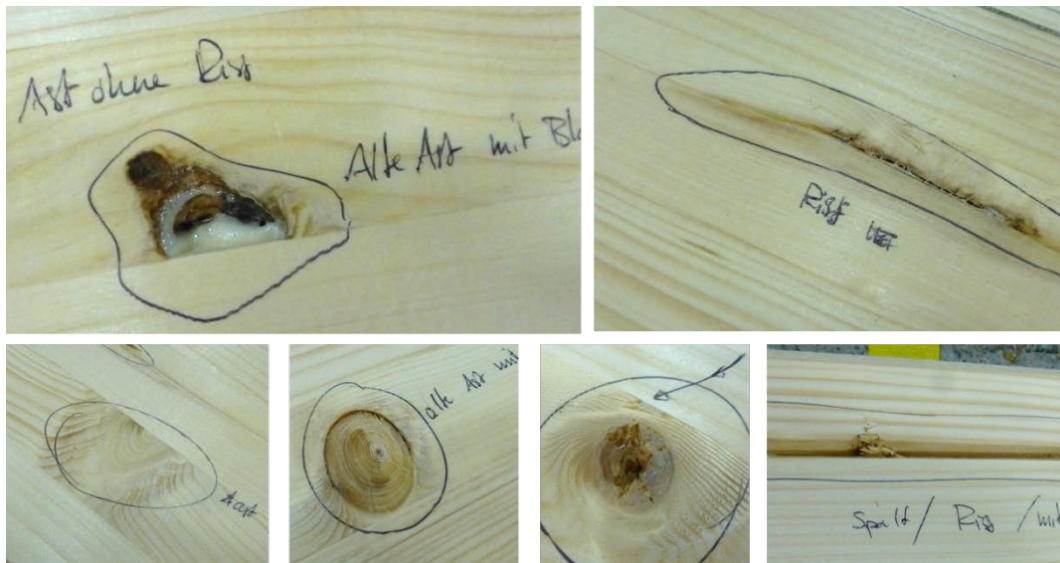


Abbildung 8: Beispiele von möglichen Fehlstellen

2.3.2 Holzfeuchte

Brückentragwerke in Holz unterliegen dem Aussenklima, wodurch es durch das hygroskopische Verhalten von Holz zu einer Änderung der Holzfeuchte im Tragquerschnitt kommt. Die daraus resultierende unterschiedliche Holzfeuchteverteilung im Querschnitt führt zu ungleichem Schwind- und Quellverhalten innerhalb des Querschnitts. Dies wiederum führt zu inneren Spannungen auch in der Fahrbahnplatte und damit zu einer besonderen Beanspruchung des Schubverbundes (Schiere 2016).

Brettspertholzplatten bzw. alle geklebten Vollholzprodukte werden heute in der Regel mit einer Holzfeuchte von 11M% +/- 2M% ausgeliefert. Im Gebrauchszustand kann man bei einer «geschützten Brücke», d.h. alle Holzbauteile sind durch Abdichtungen bzw. Bekleidungen vor direkter Bewitterung geschützt, eine Ausgleichsfeuchte von 18 M% +/- 2M% erwarten (Müller et al. 2017). Deshalb sollte zur Vermeidung von hohen inneren Spannungen, die Holzbauteile schon vor der Montage schonend auf eine Holzfeuchte von 14 – 15 M% konditioniert werden.

Die Feuchtigkeit von mineralischen Untergründen darf für die Applikation der Versiegelung z.B. FLK 5M% nicht überschreiten. Das entspricht einer Holzfeuchte von 14.4 M%.

Im aktuellen Entwurf der VSS-40451 ist aus diesem Grund die Holzfeuchte der Fahrbahnplatten auf max. 15 M% als Obergrenze beschränkt.

Bei Instandsetzungen und Erneuerung des gesamten Fahrbahnaufbaus einschl. der Abdichtung kann diese Obergrenze nicht eingehalten werden. Hier kann die Holzfeuchte z.B. infolge Leckagen in der Abdichtung weit über 20M% bis zu 30M% betragen.

Wie in Kap. 2.2.1 aufgeführt, wurden daher aus «Vorsicht» teilweise auch Holzbrücken, welche ursprünglich mit Verbundsystem ausgeführt waren, bei der Instandsetzung, neu ohne Verbund ausgeführt. Da dies unbefriedigend ist, wird im Kapitel 6 spezifisch darauf eingegangen.

2.4 Abdichtungssysteme im Verbund

2.4.1 Versiegelung aus Epoxidharz

Die Epoxidharzversiegelung wird in der Praxis meist zweilagig aufgebracht. In der ersten Schicht wird die Grundplatte mit ca. 500 g/m² versiegelt und mit einem feuergetrocknetem Quarzsand (Korngrösse 0.6 mm bis 1.2 mm, 4 kg/m²) zum Aufräumen der Oberfläche (zur PBD-Bahn) abgestreut. In der Regel wird, sobald die erste Lage ausgehärtet ist, eine zweite Epoxidharzlage aufgebracht. Die zweite Epoxidharzlage kann auch durch eine Kratzspachtelung (Mischung von Epoxid und Quarzsand im Mischungsverhältnis 1:8) ersetzt werden.

Epoxidharz füllt keine Öffnungen oder Spalten unter einem Durchmesser bzw. einer Breite von 0.1 mm. Die Gefahr ist, dass sich, bei steigenden Temperaturen, die Luft in dieser Öffnung (nach den idealen Gasgesetzen) ausdehnt und sich ein Luftkanal (Leckage) in der Grundierungsschicht bildet. Sobald das Epoxid in eine «Gel-Phase» übergeht, schliesst sich dieser Luftkanal nicht mehr. Es wird deshalb zwingend angeraten, die Grundierung bei sinkenden Temperaturen aufzubringen.

Fehlstellen in der Holzoberfläche sind deshalb vorgängig auszufüllen. Mit einer ersten Lage Epoxidharz, mit einem Roller aufgetragen, werden die Wände der Risse/Öffnungen verschlossen. Anschliessend können die Unebenheiten mit einer Kratzspachtelung bis zu 5 mm Dicke (lokal maximal 10 mm) gefüllt werden.

Das verwendete Epoxidharz ist ein hoch temperaturbeständiges Epoxid (T_g ab 95 °C SIKADUR 188). Im Vergleich hierzu haben normale Epoxidharze eine Glasübergangstemperatur (T_g) von 40 °C bis 60 °C. Die Glasübergangstemperatur ist bei hochtemperaturbeständigen Epoxidharzen kein «harter» Übergang. An trockener Luft ist ein zeitlich begrenztes Ansteigen der Temperaturen auf 140 °C bis 150 °C unproblematisch. Für die Herstellung von Epoxidharzen zur Verwendung als Grundierung/Versiegelung unter Bitumenschweißbahnen werden spezielle Harze mit deutlich höherer Glasübergangstemperatur (T_g) formuliert. Beim Aufflammen der Bahnen müssen diese kurzfristigen Temperaturen bis zu +420°C schadlos bestehen. Der nachfolgende Auftrag von Asphalt mit einer Temperatur von 190°C bis 200°C ist dabei eher vernachlässigbar und als unkritisch zu betrachten.

Dies wird durch Messungen im Zuge des Projektes belegt, bei denen der Temperaturverlauf beim Einbau von z.B. 195°C heissem Gussasphalt messtechnisch erfasst wurde. Die Temperatur auf der Versiegelung ist dabei nicht höher als 110 °C angestiegen (Abb. 22). Durch die schlechte Wärmeleitung der Holzplatte im Vergleich zu einer Fahrbahnplatte aus Stahlbeton bleibt diese Temperatur etwa 30 min auf hohem Niveau und kühlt dann kontinuierlich ab.

Versiegelung aus Polymethylmethacrylat (PMMA)

Das PMMA kann alternativ zu Epoxidharz verwendet werden. Der Vorteil von PMMA ist, dass dies auch bei tiefen Temperaturen sehr schnell abbindet. Für das Produkt ALSAN REKU P70 von SOPREMA wird ein Temperaturbereich von min. 0°C bis max. 30°C, eine maximale relative Luftfeuchtigkeit von 90% genannt wobei die Untergrundtemperatur während der Verarbeitung und Aushärtung mindestens 3°C über dem Taupunkt liegen muss. Die Feuchtigkeit von mineralischen Untergründen darf 5M% nicht überschreiten. Das entspricht einer Holzfeuchte von 14.4 M%.

Bereits nach einer Stunde kann eine weitere Lage aufgebracht werden. Dies lässt eine rasche Versiegelung der Holzplatte zu. Bei der Verwendung von Epoxidharz ist hierzu im Vergleich eine Abbinde-/Trocknungszeit von ca. 24 Stunden notwendig.

Der grosse Nachteil von PMMA ist jedoch, dass es an Holzoberfläche mit einem hohen Anteil an Harz/Terpenen nicht abbindet. Deshalb ist bei der Verwendung von PMMA auf eine sehr gute Oberflächenqualität der Holzwerkstoffplatten (ohne Äste oder Harzgallen) zu achten. Dreischichtplatten dieser Art werden produziert.

PMMA kann auf unterschiedliche Art und Weise in einem Fahrbahnaufbau aufgetragen werden: in Kombination mit einer PBD-Bahn oder mit einer Membrane aus PMMA. Wenn die Versiegelung mit einer PMMA Membran abgedichtet wird, kann diese auch einlagig ohne Quarzsand-Einstreuung aufgebracht werden (Versuchsreihe 1). Wenn die Versiegelung mit einer PBD-Bahn abgedichtet wird, wird auch hier i.d.R. die erste Lage mit Quarzsand abgestreut (Versuchsreihe 2).

Von Flüssigkunststoffen ist bekannt, dass sie abhängig vom Auftragsverfahren (aufgerollt oder aufgespritzt) unterschiedliche Elastizitäten aufweisen können. Aufspritzen führt zu einer höheren Elastizität (AP FLK).

Das PMMA von SOPREMA (ALSAN REKU P70) hat eine T_g zwischen 140 °C und 150 °C. Diese kann mit dem Katalysator nur um ein paar Grad beeinflusst werden (3 °C bei einem Anteil von 3% anstatt 2%). Der Katalysator reguliert die Abbindezeit des PMMA's. Bei einer Materialtemperatur von 20 °C wird ein Anteil von 2 % empfohlen, bei 10 °C ein Anteil von 3%.

2.4.2 Abdichtung aus Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD)

Die Polymerbitumen-Dichtungsbahnen PBD müssen der Norm SIA 281 «Kunststoff-, Bitumen- und Ton-Dichtungsbahnen» entsprechen und eine Nenndicke von 5 mm aufweisen. Unter Schutzschichten aus Gussasphalt müssen diese die Anforderungen für die spezifische Zuordnung MA erfüllen (VSS-40451).

«Die Polymerbitumen-Dichtungsbahnen sind versetzt anzuordnen, mehr als Dreifach-Überlappungen (z.B. am Längs- und Querstoss) sind nicht zulässig. Die Breite von Überlappungen beträgt in der Regel 100 mm, bei Einzelstellen minimal 70 mm und maximal 150 mm».

Die PBD Bahn wird mit einer Gasflamme manuell oder maschinell aufgeflammt und anhand einer schweren Gliederwalze derart angedrückt, dass keine Hohlräume zwischen PBD und Unterlage verbleiben. Kurz nach dem Aufbringen und Abkühlen der PBD Bahn, kann die Schutzschicht aufgebracht werden.

«Abdichtungen aus Polymerbitumen-Dichtungsbahnen sind innerhalb einer Woche mit der Schutzschicht zu schützen. Bei starker Sonneneinstrahlung sind sofort (spätestens am Folgetag) Schutzmassnahmen gegen das Aufheizen der Abdichtung zu treffen» (VSS 40 451).

In der Schweiz werden gemäss SN 40 450 PBD-Abdichtungen einlagig ausgeführt, wobei entsprechende Anforderungen an die PBD-Bahnen gestellt werden. Im Ausland werden

teilweise auch 2-lagige PBD-Abdichtungen ausgeführt. Hier müssen die Bahnen präzise ausgelegt werden, um die Anzahl Lagen bei Überlappungen und Stössen auf ein Minimum zu reduzieren (die Randbahn bei zweilagigem Aufbau beträgt z.B. nur die halbe Bahnbreite). Bei Überlappungen sind weniger als drei Lagen unvermeidbar, bei Stössen liegen vier Bahnen übereinander. Kritisch bei so viele Lagen (sowie bei Stössen einlagiger Abdichtungen) ist, dass keine Lufteinschlüsse zwischen den Lagen vorhanden sind. Dies kann zu Blasenbildung führen.

2.4.3 Abdichtung aus PMMA-Membrane

Der Vorteil von PMMA Membranen ist, dass sie härter sind und bei Verkehrsbelastung weniger kriechen als die PBD-Bahnen. Die PMMA Membranen werden bei Betonbrücken auf vielbefahrenen Strecken bevorzugt. Die PMMA Membran kann ebenfalls entweder aufgerollt oder aufgespritzt werden. Die Membran wird zweilagig aufgebracht (Prüfserie 01 und Prüfserie 02).

Für das Produkt ALSAN 773 von Soprema wird ein Temperaturbereich von min. 0°C bis max. 35°C, eine maximale relative Luftfeuchtigkeit von 90% genannt, wobei die Untergrundtemperatur während der Verarbeitung und Aushärtung ebenfalls mindestens 3°C über dem Taupunkt liegen muss.

Nach der Applikation der Membran ist ein Haftvermittler mit dem Asphalt erforderlich (Tack Coat).

2.4.4 Abdichtung aus Asphaltmastix

Diese hat sich als Abdichtung auf den feuchtesensiblen Fahrbahnplatten aus Holz nicht bewährt. In Milbrandt und Schellenberg (1998) wird zwar auch Asphaltmastix als mögliche Abdichtung genannt. Da jedoch Mastix in den heissen Gussasphalt aufsteigt und dessen mechanische Eigenschaften negativ verändert werden, raten sie von der Verwendung ab. Er wird aus diesem Grund heute als Abdichtung auf Holzbrücken nicht mehr verwendet und ist in der überarbeiteten VSS 40 451 nicht mehr als Abdichtung aufgeführt.

2.5 Asphaltbeläge

2.5.1 Grundsätze

Schutzschichten dienen dem mechanischen Schutz der Abdichtung. Sie müssen kraftschlüssig, vollflächig und dauerhaft mit der Abdichtung verbunden sein (Entwurf VSS 40 451:2022).

Die Deckschicht und die allenfalls vorhandenen Binderschichten bilden die Decke im Systemaufbau. Die Deck- und Binderschicht sind gemäss VSS 40 302 definiert. Bei der Auswahl des Mischgutes ist die Verkehrsbeanspruchungen zu beachten.

2.5.2 Schichten aus Gussasphalt

Als Schutz-, Binder- und Deckschicht wird bei Fahrbahnplatten aus Holz Gussasphalt eingesetzt (VSS-40451). Gussasphalte benötigen für die Verarbeitung Temperaturen 200 bis 220 °C. Diese Bearbeitungstemperatur entzieht der Holzplatte die Feuchtigkeit und kann zu der oben beschriebenen Blasenbildung durch Wasserdampfbildung führen (Milbrandt und Schellenberg, 1998). Die ursprünglichen Einbautemperaturen von bis zu 230°C werden heute durch Beimischung von Additiven gesenkt; je nach Rezeptur und Objekt um bis zu 30 °C (Niedertemperaturasphalt oder niedrigviskoser Asphalt (NVA)).

Die Dicke der unteren Schicht (Schutzschicht) sollte gemäss Milbrandt und Schellenberg (1998) auf Holzunterlagen nicht mehr als 25 mm betragen. Somit kühlt der Asphalt schneller ab und verhindert dadurch einen zu grossen Dampfdruck. Diese Anforderung macht bei Strassenbrücken mit einer Gesamtdicke des Gesamtaufbaus von mehr als 70

mm einen 3-lagigen Aufbau erforderlich. Dies führt zu höheren Kosten, längeren Bauzeiten und zu zusätzlichen Risiken, auf Grund der verschiedenen Schichtübergänge zwischen den Belagsschichten.

3 Versuchsreihen zum Systemaufbau mit Verbund

3.1 Versuchsaufbauten und verwendete Materialien

In allen Prüferien standen die folgenden Varianten im Vordergrund:

- 1) Variation der Grundplatte:
 - a) Brettsperrholz (CLT, BSP)
 - b) Furnierschichtholz (LVL)
 - c) Brettschichtholz (BSH) (für quervorgespannte Fahrbahnplatten)
 - d) Beton
- 2) Variation der Grundierung/Versiegelung und Abdichtung:
 - a) Epoxidharz (SIKADUR 188) mit PBD-Abdichtung
 - b) PMMA-Versiegelung (ALSAN REKU P70) mit PBD-Abdichtung
 - c) Bituminöser Anstrich mit PBD-Abdichtung
 - d) Primer mit PBD-Abdichtung
 - e) PMMA-Versiegelung und -Abdichtung (Eliminator und ALSAN 773)
- 3) Variation der Belag:
 - a) Niederviskoser Gussasphalt (NVA) als MA 8
 - b) Niederviskoser Gussasphalt (NVA) als MA 11
 - c) Gussasphalt ohne Niedertemperaturmodifikation MA 11
- 4) Feuchtigkeit der Platten:
 - a) 12 M% Holzfeuchte
 - b) 18 M% Holzfeuchte
 - c) 24 M% Holzfeuchte

In Tabelle 2 sind die Plattennummern mit dem Aufbau der Varianten aufgeführt. In Prüferie 01 wurden Platten P01 bis P24 verwendet. Einige Platten aus dieser Serie wurden erst in Serie 02 (P31-P44, K1-K6, P1-P3) verwendet. Auch wurden an einigen Platten Vorversuche zur Applikation von PMMA als Versiegelung und Abdichtung durchgeführt. In Serie 03 wurden die Platten P51-P54 verwendet.

Tabelle 2 : Plattennummer und Variantenaufbau

Platte	Material	Versiegelung	Abdichtung	GA	Feuchte	
P01	BSP					Nicht verwendet
P02	BSP					Nicht verwendet
P03	BSP	PMMA (P70)	PMMA (773)	MA 11 (230°C)	12 M%	
P04	BSP					Nicht verwendet
P05	BSP					Nicht verwendet
P06	BSP	PMMA (P70)	PMMA (773)	MA 8	12 M%	
P07	BSP	PMMA (P70)	PMMA (773)	MA 8	12 M%	
P08	BSP	EP	PBD	MA 11 (230°C)	12 M%	
P09	BSP	PMMA (P70)	PMMA (773)	MA 8	12 M%	

P10	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	Mit Glasvlies
P11	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P12	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	Mit Glasvlies
P13	BSP	EP	PBD	MA 11 (230°C)	12 M%	Nass
P14	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P21	Beton	EP	PBD	MA 8	3 M%	
P22	Beton	EP	PBD	MA 11 (230°C)	3 M%	
P23	Beton	PMMA (P70)	PMMA (773)	MA 8	3 M%	
P24	Beton	PMMA (P70)	PMMA (773)	MA 11 (230°C)	3 M%	
P31	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P32	BSP	EP	PBD	MA 11	12 M%	
P33	BSP	PMMA (P70)	PBD	MA 8	12 M%	
P34	BSP	Bit. Anstrich	PBD	MA 8	12 M%	
P35	BSP	Primer RKH	PBD	MA 8	12 M%	
P36 (P31)	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P37 (P31)	BSP	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P38	BSP	PMMA (EI)	PMMA (EI)	MA 8	12 M%	
P39	BSP	PMMA (EI)	PMMA (EI)	MA 11	12 M%	
P40 (P33)	BSP	PMMA (P70)	PBD	MA 8	12 M%	
P41	BSP	EP	PBD	MA 8	18 M%	
P42	BSP	EP	PBD	MA 11	18 M%	
P43	BSP	Primer RKH	PBD	MA 11	18 M%	
P44	BSP					Vorversuch
K1	Furnierschichtholz	EP	PBD	MA 8	24 M%	
K2	Furnierschichtholz	EP	PBD	MA 8	18 M%	
K3	Furnierschichtholz	PMMA (EI)	PMMA (EI)	MA 8	12 M%	
K4	Furnierschichtholz	PMMA (EI)	PMMA (EI)	MA 11	12 M%	
K5	Furnierschichtholz	EP	PBD	MA 8	12 M%	
K6	Furnierschichtholz	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P1	BSP	EP	PBD	MA 8	24 M%	Aus Serie 01
P2	BSP	EP	PBD	MA 11	24 M%	Aus Serie 01
P3	BSP	Bit. Anstrich	PBD	MA 11	24 M%	Aus Serie 01
P51	BSH	EP	PBD	MA 8	12 M%	
P52 (P51)	BSH	EP	PBD	MA 8	12 M%	verspachtelt
P53 (P51)	BSH	EP	PBD	MA 8	12 M%	50% verspachtelt
P54 (P51)	BSH	EP	PBD	MA 8	12 M%	verspachtelt

3.2 Grundplatten

Für die Prüfserien 01 und 02 wurde Brettsperrholzplatten der Firma Schilliger AG in den Abmessungen 2 m x 7 m verwendet, welche mit 5 Lagen je 20 mm zu einer Gesamtdicke von 100 mm, mit Holz der Festigkeitsklasse C24 aufgebaut waren. Die Oberflächenqualität war als 'D' definiert: Astlöcher oder andere Oberflächenfehler wurden nicht verspachtelt. Die Platten wurden als Prüfkörper zu 14 Einzelplatten mit den Abmessungen 1.0 m x 1.0 m zugeschnitten.

Für die Prüfserie 04 wurden Brettsperrholzplatten Fabr. CLT Suisse, JPF Ducret verwendet. Auch diese wurden in Abmessungen von 1.0 m x 1.0 m jedoch mit einem Aufbau von 3 Schichten von je 40 mm für eine Gesamtdicke von 120 mm geliefert. Eine Seite der Platte wurde verspachtelt (Qualität C: Industrie-sicht), die andere Seite wurde nicht bearbeitet (Qualität D: Industrie).

Die 100 mm dicke Furnierschichtholzplatten wurden aus zwei aufeinander geklebten Platten von je 50 mm Dicke hergestellt. Die Platten wurden in Abmessungen von 0.98 m x 0.98 m geliefert.

Die Brettschichtholzplatten der Festigkeitsklasse GL24h wurden in der Holzart Fichte/Tanne mit Abmessung von 1.0 m x 1.0 m und einer Dicke von 100 mm bei der Roth Burgdorf AG hergestellt.

Die Klimatisierung der Platten in Prüfserie 02 gelangte in die Klimakammern der BFH (Dreifachklimakammer) und IMP Bautest. Die BSP-Platten wurden zu trocken geliefert (9 M%). Die Zielfeuchten wurden mit einer zweimonatigen Klimatisierung erreicht. Die feuchtesten Platten wurden teilweise mit deionisiertem Wasser, in Form von Sprühnebel, befeuchtet. Damit konnte die Auffeuchtung des Holzes beschleunigt werden. Die Platten mit einer Zielfeuchte von 24 M% wurden in einem klimatisierten Lagerraum der IMP Bautest bei einer Luftfeuchtigkeit von 100% aufgefuechtet, Auch diese Platten wurden zusätzlich durch Aufsprühen von deionisiertem Wasser befeuchtet. Die gemessenen Holzfeuchten sind in

Abbildung 15 sichtbar.

An der Berner Fachhochschule AHB in Biel, wurden vier Betonplatten, mit Abmessungen von 0.8 m x 0.8 m x 100 mm, hergestellt. Da die Betonplatten ohne Stahlarmierung hergestellt wurden, mussten diese auf Paletten gelagert und transportiert werden. Der Beton wurde nach den «Vorgaben Tiefbaubetone für Kunstbauten des Kantons Bern, Anhang 1A, Tiefbaubetone für Kunstbauten», gemäss Norm SN EN 206:2013+A1:2016 gewählt: Klasse F(T3) Kranbeton. Das entsprach eine Mindestdruckfestigkeit C30/37 mit einem Nennwert des Grösstkorns von 32 mm. Die Feuchte der Platten wurde am 21. Oktober 2020 mit einem Tramex CME4 gemessen.

3.2.1 Versiegelung und Abdichtungen

In der Versuchsreihe wurden fünf mögliche Materialkombinationen für Versiegelung und Abdichtung appliziert (vgl. Seite 37).

Variante 2a: Epoxidharz-Versiegelung mit aufgeschweisster Polymerbitumen-Dichtungsbahn SOPREMA Impact MA/AC ts.

Dies ist eine Abdichtungssystem welches auf Betonbrücken üblicherweise verwendet wird. Die Grundierung aus Epoxidharz (SIKADUR 188) wurde mit Quarzsand K103 (0.6 mm-1.2 mm Körnigkeitsgrösse) abgestreut. Die Grundierung (erste Lage mit Quarzsand) und die Versiegelung (zweite EP Lage) wurden an zwei nachfolgenden Tagen appliziert.

Variante 2b: PMMA Versiegelung ALSAN REKU P70, zweilagig appliziert, mit aufgeschweisster Polymerbitumen-Dichtungsbahnen SOPREMA Impact MA/AC ts. In die Grundierungsschicht wurde wie bei Epoxidharzgrundierungen Quarzsand (K103) mit einer Korngrösse von 0.6 bis 1.2 mm eingestreut

Variante 2c: Bituminöser Anstrich Elastocol 500 (SOPREMA) einlagig mit aufgeschweisster Polymer-Bitumen-Dichtungsbahn SOPREMA Impact MA/AC ts (Abbildung 9).

Variante 2d: Primer RKH (Aeschlimann AG), einlagig, mit aufgeschweisster Polymerbitumen-Dichtungsbahnen SOPREMA Impact MA/AC ts (Abbildung 9).



Abbildung 9 : Applikation von Elastocol 500 (links) und Primer RKH (rechts)

Das PMMA (Variante 2e auf Seite 37; ehem. Stirling Lloyd, derzeit GCP Applied Technologies) Eliminator wurde an zwei unterschiedlichen Tagen aufgespritzt. Part 1 wurde am ersten Tag appliziert. Part A (gelbfarbig) und Part B (weissfarbig) wurden am zweiten Tag aufgebracht; die Applikation erfolgte in Schichtdicken von etwa 1.2 mm mit 200 Pa Druck (Abbildung 10). Die Reihenfolge ist nicht wichtig, es können zweimal dieselben Schichten aufgebracht werden. Der Unterschied in Farben ermöglicht eine optische Kontrolle der korrekten Applikation. Das Tack Coat (Haftvermittler) wurde auch am zweiten Tag aufgebracht.



Abbildung 10 : Aufbringen des Part A und Part B (links) auf der Part 1 Lage und das Aufbringen der Tack Coat (rechts)

Ein zweites PMMA-System (Variante 2e auf Seite 37) wurde mit SOPREMA Produkten erprobt (Abbildung 11). In einem ersten Schritt wurde eine Schicht REKU P70 aufgebracht (3% Katalysator, ca. 600 g/m²) und danach zwei Schichten REKU 773 (2% Katalysator, 2 x Nachrollen mit Stachelwalze (ENG: Spiked Roller)). Am nachfolgenden Tag wurde noch eine Lage ALSAN Connect aufgestrichen. Es wurde festgestellt, dass die Versiegelungslage auf Astlöcher und Harzgallen, infolge der hohen Harzanteile (Terpenen), nicht gut aushärtete.

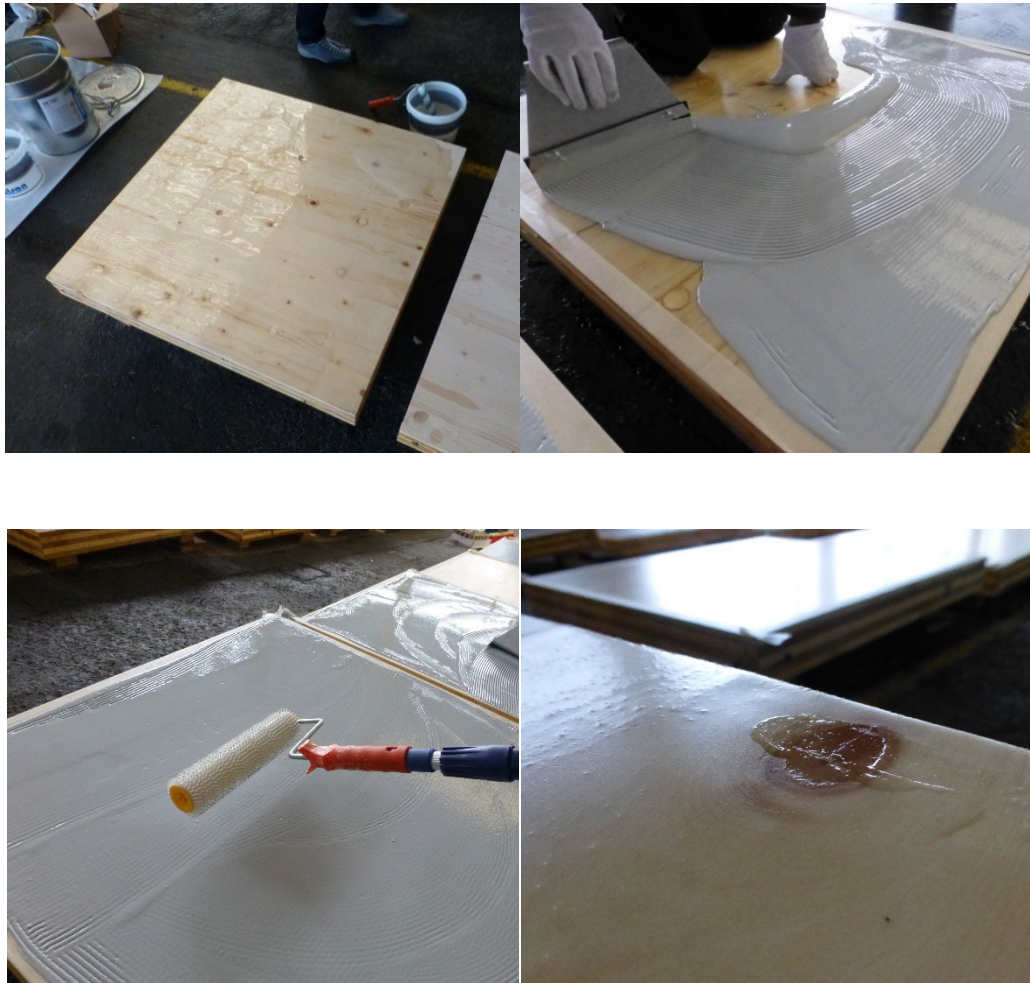


Abbildung 11: Aufbringen der PMMA Grundierungslage (links oben), die 1. Abdichtungslage (rechts-oben), der Stachelwalze (links unten), und der nicht ausgetrocknete Versiegelungslage auf einen Ast (rechts unten)

In der zweiten und dritten Prüferie wurden für das bessere Aufklammern der PBD-Bahn (Sopralen Impact MA/AC FL) die Platten der Prüfkörper (bis zu sechs Platten) aneinandergestossen und nivelliert. Auf dieser gemeinsamen Fläche der Holzplatten konnten die PBD-Bahnen mit einer Gliederwalze aufgeklammert werden. Dieses Vorgehen ist realitätsnah. Nach dem Aufklammern wurden die Platten getrennt.



Abbildung 12: Das Applizieren der PBD-Bahnen auf die Epoxidharzversiegelungen mit Flamme und Gliederwalze zur Verteilung der Anpresskraft

3.2.2 Gussasphalt

Es wurde mit drei verschiedenen Asphaltarten gearbeitet (Variante 3a, 3b, und 3c auf Seite 37): MA 8 in einer Schichtdicke von 25 mm (NVA) und MA 11 in einer Schichtdicke von 40 mm (NVA und normal). Die Zieltemperatur des MA NVA war 190°C und die des nicht modifizierten MA 230 °C. Die Temperaturen wurden vor der Applikation mit einem Metra© Asphalt-Thermometer gemessen.



Abbildung 13: Aufwärmung des Asphalts im Kocher (links) und Messung der Temperatur in Holzkübel vor Applikation (rechts)

3.2.3 Rohdichte und Klimatisierung der Grundplatten

Die Rohdichte der Holzplatten wurde anhand der Masse und des Volumens der Platten bestimmt. Die mittlere Rohdichte betrug 440 kg/m³ (Abbildung 14, links). Die Feuchte der Holzplatten wurde an drei Stellen gemessen, die Mittelwerte sind auch in Abbildung 14

(rechts) dargestellt. Der Mittelwert von allen Platten betrug 9.3 M%, fast 3 M% tiefer als der Zielwert von 12 M%. Die mittlere Feuchte der Betonplatten betrug 3.9 M%, wo eine Zielfeuchte von 3 M% vorgesehen war. Diese relativ hohe Feuchte lag knapp unter dem maximal zulässigen Wert von 4 M%.

Die gemessene Holzfeuchte nach der Klimatisierung der Platten der Prüfsreihe 02 ist in **Abbildung 15** dargestellt.

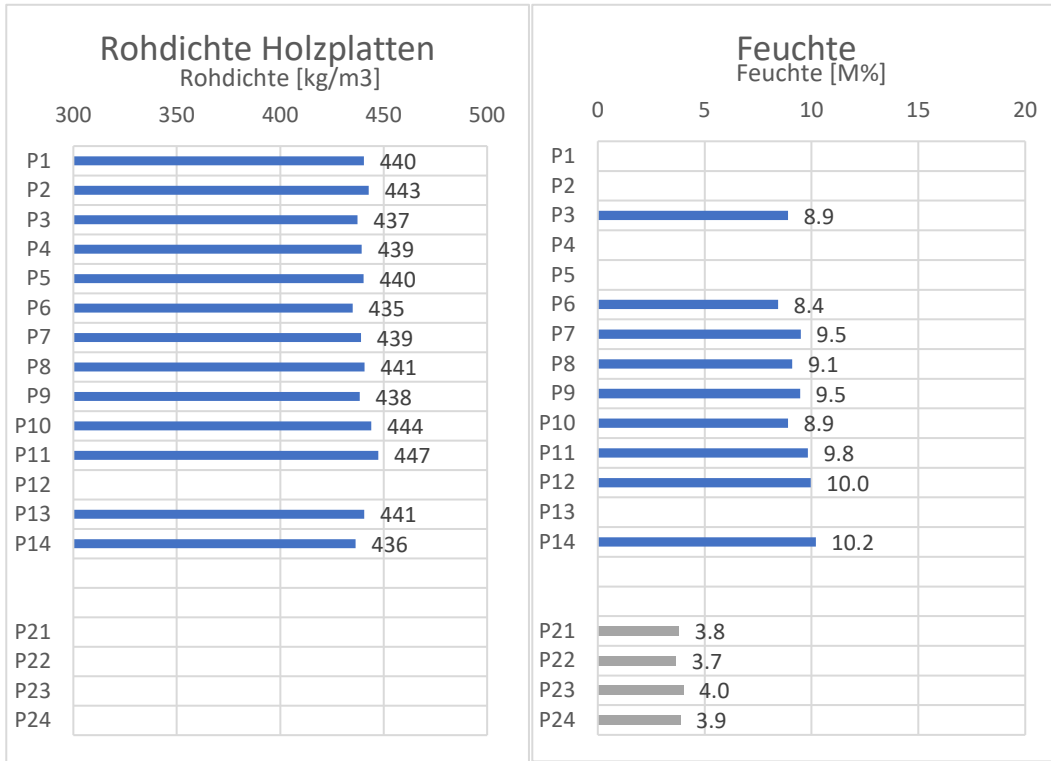


Abbildung 14: Die berechnete Rohdichten und Mittelwerte der gemessenen Feuchten der Platten in Prüfsreihe 01 am 21. Oktober 2020

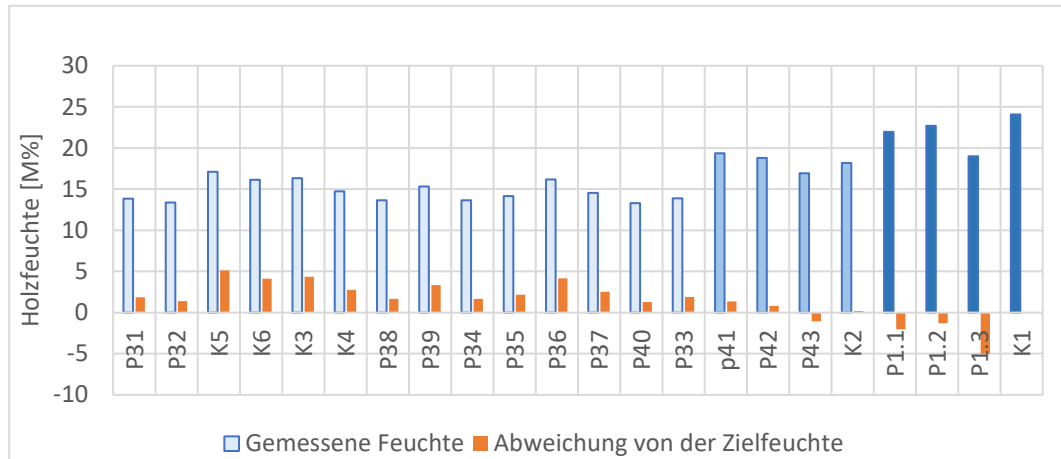


Abbildung 15: Mittelwerte der gemessenen Holzfeuchten und ihre Abweichung zu der Zielfeuchte in Prüfserie 02

3.2.4 Prüfkörperentnahme

Während und nach der Herstellung der Platten wurden Tests durchgeführt:

- Haftzugversuche (HZ) (während der Herstellung) auf allen Schichten:
 - Grundierung (3x),
 - Abdichtung (3x), und
 - Schutzschicht (3x)
- Leutner (L) oder Advanced Shear Tests (AST) nach der Herstellung (3x)
- Schubschwellversuche (SSV) nach der Herstellung (4x)

In der Prüfserie 01 waren noch Prüfkörper für Blasenbildungsversuche (B) vorgesehen. Die Probekörperentnahme wurde wie in Abb. 16 ausgeführt.

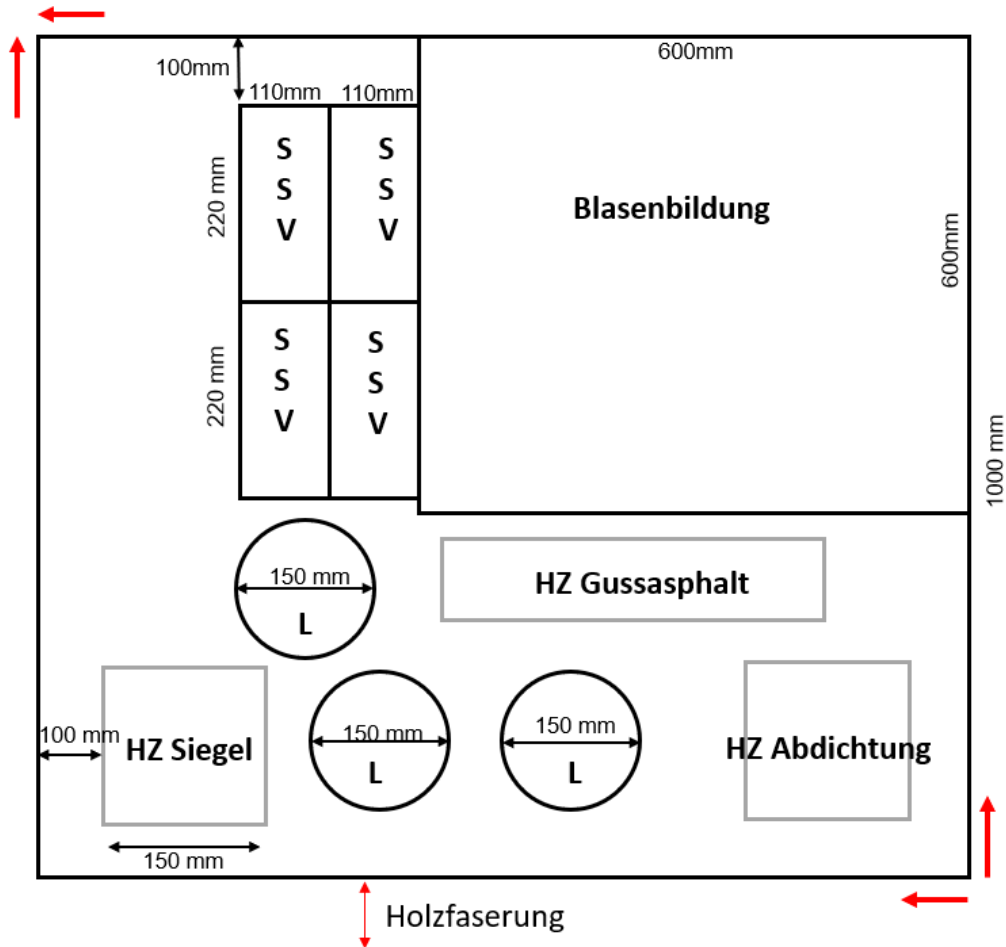


Abbildung 16 : Darstellung der geplanten und ausgeführten Probekörperentnahme für Haftzugprüfungen (HZ), Blasenbildungsanalyse, Leutner (L) und Schubschwellversuche (SSV) (Ch. Angst)

3.3 Erste, zweite, und dritte Prüfserie

In Prüfserie 01 wurden die Platten im überdachten Werkhof der Aeschlimann AG in Zofingen (AG) hergestellt. Die Umgebungstemperatur lag zwischen 10 und 15°C, die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 95 %.

Im Unterschied zum Vorgehen, welches im Kapitel 3.2.1 beschrieben ist, erfolgte das Aufschneiden der PBD pro Platte in einzelnen Meterabschnitten (siehe auch Abbildung 12). Der Ablauf ist in Abbildung 17 dargestellt.

In Prüfserie 02 wurden die Platten im überdachten Werkhof der Aeschlimann AG in Zofingen (AG) bearbeitet d.h. die gewünschten Fahrbahnaufbauten hergestellt. Die Umgebungstemperatur betrug 20°C.

In der Prüfserie 03 wurde die Applikation des Asphalts auf Brettschichtholzplatten erprobt. Diese Versuche fanden an der BFH in Biel statt.

Eine Platte wurde speziell zum «Provozieren» von Blasenbildung bearbeitet. Hier wurden absichtlich Löcher von 2 mm bis 4 mm Durchmesser vor dem Aufklappen der PBD in der Versiegelung gebohrt. Der Ablauf ist in Abbildung 17 in Bildern festgehalten worden.

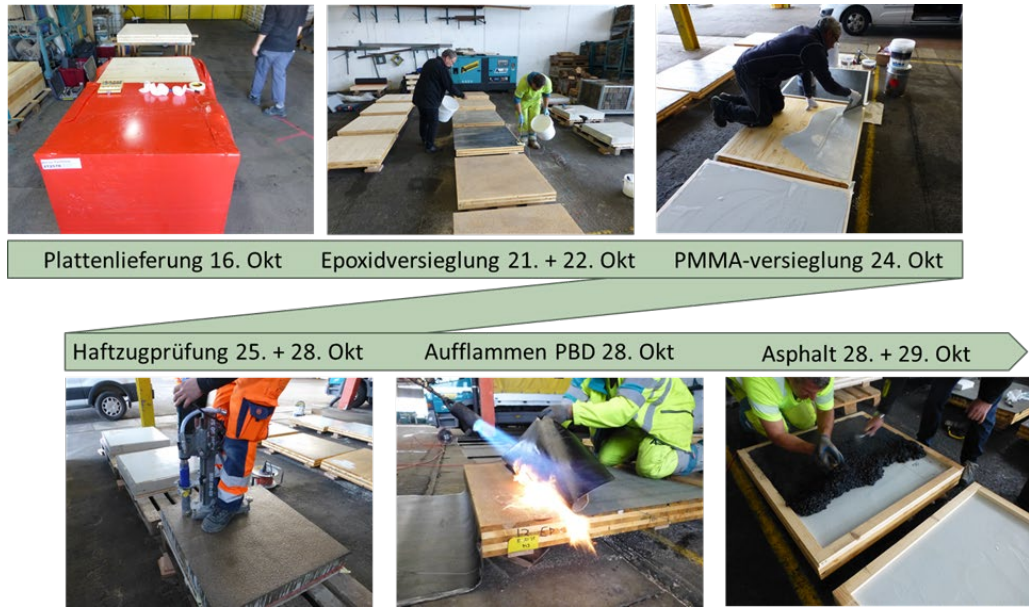


Abbildung 17 : Darstellung des Ablaufs der Prüfserie 01 im Werkhof der Aeschlimann AG in Zofingen (AG), von Plattenlieferung bis zum Asphalteinbau



Abbildung 18: Darstellung des Ablaufs der Prüfserie 02 im Werkhof der Aeschlimann AG in Zofingen (AG), von Plattenlieferung bis zum Asphalteinbau



Abbildung 19 : Darstellung der Ablauf der Prüfserie 03 in Biel, von der Plattenlieferung bis zum Asphalteinbau

3.4 Temperaturmessungen

3.4.1 Materialtemperatur

Die Temperaturmessungen erfolgten mit K-Element Sensoren (Abbildung 20). Die Thermoelemente bestehen aus einem zweiadrigen Kabel, aus unterschiedlichen elektrischen Leitern, die am Ende zusammengeschweisst werden. Eine temperaturabhängige Spannungsdifferenz, die zwischen den Metallen entsteht, ermöglicht die Messung der Temperatur. Die Messung ist unabhängig von der Kabellänge und den Temperaturschwankungen entlang der Kabel, wie es bei Messungen von Temperaturen mit PT100 Sensoren der Fall ist. Hier wird der Widerstand der Kabel in der Messung berücksichtigt. An dem Almemo©-Stecker des K-Elements wurde die Referenztemperatur gemessen. Vor der Applikation des Gussasphaltes wurde die Temperatur mit einem Metra Asphalt Thermometer gemessen (Abbildung 20).

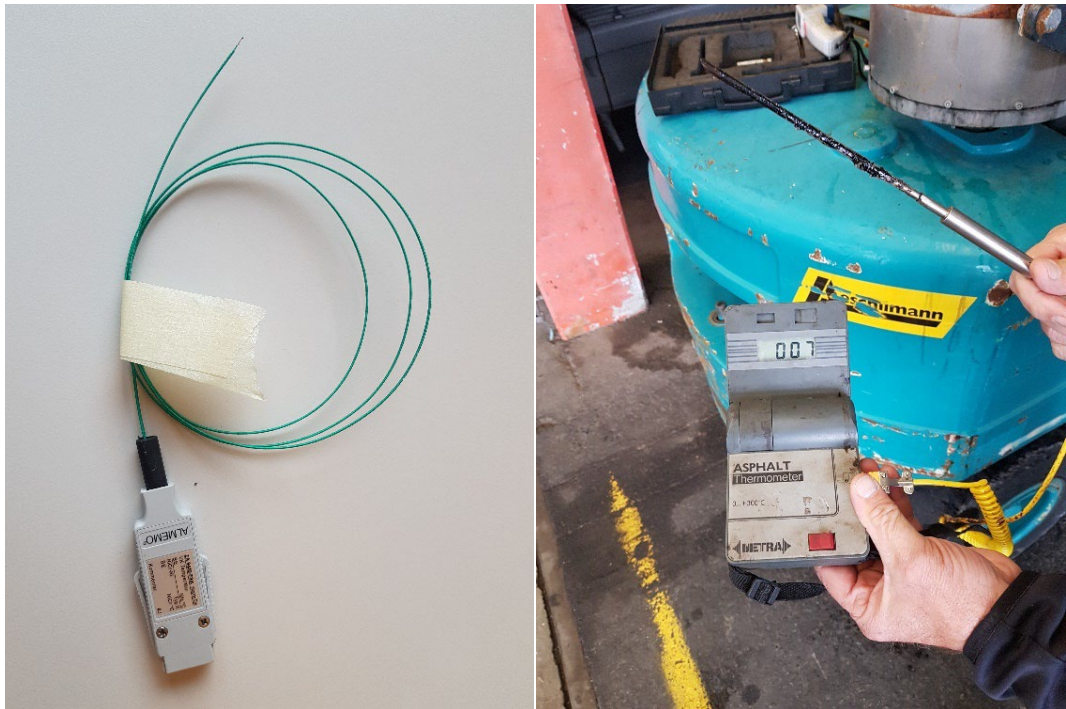


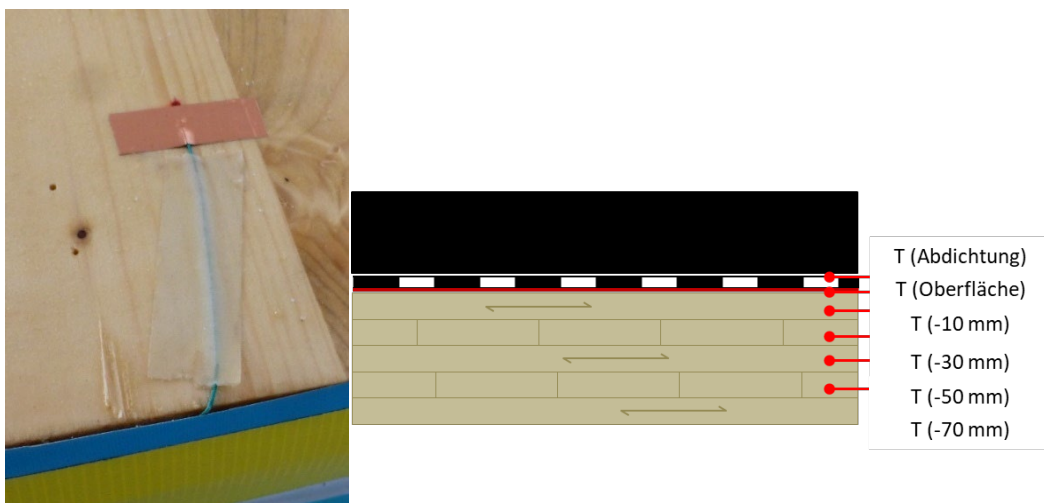
Abbildung 20: K-Element Temperatursensor mit dem Almemo®-Stecker (links) und Metra® Asphalt Thermometer rechts)

Die Temperatursensoren (K-Element) wurden an den Schichtübergängen oder im Gussasphalt positioniert. Die Sensoren wurden von der Seite der Platten, entlang der Temperaturisothermen verlegt. Die Positionen der Temperatursensoren sind in Tabelle 3 und *Abbildung 21* ersichtlich. In Tabelle 3 sind die maximale Anzahl Positionen aufgeführt, wobei dieses Vorgehen nur an einzelnen Platten ausgeführt wurde. In den Schichtübergängen und in den Holzplatten wurden auch Temperaturen gemessen. Die Sensoren wurden mit einem Kupferklebeband (*Abbildung 21*) fixiert.

Tabelle 3: Position der Temperatursensoren in den Aufbauten mit Holz- oder Betonuntergrunde

Material	Schichtübergang	Prüfserie 01	Prüfserie 02	Prüfserie 03
Messfrequenz		Je 2 Sekunden	Je 2 Sekunden	Je 2 Sekunden
Gussasphalt		X		
	Abdichtung/Gussasphalt	X	X	X
	Grundplatte/Abdichtung	X	X	X
10 mm unter Abdichtung		X	X	
30 mm unter Abdichtung		X	X	
50 mm unter Abdichtung			X	
70 mm unter Abdichtung			X	

Für die Messung der Materialtemperatur wurden in der Holzplatte wurden 90 mm tiefe Löcher mit 3 mm Durchmesser gebohrt. Auf die Spitze der Sensoren wurde vor der Montage eine leitfähige Paste appliziert. Nach dem Einbau der Sensoren wurde das Loch mit einer Silikon-Dichtmasse abgedichtet.

**Abbildung 21 :** Ein K-Element Sensor auf der Oberfläche einer Holzplatte vor Anbringen der Epoxidharz-Grundierung (links) und die Darstellung der Positionen der Sensoren in den unterschiedlichen Schichten/Materialien (rechts)

3.4.2 Temperaturverläufe anhand Messungen in Platten P31 und P32 (Prüfserie 02)

Temperaturmessungen wurden an vielen Platten gemacht. Da die Platten P31 (Holzuntergrund, PBD, MA 8) und P32 (Holzuntergrund, PBD, MA 11) mit vielen Sensoren bestückt wurden, sind Temperaturverläufe und Temperaturgradienten gut aus den Messdaten herauszulesen.

Aus der Abbildung kann das Folgende abgelesen werden:

- Die Höchsttemperatur an der Oberfläche der Holzunterlage liegt bei beiden Platten bei ca. 105 °C.
- Temperaturen an der Oberfläche der beiden Platten sind vergleichbar
- Die Unterschiede zwischen den Temperaturen an der Holzoberfläche und in 10 mm Tiefe betragen ca. 30 °C (3 °C/mm). Unmittelbar nach der Applikation des Asphaltes, sind diese Temperaturgradienten am grössten.

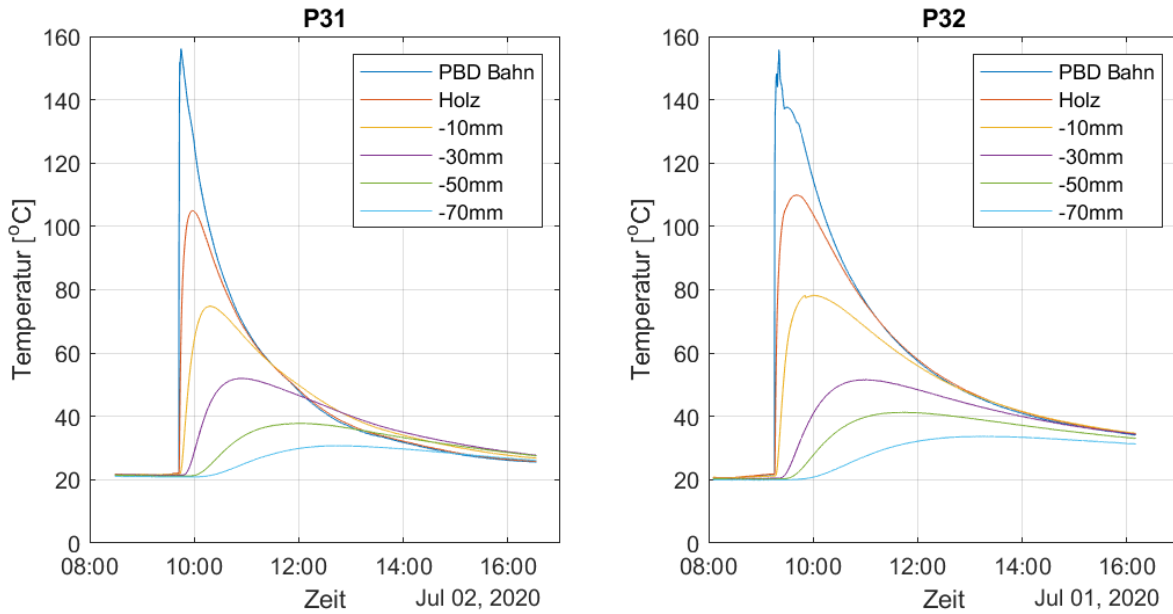
Das wird nachfolgend noch weiter in Tabelle 4 analysiert. Einbautemperatur des Gussasphaltes war 188 °C (MA 8) und 194 °C (MA 11). Die Temperatur der Holzplatten war 22°C (P31) und 21°C (P32). Die Höchsttemperaturen an den Oberflächen waren 105°C und 110 °C. Die Temperaturgradienten bei der Höchsttemperatur liegen zwischen 3.5 °C/mm und 4.0°C/mm.

Die Wärme kann nicht genau nachgerechnet werden, aber ein relativer Vergleich der Platte P31 und P32 ist möglich. Das wird mit folgender Formel betrachtet, nur für die Holzplatte:

$$Q = C \int T dm \quad (1)$$

Diese kann als Trapezoide der Plattenhöhe, über die verschiedenen Messpunkte (Oberfläche, -10 mm, -30 mm, -50 mm, -70 mm), berechnet werden. Die Energie ist das Integral der Wärme über die Zeit:

$$W = \int Q dt \quad (2)$$



Aus der Abbildung lässt sich auch ablesen, dass MA 11 (wahrscheinlich wegen seiner grösseren Schichtdicke) für leicht höhere Temperaturen auf der Holzoberfläche sorgt als MA 8. Auch sind die Höchsttemperaturen über eine längere Zeit anwesend als auf der Platte mit MA 8.

Milbrandt und Schellenberg (1999) empfehlen mit einer Schutzschicht aus MA 8 zu arbeiten. Dickere Schutzschichten führen wegen höherem Energieeintrag zu Blasen. Aus Abbildung 22 kann dies aber nicht nachgewiesen werden. Am Anfang, gerade nach der Applikation der Schutzschicht, ist die Temperatur zwar etwas höher, aber die Gesamtmenge an Energie ist auf der Platte P32 auch nach 2 Stunden nur 12% höher, als auf der Platte P31 (Tabelle 4).

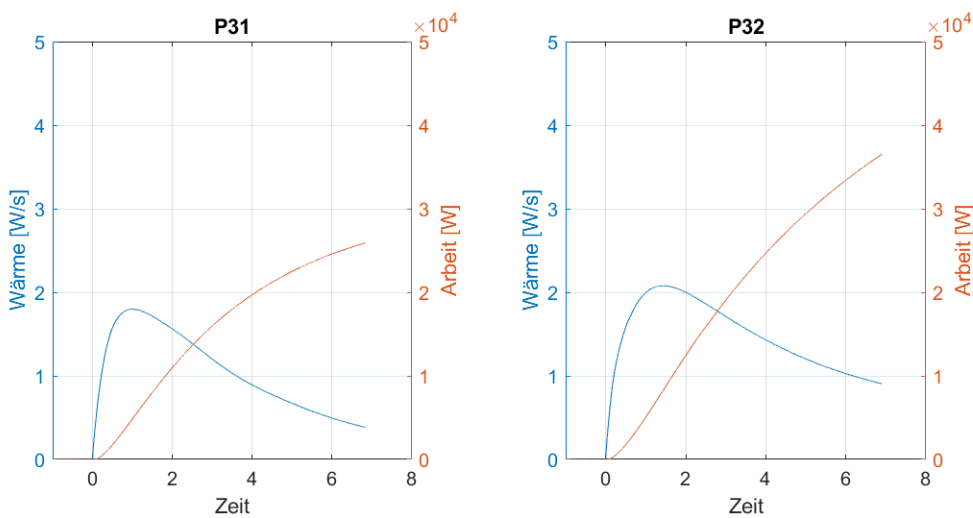


Abbildung 22: Wärmeeintrag und «Arbeit» in den Platten P31 und P32 (Berechnung)

Tabelle 4 : Analyse der Temperaturverläufe in Platte P31 und P32

	P31	P32
Gussasphalt	MA 8 (25 mm)	MA 11 (40 mm)
Einbautemperatur Gussasphalt	188 °C	194 °C
Temperatur Platte	22 °C	21 °C
Maximaltemperatur Oberfläche	105 °C	110 °C
Temperaturgradient Oberfläche bei Höchsttemperatur	4.0 °C/mm	3.4 °C/mm
Verhältnis Energieeintrag nach 2 Stunden	P31/P31 (2 Std) 1	P32/P31 (2 Std) 1.12
Verhältnis Energieeintrag nach 3 Stunden	P31/P31 (4 Std) 1	P32/P31 (4 Std) 1.25
Verhältnis Energieeintrag nach 4 Stunden	P31/P31 (6 Std) 1	P32/P31 (6 Std) 1.36

3.4.3 Einfluss der Holzfeuchte auf die Oberflächentemperatur

Aus Abbildung 24 lässt sich einen Einfluss der Holzfeuchte auf die Oberflächentemperatur ablesen. Dieser wird in Abbildung 23 nochmals verglichen. Es ist ein leichter Einfluss der Holzfeuchte auf die Oberflächentemperatur erkennbar. Das würde bedeuten, dass eine feuchte Holzplatte eine höhere Temperaturleitfähigkeit hat.

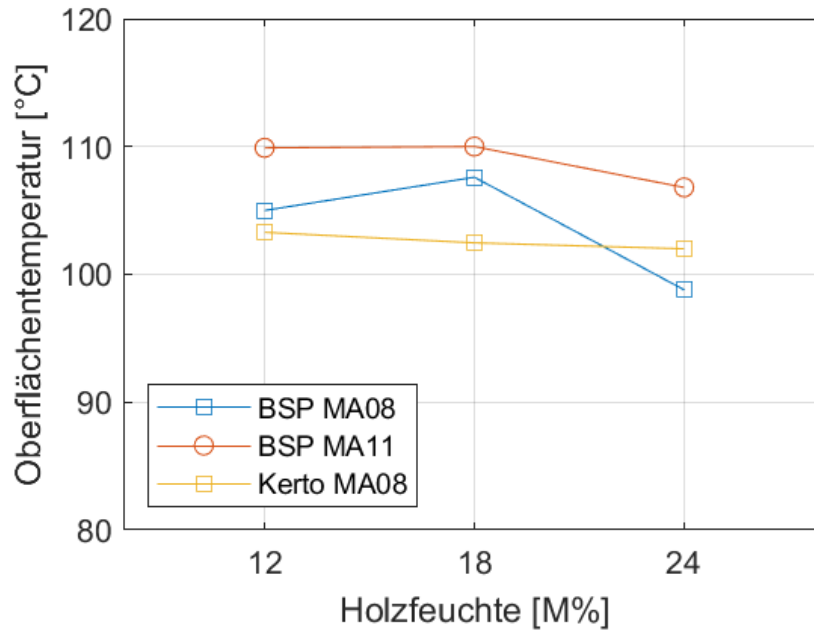


Abbildung 23: Vergleich der maximale Oberflächentemperatur nach Holzfeuchte

3.4.4 Vergleich von Temperaturen, die an den Oberflächen gemessen wurden

Die Temperaturen aus den drei Serien werden miteinander verglichen. Wie in Tabelle 4 aufgezeigt, wurden Höchsttemperaturen auf Platte P31 und P32, respektive 105.0 °C und 109.9°C gemessen. Der Gussasphalt wurde auf P32 mit eine 6 °C höhere Temperatur aufgebracht. Die Temperatur des Gussasphalts aus dem Kocher ist höher, als die Temperatur, die auf der Oberfläche der Holzplatten gemessen wurde. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass die Temperatur im Kocher nicht kontinuierlich gemessen wurde.

Es wird eine genauere Betrachtung der Temperaturen vorgenommen, in welchem der Einfluss der Temperatur der Holzplatte vor den Versuchen, die Gussasphalttemperatur, und die Maximaltemperatur an der Oberfläche einbezogen wird. Folgende Formel wird dafür angewendet:

$$T_o = f_{TO} (T_s + T_{GA}) \quad (3)$$

Anhand dieser Formel kann der Faktor f_{TO} berechnet werden. Diese wird für alle drei Prüferien in Abbildung 24 dargestellt. Anhand von Simulationen mit einer spezifischen «Software zur realitätsnahen instationären Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen WUFI® (Wärme Und Feuchte Instationär)», wurde dieser Faktor f_{TO} verifiziert. Der Faktor aus den Simulationen hat zwar ein anderer Wert, er entspricht aber demjenigen aus den Experimenten. Die Unterschiede

können den Materialparameter zugewiesen werden. Der Einfluss der Temperatur der Holzoberfläche wird in (links)

Abbildung 25 abgebildet und verglichen. Hier wurde der Trend aus allen Versuchen berechnet, bei welchen eine Einbautemperatur des Gussasphaltes zwischen 190 °C und 200 °C lag. Auch dieser Verlauf wurde anhand von Simulationen verifiziert. Hier ist ersichtlich, dass die Temperaturen aus der Simulation tiefer liegen als die aus den Messungen. Zwischen MA 8 und MA 11, beide in der Simulation mit 190 °C eingebaut, wurde eine Oberflächentemperatur von 81.2 °C, respektive 92.1 °C, gemessen.

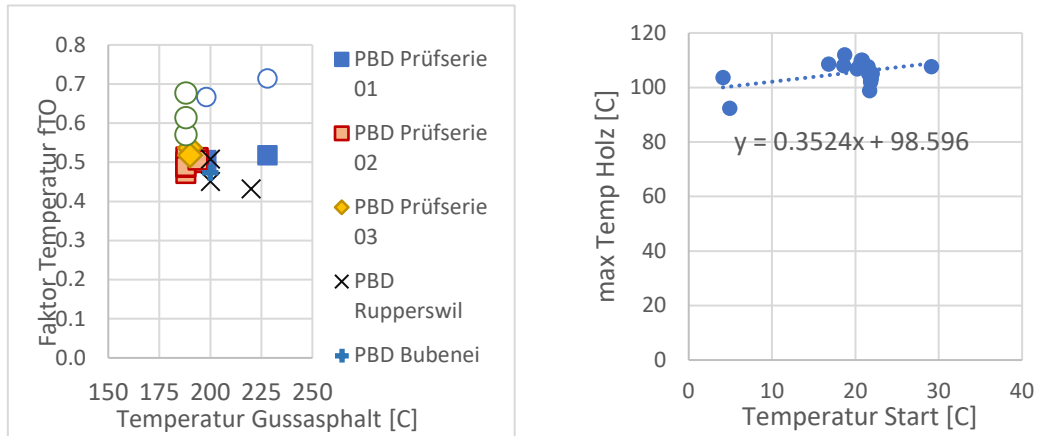


Abbildung 24: Vergleich des Faktors f_{TO} für alle Versuche (links)

Abbildung 25: Vergleich der Maximaltemperatur in Abhängigkeit der Temperatur der Holzplatte vor Applikation des Asphalt (rechts)

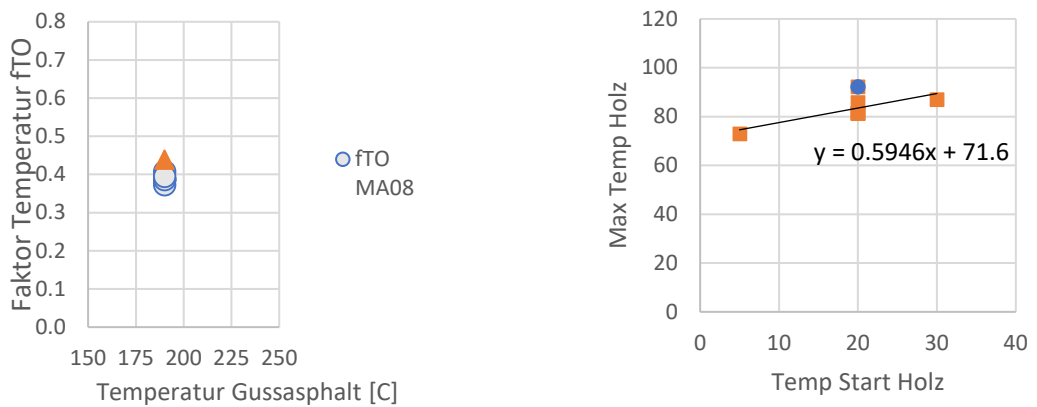


Abbildung 26: Berechnung des Faktors f_{TO} (links)

Abbildung 27: Vergleich der Maximaltemperatur in Abhängigkeit der Temperatur der Holzplatte vor Applikation des Asphalt (rechts)

3.5 Holzfeuchtemessungen

3.5.1 Messtechnik und Methode

Die Sorptionsmethode ermöglicht die Bestimmung der Holzfeuchte mittels Messung der Luftfeuchte. Luftfeuchtesensoren werden oft mit Temperatursensoren zusammen geliefert. Die Messung der Feuchte und Temperatur erfolgte mit kapazitiven Feuchtefühler Almemo© FHA 646 R mit PFTE, mit einem Staubschutz (PTFE) (

). Für diese Messung müsste ein Loch von 8 mm Durchmesser und bis zu 90 mm Tiefe gebohrt werden.

Die Widerstandsmethode (SN EN 13183-2:2002) erfolgte über die Messung des Widerstands zwischen zwei Elektroden. Eine Umwandlungskurve wird verwendet, um den gemessenen Widerstand (Bereich von 10 k Ω bis 100 G Ω) in Holzfeuchte umzuwandeln. Die Widerstände wurden mit einem Scantronik Gigamodul gemessen und auf einem Thermofox gespeichert. Die Positionen der Sensoren sind in Tabelle 5 ersichtlich. In den Platten P31 und P32 wurde die Feuchte, zur Vermeidung von Abfuhr von Wärme entlang der Isothermen, mit sehr dünnen Schrauben gemessen (Abbildung 29).

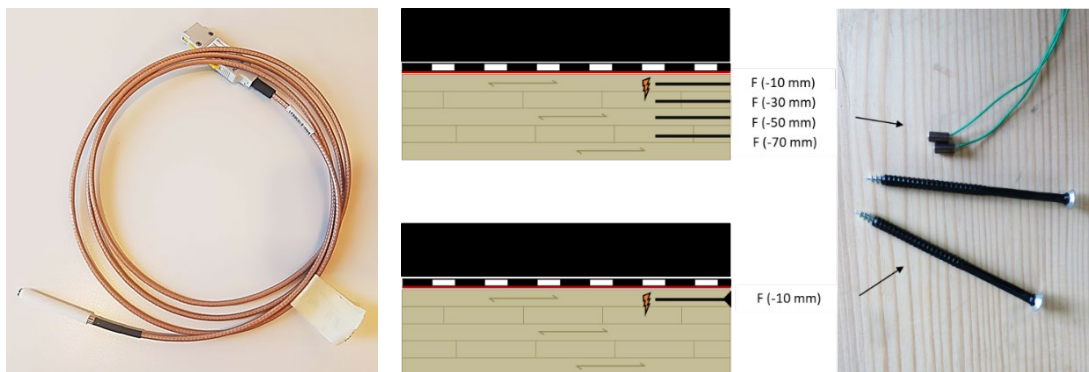


Abbildung 28 : Luftfeuchtesensor Almemo© FHA 646 R mit PFTE mit einem Staubschutz (PTFE) und Darstellung der Ausstattung der Holzplatten mit Feuchtesensor und Schrauben.

Tabelle 5: Position der Feuchtesensoren im Holz (Materialfeuchte wurde in Prüfserie 03 nicht mitgemessen)

Material	Widerstandsmethode Prüfserie 01 und Prüfserie 02	Widerstandsmethode Prüfserie 02 (P31/P32)	Sorptionsmethode Prüfserie 01 und Prüfserie 02
Messfrequenz	Je 15 Minuten	Je 5 Minuten	Je 2 Sekunden
10 mm unter Abdichtung	X	X	X
30 mm unter Abdichtung		X	
50 mm unter Abdichtung		X	
70 mm unter Abdichtung		X	

3.5.2 Gemessene Feuchteverläufe während Applikation des Asphalts

Die Feuchtemessung in Platten P31 und P32 während der Applikation des Asphaltes ist in

Abbildung 29 dargestellt. Die Feuchtemessungen mit der elektrischen Widerstandsmethode wurden hier in vier unterschiedlichen Tiefen vorgenommen. Die Sorptionsmethode wurde ausschliesslich in einer Tiefe von 10 mm unter der Abdichtung angewendet.

Kurz nach der Applikation des Asphaltes stellen die Feuchtemessungen mit elektrischem Widerstand, direkt unter der Oberfläche des Holzes, extreme Schwankungen dar. Innerhalb weniger Minuten ändert sich der Widerstand zwischen den Elektroden, aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Widerstands im Holz, um einen Faktor von 100 bis 1000. Dies lässt erkennen, dass die grossen Schwankungen eher der Grenzen der Messtechnik und nicht einer tatsächlichen Änderung der Holzfeuchte zuzuordnen. Relevant wird die Holzfeuchte auf den Platten einige Stunden nach der Applikation des Asphaltes. Belegt werden kann dies auch dadurch, dass in P32 die Feuchte 10 mm unter die Oberfläche gesunken ist und 30 mm unter der Oberfläche gestiegen ist. Auf Platte P31 ist die Feuchte unter die Oberfläche, im Vergleich zur Ausgangsfeuchte, gestiegen. Generell unterscheiden sich die Holzfeuchten bis zu 3 M% von den Ausgangsfeuchten.

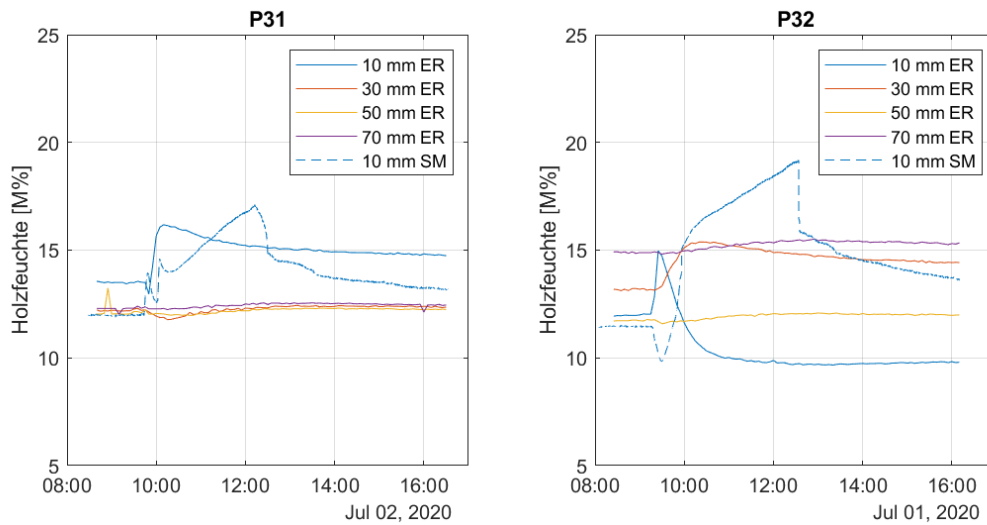


Abbildung 29: Holzfeuchteänderungen in unterschiedlichen Tiefen und mit unterschiedlichen Methoden während der Applikation des Asphalttes

Die Feuchteverläufe mit der Sorptionsmethode 10 mm unter der Oberfläche, bilden einen etwas konstanteren Holzfeuchteverlauf ab.

3.5.3 Verlauf der Holzfeuchten während den Versuchen

Die Holzfeuchten wurden in mehreren Platten gemessen. Die gemessenen Werte aus Prüfsreihe 01 und Prüfsreihe 02 wurden in

Abbildung 30 dargestellt: Vor der Applikation des Asphalttes, nach 2 Stunden und nach 24 Stunden. Tendenziell sind die Holzfeuchten nach 24 Stunden gemessen etwa 1 M% höher. Auffallend ist, dass in den ersten zwei Stunden der Messwert der Holzfeuchte zunächst erheblich ansteigt.

Folgende Erklärungen können hierzu gefunden werden:

- Während der Applikation des Gussasphalttes verdampft viel Wasser aus den Zellwänden in der Luft der Hohlräume. Während der Abkühlung kondensiert dieses Wasser wieder auf der Zellwand. Das beeinflusst den Widerstand des Holzes.
- Ein grosser Temperaturgradient ist nicht mehr gegeben. Nach zwei Stunden ist die Temperatur an der Oberfläche des Holzuntergrunds noch immer zwischen 60 °C und 80 °C. Die Temperaturkompensation kann bei so hohen Temperaturen abweichen.

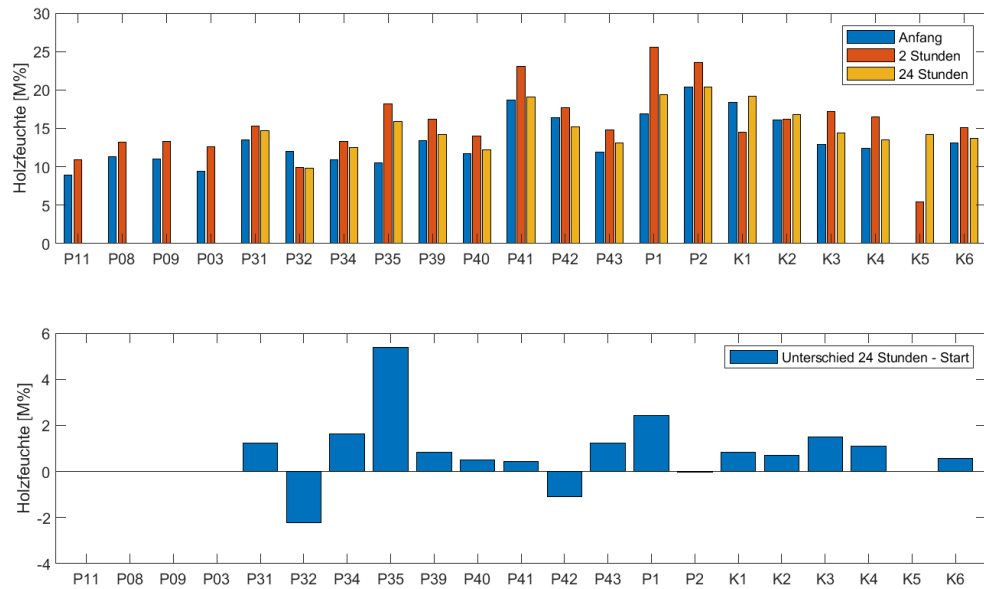


Abbildung 30: Gemessene Holzfeuchten während Applikation des Asphaltes sowie den Unterschieden von Endwert zu Startwert

3.6 Haftzugversuche

3.6.1 Bereits bekannte Daten und Vorgehen

Die Haftzugfestigkeit des Verbundes ist eine Prüfung, die zur Qualitätssicherung oder bei der Zustandserfassung auf der Baustelle ausgeführt werden kann. Auch im Bereich der Entwicklung von Anstichen und Lacke auf Holz werden Haftzugprüfungen durchgeführt. Hier werden Stempel von 15 mm auf einem Anstrich geklebt und nachher abgezogen (EN ISO 4624:2016). Im Brückenbau wird pro Versuch, eine 3-er Serie mit Stempel von 50 mm Durchmesser auf die Betonunterlage, die Versiegelung/Grundierung, Abdichtung und Asphalt-Schutzschicht, durchgeführt. So können die Haftzugfestigkeiten der einzelnen Schichten des Gesamtaufbaus untersucht werden. Es bestehen Anforderungen an die Mittelwerte.

In Scharmacher und Müller (2013) wurden Haftzugfestigkeiten der Abdichtungen (PMMA und PBD) mit folgenden Ergebnissen geprüft:

- Epoxidharzversiegelung und PBD-Bahn auf Brettsperrholzplatte 0.33 MPa
- PMMA-Versiegelung und PMMA-Membran auf Brettsperrholzplatte 1.41 MPa
- Epoxidharzversiegelung und PBD-Bahn auf Furnierschichtholzplatte 0.43 MPa
- PMMA-Versiegelung und PMMA-Membran auf Furnierschichtholzplatte 1.12 MPa

Daraus ist ersichtlich, dass die PMMA-Abdichtung auf Holz eine grössere Haftzugfestigkeit hat, als eine PBD-Abdichtung auf Holz. Nach SIA 272, SIA 273 und VSS40 450 muss bei 20°C eine Haftzugfestigkeit der PBD-Bahn 0.46 N/mm² erreicht werden.

In Milbrandt und Schellenberg (1998) werden auch Haftzugversuche auf PBD-Bahnen durchgeführt. Hier werden, je nach Systemaufbau, Werte zwischen 0.40 MPa und 0.55 MPa auf einen Holzuntergrund erreicht. Diese sind damit leicht höher, als die Werte in Scharmacher und Müller (2013).

3.6.2 Abhängigkeit der Holzfeuchte

Die Annahme vor Versuchsbeginn war, dass die Haftfestigkeit von Epoxidharz (EP) auf Holz aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung, von einem höheren Feuchtegehalt im Holz beeinflusst wird. Um diese Haftung zu untersuchen, wurden Haftungsprüfungen nach EN ISO 4624:2016 durchgeführt mit verschiedenen Systemaufbauten bestehend aus Versiegelung und verschieden konditioniertem Fichtenholz.

Eine Übersicht in Abbildung 31 zeigt, die Ergebnisse die Haftfestigkeit von Epoxidharzversiegelung auf Fichtenholz mit Holzfeuchten zwischen 12 – 16 % MC unterscheiden sich nur gering: 3.1 N/mm² für Holz mit 16 % MC, 3.2 N/mm² für Holz mit 12 % MC und 3.4 N/mm² für Holz mit 14 % MC. Für Epoxidharz auf Holz mit >24 % MC liegt der gemessene Mittelwert der Haftfestigkeit bei 2.3 N/mm². Die Mittelwerte aller Messreihen liegen somit über dem Richtwert von 2.0 N/mm². Dieser Richtwert beruht auf Erfahrungswerten und besagt, bei einer Haftfestigkeit von >2 N/mm² kann der Verbund zwischen Beschichtung und Untergrund als Versagensquelle im Beschichtungssystem ausgeschlossen werden. Für Prüfkörper mit 24 % MC wird ein geringerer Verbund gemessen mit einer Haftfestigkeit von im Mittel 2.3 N/mm², eine im Vergleich um 30% abgeminderte Haftfestigkeit.

Das Versagen ändert sich mit geringerer Holzfeuchte. Bei 12 M% und 14 M% kam es durchgehend zu einem Versagen aufgrund von Holzbruch. Das Ergebnis zeigt entsprechend die Querkzugfestigkeit von Fichtenholz. Diese ist folglich geringer als die Haftfestigkeit von Epoxidharz auf Fichtenholz. Die Versagensart ändert sich mit zunehmender Holzfeuchte dahingehend, dass ein Versagen des Verbunds zwischen Prüfstempel und Klebstoff auftritt. Hier stellt der gemessene Wert folglich die Haftfestigkeit zwischen Prüfstempel und Klebstoff dar.

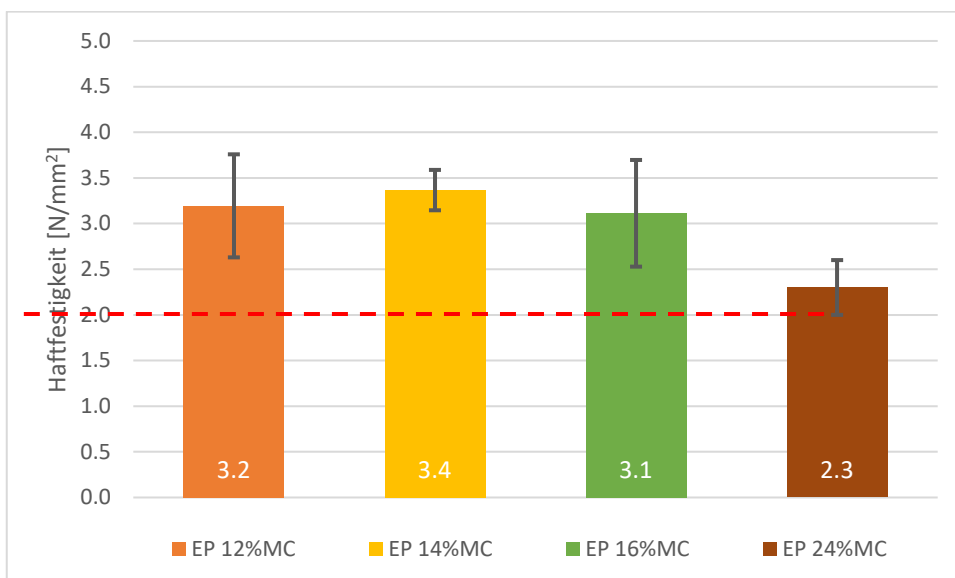


Abbildung 31: Ergebnisse der Haftfestigkeitsprüfungen: Haftfestigkeiten im Mittel und jeweilige Standardabweichung der Prüfungen von Epoxidharzversiegelung (EP) auf Holz mit unterschiedlichen Holzfeuchtegehalten (% MC)

3.6.3 Haftzugversuche an Grundplatten

Die Haftzugversuche wurden an den Platten mit Stempeln \varnothing 50 mm auf der Versiegelung, der Abdichtung und auf der Schutzschicht durchgeführt (Abbildung 32). Für die Versiegelung gilt als Anforderung auf Beton ein Mindestwert von 1.5 N/mm^2 für den Mittelwert, für die PBD-Abdichtung gilt bei 20°C eine Anforderung an den Mittelwert von 0.46 N/mm^2 .



Abbildung 32: Durchführung der Haftzugversuche mit Stempeln (\varnothing 50 mm)

Für Epoxidharz und PMMA wurde eine andere Abreissgeschwindigkeit (100 N/S) als für PBD (300 N/s) gewählt. Die Prüfungen wurden gemäss den geltenden Normen SN EN 1542 sowie SIA 281-3 für PBD durchgeführt.

3.6.4 Ergebnisse

Haftzugversuche auf der Grundierung

Die Mittelwerte der 3-er-Serien sind in der Tabelle 6 aufgeführt. Sowohl bei der Grundierung aus PMMA als auch bei derjenigen aus EP (Epoxidharz) sind die Werte als sehr gut zu betrachten. Nimmt man die für Betonuntergrund geltende Anforderung von $\geq 1.50 \text{ N/mm}^2$ als Basis, so werden diese Anforderung bei allen Platten erfüllt. Die Informationen zum Bruchbild zeigen, dass der Bruch selten in der Trennschicht Grundierung/Holz erfolgte. In 13 von insgesamt 27 Einzelversuchen erfolgte der Bruch mehrheitlich im Holz, was nichts anderes bedeutet, als dass die Abreissfestigkeit der Grundierung grösser, als die Zugfestigkeit des Holzes war! In ebenfalls 13 von 27 Einzelwerten erfolgte der Bruch in der Verklebung des Prüfstempels auf der Grundierung, was bei derart hohen Werten häufig vorkommt. Trotz des Bruches im Leim, kann festgestellt werden, dass die Anforderungen (an Betonuntergrund) erfüllt wurden.

Tabelle 6: Haftzugversuche auf der Grundierung der Prüfplatten; Mittelwerte der 3-er-Serien. In den Kolonnen «Trennung» sind die Anteile der Bruchflächen der einzelnen Versuche angegeben (Beispiel bei Platte K6: Y/A 0/20/0 bedeutet, dass beim 1. und 3. Versuch 0 % des Bruches und beim 2. Versuch 20 % des Bruches in der Trennfläche Klebstoff/Grundierung erfolgte)

Platte	Datum	MW	Aufbau			Trennung		
			N/mm ²	Y - Leim	A - Grundierung	B - Unterlage	Y/A	A/B
P38	29.06.2020	4.0		PMMA	Holz	100/100/100		
P40	29.06.2020	3.8		PMMA	Holz	0/0/20		100/100/80
K3	29.06.2020	1.8		PMMA	Holz		30/50/80	70/50/20
K6	29.06.2020	1.7		EP	Holz	0/20/0	40/20/15	60/60/85
P41	29.06.2020	4.9		EP	Holz	0/90/100		100/10/0
P1	29.06.2020	2.3		EP	Holz	100/100/100		
P31	29.06.2020	3.4		EP	Holz	0/100/100		100/0/0
P 51	23.09.2020	3.5		EP	Holz	100/0/100		0/100/0
P 53	23.09.2020	3.6		EP	Holz	0/0/100		100/100/0

Haftzugversuche auf der Abdichtung

Die Mittelwerte der durchgeführten 3-er-Serien sind in der Tabelle 7 aufgeführt. Die Anforderungen an die Haftfestigkeit von bituminösen Abdichtungen sind abhängig der von Temperatur der Unterlage zum Zeitpunkt der Prüfung; je tiefer die Temperatur, desto grösser die geforderte Haftzugfestigkeit. Bei einer Temperatur von 20.7 °C liegt die Anforderung bei 0.45 N/mm², bei 23.1 °C beträgt sie 0.40 N/mm². Es kann festgestellt werden, dass die gemessenen Werte die Anforderungen um mehr als das Doppelte übertreffen, mit Ausnahme der Platte P1. Unabhängig von der Grundierung, wurden sehr gute Werte erzielt, selbst bei der bituminösen Grundierung.

Tabelle 7: Haftzugversuche auf der PBD-Abdichtung; Mittelwerte der 3-er-Serien (Lesehilfe zu «Trennung» siehe Tabelle 6)

Platte	Datum	Temp.	MW	Aufbau				Trennung		
				[°C]	[N/mm ²]	Y - Leim	A - Abd.	B - Grund.	C - Unterl.	Y/A
P34	30.06.20	20.7	0.9		PBD	Bit.-Anstr.	Holz		15/100/40	85/0/60
P35	30.06.20	20.7	0.92		PBD	Bit.-Anstr.	Holz		20/60/20	80/40/80
P1	30.06.20	21.3	0.64		PBD	EP	Holz		90/0/0	10/100/100
P41	30.06.20	21.4	1.25		PBD	EP	Holz		100/100/100	
P31	30.06.20	21.7	0.97		PBD	EP	Holz	0/50/0	0/50/15	100/0/85
K6	30.06.20	22.0	1.21		PBD	EP	Holz		100/100/100	
P40	30.06.20	23.1	1.13		PBD	PMMA	Holz	80/0/0	20/100/100	

Haftzugversuche auf der Gussasphalt Schutzschicht

Die Mittelwerte der durchgeführten 3-er-Serien sind in der Tabelle 8 aufgeführt. Wie bei den Abdichtungen aus PBD sind auch beim MA die Anforderungen an die Haftfestigkeit abhängig der von Temperatur der Unterlage zum Zeitpunkt der Prüfung. Bei einer Temperatur von 23.8 bis 24.2 °C beträgt die geforderte Haftzugfestigkeit 0.38 N/mm². Generell kann festgehalten werden, dass die gemessenen Werte die Anforderungen deutlich übersteigen. Der Bruch erfolgte in der Regel innerhalb der PBD; dies bedeutet, dass die Haftzugfestigkeit der Schutzschicht auf der PBD noch besser ist als in der Tabelle angegeben.

Tabelle 8 : Haftzugversuche auf der MA-Schutzschicht

Platte	Datum	MW	Temperatur	Trennung	
		N/mm ²	[°C]	A - MA	B - PBD
P41	22.07.2020	1.07	24.0	0/0/20	100/100/80
K2	23.07.2020	1.03	24.1		100/100/100
K1	24.07.2020	1.00	24.2		100/100/100
P31	25.07.2020	1.03	23.9		100/100/100
K6	26.07.2020	1.00	23.8		100/100/100

3.7 Schubsteifigkeit und -festigkeit nach AST

3.7.1 Bereits bekannte Schubfestigkeitswerte aus der Literatur

Raab und Partl (2004) erwähnen in ihrem Bericht, dass einige mechanische Versuche vorhanden sind, womit relative Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrbahnaufbauten verglichen werden können. Gemäss Zofka et al. (2015), sind noch keine Versuche verfügbar, welche die Eignung während der gesamten Lebensdauer nachweisen.

In Pousette (1997) wurden Versuchskörper (115 mm x 175 mm) abgeschert. Die Mindestanforderung von 0.15 N/mm² (vergleichbar mit 2.6 kN auf Bohrkerne mit Ø150 mm Durchmesser) nach schwedischer Norm wurde mit Asphaltbeton und Gussasphalt erreicht (0.17 N/mm² bis 0.23 N/mm²). Im Vergleich zur Mindestanforderung des Leutnerversuchs (SN EN 12697-48 müsste diese Scherfestigkeit bei 0.85 N/mm² liegen, aber Prüfgeschwindigkeiten unterscheiden sich: Pousette (1997) 10 mm/min und Leutner 50 mm/min. Die Prüfkörper wurden während des Abscherens mit einer Normallast belastet, wie bei Zofka et al. (2015) von 0.7 N/mm² (12.4 kN auf Bohrkerne mit Ø150 mm Durchmesser).

In Scharmacher und Müller (2013) wurden Gussasphaltbeläge von ihrem viereckigen Untergrund (200 mm x 200 mm) voneinander abgeschert. Sichtbar ist, dass die PMMA-Abdichtung zwar steifer sind als die PBD-Abdichtungen, aber auch ein sprödes Bruchverhalten haben. Dazu ist aus der Abbildung abzuleiten, dass es keine Unterschiede zwischen dem Abscherverhalten vom Belag auf Beton, Stahl und Holzplatten gibt. Die Scherfestigkeiten von PBD Bahnen stimmen grob mit den Scherfestigkeiten von Pousette (1997) überein, obwohl diese Platten in Scharmacher und Müller (2013) ohne Normallast belastet wurden. Die Prüfgeschwindigkeit dieser Versuche lag bei 5 mm/min. Scherfestigkeiten der Aufbau mit PBD-Bahn liegen rund 0.2 N/mm, ähnlich wie bei Pousette (1997).

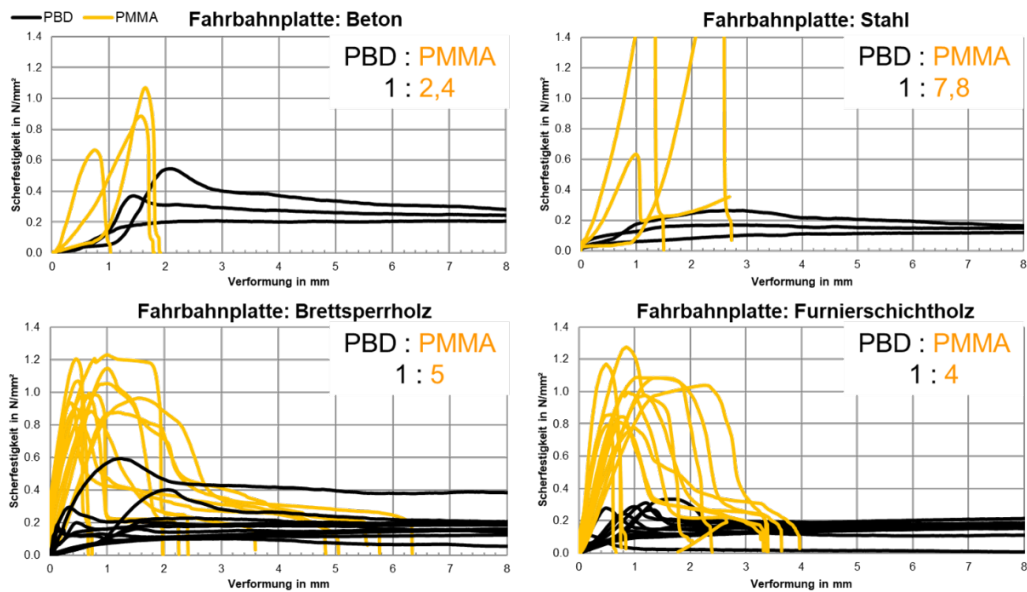


Abbildung 33: Abschersteifigkeiten und -Festigkeiten von verschiedenen Fahrbahnaufbauten

Die Versuche von Raab und Partl (2004) wurden anhand des Leutnerverfahrens durchgeführt (Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min). Die Schutzschicht wurde vom Untergrund abgeschert, die Versiegelung und Abdichtung bestanden aus Epoxidharz und PBD-Bahnen. Die erhaltenen Scherfestigkeiten lagen zwischen 10,4 kN und 10,6 kN (beide 0,6 MPa), bei einer Verformung von 1,5 mm (PBD-APP) und 7,9 mm (PBD-SBS). Betrachtet man auch die Verformung nach Belastung einer MMLS3 Maschine, Simulation von Verkehrsbelastungen, wird die Streuung der Scherfestigkeiten und Verformung grösser: Zwischen 7,9 kN und 12,7 kN (0,4 MPa und 0,7 MPa). In Scharmacher und Müller (2013) wurde ein Bruch der PBD-Abdichtung nie erreicht. In Raab und Partl (2004) wurde diese aber zwischen 1,5 mm und 13,1 mm erreicht. Die kleinste Verformung wird in APP (ataktisches Polypropylen) Abdichtungen gemessen, die grösste in SBS (Styrol-Butadien-Styrol Copolymer). In PBD-Abdichtungen mit SBS, werden auch grössere Streuungen in Festigkeit und Verformung gemessen. Die Art der Abdichtung ist für die Scherfestigkeit nicht relevant, aber die SBS PBD Bahn ist deutlich weniger steif.

3.7.2 Leutner und Advanced Shear Test

Für Leutner (VSS 70 461) oder Advanced Shear Test (AST) werden Zylinder (150 mm Durchmesser) aus den Fahrbahnaufbauten gebohrt oder geschnitten. Der AST Versuch kann als verbesserter Leutnerversuch gesehen werden (Leutner, 1979 und Zofka et al., 2015). Mit dem AST wird eine Normallast auf den Fahrbahnbelag angebracht, damit eine Situation beim Bremsen eines Fahrzeuges realitätsnah simuliert werden kann. Grundsätzlich sind unterschiedliche Randbedingungen möglich, wenn es zu Auflasten kommt:

- Keine Auflast, bzw. Leutner
- Konstante Spannung,
- Konstante Verformung, und

- Konstante Steifigkeit (AST).

Das Einstellen einer konstanten Steifigkeit ist realistisch. Würde sich der Belag während des Bremsens eines Fahrzeuges vertikal verformen, dann würden die Normallasten ab- oder zunehmen, bzw. würden die Feder der Achse des Fahrzeuges sich eindrücken oder ausdehnen.

Die Norm VSS 40 430 empfiehlt für den Schubverbund nach Leutner Minimal-Werte von 15 kN zwischen Deck- und Binderschicht bzw. von 12 kN zwischen Binder und Tragschicht. Anforderungen für diese Prüfung bei Abdichtungssystemen wurden aus naheliegenden Gründen nicht festgelegt, da Bohrkern in Abdichtungssysteme selten gezogen werden.

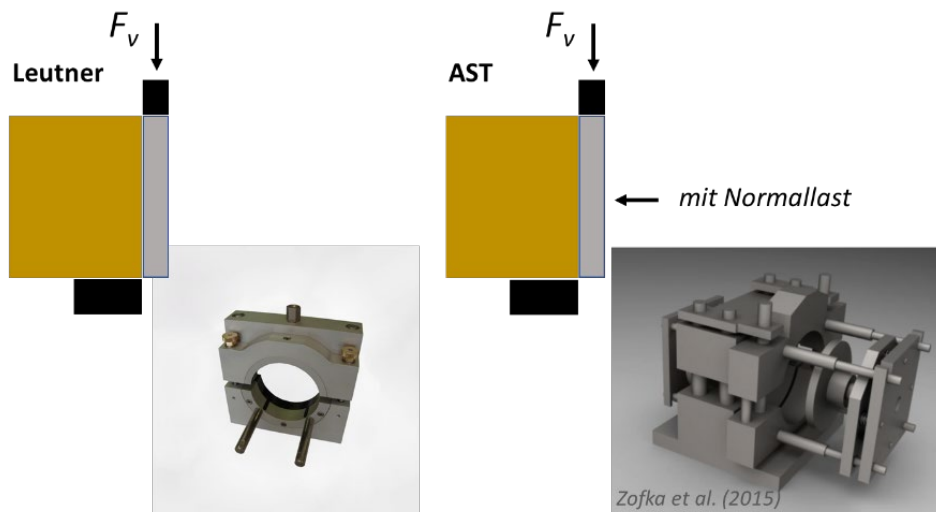


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Unterschiede zwischen Leutner und AST

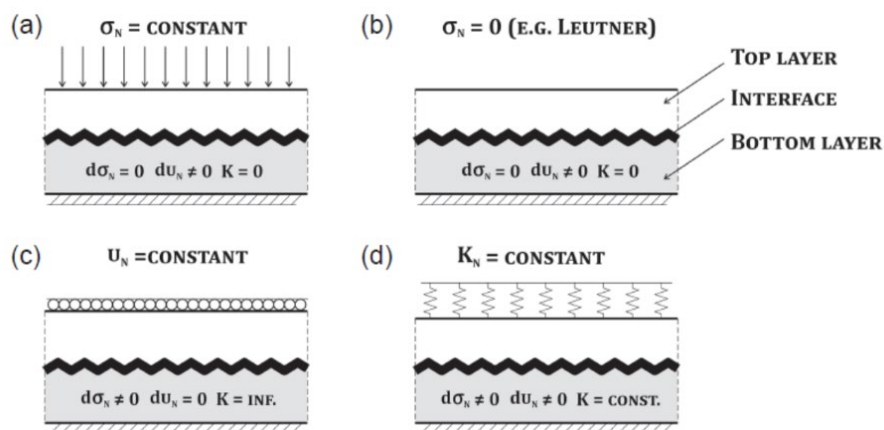


Abbildung 35: Darstellung der unterschiedlichen Randbedingungen des Auflagens im AST-Versuch (Zofka et al., 2015)

3.7.3 Einfluss der Versuchsparameter

Es wurde in der Prüfserie 02 eine extra Platte hergestellt, um Empfindlichkeiten zur Einstellung der Versuchsparameter zu AST zu überprüfen. Aus dieser Platte wurden 16 Bohrkern geschnitten. Die variierten Versuchsparameter waren:

- Normalkraft (0 kN, 2 kN, 4 kN, 10 kN, 20 kN),
- Geschwindigkeit (1 mm/min und 50 mm/min), und
- Temperatur (-10 °C und 20 °C).

In keinem Bohrkern waren Blasen vorhanden. 11 Bohrkern wurden mit unterschiedlichen Normalkräften geprüft. Alle Bohrkern wurden mit einem Versatz von 5 mm zwischen den Einspannungen (Grundplatte und Schutzschicht) geprüft und zwei mit einem Versatz von 1 mm. Beim letzten Versuchsaufbau wurde die Versiegelung abgeschert, was nicht zu repräsentativen Ergebnissen führte.

In Abbildung 36 sind die Kraft-Weg-Diagramme abgebildet (Links) und die Widerstände bei unterschiedlichen Verformungen und Normalkräfte (Rechts). Die Ergebnisse bei einer Normalkraft von 0 kN entsprechen dem Leutner-Verfahren. Sichtbar ist, dass der Schubwiderstand bei einer Vergrößerung der Normalkraft zunimmt. Bei einer Normalkraft von 10 kN ist der Widerstand immer 2 kN höher als bei einer Normalkraft von 0 kN. Positiv ist, dass bei schwereren Fahrzeugen der Widerstand zunimmt.

In

Abbildung 37 ist auch der Einfluss von Prüfgeschwindigkeit und Temperatur ersichtlich. Bei einer tiefen Geschwindigkeit von 1 mm/min ist der Widerstand um ein Faktor 3 kleiner (3.6 bei 20 °C und 10 mm Verformung und 2.6 bei -10°C und 10 mm Verformung). Die Abscherverhältnisse bei tiefen Prüfgeschwindigkeiten entsprechen den Versuchen von Scharmacher und Müller (2013). Dies betrifft auch den Temperatureinfluss. Dieser führt bei einer Temperatur von -10 °C zu einem Widerstand von ca. 70 kN.

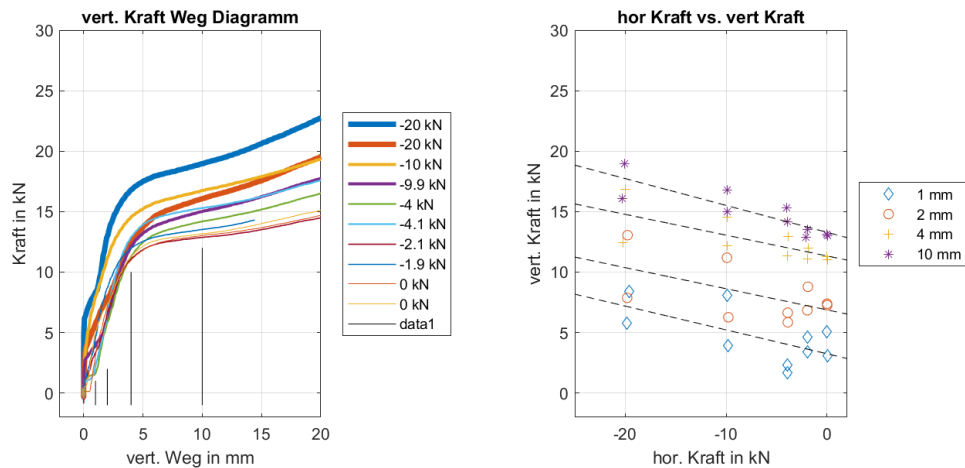


Abbildung 36: Kraft-Weg-Diagramme von Abschereigenschaften unter verschiedene Normalkräfte (links) und die Verhältnisse der Schubwiderstand bei unterschiedliche Normalkräfte und Wege (rechts)

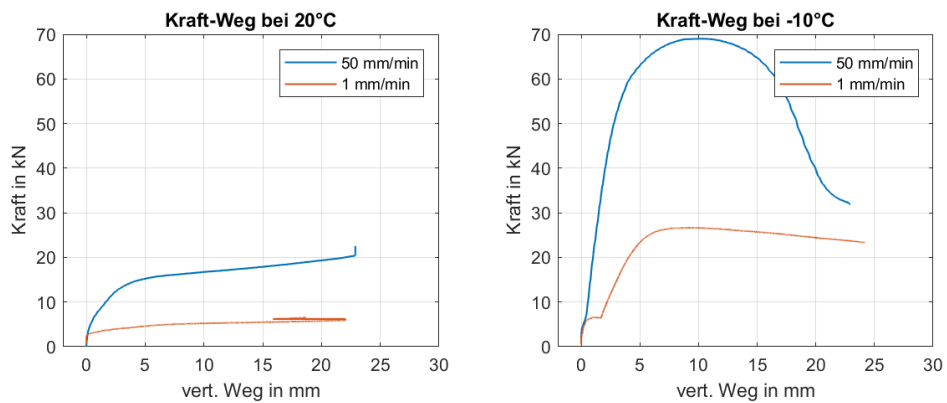


Abbildung 37: Kraft-Weg-Diagramme bei 10 kN Normalkraft unter Normalbedingungen (20°C) und kalte Bedingungen (-10 K) und unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten (50 mm/min (nach Leutner) und 1 mm/min)

3.7.4 Korrektur für effektive Scherfläche

In der ersten Versuchsreihe entstanden in Platten mit Holzuntergrund und PBD-Abdichtung Kurzzeitblasen, so auch in der zweiten Versuchsreihe. Dadurch verringerte die effektive Oberfläche beim Abscheren. Von vier Platten wurden die effektiven Scherflächen ermittelt (Abbildung 38).

Die Fläche wurde anhand der Delaminierung am Umfang der Bohrkerns ermittelt. In Einzelfällen waren dies tatsächlich Blasen, z.B. in P08. Es ist unklar ob diese Delaminierung sich auch teilweise während des Aufschneidens der Platten (mit Wasser) entstanden sind. Die Mittelwerte der effektiven Flächen sind 83% und 90% in Platten P11 und P31 respektive (beide mit MA 8) und in Platten P08 und P41 waren das respektive 63% und 77% (beide MA 11).

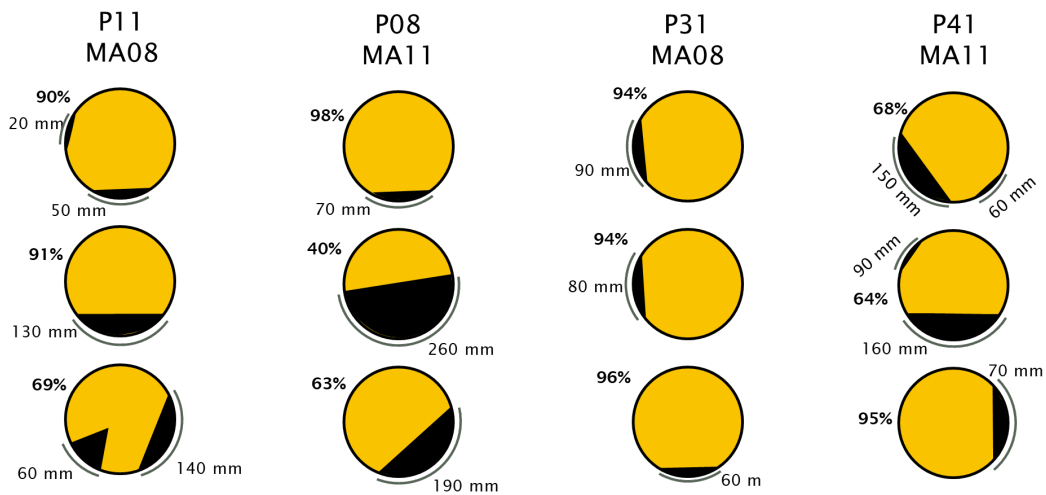


Abbildung 38: Anteil potentielle effektive Scherfläche anhand gemessene Delaminierungen an der Oberfläche von Bohrkernen



Abbildung 39: Unterschiedliche Arten von Delaminierungen / Blasenbildungen auf Bohrkern P41.2 und P08.1

Die Kraft-Weg Diagramme von diesen Platten wurden in Abbildung 40 dargestellt. Ohne Korrektur für die verringerten Oberflächen ist ersichtlich, dass bei einigen Platten eine grosse Streuung zwischen den Einzelwerten auftritt. Eine kleine Verringerung der Scherfläche hat keinen grossen Einfluss auf die Scherfestigkeit, bei grösseren Blasen ist erwartungsgemäss ein Einfluss feststellbar. Nachfolgend werden alle Ergebnisse entsprechend korrigiert. Dabei werden die gemessenen Widerstände auf eine Scherfläche von 100% linear umgerechnet.

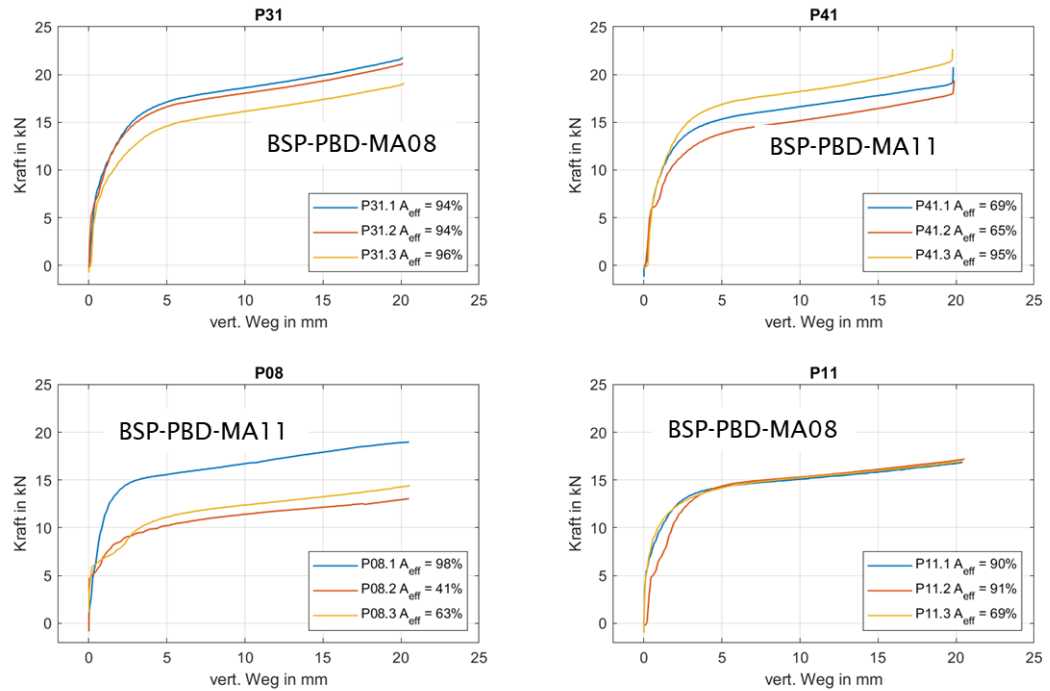


Abbildung 40 : Kraft-Weg Diagramm von Prüfkörper wo der effektive Scheroberfläche ermittelt wurde

3.7.5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In Abbildung 41 sind Kraft-Weg Diagramme ersichtlich für unterschiedliche Fahrbahnaufbauten. Aus der Abbildung unterscheidet sich die FLK-Abdichtung durch einen sehr schubsteifen Fahrbahnaufbau im Vergleich zu Abdichtungen aus PBD Bahnen. Bei den Abdichtungen aus PBD werden, egal welcher Untergrund, gleiche Verhältnisse zwischen Kraft und Verformung gemessen. Das würde bedeuten, dass die PBD Bahn massgebend ist, nicht der Untergrund.

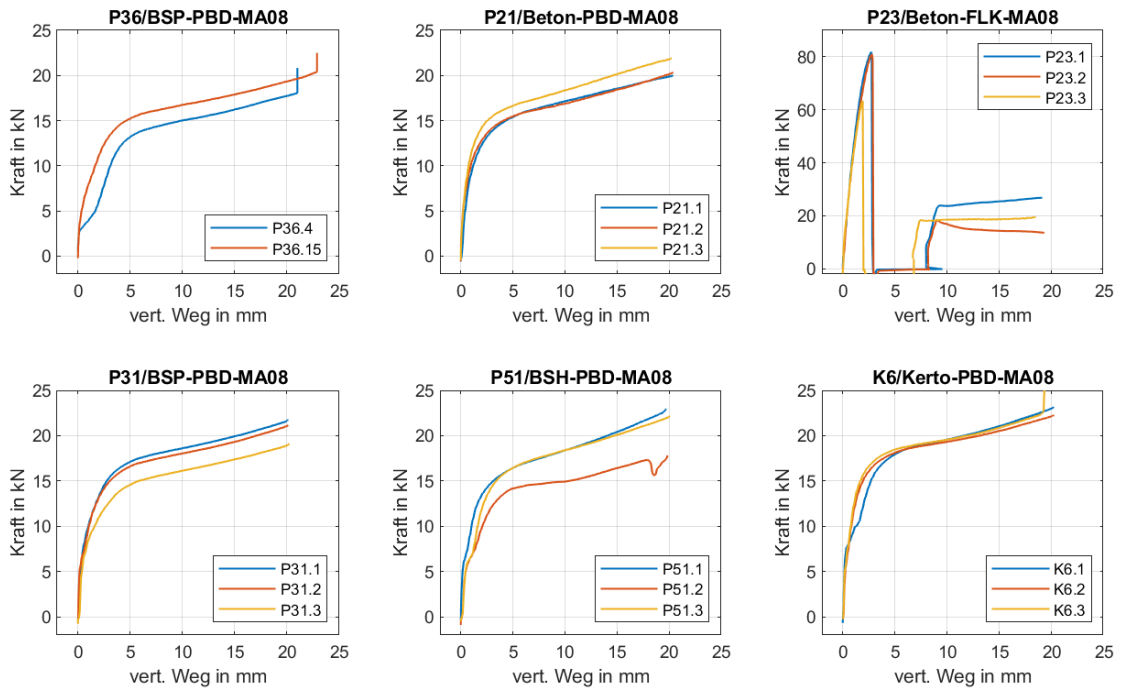


Abbildung 41: Kraft-Wegdiagramme von unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten

Bei 10 mm Verformung ($10/150 = 7\%$ Dehnung) wurden Scherfestigkeiten um ca. 1 N/mm^2 gemessen (Abbildung 42 und

Tabelle 9). Besonders auffällig ist:

- zwischen Grundplatten aus Beton (0.99), Brettschichtholz (0.98), Brettsperrholz (1-mal 0.90 und 2-mal 1.06) und Furnierschichtholz (1.05 bei 24 M% und 1.09 M% bei 12 M%) sind kaum Unterschiede feststellbar. Alle Untersuchungen wurden mit einem MA 8 NVA durchgeführt.
- die Scherfestigkeiten auf einer Platte mit MA 11 (1.23 (grosse Streuung)) lagen etwa 20% höher als mit MA 8 (0.90 bis 1.20).

Die erste Feststellung ist ein wichtiges Ergebnis. Die zweite ist möglicherweise zufällig und müsste überprüft werden. Die erhaltenen Schubfestigkeiten lassen sich mit Ergebnissen von Raab und Partl (2014) mit Scherfestigkeiten von 0.4 N/mm^2 bis 0.7 N/mm^2 (SBS-PBD Bahnen, zwischen etwa 7 mm und 13 mm Verformung) gut vergleichen. Da wurden die Bohrkern ohne Auflast (Leutner) untersucht.

Die Ergebnisse lassen sich auch mit Ergebnissen von Pousette (1998) (0.17 N/mm^2 bis 0.23 N/mm^2 bei Prüfgeschwindigkeiten von 10 mm/min) und Scharmacher und Müller (2013) (0.2 N/mm^2 bei Prüfgeschwindigkeiten von 5 mm/min) vergleichen.

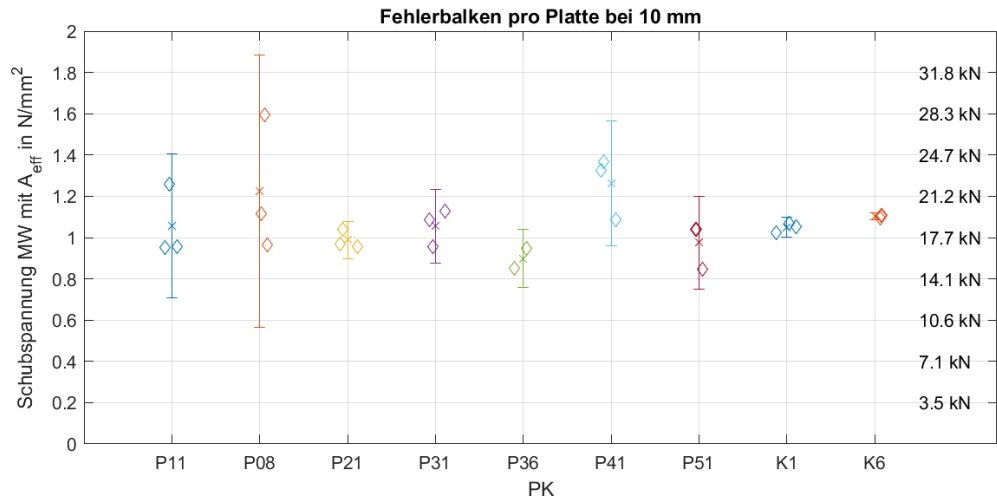


Abbildung 42 : Scherfestigkeiten bei 10 mm Verformung (6% Dehnung)

Tabelle 9: Werte der mittleren Scherfestigkeiten bei 10 mm Verformung (6% Dehnung) nach den AST versuchen

Plattenummer	Fahrbahnaufbau	Mittelwert Schubfestigkeit (N/mm2)
P11	BSP-PBD-MA 8 (NVA)	1.06
P08	BSP-PBD-MA 11	1.23
P21	Beton-PBD-MA 8 (NVA)	0.99
P31	BSP-PBD-MA 8 (NVA)	1.06
P36	BSP-PBD-MA 8 (NVA)	0.90
P41	BSP-PBD-MA 11 (NVA)	1.26
P51	BSH-PBD-MA 8 (NVA)	0.98
K1	Furnierschichtholz PBD-MA 8 (NVA)	1.05
K6	Furnierschichtholz PBD-MA 8 (NVA)	1.09

3.8 Schubschwellversuche

3.8.1 Stand der Technik und Vorgehen

Für die Durchführung des dynamischen Schubschwellversuches wurde die Prüfanordnung einer, bei der Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung BAM, Berlin entwickelten, Prüfmethode verwendet, welche zur Untersuchung des Schichtenverbundes bei Brückenabdichtungen zum Einsatz kommt. Diese Prüfmethode ist in der EN 13653 als statische Prüfung beschrieben. In (Angst 2015) wurde für diese Prüfung anstelle einer statischen Auflast eine dynamische Beanspruchung gewählt und die entsprechenden Prüfparameter nach eingehender Evaluation wie folgt festgelegt:

Prüftemperatur:	23 °C
Oberlast	0.2 N/mm ²
Unterlast	0.002 N/mm ²
Anzahl Zyklen	2'000
Haversine-Belastung mit Pausen:	
Belastung (Oberlast)	0.2 Sekunden
Pause (Unterlast)	1.5 Sekunden

Die rechteckigen Prüfkörper werden in einem Rahmen in Schräglage derart eingespannt, dass aus der vertikalen Belastung eine Schubbeanspruchung mit senkrechter Auflast resultiert. So kann ohne aufwendigen, apparativen Aufwand die Schubbeanspruchung in der Praxis (bestehend aus Schubbeanspruchung mit senkrechter Auflast) nachvollzogen werden. Ein grosser Vorteil dieser Methode ist die dynamische Beanspruchung sowohl des Schubes wie auch der senkrechten Auflast.

In Abbildung 9 ist links eine entsprechende Prüfeinrichtung zu sehen, rechts ist die dynamische Belastung systematisch dargestellt. In der linken Abbildung ist dargestellt, wie die aufgebrachte Last (rot) in einer kombinierten Beanspruchung (gelb) aufgeteilt wird.

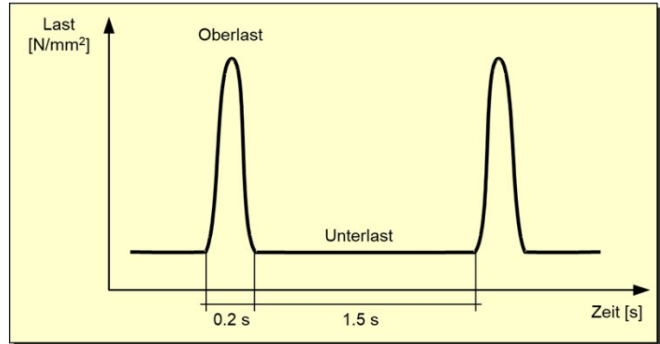
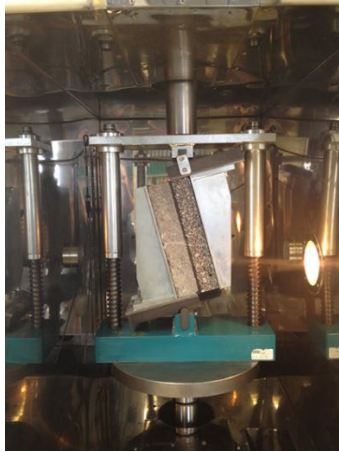


Abbildung 43: Prüfmaschine für dynamische Schubschwellversuche sowie systematische Darstellung der Belastung

3.8.2 Ergebnisse

In der zweiten Versuchsreihe 02 (Platten P08 bis P13) wurden Schubschwell-Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Holzfeuchtigkeit (Platten P08 und P13) sowie der Dicke der eingebauten MA-Schicht zu untersuchen. Je nach Dicke der heissen MA-Schicht wird mehr oder weniger Wärme in die Unterlage eingebracht, was allenfalls zu Ablösungen infolge Dampfdruck führen könnte. In einer weiteren Versuchsreihe (P31 bis P51 in Abbildung 45) wurde der Einfluss der Holzunterlage untersucht.

Es fiel auf, dass die an den Prüfkörpern aus Holz gemessene Gesamtdehnung (4.6 bis 6.7 mm) deutlich über den Erfahrungswerten auf Betonunterlage (kleiner 2 mm) lagen. Da vermutet wurde der Prüfkörper aus Holz könne sich während der Prüfung verformen, was zu den höheren Werten für die Dehnung führen würde, wurde die Verformung des Holzes gemessen. Zu diesem Zweck wurde ein Holzblock in die Apparatur (gemäss Abbildung 9) eingespannt und mit den für Schubschwell-Versuche üblichen Belastungen beansprucht. Die mittlere Dehnung zweier Prüfkörper nach 2'000 Zyklen betrug 0.067 mm. Somit wurde der Nachweis erbracht, dass die festgestellten Unterschiede zwischen den Ergebnissen auf Holzunterlage und denjenigen auf Beton nicht auf Deformationen des Holzes zurückzuführen sind.

Tabelle 10: Ergebnisse der Schub-Schwellversuche (NV: Niederviskoses Bindemittel mit niedrigerer MA-Temperatur)

Platte	Holzunterlage	Grundierung	Abd	Schichtdicke MA [mm]	Bemerkung	Dehnung nach 2000 Zyklen [mm]
P08	BSP	EP	PBD	40	Feuchte 12 %	6.7
P10	BSP	EP	PBD	25	MA in NV; Glasvlies	4.7
P11	BSP	EP	PBD	25	MA in NV	5.9
P13	BSP	EP	PBD	40	Holz nass	6.7
P31	BSP	EP	PBD	25		5.5
P41	BSP	EP	PBD	25		7.4
K1	Furnierschichtholz	EP	PBD	25		4.4
K2	Furnierschichtholz	EP	PBD	25		8.2
K6	Furnierschichtholz	EP	PBD	25		6.4
P51	BSH	EP	PBD	25		6.9

Wie der Abbildung 45 zu entnehmen ist, haben weder die Feuchtigkeit des Holzes (P08/P13), die Dicke der MA-Schicht (P08/P10), noch die Temperatur des MA (P08/P11) einen Einfluss auf die gemessene Dehnung nach 2'000 Zyklen.

Die mittlere Dehnung der 3-er-Serien auf den 6 BSP-Platten (6.1 mm) und diejenige auf den 3 Furnierschichtholz -Platten (6.3 mm) liegen sehr nahe beieinander. Es kann kein relevanter Unterschied der Dehnungen in Abhängigkeit der Holzunterlage festgestellt werden.

3.9 Blasenbildung

Wie bereits erwähnt, kann es bei verklebten Abdichtungen zu Blasenbildungen kommen. Je nach Zeitpunkt des Auftretens der Blasen wird zwischen Kurzzeit- und Langzeit-Blasenbildung unterschieden. Während die Kurzzeit-Blasenbildung bereits im Zuge der Ausführung der Abdichtungsarbeiten auftritt, benötigt die Langzeit-Blasenbildung mehrere Sommer, um sichtbar zu werden.

Für die Entstehung wachsender Blasen (Langzeit-Blasenbildung) müssen folgende Voraussetzungen kumulativ gegeben sein:

- Feuchtigkeit:
es muss genügend Feuchtigkeit zur Verfügung stehen, um einen entsprechenden Dampfdruck entstehen zu lassen. Die Feuchtigkeit stammt in der Regel aus der Unterlage
- Verbindung Blase – Feuchtigkeit:
die Blase muss über Kanülen, Fehlstellen etc Zugang zum »Feuchtigkeitsreservoir« (Unterlage) haben

- Wärme:
Energie in Form von Wärmeeinstrahlung ist erforderlich, um aus der Feuchtigkeit einen Dampfdruck zu erzeugen

Sind diese Voraussetzungen gegeben, können über Jahre aus kleinen Bläschen grosse Blasen entstehen, welche an der Oberfläche in Form von Kratern auftreten und die Sicherheit des Verkehrs beeinträchtigen (Stolperfallen für Fussgänger; Gefahr für den 2-Rad-Verkehr). Dabei kann die Lage der wachsenden Blase sowohl unter der PBD, zwischen PBD und MA-Schutzschicht, oder sogar zwischen Schutz- und Tragschicht zu liegen kommen. Das Wachstum dieser Blasen erfolgt in Zyklen, welche wie folgt beschrieben werden können:

An warmen Tagen verdampft die Feuchtigkeit in der Blase und erzeugt einen Druck innerhalb der Blase. Da zu diesem Zeitpunkt der erwärmte Gussasphalt eher weich ist, kann die Blase expandieren. In einer folgenden, kühleren Periode erhärtet der Gussasphalt, welcher dadurch die erweiterte Form beibehält. Die Luft in der Blase kühlt ab und es entsteht ein Unterdruck (Gasgesetz), welcher zusätzliche Feuchtigkeit aus der Unterlage in die Blase nachzieht. An weiteren, warmen Tagen wiederholt sich der gleiche Prozess, welcher kleine Blasen stetig anwachsen lässt.

Dieses Phänomen ist auf Betonbrücken bekannt. Fälle, bei denen es auf Holzbrücken zu wachsenden Blasen kam, sind nicht bekannt. Betrachtet man den Feuchtigkeitsgehalt von Beton (3 Masse-%) und Holz (12 Masse-%), so ist die Vermutung naheliegend, dass wachsende Blasen auch auf Holzbrücken entstehen können. Berechnet man hingegen die absolute Wassermenge pro m³ sieht es folgendermassen aus:

Tabelle 11 : Vergleich der relativen und absoluten Wassermengen in Holz und Beton

Baustoff	Rel. Feuchtigkeit	Rohdichte	Absolute Wassermenge
	[Masse-%]	[kg/m ³]	[kg / m ³]
Holz	12	500	60
Beton	3	2400	72

3.9.1 Blasenbildung während der Herstellung der Platten

Die Kurzzeit-Blasenbildung konnte während der Herstellung der Platten beobachtet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Systemaufbauten bezüglich der Blasenbildung bei der Herstellung verglichen; die Systeme sind in Tabelle 10 beschrieben:

- Mit System 2a (Epoxidversieglung und PBD-Abdichtung) kam es auf Betonuntergrund (1d), Furnierschichtholz LVL (1b), und Brettschichtholz (1c) zu keiner Blasenbildung. Auf Brettsperrholzplatten (1a) hingegen sind Blasen aufgetreten.
- Mit System 2b (PMMA-Versieglung und PBD-Abdichtung) kam es zu Blasen auf Brettsperrholzplatten (1a).
- Mit System 2c (bituminöser Anstrich mit PBD-Abdichtung) kam es zu Blasen auf Brettsperrholzplatten.
- Mit System 2d (bituminöser Anstrich mit PBD-Abdichtung) kam es zu Blasen auf Brettsperrholzplatten.

- Mit System 2e (PMMA Versiegelung und -Abdichtung) kam es auf Brettsper Holzplatten (1a) die mit ALSAN Produkte versiegelt und abgedichtet wurden zu Blasenbildung. Es kam hier auch auf Brettsper Holz (1a) und Furnierschich Holz LVL (1c), die mit Eliminator versiegelt und abgedichtet wurden, zu Blasenbildung.

Das Entstehen der Blasen in den Systemen 2a und 2b wird auf einzelne Fehlstellen in der Versiegelung zurückgeführt. In den Systemen 2c und 2d wird eine zu tiefe Dampfdiffusionsdichtheit des bituminösen Haftvermittlers (Primer) als Ursache betrachtet. Möglicherweise sind Anteile der flüchtigen Komponenten des Primers in die Holzunterlage eingedrungen, welche dann durch die Wärme des MA reaktiviert wurden. Das Entstehen der Blasen im System 2e wird auf eine ungenügende Temperaturbeständigkeit der PMMA-Versiegelung und -Abdichtung zurückgeführt.

Generell kann festgehalten werden, dass die Temperaturgradienten auf Holz sich deutlich von denjenigen auf Betonuntergrund unterscheiden. Die geringere Wärmeleitfähigkeit des Holzuntergrundes führt beim Einbau des Gussasphaltes im Vergleich zum Betonuntergrund zu deutlich höheren Temperaturen in der Abdichtung. Die verwendeten PMMA-Produkte, welche sich auf Beton hervorragend bewährt haben, führten auf Holz zu Blasenbildungen. Zudem wurde festgestellt, dass Blasen vor allem dort entstehen, wo Astlöcher im Holz waren.

Auf Brettsper Holz-Platten wurden beim System mit EP-Versiegelung ebenfalls Blasen festgestellt.



Abbildung 44 : Platten (BSP) mit PMMA-Abdichtung nach dem Einbau des MA ; links Platte 3 (PMMA-Abdichtung ; MA 11 40 mm ; 230 °C); rechts Platte 6 (PMMA-Abdichtung; MA 8 25 mm; 190 °C



Abbildung 45 : Schnittbilder der spontanen Blasenbildung während des Einbaus des Gussasphaltes; System 2e (Platte P9 ; BSP / PMMA-Versiegelung / PMMA-Abdichtung / MA 8 25 mm bei 190°C)

In Abbildung 45 sind Schnittbilder der eingebauten Platten MA auf PMMA dargestellt. In beiden Bildern wölbte sich die PMMA-Abdichtung unter der Temperatureinwirkung auf und bildete eine Blase im MA. In der rechten Abbildung hat sich die PMMA-Abdichtung nach dem Abkühlen wieder zurückverformt. In beide Bildern ist festzustellen, dass sich die Abdichtung von der Holzunterlage abgelöst hat; auch die Verbindung zum MA ist nicht befriedigend.

3.9.2 Langzeit-Blasenbildung im Labor

Das Institut IMP hatte bereits bei früheren Projekten aus der Privatwirtschaft eine Vorrichtung gebaut, mit welcher in Abdichtungs- und Belagsaufbauten Blasen provoziert werden konnten (siehe Abbildung 46). Dabei wurden Betonplatten mit einer Abdichtung und einer MA-Schicht überzogen und einer Anzahl Temperaturzyklen unterworfen, welche mit IR-Lampen erzeugt wurden. Durch die Bildung von Fehlstellen in der Abdichtung konnten entweder Blasen gezielt «gezüchtet» werden, um bestimmte Fragestellungen zu bearbeiten, oder ohne Fehlstellen der Nachweis einer dauerhaft funktionierenden Abdichtung erbracht werden.

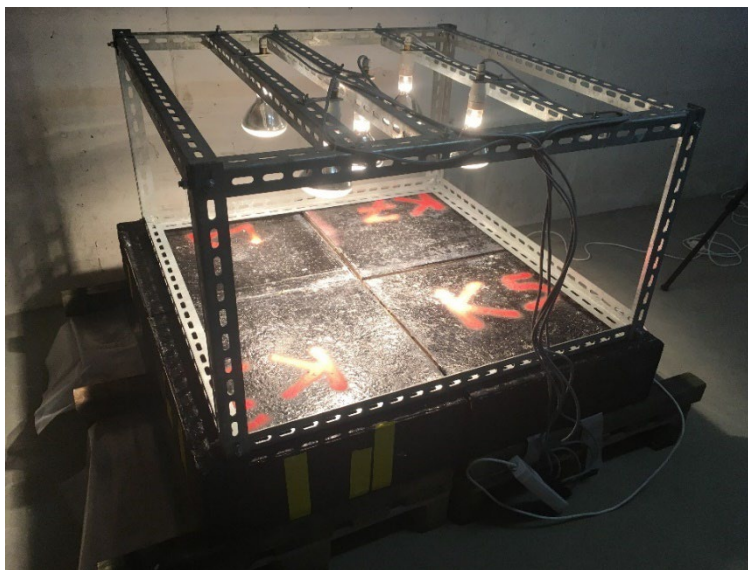


Abbildung 46 : Prüfvorrichtung zur Bildung von Blasen in Abdichtungs- und Gussasphalt-Aufbauten

Der applizierte Temperaturverlauf wurde derart gewählt, dass an der Oberfläche der Prüfkörper etwa derjenige Temperaturverlauf verzeichnet werden konnte, welcher in einer sommerlichen Schönwetterperiode im Mittelland auf Brückenbelägen auftritt (eine Abfolge sonniger Tage im Sommer (Abbildung 47).

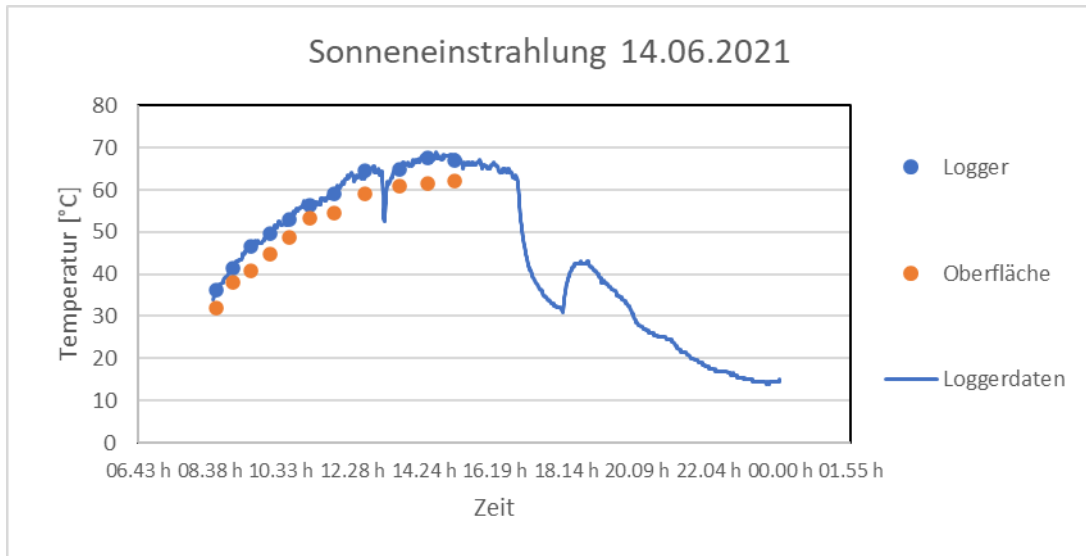


Abbildung 47 : Verlauf der Tagestemperatur auf einer Asphaltplatte (kleiner Abfall um 13:00 ist der Schatten einer Strassenlampe, um 16:30 fällt der Schatten eines geparkten Autos auf die Platte, das dann um 18:00 wegfährt

In einer ersten Phase wurde eine Platte untersucht, auf welcher eine PBD-Abdichtung direkt auf das Holz aufgeschweisst wurde. Die Wärmezyklen beanspruchten die Oberfläche der PBD ohne MA-Schutzschicht. Damit sollte der Nachweis erbracht werden, dass bei sehr ungünstigen Verhältnissen, Blasen im System entstehen. Bereits nach 8 Zyklen (4h heizen / 8h abkühlen) konnten 6 grosse Blasen beobachtet werden. Damit war der Nachweis erbracht, dass die Blasenbildung auch auf Holzunterlagen grundsätzlich funktioniert.



Abbildung 48 : *Blasen auf der Abdichtung nach einer 8 Temperaturzyklen*

Im nächsten Schritt wurde eine Platte mit einer PBD-Abdichtung auf EP-Versiegelung untersucht. Um aufzuzeigen, dass Blasen erzeugt werden können, wurden 4 Fehlstellen in der EP-Versiegelung gebohrt (\varnothing 10 mm). Wie der Abbildung 49 zu entnehmen ist, konnten Blasen gezielt erzeugt werden; die übrige Fläche haftete tadellos auf dem Holz. Die Blasen kamen bereits nach einem Temperaturzyklus zum Vorschein.



Abbildung 49 : *Blasen an Fehlstellen in der EP-Versiegelung ; die Wärmebeanspruchung erfolgte auf der PBD ohne MA-Schutzschicht*

Nachdem die Vorversuche zeigten, dass Blasen auf einer PBD-Abdichtung erfolgreich erzeugt werden konnten, wurden Platten mit einer MA-Schutzschicht untersucht. Leider konnten keine Blasen provoziert werden, obwohl diverse Massnahmen zur Förderung der Blasenbildung ergriffen wurden:

- Bildung von Fehlstellen in der Abdichtung
- Anbringen eines «Flüssigkeitsreservoirs» in Form eines mit Wasser gefüllten Rohres unter der Fehlstelle der Abdichtung
- Verlängerung der Beanspruchung über mehrere Wochen

Im Unterschied zu Beton weist Holz eine offene, poröse Struktur auf. Wir müssen davon ausgehen, dass sich ein Wasserdruck im Holz abbauen kann, was bei Beton nicht der Fall ist. Da die Blasen bei der Beanspruchung auf der PBD bereits nach wenigen Zyklen entstanden, ist anzunehmen, dass in diesem Fall ein hoher Druck (keine thermische Isolation durch den MA) entstand, welcher nicht sofort abgebaut werden konnte und daher die PBD von der Holunterlage abgedrückt wurde. Die theoretischen Betrachtungen in 3.9.3 unterstützen diese Annahmen.

3.9.3 Rechnerische Modelle zur Blasenbildung bei Fahrbahnplatten in Holz

Mit rechnerischen Modellen werden die Ursachen der Blasenbildung nachvollzogen. Die Prozesse sind komplex und es ist kein numerisches Programm bekannt, mit welchem gleichzeitig Druckunterschiede, Temperaturverläufe und Feuchte gekoppelt berechnet werden können. Hinzu kommt, dass sich die Blasen nur in der ersten zehn Minuten nach der Applikation des Gussasphaltes bilden und alle physikalischen Prozesse sehr dynamisch verlaufen.

Die Ursache der Kurzzeit-Blasenbildung wird deshalb vereinfacht anhand zweier Ansätze betrachtet:

- durch eine Druckzunahme in einem abgeschlossenen Hohlraum nach einer Temperaturänderung (mit dem idealen Gasgesetz)
- durch eine Druckzunahme welche durch den Wechsel von Wasser auf Wasserdampf nach einer Temperaturänderung entsteht

1. Im ersten Ansatz wird ein Volumen von 20 °C auf 110 °C erwärmt. Wenn das Volumen konstant bleibt, kann die Zunahme des Druckes nach dem idealen Gasgesetz einfach berechnet werden. Der Druck nimmt bei der gewählten Temperaturzunahme um 0.3 bar zu.
2. In dem zweiten Ansatz verdampft Wasser aus den Zellwänden des Holzes in die Hohlräume. Hier wird zunächst angenommen, dass nur 1 M% Wasser im obersten 1 mm der Platte verdunsten, da während der Experimente festgestellt wurde, dass die Temperaturgradienten an der Oberfläche gross sind. Hinzu kommt, dass der Prozess der Diffusion von Wasser (Wassertransport) im Holz sehr langsam ist. In einem Kubikmeter Holz (1.0 m x 1.0 m x 1.0 m) sind bei 12 M% Holzfeuchte insgesamt 48 kg Wasser eingeschlossen. Pro Millimeter Tiefe sind das 48 Gramm über eine Fläche eines Quadratmeters. Bezogen auf 1M% müssen deshalb 4 Gramm Wasser in kürzester Zeit verdampfen und es infolgedessen in dem Zellraum zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Luftfeuchtigkeit von 65% auf 100 % Luftfeuchtigkeit führen muss.

Mit einer Ausgangsfeuchte im Zellraum von 65% (12 M%) und mit Einbezug der Porosität des Holzes (0.67), beträgt die absolute Wassermenge 8 g/m³ (8 mg pro Millimeter Tiefe). Bei einer Luftfeuchte von 100% und einer Temperatur von 100 °C, nimmt die Wassermenge

von 538 g/m³ auf 546 g/m³ (546 mg pro Millimeter Tiefe) zu. Beim Verdunsten von 4 Gramm Wasser, nimmt die Druck in diesem ersten Millimeter Tiefe um $4/0.538 = 7.44$ bar zu. Diese erste Abschätzung zeigt anschaulich den dabei entstehenden Dampfdruck. Verdampfen 2 M% sind es von der Grössenordnung her bereits 14.88 bar.

Die Ursache der Blasenbildung ist folglich die Verdunstung von Wasser aus den Zellwänden.

Lufteinschluss Gasgesetz	Wasserdampf Flüssig nach Dampf	Terpenen (Harz)
Konstantes Volumen $T_{\text{start}} = 293.15^{\circ}\text{K}$ (20°C) $T_{\text{ende}} = 383.15^{\circ}\text{K}$ (110°C) $P_{\text{start}} = 0.10$ MPa (1.0 bar) $P_{\text{ende}} = 0.13$ MPa (1.3 bar) $\Delta P = 0.03$ MPa (0.3 bar)	Siedetemperatur 100°C Feuchte vom Holz 12 M% Porosität Holz = 67% $T_{\text{start}} = 293^{\circ}\text{K}$ (20°C) $T_{\text{ende}} = 383^{\circ}\text{K}$ (110°C) $LF_{\text{start}} = 65\%$ $LF_{\text{ende}} = 100\%$ $\Delta P = 0.74$ MPa pro M% (7.4 bar)	Siedetemperatur 120°C ...?

Abbildung 50: Auflistung der mögliche (Dampf)Drücke in der Kurzzeit-Blasenbildung

In Versuchen zur Provozierung der Langzeitblasenbildung konnten keine Blasen erzeugt werden. In der Obermattbrücke (Baujahr 2007) wurden selbst nach 13 Jahren keine Blasen festgestellt. Damit ist anzunehmen, dass diese Problematik bei Fahrbahnplatten aus Holz ein sehr geringes Risiko im Vergleich zu den Fahrbahnplatten aus Beton darstellt.

Der Oxygen Permeability Index (OPI) erlaubt eine mögliche Erklärung. Es ist bekannt, dass Holz etwa 67 % Poren hat, welche miteinander verbunden sind. Das Volumen des Betons besteht aus lediglich 3 % aus Poren die dazu nicht miteinander verbunden sind. Die Messung des OPI erfolgt mit einem Gerät aus zwei Kammern, welche mit dem zu prüfenden Material (Durchmesser / Dicke = 68 / 25 mm) (Loser, 2020) getrennt werden. Auf einer Seite wird ein Druck aufgebaut und die Geschwindigkeit des Druckabfalls durch die Probe, wird gemessen. Der OPI von Fichtenholz ist 3.5-mal grösser als derjenige von Beton (Hugi et al., 2007 und Loser, 2020). Dies bedeutet, dass in Holz der Druck 3.5-fach schneller abnimmt als im Beton. Bei gleicher Zunahme der Temperatur wäre der Druck in einer Luftblase einer Holzbrücke 3.5-mal tiefer als in einer Betonbrücke. Die Geschwindigkeit der Abnahme ist in Abbildung 51 illustriert.

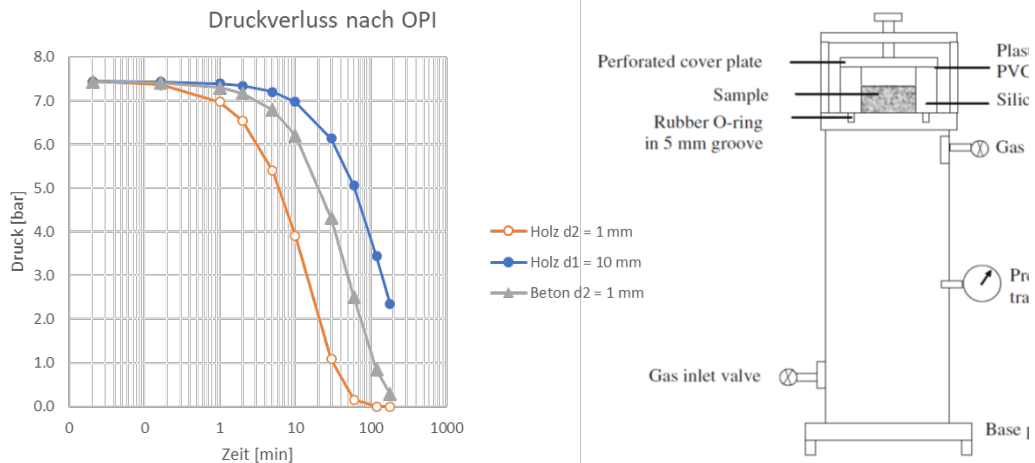


Abbildung 51: Rechnerische Abnahme des Druckes nach Messung von Oxygen Permeability Index (OPI)

3.10 Asphalt

Gussasphalt MA ist dank seiner Zusammensetzung und den verwendeten Baustoffen selbstverdichtend und weist einen sehr geringen Hohlraumgehalt (ca.1 Vol.-%) auf, wodurch er wasserdicht ist. Im Schweizer Brückenbau wird Gussasphalt üblicherweise für Schutz- Trag- und Deckschichten eingesetzt.

Die VSS 40 450 legt die MA-Sorten fest, welche im Brückenbau anzuwenden sind. Die einzelnen MA-Sorten sind in der SN-EN 13108-8 bezüglich Korngrößenverteilung, Grösstkorn, Bindemittelsorte und -Qualität sowie Bindemittelgehalt beschrieben. Diese Norm legt auch Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen MA-Sorten fest.

3.11 Diskussion und Schlussfolgerungen

3.11.1 Fahrbahnaufbauten

Es ist dringend zu empfehlen, Anforderungen an die Oberflächen-Eigenschaften der Holzplatten zu definieren:

- Brettschichtholzplatten: Industriequalität und gehobelt reicht, eventuell tiefe Risse (Baumkante) oder Materialausbrüche (Äste), welche beim Hobeln entstehen, verspachteln
- Furnierschichtholzplatte: Industriequalität ausreichend
- Brettsperholz: Industrie Sichtqualität reicht: die Fehlstellen der Platte müssen verspachtelt und geschliffen sein.

Als Baustoff für die Versiegelung ist nur Epoxidharz zu empfehlen. PMMA-Versiegelungen härten auf Harzgallen und (lebenden) Äste, infolge des hohen Anteils an Terpenen, nicht aus.

Als Abdichtung sind Polymerbitumen-Dichtungsbahnen zu empfehlen. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit von Holz, entstehen beim Einbau des Gussasphaltes wesentlich höhere Temperaturen in der Abdichtung als bei einer Betonunterlage. PMMA-Abdichtungen, welche sich auf Beton bestens bewähren, versagen auf Holz, da die auftretenden Temperaturen zu hoch sind. Diese Feststellung gilt auch für dünne Schutzschichten (25 mm) mit Niedertemperatur-Asphalt.

Der Gussasphalt muss als Niedertemperatur-Asphalt mit maximaler Temperatur von 200°C eingebaut werden. Die Schutzschicht kann damit mit MA 8 mit einer Dicke von 25 mm oder auch mit MA 11 35 mm dick eingebaut werden.

3.11.2 Temperatur- und Feuchteverlauf

Während der Verlegung der MA-Schutzschicht wurden die Temperaturen im Aufbau gemessen. Von besonderem Interesse ist die Temperatur direkt unter der Abdichtung, welche bei der PBD maximal 110°C und unter der PMMA-Abdichtung maximal 140°C betrug. Die Temperatur lag nach 2 Stunden immer noch bei 60 bis 80°C. Die Feuchtigkeit im Holz wird bis zu einer Tiefe von maximal 30 mm durch den Einbau des Gussasphaltes beeinflusst. Auch 24 Stunden nach dem MA-Einbau lag die Feuchtigkeit noch 1 % über dem Wert vor dem Einbau.

3.11.3 Haftzugversuche

- EP-Versiegelung / Untergrund:
Die gemessenen Werte (Mittelwert einer 3-er Serie) lagen bei den 9 untersuchten Platten zwischen 1.7 und 4.9; Mittelwert 3.2 N/mm². Diese Werte liegen deutlich über dem bei Betonuntergrund geltenden Anforderungswert von 1.5 N/mm².
- PBD / Versiegelung
Es wurden 7 Platten mit unterschiedlichem Aufbau untersucht; die gemessenen Werte (3-er Serie) lagen zwischen 0.64 und 1.25; Mittelwert 1.0 N/mm². Bei bituminösen Produkten werden die Anforderungen in Abhängigkeit von der Temperatur festgelegt; bei der Temperatur zum Zeitpunkt der Messung lag der Sollwert bei 0.45 N/mm².
- Gussasphalt / PBD
Bei den 5 untersuchten Platten lagen die Haftzugwerte zwischen 1.0 und 1.1 N/mm²; Mittelwert 1.0 N/mm². Auch in diesem Falle ist der Sollwert von der Temperatur abhängig; er betrug 0.38 N/mm².
- Die Haftzugfestigkeiten in allen untersuchten Zwischenschichten erfüllen die Anforderungen, welche bei Brückenabdichtungen auf Betonuntergrund (VSS 40 450) gelten. Für Holzbrücken empfehlen wir die gleichen Werte anzuwenden.

3.11.4 Scherversuche

Aus den durchgeführten Prüfungen können auf Holzplatten keine Unterschiede zu Betonplatten festgestellt werden.

3.11.5 Blasenbildung

Im Unterschied zu Beton weist Holz eine deutlich höhere Porosität auf, sodass allenfalls auftretender Dampf zwischen Abdichtung und Unterlage durch Diffusionsvorgänge im Holz abgebaut werden kann. Wachsende Blasen, welche über einen langen Zeitraum langsam entstehen, treten bei Holz kaum auf. Weder in der Praxis noch in Laborversuchen konnte langsam wachsende Blasen festgestellt werden.

Während des Einbaus des Gussasphaltes treten hohe Temperaturen auf, welche bei allfälligen Fehlstellen zu einer raschen Zunahme des Dampfdruckes führen, welcher nicht schnell genug abgebaut werden kann. Somit sind Blasen während den Bauarbeiten nicht auszuschliessen, wie dies in den Laboruntersuchungen festgestellt wurde. Wir schätzen das Risiko einer Blasenbildung während den Bauarbeiten bei Holz nicht höher ein, als dies bei Betonuntergrund der Fall ist.

4 Bauwerksmonitoring

Die Holzfeuchte hat einen massgebenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Holzbrücken. Holz reagiert aufgrund eines ausgeprägten hygroskopischen Materialverhaltens auf das Umgebungsklima mit einer Feuchtezunahme oder -abnahme.

Die Holzfeuchte hat auf folgende Eigenschaften des Holzes einen Einfluss:

- Steifigkeit und Festigkeit
- Gefährdung durch holzerstörende Pilze
- Formbeständigkeit und Querschnittsbeständigkeit (Risse)

Ein wichtiger Kenn- und Grenzwert für die Grösse der Holzfeuchte ist der Fasersättigungsbereich.

Bis zum Erreichen des Fasersättigungsbereiches wird Feuchtigkeit in die Zellwände als gebundenes Wasser eingelagert, darüber hinaus erfolgt die Einlagerung als freies Wasser in den Hohlräumen des Holzes. Der Fasersättigungsbereich hängt von der Holzart ab. Für die üblichen nordeuropäische Holzarten liegt er bei ca. 26 – 32 %. Nur bei Holzfeuchten unter dem Fasersättigungsbereich treten Schwind- und Quellvorgänge auf.

Je nach umgebendem Klima stellt sich bei Holz ein Gleichgewicht zwischen Holzfeuchte und relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur ein. Die zu erwartende Ausgleichsfeuchte ist bei geschützten Brücken mit 18M% +/-2% zu erwarten.

Eine deutlich erhöhte Holzfeuchte führt zu einer Schädigung durch holzerstörende Pilze. Für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen ist eine Holzfeuchte infolge Staunässe oberhalb der Fasersättigung über einen längeren Zeitraum (grösser 4 Monate) notwendig.

Aus diesem Grund sind regelmässige lokale Inspektionen, mit Überprüfung der Holzfeuchte in den einzelnen Bauteilen, für die Sicherung von Brückentragwerken wichtig. Schwer kontrollierbare und verdeckte Komponenten sind bei „geschützten“ Holzbrücken oft nicht zu vermeiden. Ferner können die Abdichtungssysteme i.d.R. nicht oder nur mit aufwändigen Sondierungen kontrolliert werden.

Gerade bei der Erneuerung von Asphaltbelägen werden immer wieder Leckagen in der Abdichtung erkennbar. Diese führen zu Staunässe in der Fahrbahnplatte und in der Folge oft zur Schädigung (Degradation) durch holzerstörende Pilze.

Die Langzeitüberwachungen des Holzfeuchtegehaltes von Brückentragwerken ermöglicht es frühzeitig auf Diskrepanzen zu reagieren. Eine flächige Leckage-Erkennung integriert in einem Monitoringsystem macht hier besonders Sinn. Durch den Einbau von Messsensoren können Messdaten in festgelegten Intervallen erfasst und gespeichert werden. Warnungen und Alarmer sind direkt von der Messeinheit ausgelöst.

Ein für den Holzbrückenbau neuentwickeltes Monitoringsystem unter Verwendung von Sensorbänder wurde im Zuge des F+E-Projektes zur kontinuierlichen Überwachung der Funktionstüchtigkeit der Abdichtung an einer Fuss- und Radwegbrücke zwischen Rapperswil und Auenstein (Auenparkbrücke Rapperswil/Auenstein) ausgeführt und wissenschaftlich begleitet. Da das Hauptziel des F+E-Projekts die Entwicklung von Systemaufbauten im Verbund war, wurden auch Lösungen zur Überwachung der Funktionstüchtigkeit der Abdichtung bei Aufbauten mit Vollverbund entwickelt.

4.1 Stand der Technik

4.1.1 Messverfahren

Für die Überwachung von Brückentragwerken ist heute die elektrische Widerstandsmessung zur Kontrolle des Holzfeuchtegehaltes in der Tragkonstruktion Standard. Die Adaption der Messsensoren und die Datenspeicherung wie auch die Onlineübertragung sind relativ einfach umzusetzen.

Für die Überwachung von punktuell kritischen Stellen im Holz, kommen neben den Widerstandsmessverfahren auch die Sorptionsisothermen-Methode zur Anwendung.

Die Sorptionsmethode liefert hohe Genauigkeit und sieht den Einbau von Feuchte- und Temperatursensoren an den kritischen Stellen vor (Bonifacio S. 2020).

Eine interessante Möglichkeit könnten die passiven RFID Sensoren bieten. Ein spezifischer Typ von RFID-Tags misst die Feuchte in der unmittelbaren Umgebung des Tags nach dem Prinzip des kapazitiven Messverfahrens (Burger K. et al. 2018). Die Anwendung dieser Sensoren kommt vor allem im medizinischen und logistischen Bereich vor. Die Verwendung von RFID-Tags ist kostengünstig und kabellos. Passive RFID-Tags brauchen keine externe Stromversorgung oder Batterie und sind somit bei vielen Anwendungen einsetzbar.

Flächige Bauteile können zuverlässig mit leitfähigem Glasvlies oder mit Bandsensoren überwacht werden. Beide Lösungen stützen sich auf Potenzialmessungen und sind vor allem im Hochbau bei Überwachung von Flachdächern im Einsatz (Burger K. et al. 2018). Bei Veränderung der Feuchte oder bei Vorhandensein von Wasser ändert sich das elektrische Potential.

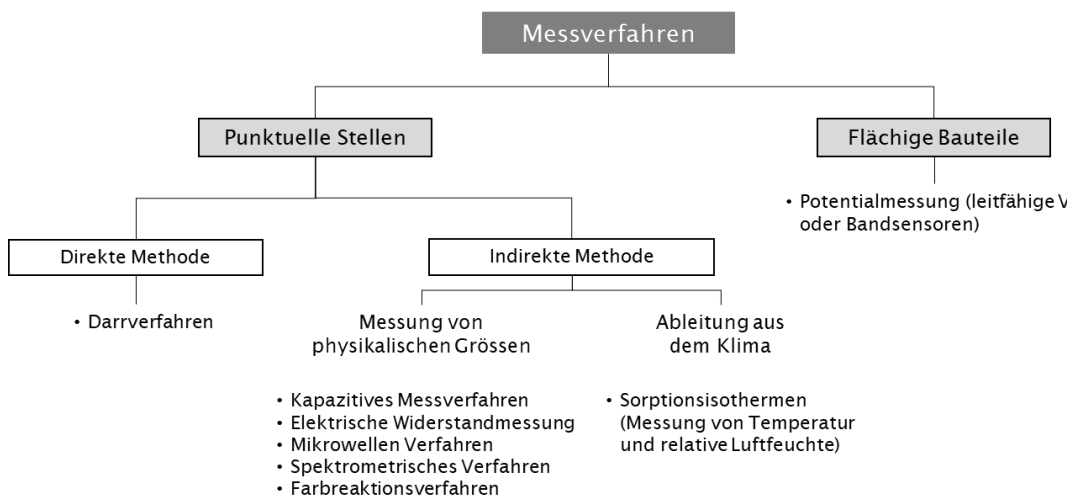


Abbildung 52: Übersicht der Messverfahren in Anwendung bei punktuellen Stellen und bei flächigen Bauteilen

Durch den Einbau von punktuellen oder flächigen Messsensoren, können Messdaten in festgelegten Intervallen mit einer Messeinheit erfasst und auf einem Webserver gespeichert werden. Dies ermöglicht, dass diese in Echtzeit, z.B. vom Arbeitsplatz aus, eingesehen werden können. Mit dieser Lösung sind die Daten immer weltweit verfügbar. Der Server kann die Messdaten auswerten und Warnungen bzw. Alarm auslösen. Nach der Inbetriebnahme arbeitet das System autonom. Die verschiedenen Komponenten, Messstellen, Messeinheit, Gateway und Benutzeroberfläche, bilden dabei das Monitoringsystem.

Das Widerstandsmessverfahren basiert auf dem Prinzip, dass die Holzfeuchte den elektrischen Widerstand des Holzes beeinflusst: der elektrische Widerstand nimmt mit zunehmender Holzfeuchte ab (Keylwerth R. und Noack D.1956). Der elektrische Widerstand wird mit Hilfe von zwei Elektroden gemessen, die in das Holz eingeführt werden. Elektroden sind in der Regel isolierte Nägel oder Schrauben. Die beiden Elektroden werden mit einem Gerät verbunden, um den elektrischen Widerstand zu messen. Auch die Holztemperatur ist zu messen, da die Holzfeuchte von der Holztemperatur abhängig ist (Herrmann M. 2009).

Bei Messstellen, die dem Einfluss von Unwetter oder starken Schwankungen der Holzfeuchte ausgesetzt sind, muss der Einbau der Elektrode besonders sorgfältig erfolgen. Durch Schwinden und Quellen können normale Holzschrauben oder Nagel keinen oder schlechten Kontakt mit dem Holz oder dem Kabel haben. Das führt zur Verfälschung der Widerstandsmessung und zu einer tieferen Holzfeuchte. Eine Lösung mit Stockschrauben und einer Schutzbox hat sich bewährt. Die Stockschrauben sind ausser der Spitze zu isolieren. Die Kabel sind direkt an der Stockschraube fixiert mit Mutter und Kontermutter. Schwinden und Quellen von Holz hat so keinen Einfluss auf den guten elektrischen Kontakt zwischen dem Holz und der Elektrode. Alle metallischen Teile der Elektroden müssen aus Edelstahl bestehen.

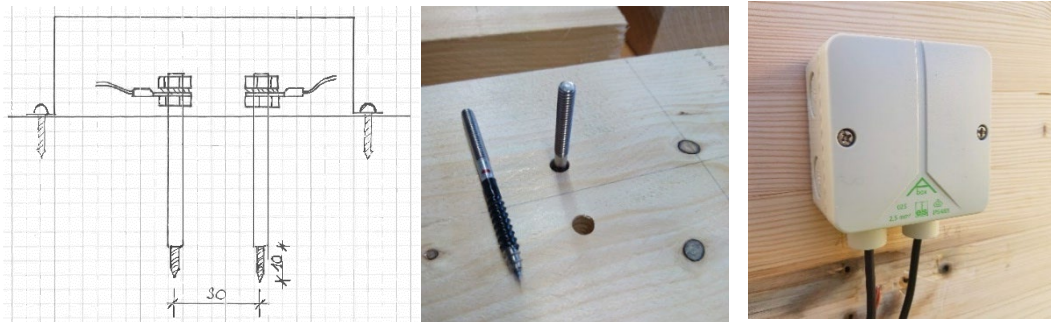


Abbildung 53: Prinzip Skizze und Fotos des Einbaus von Stockschrauben-Elektrode und Schutzbox

Nach der Messung des elektrischen Widerstandes und der Temperatur des Holzes ist es möglich, die Holzfeuchte anhand von Modellen oder Kennlinien zu bestimmen.

Das Messverfahren sollte bei Temperaturen von unter 0 °C mit Vorbehalt und ab -5 °C nicht mehr eingesetzt werden, da hier die Wassermoleküle im Holz zu gefrieren beginnen und sich die Leitfähigkeit von Holz ändert. Die Messdaten sind dann fehlerhaft. Nach Dietsch et al. (2015), liefert die Widerstandsmessmethode eine Genauigkeit von ± 1.0 M-% für Holzfeuchten zwischen 6 M-% und dem Fasersättigungspunkt. Oberhalb des Fasersättigungspunktes nimmt die Genauigkeit deutlich ab. Ab etwa 25 M% Holzfeuchte, liegt eine zunehmende Ungenauigkeit vor.

Die Sorptionsisothermen-Methode, sieht die Messung von Lufttemperatur und relativer Feuchte in einem kleinen versiegelten Hohlraum im Holz vor. Die Auswertung der Holzfeuchte erfolgt mit Modellen, die den Zusammenhang zwischen den gemessenen Parametern beschreiben, z. B. für Fichtenholz nach Simpson (1973).

Leimfugen, Salz (Streusalz), Imprägnierung können einen Einfluss auf die Messung mit der Widerstandsmethode haben. In diesen Fällen eignet sich die Sorptionsmethode am besten, da diese Faktoren die Messung nicht beeinflussen. Zum anderen wird diese Methode bei Bauwerken eingesetzt, bei denen mit langanhaltenden Temperaturen unterhalb von 0 – 5°C gerechnet wird.

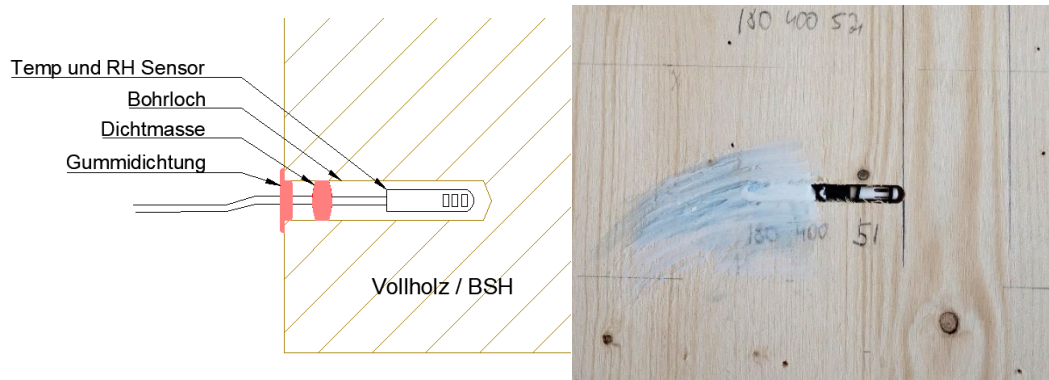


Abbildung 54: Einbau Lufttemperatur und relative Feuchte Sensor für die Sorptionsisothermen-Methode

4.1.2 Flächige Messverfahren für Abdichtungen

Bei einer intakten Abdichtung ist nicht nur der Wasserfluss, sondern auch der elektrische Stromfluss unmöglich. Bei einer Leckage fließt Wasser von der nassen Seite auf die andere Seite der Abdichtung und ermöglicht die Leitung von elektrischem Strom.

Anhand von diesem physikalischen Prinzip, sind heutzutage flächige Überwachungen von Flachdächern oder Deponien möglich (Burger K. et al. 2018). Bei Flachdächern werden leitfähiges Glasvlies unter der Abdichtung und oberhalb der Dämmung eingebaut. Zusätzlich wird ein Raster von Flachkabeln eingebaut. Diese bilden den Pol des Messsystems. Oberhalb der Abdichtung wird mittels einer Kontaktplatte der zweite Pol gesetzt. Bei einem Regenereignis wird der Strom von der Kontaktplatte über die gesamte nasse Oberfläche zur Abdichtung geleitet. Die Messeinheit führt eine Potenzialmessung zwischen den zwei Stellen durch. Anhand des Kabelrasters ist es möglich, den Potentialverlauf in der Fläche darzustellen und Leckagen sofort zu erkennen und die Position festzustellen.

Der Einbau von Glasvlies unter der Abdichtung dient auch als Trennschicht. Der Aufbau hat also kein Verbund zwischen Abdichtung und Untergrund. Bei Flachdächern sind keine besonderen mechanischen Eigenschaften und Verbund beim Abdichtungssystem gefragt. Diese Trennschicht kann auch während des Einbaus der Abdichtung den Dampfdruck ausgleichen.

Dieses Messsystem kann sowohl mit einer fix installierten Messeinheit inkl. Sendung der Daten an einem Cloudserver betrieben werden oder auch für regelmässige Inspektionen der Abdichtung mit mobilen Messgeräten verwendet werden.

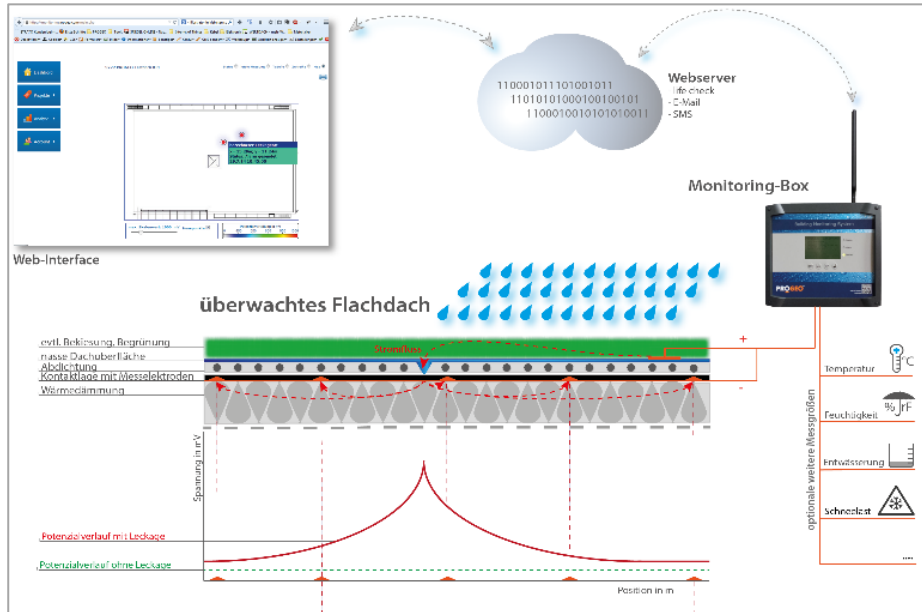


Abbildung 55: Prinzip Aufbau Monitoringsystem und Messung des Potentials in Anwendung bei der Monitoringsystem der Firma ProGeo GmbH

Als Alternative zum leitfähigen Glasvlies können auch Sensorbänder eingesetzt werden. Mit Sensorbändern ist es möglich, linienförmig unter der Abdichtung hohe Feuchten oder Nässe zu detektieren. Bandsensoren bestehen aus einem Kunststoffgewebe in die Edelstahldrähten eingewoben sind. Zur Messung des Potentials braucht es keinen Pol an der Oberfläche der Abdichtung. Die Potentialmessung wird zwischen zwei Drähten im Sensorband durchgeführt. Das Vorhandensein von Wasser führt dazu, dass der elektrische Widerstand sinkt und detektiert werden kann.

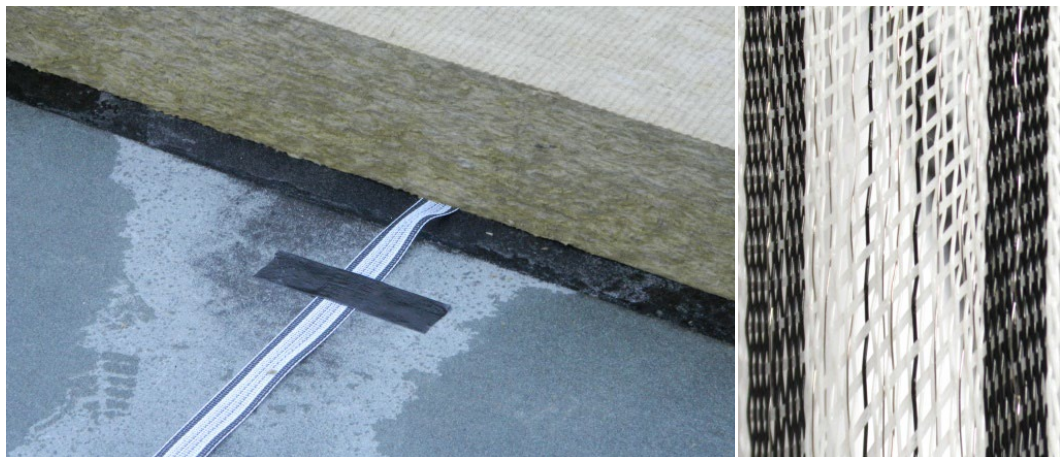


Abbildung 56: Bandsensor «dm» der Firma ProGeo in einem Warmdachaufbau (links) und Detail (rechts)

Dieses Messverfahren ist vor allem an Stellen im Einsatz, an denen sich das Wasser oder die Feuchte unter der Abdichtung ausbreiten können. Dies ist bei einem Aufbau ohne Verbund zwischen den Abschottungen möglich.

Bei geeigneten Oberflächen der Fahrbahnplatten kann so mit linienförmigen Sensorbändern an den Tiefpunkten, Leckagen über die gesamte Fläche identifiziert werden.

4.1.3 Die kapazitive Methode mittels Radio Frequency Identification (RFID)-Tags

Radio Frequency Identification (RFID)-Tags („Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen“) oder Transponder sind kleine Geräte, die Radiowellen mit geringer Leistung nutzen, um Daten zu empfangen, zu speichern und an ein Lesegerät in der Nähe zu übertragen. Die RFID-Tags bestehen aus den drei Hauptkomponenten: einem Mikrochip oder integrierten Schaltkreis (IC), einer Antenne und einer Substrat- oder Schutzmaterialschicht, die alle Komponenten zusammenhält (Smiley S. 2019).



Abbildung 57: Komponenten eines RFID-Tags (Smiley S. 2019) (links)

Abbildung 58: RFID-Tags der Firma Smartrac, Sensor DOGBONE oben und Sensor PATCH unten, zur Messung der Feuchte (rechts)

Es gibt drei Grundtypen von RFID-Tags: passive, aktive und semi-passive oder batteriegestützte passive (BAP) (Smiley S. 2019). Passive RFID-Tags haben keine interne Stromquelle, sondern werden durch die elektromagnetische Energie gespeist, die von einem RFID-Lesegerät übertragen wird. Aktive RFID-Tags verfügen über einen eigenen Sender und eine eigene Stromquelle an Bord des Tags.

Semipassive oder batteriegestützte passive (BAP) Tags bestehen aus einer Stromquelle, die in eine passive Tag-Konfiguration integriert ist. Darüber hinaus arbeiten RFID-Tags in drei Frequenzbereichen: Ultra-High Frequency (Ultrahochfrequenz, UHF), High Frequency (Hochfrequenz, HF) und Low Frequency (Niederfrequenz, LF).

RFID-Tags können auf einer Vielzahl von Oberflächen angebracht werden und sind in verschiedenen Größen und Ausführungen erhältlich. Die Abmessungen variieren von einigen Millimetern bis zu mehreren Zentimetern.

4.2 Flächige Leckage-Erkennung bei Abdichtungssystemen mit Verbund

Durch Einsatz von abgesicherten Systemlösungen für Abdichtungssysteme und Asphaltbeläge auf Fahrbahnplatten aus Holz, kann die Dauerhaftigkeit der Holzbrücken erhöht und der Wartungsaufwand signifikant reduziert werden. Der Fahrbahnaufbau kann eine schwimmende Verlegung der Abdichtung (Aufbau ohne Verbund) oder ein schubfester Aufbau mit Vollverbund aufweisen. Bei beiden Systemlösungen sind die Schadens- bzw. Feuchtweiterleitungsmechanismen im Fall einer Leckage sehr unterschiedlich. Bei dem Aufbau mit Vollverbund, verursacht die Leckage eine lokale Erhöhung der Holzfeuchte in der Trägerplatte. Der Verbund zwischen Abdichtung und Unterlage verhindert die Ausbreitung des eindringenden Wassers unter der Abdichtung. Bei einem Aufbau ohne Verbund kann sich die eindringende Feuchtigkeit in der Trennlage (oft aus mehrlagigen Glasvliesbahnen) verteilen. Eine Erhöhung der Holzfeuchte über eine grössere Fläche der Fahrbahnplatte im Vergleich zum Aufbau mit Vollverbund ist die Folge (Abb. 61).

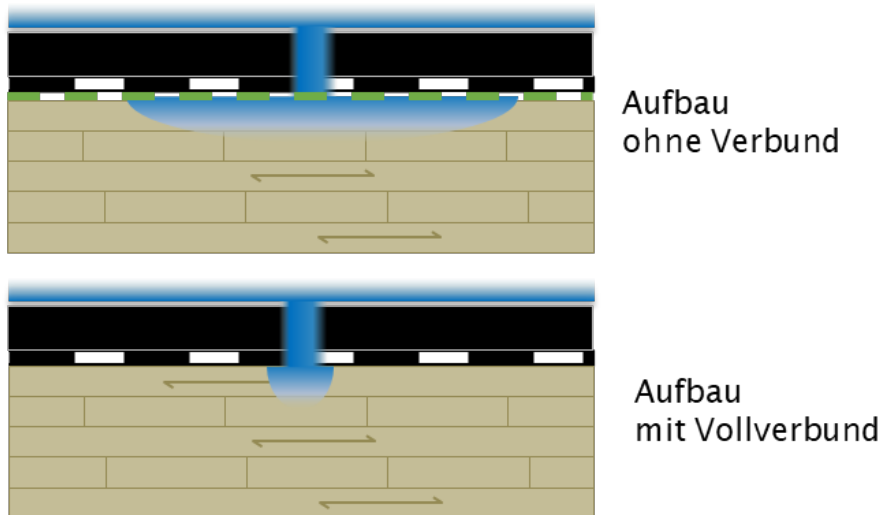


Abbildung 59: Schadenmechanismus im Falle einer Leckage in der Abdichtung, ohne und mit Verbund

Bei einem Aufbau ohne Verbund ist es aufgrund der Ausbreitung des Wassers in der Trennschicht, einfach möglich mit punktuellen oder linienförmigen Sensoren eine Leckage zu detektieren (vgl. Kapitel 4.3). Bei einem Aufbau mit Verbund ist hingegen ein System zur flächigen Überwachung eines möglichen Feuchteintritts zwingend notwendig.

4.2.1 Eignung leitfähiger Glasvliese zur Überwachung von Leckagen bei Aufbauten im Verbund

Leitfähige Glasvliese werden bei Aufbauten ohne Verbund bereits als Trennschicht unter der Abdichtung verwendet. Mittels der elektrischen Eigenschaften dieser Vliese und einer Gegenelektrode an der Oberfläche (vgl. Stand der Technik) kann eine Potentialmessung durchgeführt und eine Leckage einfach erkannt werden. Mittels Versuche wurde die Eignung, die elektrischen und mechanischen Eigenschaften und der Einbau von leitfähigen Glasvliesen in der Epoxidharz-Versiegelung evaluiert.

Für die Versuche wurde eine Brettsper Holzplatte mit den Abmessungen 1 m x 1 m mit einer ersten Schicht Epoxidharz versiegelt. Darauf wurde direkt ein Glasvlies und im Raster von 30 cm Kabel auf Abstand zum Glasvlies verlegt. Als Kontaktstelle/Abstandshalter zwischen Glasvlies und Kabel dienen Ringkabelschuhe. Eine weitere Schicht Epoxidharz wurde eingebaut, um das Glasvlies zu tränken. Anschliessend erfolgt die übliche Absandung mit Quarzsand (vgl. Kap 4.) und eine weitere Schicht Epoxidharz. Nach dem Austrocknen der Epoxidharzversiegelung wurde eine PBD-Bahn aufgeflammt und der Gussasphalt eingebaut.

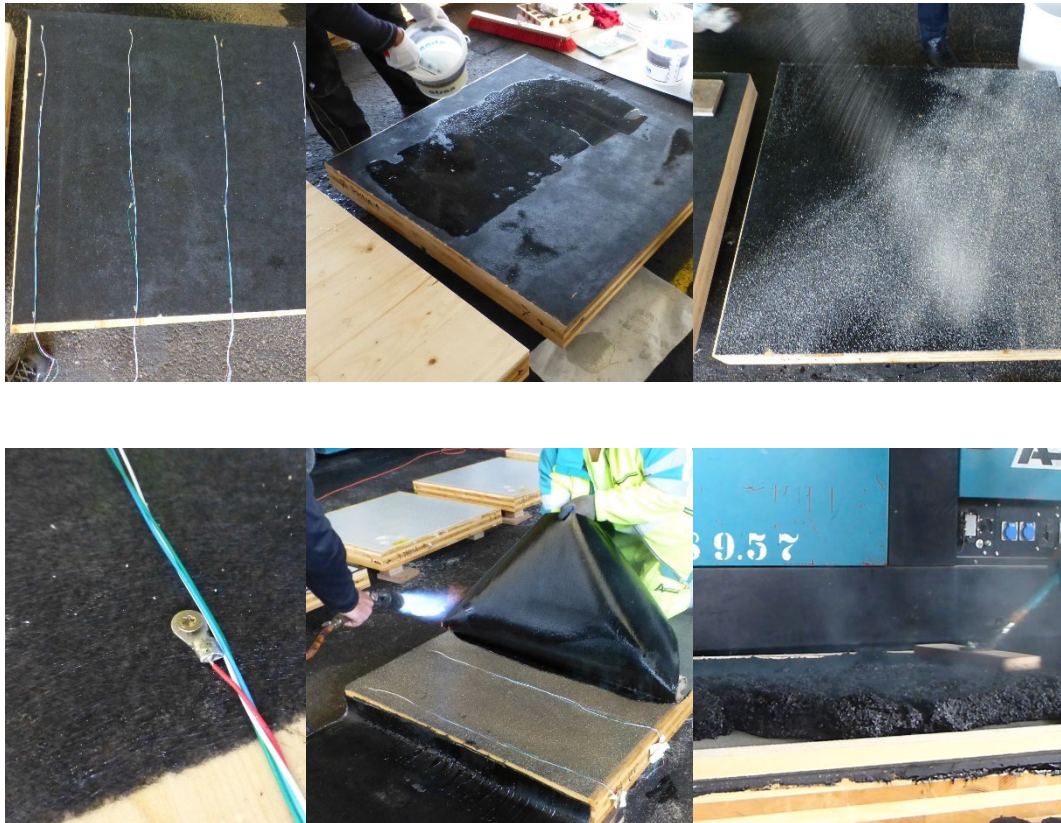
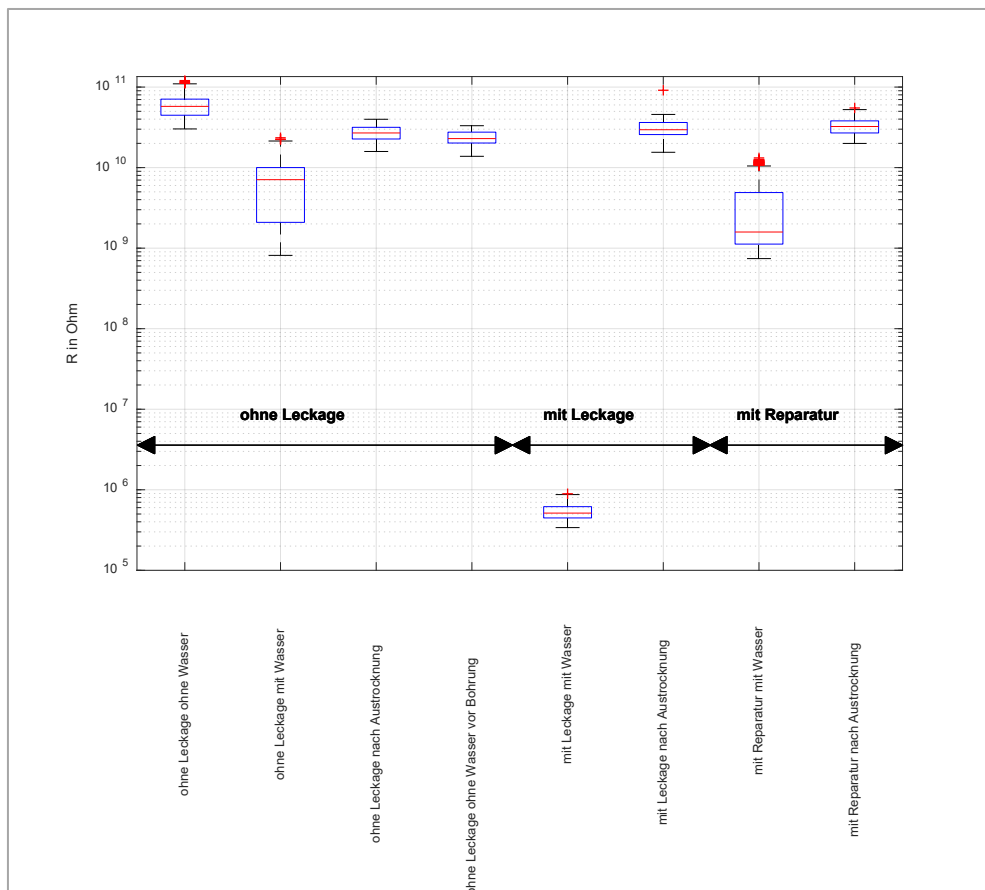
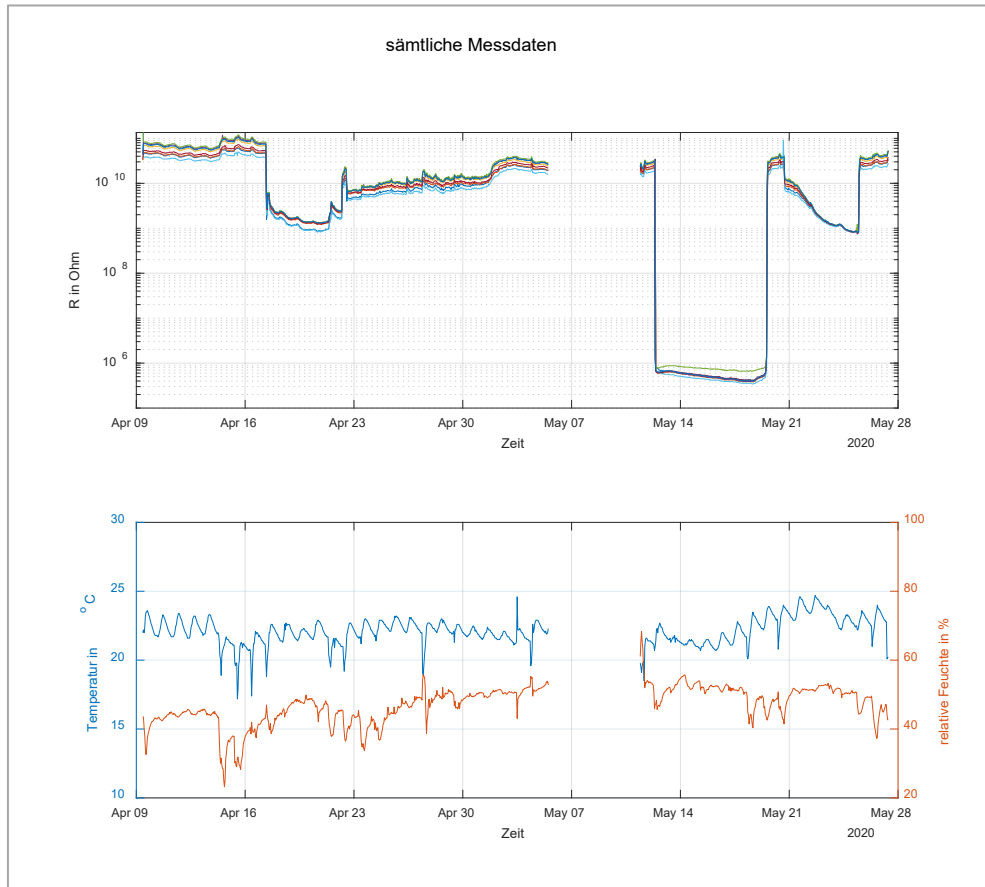


Abbildung 60: Darstellung des Versuchsablaufs im Werkhof der Aeschlimann AG in Zofingen (AG)

4.2.2 Versuche zur Messung des elektrischen Widerstands und Simulation einer Leckage in der Abdichtung

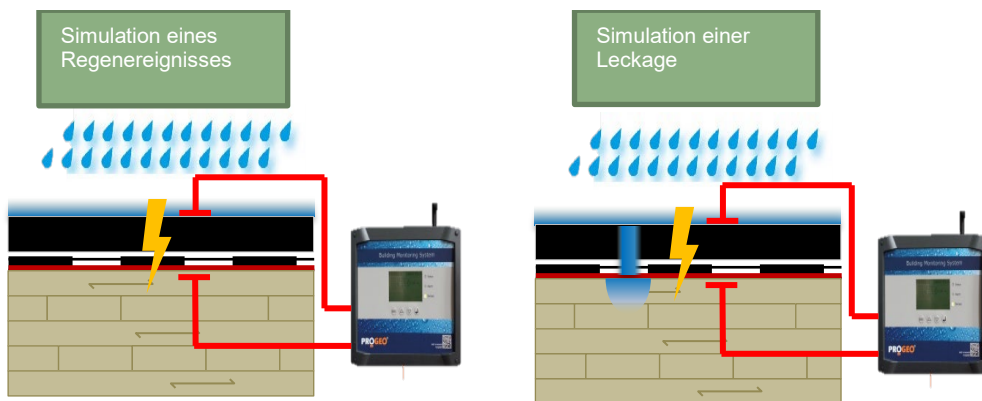
- ➔ Das Wasser bildet eine parallele Schaltung von mehreren Widerständen über die Oberfläche und dem Glasvlies



4.2.3 Versuche zur Messung der Eigenschaften mit und ohne Epoxidharz

- Einfluss der Kontaktfläche zwischen Kabel und Glasvlies
- Einfluss des Einbettens (Tränken) in Epoxidharz
 - Ziel: diese beiden Faktoren zu untersuchen

Bereits durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass der Einbau von leitfähigen Werkstoffen wie z. B. spezielle Glasvliese unter der Abdichtung, das Detektieren von Feuchteänderungen bei Holzbrücken ermöglicht. Die Versuche haben auch bewiesen, dass bei Anwendung in Abdichtungssystemen im Verbund die mechanischen Eigenschaften nicht negativ beeinflusst werden.



Flächenmonitoring (Leckagemonitoring)

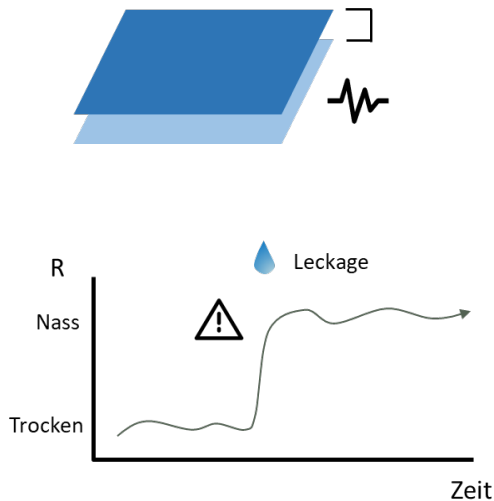


Abbildung 61: Schema Messungen auf Holzplatten mit leitfähige Glasvlies, PBD-Abdichtung und Gussasphalt bei Systemaufbauten im Verbund

4.3 Monitoring von einer Fuss- und Radwegbrücke

Im Zuge des F+E Projektes wurde eine Messkampagne an einem konkreten Bauobjekt durchgeführt mit dem Ziel die Eignung von im Hochbau üblichen Messsystemen für die

Anwendung bei Strassenbrücken zu evaluieren. Anhand dieser realen Situation können Kenndaten für den Bau und Betrieb von Brücken gewonnen werden.

Die Fuss- und Radwegbrücke B8025a zwischen Ruppertswil und Auenstein wurde in Jahr 2020 errichtet. Die Brücke spannt über fünf Felder und führt über die Aare mit einer gesamten Länge von 98 m.

Die zwei Längsträger bestehen aus mehreren vor Ort miteinander mechanisch verbundenen Brettschichtholzträgern, mit einer Breite von 3x240 mm und einer Höhe von 840 mm.

Auf der zwei Längsträger sind Querbalken 160x220 mm im Abstand von $e = 500$ mm verlegt. Die Fahrbahnplatte besteht aus einer 50 mm dicken 3-Schichtplatte aus Nadelholz, einer Trennlage (Glasvlies, 3-lagig), PBD-Abdichtung und Gussasphalt.

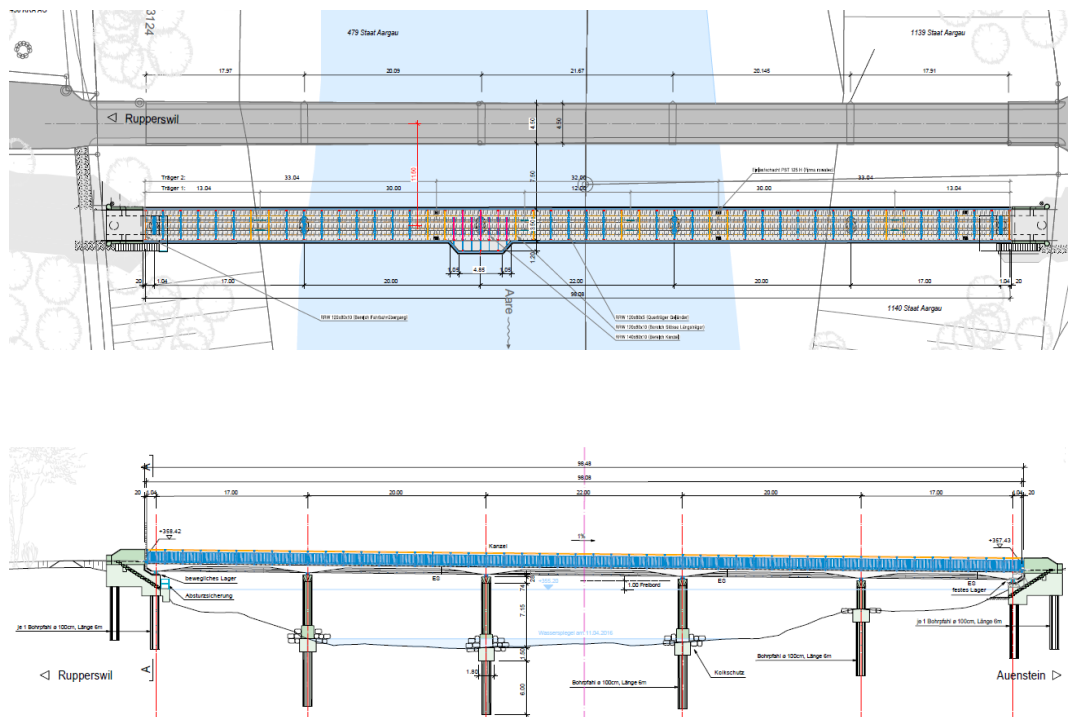


Abbildung 62: Situation und Längsschnitt Fuss- und Radwegbrücke B8025a zwischen Ruppertswil und Auenstein

4.3.1 Instrumentierung Brücke B 8025a

Die Instrumentierung der Brücke wurde so ausgelegt, dass einerseits Langzeitmessungen und die Überwachung der Funktionstüchtigkeit der Abdichtung gewährleistet wird und andererseits Temperaturmessungen beim Einbau des Gussasphalts möglich sind.

Da die Anforderungen an die Sensorsysteme für beide Anforderungen sehr unterschiedlich sind, war der Einbau von zwei verschiedenen Sensorsystemen erforderlich. Das System für die Temperaturmessungen beim Applizieren des Gussasphalts konnte nach der

Fertigstellung der Fahrbahnplatte wieder (teilweise) demontiert werden. Die zweite Sensorausstattung ist für die Langzeitmessungen ausgelegt.

4.3.2 Sensorausstattung für Temperaturmessungen während des Einbaus des Gussasphalts

Zur Erfassung der Temperatur, während dem Einbau des Gussasphalts, wurden Thermoelemente Typ K verwendet. Diese Art von Sensoren eignet sich sehr gut zur Messung von hohen Temperaturen. Die Messungen wurden mit einer Messrate von 0.1 Hz (1 Wert alle 10 Sekunden) an der Oberfläche der 3-Schichtplatte und an vier verschiedenen Stellen (Temp. Holz), die Temperatur an der Oberfläche der Stahlwinkel an vier Orte (Temp. Stahl) und die Temperatur an der Oberfläche der Abdichtung an zwei verschiedene Stellen (Temp. PMMA) durchgeführt. Die Lage der Sensoren ist in der Abbildung 63 dargestellt.

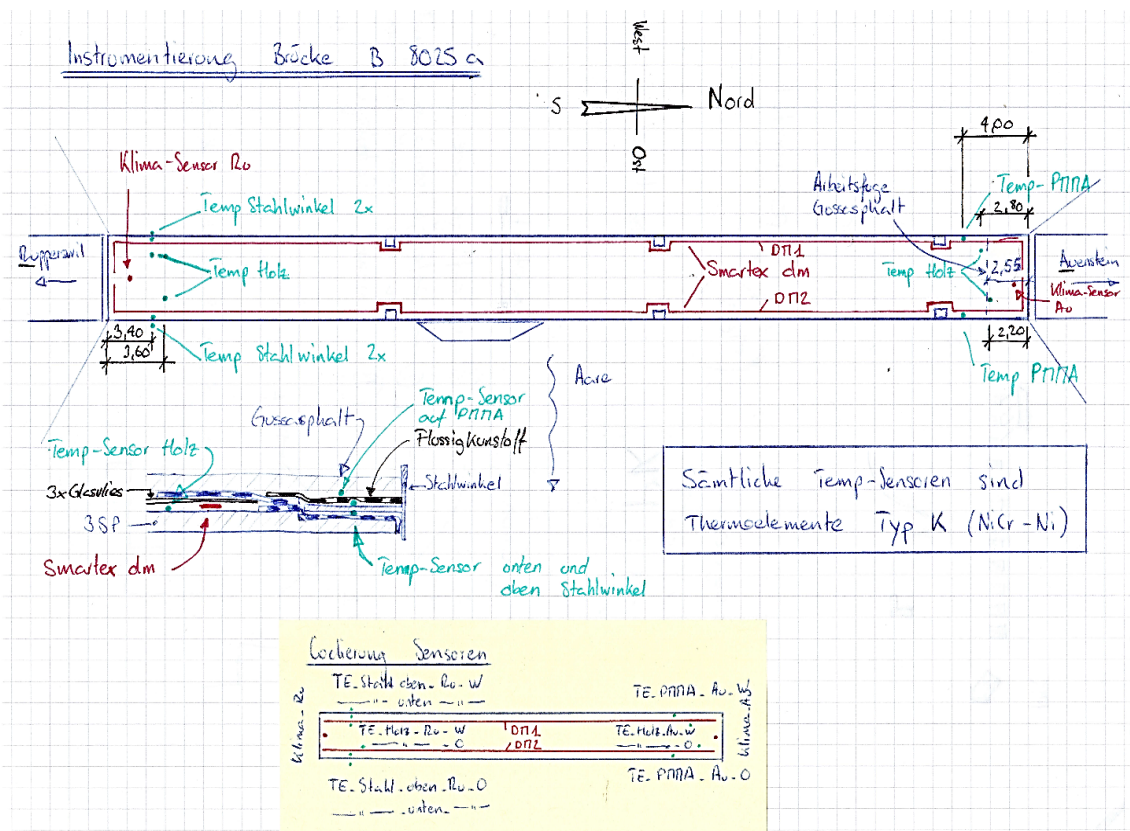


Abbildung 63: Situationsplan der Fuss- und Radwegbrücke B8025a zwischen Rapperswil und Auenstein während Messungen bei Einbau des Gussasphalts

4.3.3 Sensoren für die Langzeitmessung und zur Überwachung der Abdichtung

Für das Monitoring der Brücke wurden Sensoren unterhalb der Abdichtung entlang der Brückenränder eingebaut. Diese Sensoren bestehen aus Kunststoffbänder, in die Edelstahldrähte eingewoben sind. Die Sensorbänder «smartex dm» (ProGeo) können in Verbindung mit der Messeinheit und der Auswertung der Daten, Nässe unter der

Abdichtung feststellen. Ergänzt wird das Monitoringsystem durch einen Klimasensor (Lufttemperatur und Luftfeuchte), einen Holzfeuchtesensor nach dem Prinzip des elektrischen Widerstands, welcher in einem Querträger an dem Auflager Auenstein positioniert ist und zwei Temperatursensoren, die bei Temperaturmessungen beim Einbau des Gussasphalts verwendet wurden. Alle Sensoren sind mit einer Messeinheit und einer Datenübertragungsstelle mit SIM-Karte mit dem Mobilfunknetz verbunden und überträgt die Daten in die Daten-Cloud der Firma ProGeo. Die Messeinheit ist an das öffentliche Beleuchtungsnetz angeschlossen und mit einer Batteriepufferung ausgestattet.

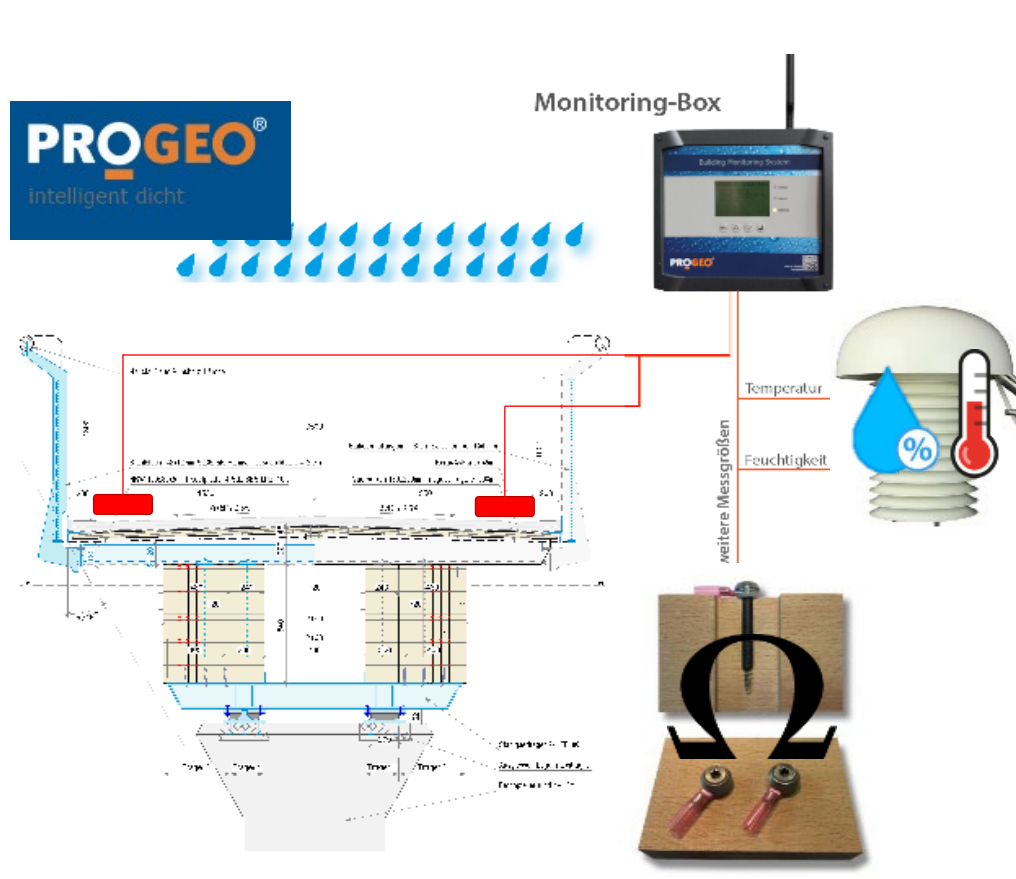


Abbildung 64: Monitoringsystem Fuss- und Radwegbrücke zwischen Rapperswil und Auenstein

4.3.4 Einbau der Sensoren auf der Fahrbahnplatte

Die Sensorbänder «smartex dm» wurden nach Anweisung der Firma ProGeo auf der Oberseite der 3-Schichtplatte verlegt. Ein Abstand vom Rand war dabei einzuhalten, damit die Bänder im Bereich der losen verlegten Abdichtung liegen. Die Ecken und das Umfahren der Einlaufschächte wurde wie in Abbildung 66 dargestellt, gemäss Angaben von ProGeo ausgeführt. Das verwendete Klebeband Ampacoll® UV der Firma Ampack ist elektrisch nicht leitfähig.

Pro Brückenseite wurde je ein Sensorband verlegt (DM 1 Seite West und DM2 Seite Ost). Die zwei Sensorbänder sind jeweils an einem Ende mit einem Kabel verbunden. Diese Anschlusskabel wurden durch die Fahrbahnplatte (links)

Abbildung 66) zur Messeinheit beim Widerlager Auenstein geführt.



Abbildung 65: Sensorbänder «smartex dm» bei einem Einlaufschacht (links)

Abbildung 66: Führung der Sensorbänder «smartex dm» durch die 3-Schichtplatte hindurch (rechts)

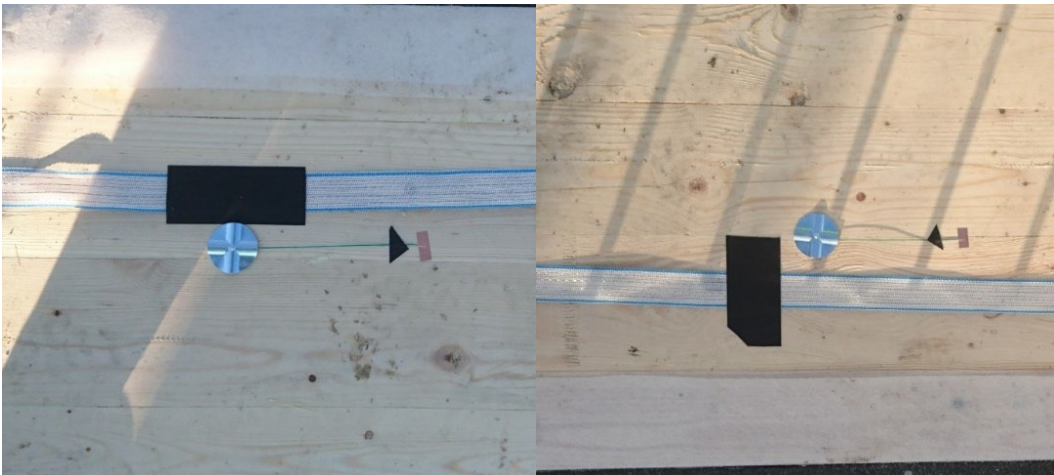


Abbildung 67: Thermoelement Typ K zur Messung der 3-Schichtplatte-Oberflächentemperatur, Seite Auenstein Ost (links)

Abbildung 68: Thermoelement Typ K zur Messung der 3-Schichtplatte-Oberflächentemperatur, Seite Auenstein West (rechts)

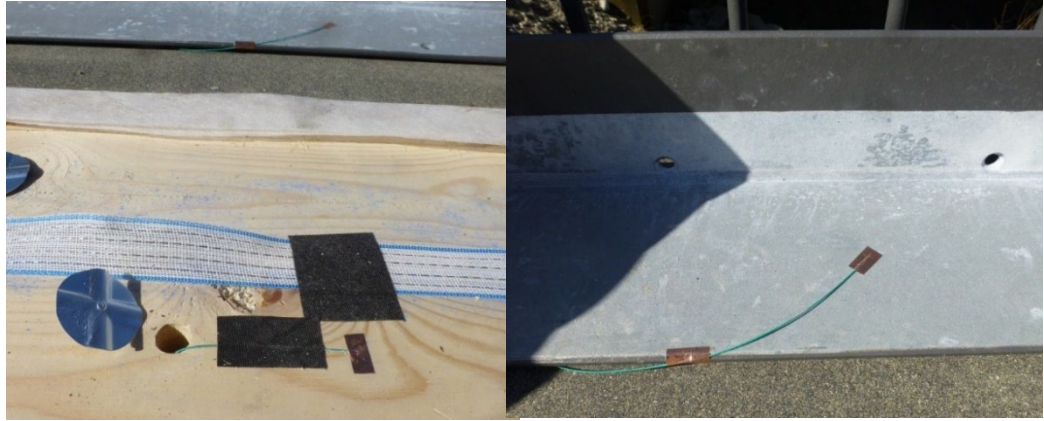


Abbildung 69: Thermoelement Typ K zur Messung der 3-Schichtplatte -
Oberflächentemperatur, Seite Rapperswil Ost

Abbildung 70: Thermoelement Typ K zur Messung der Stahlwinkel -
Oberflächentemperatur, Seite Rapperswil Ost

Die Thermoelemente sind mit Klebeband an ihren Enden an der Fahrbahnplatte befestigt. Durch die Verwendung von Kupferklebeband wird die Erfassungsfläche des Thermoelementes vergrößert. Die zwei Thermoelemente der Abbildung 67 und

Abbildung 68 sind in das Monitoringsystem integriert.

Nach der Verlegung der Sensorbänder und der Thermoelemente wurden drei Lagen Glasvlies und eine einlagige PBD-Abdichtungsbahn verlegt. Die PBD-Bahnen wurden am Rand mit den Stahlwinkeln und den Einlaufschächte verschweist.



Abbildung 71: Sensorbänder «smartex dm» auf der Holzplatte während der Verlegung
des Glasvlies und der PBD-Abdichtung (rechts) und nach der Verlegung (links)



Abbildung 72: PBD-Abdichtung nach dem Verschweißen der Stösse und Abb. 70 die Situation bei den Einlaufschächten (rechts)

4.3.5 Messeinheit und Sensoren am Auflager Auenstein

Am Auflager Auenstein ist die Messeinheit für die Langzeitüberwachung unter der Brücke montiert.

Mit der Messeinheit sind die zwei Thermoelemente Typ K, welche die Oberflächentemperatur an der 3-Schichtplatte messen und die zwei Feuchte-Sensorbänder «smartex dm» verbunden. Die Einheit ist geschützt in einer Box montiert. In der Abbildung 75 ist die Messeinheit und der Box dargestellt.

Ferner sind weitere Sensoren im Bereich des Auflagers installiert und an der Messeinheit angeschlossen:

- Holzfeuchtesensoren mittels Widerstandsmessmethode, Messung bei einer Tiefe von 40 mm
- Klimasensoren (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte)



Abbildung 73: Holzfeuchtesensoren mittels Widerstandsmessmethode an Querträger bei Auflager Auenstein (links)

Abbildung 74: Lufttemperatur- und relative Luftfeuchtesensor zwischen 3-Schichtplatte und Längsträger platziert (rechts)

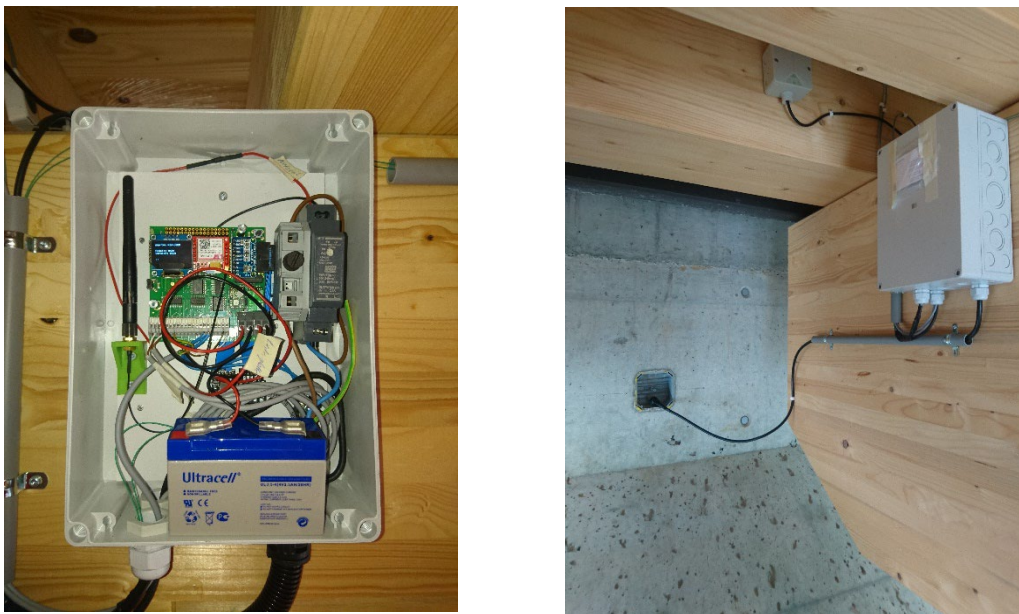


Abbildung 75: Messeinheit geschützt in einer Box montiert. Links Ansicht mit offene Box und rechts Ansicht Auflager Auenstein

4.3.6 Kontrolle während des Einbaus der Sensorbänder

Die Sensorbänder wurden nach dem Verlegen und vor dem Einbau der nachfolgenden Schichten kontrolliert. Mit einem übliche Multimeter wurde der elektrische Widerstand zwischen den Drähten gemessen. Werten in der Nähe von 1 MOhm zeigen, dass die Sensorbänder fachgerecht verlegt wurden und kein Kurzschluss beim Einbau erzeugt wurde.

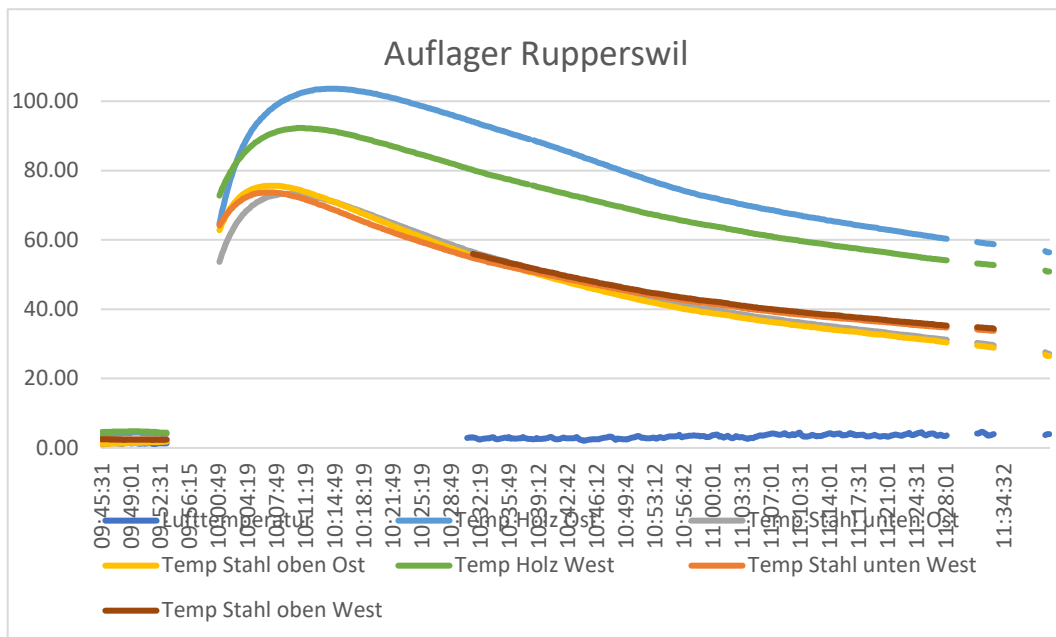


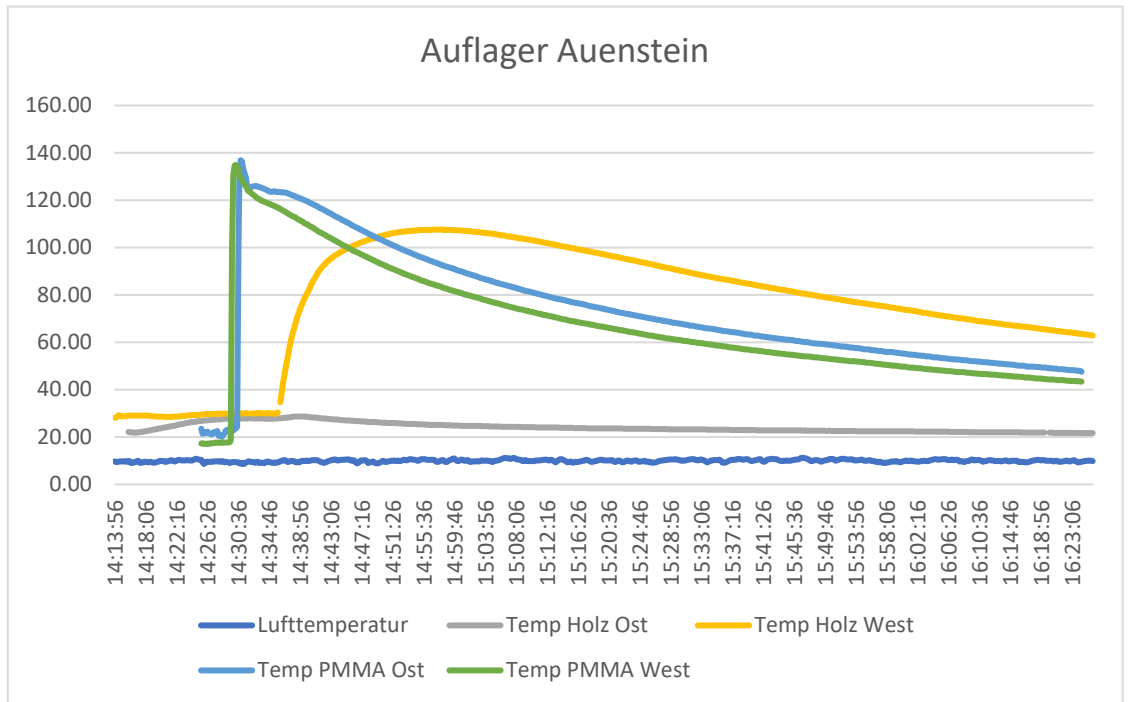
Abbildung 76: Einbaukontrolle der Sensorbänder mit Multimeter

4.3.7 Temperaturmessungen unter der PBD Bahn während der Gussasphalt-Einbau

-> mit Verbund, Prüferie Zofingen

-> ohne Verbund, Brücke Auenstein





4.3.8 Inbetriebnahme des Monitoringsystem

Die Inbetriebnahme erfolgte mit der Montage der Masseinheit unter der Brücke und die Anschliessung an der Stromversorgung. Ab November 2020 sind die Daten regelmässig erfasst.

4.4 Untersuchung von RFID-Tags zur Bestimmung der Holzfeuchte

4.4.1 RFID-Tags von der Firma Smartrac

Die Firma Smartrac bietet RFID-Tags für eine sehr breite Anwendungen. In Abstimmung mit der Firma Smartrac wurden die zwei RFID-Tags «DogBone» und «Patsch» ausgewählt, um deren Eignung zur Bestimmung der Holzfeuchte zu untersuchen. Beide RFID-Tags sind passive Sensoren.

Der Smartrac Sensor «DogBone» ist ein passives UHF-Inlay, das mit dem Magnus®S2 integrierten Schaltkreis (Single-Chip-Lösung) von Axzon ausgestattet ist. Dieser RFID-Sensor bietet eine sehr gute Leistung und misst den Feuchtegehalt in der Umgebung. Die Sensorinformationen werden digitalisiert und drahtlos an handelsübliche Lesegeräte übermittelt.

Laut Angaben des Herstellers ist der Sensor «DogBone» besonders für Materialien mit niedriger und hoher Dielektrizität wie Karton, Kunststoff, Stein, Holz und Baumaterialien geeignet. Er gilt als robust auch hinsichtlich seiner Lebensdauer und erfordert als passives System keinen Batteriewechsel.

Er entspricht allen relevanten Industriestandards und strengen Qualitätskontrollparametern.



Seine Anwendungsbereiche sind das Bauwesen, die Energiewirtschaft und das Gesundheitswesen.

Der Sensor «Patch» wurde speziell für die Messung von Feuchtigkeitsbedingungen in den medizinischen Pflegebereichen, Altenpflege, medizinischen Langzeitpflege und Kinderpflege, entwickelt.

Das Sensor «Patch» ist ein passives UHF-Inlay, das mit dem Magnus®S2 integrierten Schaltkreis (Single-Chip-Lösung) von Axzon ausgestattet ist. Dieser RFID-Sensor bietet eine hervorragende Leistung und erfasst präzise z.B. die Urinmenge in der Windel. Das spezifische Antennendesign fungiert als abgestimmter Widerstands-/Induktions-/Kondensator- (RLC) Schaltkreis, damit eine Antenne ihre Umgebung erfassen kann. Die Antenne wandelt die Umgebungsdaten in eine Impedanzänderung um, und der integrierte Schaltkreis übersetzt diese in einen Sensorcode.

Beide Sensoren «Dogbone» und «Patch» senden die erfassten Umgebungsdaten in Form eines Codes drahtlos an handelsübliche Lesegeräte.

Table 12 : Übersicht der Eigenschaften der RFID-Tags «DogBone» und «Patch» der Firma Smartrac

	Sensor DogBone	Sensor Patch
Bild		
integrierten Schaltkreis	Axzon Magnus® S2	Axzon Magnus® S2
Frequenz	860-960 MHz (ETSI band)	860-960 MHz (ETSI band)
Memory	64bit unique TID + 128bit EPC + 144bit User memory	64bit unique TID + 128bit EPC + 144bit User memory
Abmessungen	97 x 27 mm	105 x 11.62mm
Betriebstemperaturen	-40 °C bis +85 °C	-40 °C bis +85 °C
Haltbarkeit	+20 °C, 50 % RH - mindestens 2 Jahre ab Herstellungsdatum	+20 °C, 50 % RH - mindestens 2 Jahre ab Herstellungsdatum
Messbereich (Sensorcode)	0-31	10-25

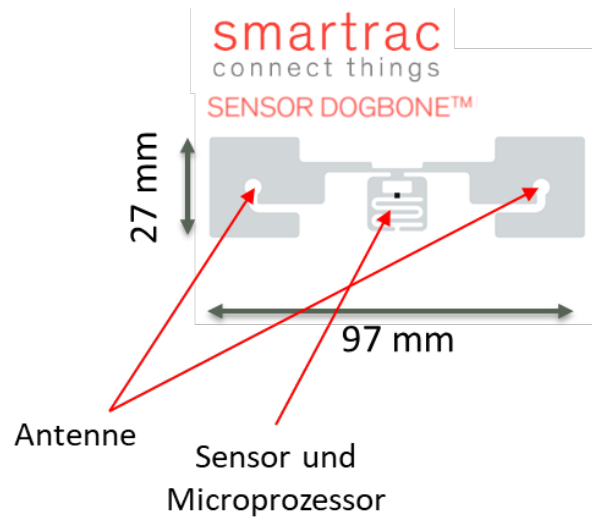


Abbildung 77: Komponenten eines RFID-Tags ohne Versorgungsspannung

4.4.2 Definition der Prüfkörper und Einbau RFID Tags

Die Untersuchungen sollen das Auswerten der folgenden Kriterien ermöglichen:

1. Welche Korrelation gibt es zwischen Tag-Code und Holzfeuchte?
2. Welchen Einfluss hat der Einbau der Tags im Probekörper oder das Aufkleben an der Oberfläche?
3. Sind die Messungen mit den Tags temperaturabhängig?
4. Ist ein Aufkleben auch bei hoher Holzfeuchte möglich?

Kriterien, die in diese Arbeit nicht untersucht werden konnten:

- Einfluss der Holzart: es wurde nur die Holzart Fichte untersucht.
- Einfluss der Anzahl der Zyklen im Feuchtewechsel (trocken-feucht) bzw. (Schwinden und Quellen) auf die Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit

36 Prüfkörper (PK) wurden aus zwei Bretter mit den Abmessungen 160x80x40 der Holzart Fichte (Festigkeitsklasse C24) hergestellt. Zwischen den Brettern wurde vor dem Verkleben immer ein RFID-Tag platziert. Die PK wurden in eine Ständerpresse während der Aushärtung gepresst. Die Grösse der Prüfkörper (160x80x80 mm) gemäss

Abbildung 78 wurde in Zusammenarbeit mit der Smartrac definiert. Bei einigen PK wurde ein RFID-Tag auch an der Oberfläche fixiert. Für das Aufkleben der Sensoren wurde der Klebstoff von den RFID wet-inlay Tag verwendet (laut Smartrac: RA-5 – Acrylic).

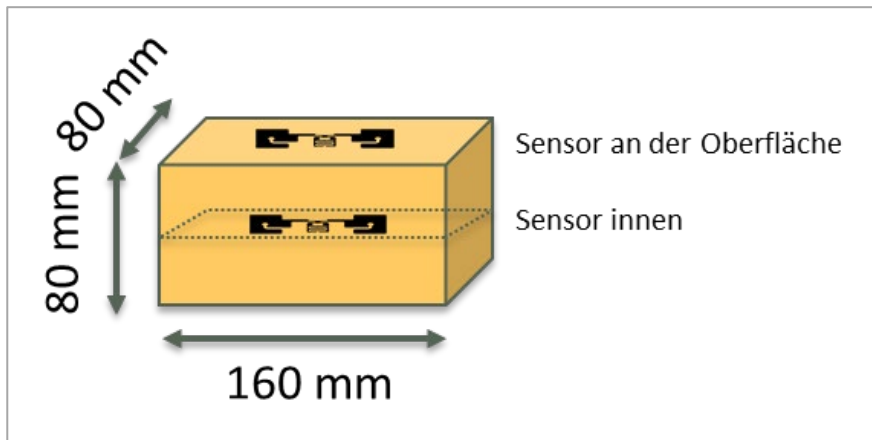


Abbildung 78: Aufbau und Abmessungen Prüfkörper

Die Prüfserie bestand aus folgender Prüfkonfiguration:

- 6 Prüfkörper mit 2x **DogBone** RFID-Tags (1x im Probekörper und 1x an der Oberfläche)
- 12 Prüfkörper mit 1x **DogBone** RFID-Tag im Probekörper
- 6 Prüfkörper mit 2x **Patch** RFID-Tag (1x im Probekörper und 1x an der Oberfläche)
- 12 Prüfkörper mit 1x **Patch** RFID-Tag im Probekörper

Zur Überprüfung ob die Tags auch bei hoher Holzfeuchte zuverlässig befestigt werden können, wurde ein Prüfkörper aus Fichte mit acht **Patch** RFID-Tags hergestellt. 4 Tags

wurden parallel zur Faserrichtung und 4 Tags senkrecht zur Faserrichtung angeklebt.

Dabei wurden vier verschiedene Produkte zum Aufkleben verwendet:

- Klebstoff von den RFID wet-inlay Tag (laut Smartrac: RA-5–Acrylic)
- Heissleim Rapid Tools Kleber PRO+
- Kombination Klebstoff von den RFID wet-inlay Tag und Klebeband Siga Rissan
- Doppelseitige Klebeband Siga Twinet

Nach Erstellung der Prüfkörper wurden die eingebauten RFID mit eine eindeutige ERC und Tag ID gekennzeichnet (Tabelle 13). Sämtliche eingebaute RFID waren funktionsfähig.

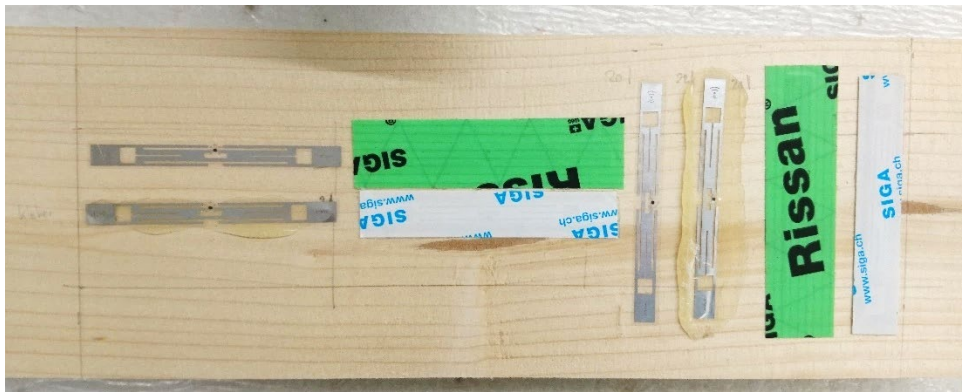


Abbildung 79: PK aus Fichte mit RFID-Tags PATCH zur Untersuchung der Haftung bei hoher Holzfeuchte

4.4.3 Klimatisierung der Prüfkörper

Ziel ist eine Korrelation zwischen Holzfeuchte und Tag-Code zu untersuchen. Im Bereich des Bauwesens sind Holzfeuchte zwischen 10 und 30 M-% bzw. zwischen 60% und 100% relative Feuchte von Bedeutung. Es wurde beschlossen die verschiedenen PK bei vier relativer Luftfeuchte und 20°C Lufttemperatur zu klimatisieren:

- 20°C und 65% relative Feuchte: Lagerung der PK im Labor (kontrollierte Klima);
- 20°C und 85% relative Feuchte: Lagerung der PK in Aquarien mit KCl-Salzlösung;
- 20°C und 95% relative Feuchte: Lagerung der PK in Aquarien mit Na₂HPO₄-Salzlösung;
- 20°C und 100% relative Feuchte: Lagerung der PK in Aquarien mit destilliertem Wasser.

Die Prüfkörper wurden regelmässig gewogen und bei Erreichen der Massenkonstanz kann davon ausgegangen werden, dass die Holzfeuchte über den ganzen Prüfkörper gleich ist.

Nach Erreichung der Massenkonstanz wurden die RFID-Tags ausgelesen.

In eine erste Phase wurden die 36 Prüfkörper bei 20°C mit drei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten gemäss Klimasatz 1 gelagert. Mit diesem Klimasatz wurden neun Messungen durchgeführt.

Danach wurden alle 36 Prüfkörper bei 20°C mit vier unterschiedlichen relativen Luftfeuchten gemäss Klimasatz 2 gelagert. Mit diesem Klimasatz wurden vier Messungen durchgeführt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Klimabedingungen detailliert dargestellt.

Tabelle 13: Übersicht PK mit RFID-Tags und untersuchten Klimata

PK Nr.	RFID-Tag Typ	Tag ID	EPC	Position	Klimasatz 1	
					Temp °C / rel. Feuchte %	Temp °C / rel. Feuchte %
PK 1.1	Dogbone	1	DDDD0001	Im PK	20/65	20/94
	Dogbone	19	DDDD0013	Oberfläche		
PK 1.2	Dogbone	2	DDDD0002	Im PK	20/65	20/94
	Dogbone	20	DDDD0014	Oberfläche		
PK 1.3	Dogbone	3	DDDD0003	Im PK	20/65	20/94
	Dogbone	21	DDDD0015	Oberfläche		
PK 1.4	Dogbone	4	DDDD0004	Im PK	20/65	20/100
	Dogbone	22	DDDD0016	Oberfläche		
PK 1.5	Dogbone	5	DDDD0005	Im PK	20/65	20/100
	Dogbone	23	DDDD0017	Oberfläche		
PK 1.6	Dogbone	6	DDDD0006	Im PK	20/65	20/100
	Dogbone	24	DDDD0018	Oberfläche		
PK 2.1	Dogbone	7	DDDD0007	Im PK	20/85	20/65
PK 2.2	Dogbone	8	DDDD0008	Im PK	20/85	20/65
PK 2.3	Dogbone	9	DDDD0009	Im PK	20/85	20/94
PK 2.4	Dogbone	10	DDDD000A	Im PK	20/85	20/94
PK 2.5	Dogbone	11	DDDD000B	Im PK	20/85	20/100

PK 2.6	Dogbone	12	DDDD000C	Im PK	20/85	20/100
PK 3.1	Dogbone	13	DDDD000D	Im PK	20/100	20/65
PK 3.2	Dogbone	14	DDDD000E	Im PK	20/100	20/65
PK 3.3	Dogbone	15	DDDD000F	Im PK	20/100	20/65
PK 3.4	Dogbone	16	DDDD0010	Im PK	20/100	20/85
PK 3.5	Dogbone	17	DDDD0011	Im PK	20/100	20/85
PK 3.6	Dogbone	18	DDDD0012	Im PK	20/100	20/85
PK 4.1	Patch	1	AAAA0001	Im PK	20/65	20/65
	Patch	27	AAAA001B	Oberfläche	20/65	20/65
PK 4.2	Patch	2	AAAA0002	Im PK	20/65	20/94
	Patch	28	AAAA001C	Oberfläche	20/65	20/94
PK 4.3	Patch	3	AAAA0003	Im PK	20/65	20/100
	Patch	29	AAAA001D	Oberfläche	20/65	20/100
PK 4.4	Patch	4	AAAA0004	Im PK	20/65	20/65
	Patch	30	AAAA001E	Oberfläche	20/65	20/65
PK 4.5	Patch	5	AAAA0005	Im PK	20/65	20/65
	Patch	31	AAAA001F	Oberfläche	20/65	20/85
PK 4.6	Patch	6	AAAA0006	Im PK	20/65	20/85
	Patch	32	AAAA0020	Oberfläche	20/65	20/85
PK 5.1	Patch	7	AAAA0007	Im PK	20/85	20/94
PK 5.2	Patch	8	AAAA0008	Im PK	20/85	20/94
PK 5.3	Patch	9	AAAA0009	Im PK	20/85	20/94
PK 5.4	Patch	10	AAAA000A	Im PK	20/85	20/100
PK 5.5	Patch	11	AAAA000B	Im PK	20/85	20/100

PK 5.6	Patch	12	AAAA000C	Im PK	20/85	20/100
PK 6.1	Patch	13	AAAA000D	Im PK	20/100	20/65
PK 6.2	Patch	14	AAAA000E	Im PK	20/100	20/65
PK 6.3	Patch	15	AAAA000F	Im PK	20/100	20/94
PK 6.4	Patch	16	AAAA0010	Im PK	20/100	20/94
PK 6.5	Patch	17	AAAA0011	Im PK	20/100	20/100
PK 6.6	Patch	18	AAAA0012	Im PK	20/100	20/100

Für die Überprüfung der Haftung der Sensoren bei hohen Holzfeuchten wurde der Prüfkörper vor dem Anbringen der Sensoren bei 20°C Lufttemperatur und 65% relative Feuchte klimatisiert. Nach dem Aufkleben der RFID-Tags wurde die Holzfeuchte schrittweise durch Lagerung in der Klimakammer bei 20°C und 80%, 20°C und 95% und 20°C und 100% erhöht.

Zur Überprüfung der Temperaturabhängigkeit wurden nach der Klimatisierung im Klimasatz 1, die Prüfkörper in Kunststoffbeutel bei 4°C und 32°C konditioniert. Diese Lagerung sorgt dafür, dass der Wassergehalt im Prüfkörper unverändert bleibt und die Messdaten bei konstanter Holzfeuchte unter verschiedenen Temperaturen erfasst werden können.

4.4.4 Masseermittlung und Bestimmung der Holzfeuchte

Die Prüfkörper wurden regelmässig bis zur Erreichung der Massenkonstanz gewogen. Die Massenkonstanz wird erreicht, wenn der Masseunterschied zwischen zwei Wäge-Vorgängen im Abstand von 24 h geringer als 0.1% ist. Nach Erreichen der konstanten Masse wurden die PK zeitgleich mit den Messungen mittels RFID-Tags gewogen. Dies ermöglicht die Ergebnisse der RFID Messungen mit der nachfolgend durch Darrprobe präzise bestimmten Holzfeuchte direkt zu vergleichen.

Das Darrverfahren wird nach der in der SN EN 13183-1 beschriebenen Methode durchgeführt. Der Probekörper wird mit einer Temperatur von 103°C getrocknet. Der Probekörper wird als darrtrocken bezeichnet, wenn der Masseunterschied zwischen zwei Wäge-Vorgängen im Abstand von 2 h geringer als 0.1% ist.

Mit der Verwendung der Probenmasse während der Durchführung der RFID-Tags Messungen und der Verwendung der Darrprobenmasse wurde die Holzfeuchte nach Gleichung (1) berechnet.

$$u_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (1)$$

mit

u_i massenbezogene Holzfeuchte an dem Klima i in M-%

m_i Masse des Probekörpers an dem Klima i während der Durchführung der RFID-Tags Messungen in g

m_0 Masse des getrockneten Probekörpers in g

Die erhaltene Holzfeuchte variiert zwischen 6.9 M-% für das Klima mit einer Temperatur von 20°C und 30% relativer Feuchte und bis zu 22.3 M-% für das Klima mit einer Temperatur von 20°C bei 98% relativer Feuchte.

4.4.5 Messung und Auslesung der RFID-Tag Code

Die Auslesung der RFID-Tags wurden mit das Messgerät Nordic ID Medea Typ HTG00023 der Firma Nordic ID durchgeführt (Abbildung 80). Dieses Gerät ist in der Lage gleichzeitig mehrere UHF RFID Tags zu lesen (Abbildung 81). Die ausgelesenen Codes können im Gerät gespeichert werden und anschliessend in einem PC importiert und weiterbearbeitet werden. Das Auslesen und Weiterbearbeiten der Messergebnisse RFID-Tags für Feuchte- und Temperaturmessungen wird durch Softwarelösungen der Gerätehersteller unterstützt.



Abbildung 80: Nordic ID Medea Typ HTG00023 der Firma Nordic



Abbildung 81: gleichzeitige Messung von mehreren RFID-Tags, die im Holzprobekörper eingebaut sind

4.4.6 Allgemeine Beurteilung der Handhabung der RFID-Tags

Die Erstellung der Prüfkörper mit den RFID-Tags konnte problemlos durchgeführt werden. Die RFID-Tags wurden durch den für die Verklebung aufgebrachtten Pressdruck nicht beschädigt.

Das Auslesen der Tags mit dem Nordic ID Medea Lesegerät war einfach. Man konnte bis 15 Tags gleichzeitig messen. Eine solche Messung dauert etwa eine bis zwei Minuten, um etwa 80% der Tags abzulesen.

Für das Auslesen der restlichen 20% musste man deutlich zeitaufwändiger jeweils für das Gerät eine gute Position zum Auslesen der Tags finden. Am Ende der Versuche konnte ein RFID-Tag von 48 nicht mehr ausgelesen werden und ist wahrscheinlich nicht mehr funktionsfähig.

4.4.7 Beurteilung der besten Position der RFID-Tag

Wie in Kapitel 4.4.2 erläutert, wurden einige PK mit zwei RFID Tags ausgerüstet. Ein Tag ist im Probekörper eingebaut und einer an der Oberfläche fixiert.

In der Abbildung 82 sind die Messungen für die zwei Einbaumöglichkeiten dargestellt. Es kann folgendes festgestellt werden:

- DogBone Sensor innen: lineare Korrelation zwischen Holzfeuchte und Tag-Code, die Streuung der gemessene Code ist bei Änderung der Holzfeuchte ähnlich.
- DogBone Sensor an der Oberfläche: eine Korrelation zwischen Tag-Code und Holzfeuchte ist nicht erkennbar, bei hohen Holzfeuchten ist der Streuung der gemessene Code kleiner.
- Patch Sensor innen: lineare Korrelation zwischen Holzfeuchte und Tag-Code, die Streuung der gemessene Code ist bei Änderung der Holzfeuchte ähnlich.
- Patch Sensor an der Oberfläche: eine Korrelation zwischen Tag-Code und Holzfeuchte ist nicht erkennbar, bei hohe Holzfeuchte ist der Streuung der gemessene Code kleiner. Die Streuung bei etwa 13 M-% Holzfeuchte schwankt in einen grossen Messbereich.

Aus diesen Feststellungen ist abzuleiten, dass zur Messung der Holzfeuchte der Einbau der RFID-Tags im Holz notwendig ist.

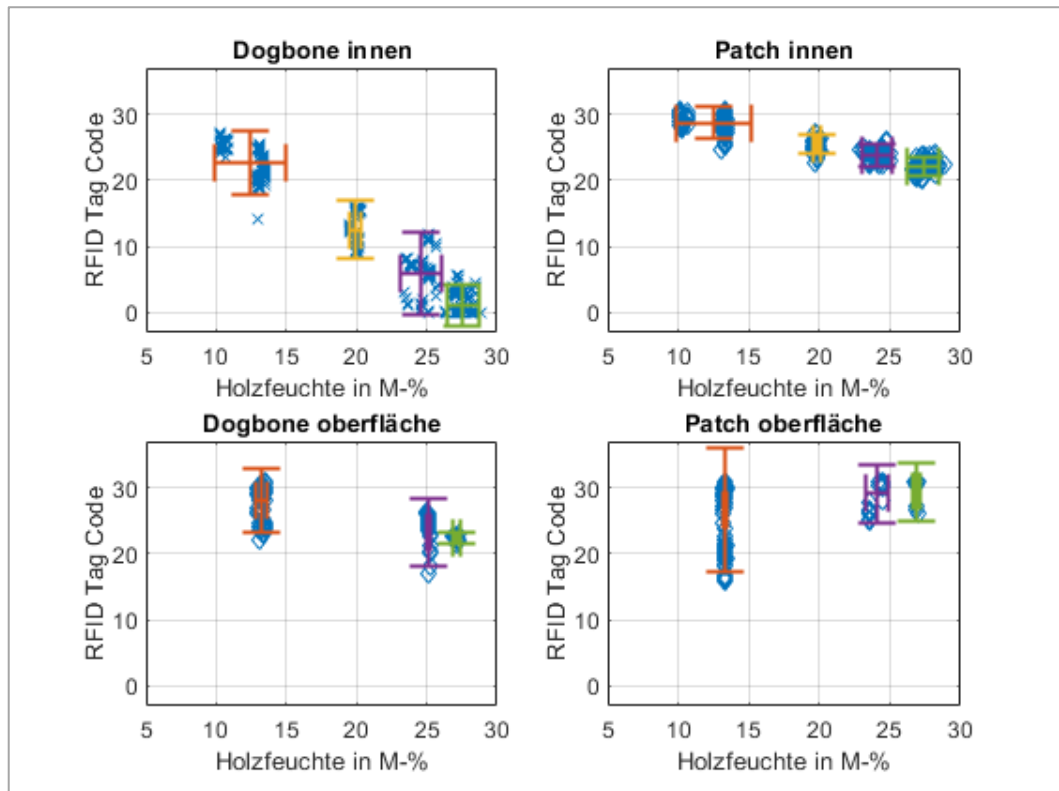


Abbildung 82: RFID-Tag Code und zugehörige Holzfeuchte für die Tags DogBone und Patch Sensor mit Einbau der Tags im Prüfkörper oder an der Oberfläche

4.4.8 Temperaturabhängigkeit der RFID-Tags Messungen

Aus den gemessenen Code's bei Temperierung der Prüfkörper auf 4°C, 20°C und 32°C wurde für jede Temperatur und für die Tags DogBone und Patch eine lineares Modell, der die Korrelation zwischen Holzfeuchte und Tag-Code darstellt. Die sechs Modelle sind in der Abbildung 83 zu finden.

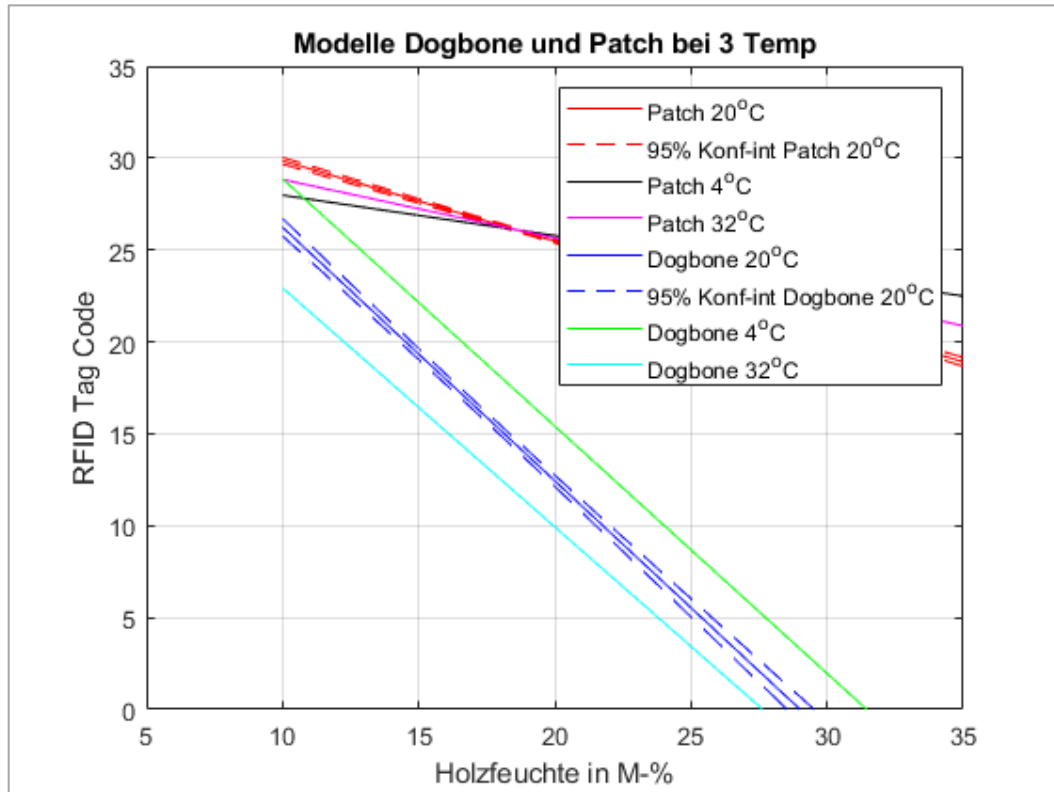


Abbildung 83: Korrelation zwischen Holzfeuchte und RFID Tag Code bei 4°C, 20°C und 32°C für die Tags DogBone und Patch

Für beide Typen der Tags ist eine Temperaturabhängigkeit vorhanden. Bei dem Tag Dogbone verursacht eine Änderung der Temperatur eine Translation des Modells. Die Steigung bleibt in der gleichen Grössenordnung. Bei dem Tag Patch führt eine Änderung der Temperatur zu einer geänderten Steigung des Modells.

4.4.9 Korrelation zwischen Tag-Code und Holzfeuchte

Aus den Messungen der RFID Codes, der im Prüfkörper eingebauten Tags bei 20°C, konnte ein Modell entwickelt werden, welches die Korrelation zwischen der Holzfeuchte und den RFID Tag Codes berechnet. Insgesamt verfügt man über einen Datensatz von 228 Punkten. Das Modell hat die folgende Form:

$T_{code} = f(u)$		(2)
mit		
T_{code}	RFID Tag Code	
u	Holzfeuchte in M-%	

Hierzu wurden verschiedene Modelle untersucht Die Modelle werden mit dem statistischen Bestimmtheitsmass R^2 analysiert. Die Eignung des Modells zur Beschreibung der Daten wird auch durch die Analyse der Residuen gegeben.

Table 14: ausgewählte Modelle zur Beschreibung der Korrelation zwischen Holzfeuchte und RFID Tag Code

Tag Typ	Modell	Anzahl Konst.	Gl. Nr.
Dogbone	$T_{code} = p_1 \cdot u + p_2$	2	(3)
Patch	$T_{code} = p_1 \cdot u + p_2$	2	(4)
mit			
Tcode: RFID Tag Code			
u: Holzfeuchte in M-%			
pi: Konstanten			

Das Modell, welches sowohl für die Dogbone-Tags wie auch für die Patch-Tags am besten den Datensatz beschreibt, ist ein Polynom ersten Grades. Die gemessenen Daten zeigen im Holzfeuchtebereich zwischen 10 -M-% und 28 M-% eine lineare Abhängigkeit des RFID-Code.

Mit dem Datensatz werden die Konstanten durch Regressionsrechnung berechnet, die die Modelle definieren. Die Analyse der Residuen zeigt, dass das Modell für die Dogbone Tags klare Auffälligkeiten in den Residuen bei Holzfeuchten über 26 M-% aufweisen (

Abbildung 84). Das ist zurückzuführen, dass die Messungen bei Holzfeuchten über 26 M-% oft die Messbereichsgrenze der RFID-Tags überschreiten. Oft wurde auch ein Code 0 gemessen, welcher die untere Grenze des Messbereichs darstellt. Diese Werten von 0 sind als «0 oder kleiner» zu betrachten. Bei der Regressionsrechnung ergeben also ein auffälliger Verlauf der Residuen.

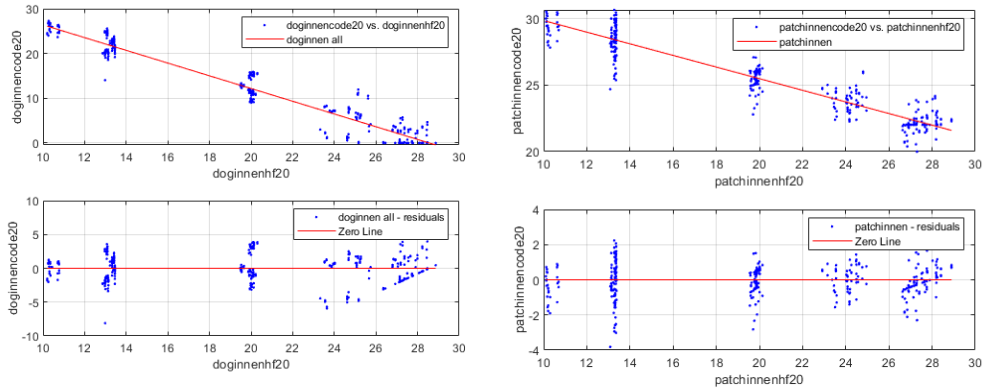


Abbildung 84 : Analyse der Residuen

Die Regressionsrechnung wird erneut ohne die Messungen bei Holzfeuchte über 26 M-% durchgeführt.

Es werden auch Ausreisser von der Berechnung ausgeschlossen. Diese zweite Berechnung zeigt keine Auffälligkeiten mehr in den Residuen-Diagrammen

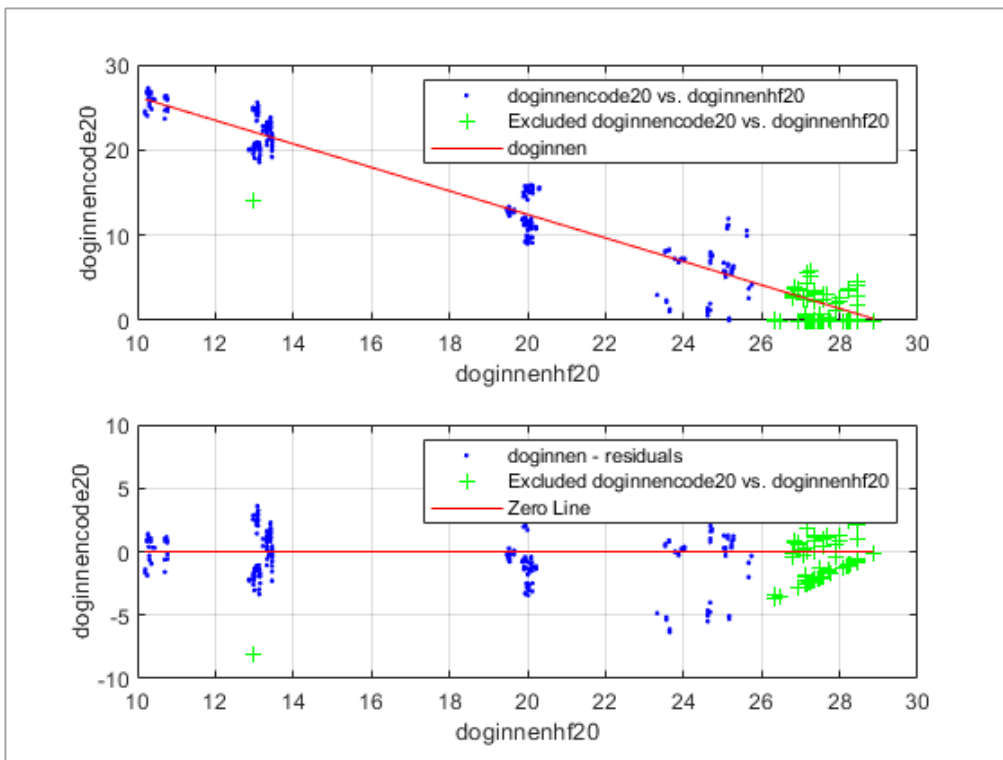


Abbildung 85: Analyse der Residuen

In der Tabelle 15 ist die Bestimmtheitsmass der zwei mit Regressionsrechnung berechneten Modelle angegeben.

Tabelle 15: Bestimmtheitsmass R^2 der Modelle DogBone und Patch

Tag Typ	Modell	Bestimmtheitsmass R^2
Dogbone	$T_{code} = p_1 \cdot u + p_2$	0.9012
Patch	$T_{code} = p_1 \cdot u + p_2$	0.8919

Ausgehend von der vorgenommenen Anpassung der Modelle wird eine Funktion definiert, um die Holzfeuchte aus den Parametern RFID-Tag-Code zu berechnen. Diese Modelle werden in folgende Form umgewandelt.

$u = f(T_{code})$		(5)
mit		
T_{code}	RFID Tag Code	
u	Holzfeuchte in M-%	

Das Modell für den Dogbone- und Patch-Tag werden nach der Holzfeuchte aufgelöst und die konstanten p_1 und p_2 werden durch

$k_1 = \frac{1}{p_1}$	(6)
$k_2 = -\frac{p_2}{p_1}$	(7)

ersetzt. Das Modell ist in der Tabelle 16 und mit den Werten der berechneten Parameter dargestellt.

Tabelle 16: definierte Modelle für die RFID-Tags Smartrac Dogbone und Smartrac Patch

Modell Dogbone und Patch:	$u = k_1 \cdot T_{code} + k_2$	(8)
mit		
Tcode	RFID Tag Code	
u	Holzfeuchte in M-%	
k_i	Konstanten	
Konstanten k_i		

	k1	k2	
Dogbone	-0.7245	29.01	
Patch	-2.285	78.22	

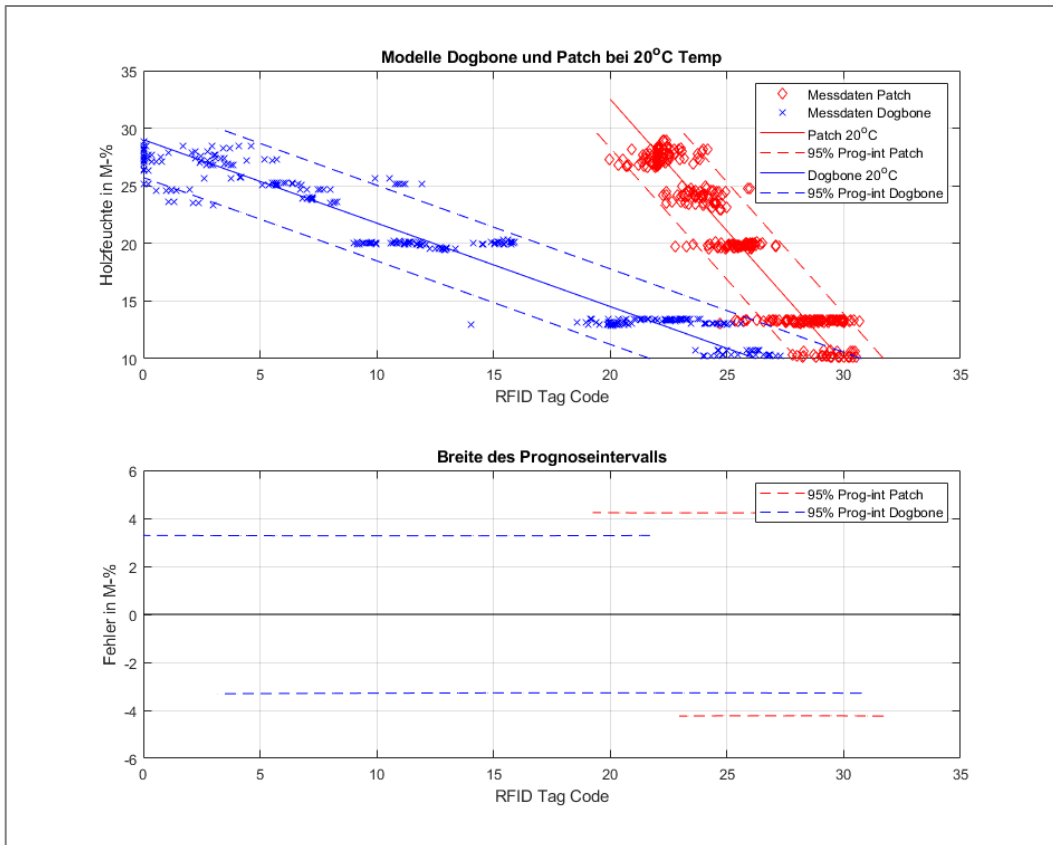


Abbildung 86: Widerstandskennlinien-Modell «LR vs. Lu T» mit 95% Prognoseintervall bei den Temperaturen von 10°C, 20°C und 30°C

Das Prognoseintervall der definierten Modelle ist in der

Abbildung 86 dargestellt. Die Breite des Prognoseintervalls ergibt sich aus der Streuung des Datensatzes, mit denen das Modell definiert wurde. In diesem Fall gibt es einen Hinweis auf den Fehler, der mit diesem Modell zur Berechnung der Holzfeuchte aus der RFID-Tag Code gemacht werden kann. Der Fehler entspricht der Differenz zwischen der mit dem Modell ermittelten Holzfeuchte und der tatsächlichen Holzfeuchte. Dieser Fehler entspricht der Breite des Prognoseintervalls. Der Fehler beträgt bei Patch-Tags ± 4.2 M-% und bei Dogbone-Tags ± 3.3 M-%.

Der Anwendungsbereich des Modells liegt zwischen 10 M-% und 28 M-% für die Holzfeuchte.

4.4.10 Versuche zur Haftung der Tags auf der Holzoberfläche

Die RFID Tags welche ohne zusätzlichen Klebstoff senkrecht zur Faserrichtung an den Prüfkörpern befestigt sind, lösen sich bei einer Konditionierung bei 90% und höher an beide Enden. Parallel zur Faserrichtung bleibt der Formschluss/Haftung auf dem Holz intakt. Das Ergebnis dieser Prüfung zeigt, dass die RFID Tags parallel zur Faserrichtung befestigt werden müssen. Zusätzlicher Klebstoff oder Fixierung der Tags mit Klebebändern ist so nicht erforderlich.

Gleichwohl verliert diese Betrachtung an Bedeutung, da das Anbringen von Sensoren auf der Oberfläche eine Korrelation zwischen Tag-Code und Holzfeuchte nicht zulässt.

4.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Holzfeuchte hat einen massgebenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Holzbrücken. Je nach umgebendem Klima stellt sich bei Holz ein Gleichgewicht zwischen Holzfeuchte und relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur ein. Die zu erwartende Ausgleichsfeuchte ist bei geschützten Brücken mit 18M% +/-2% zu erwarten.

Eine deutlich erhöhte Holzfeuchte führt zu einer Schädigung durch holzerstörende Pilze. Für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen ist eine Holzfeuchte infolge Staunässe oberhalb der Fasersättigung über einen längeren Zeitraum (grösser 4 Monate) notwendig.

Aus diesem Grund ist die regelmässige Überprüfung der Holzfeuchte in den einzelnen Bauteilen, für die Sicherung von Brückentragwerken wichtig. Schwer kontrollierbare und verdeckte Komponenten sind bei „geschützten“ Holzbrücken oft nicht zu vermeiden. Ferner können die Abdichtungssysteme i.d.R. nicht oder nur mit aufwändigen Sondierungen kontrolliert werden.

Die Langzeitüberwachungen des Holzfeuchtegehaltes von Brückentragwerken ermöglicht frühzeitig auf Diskrepanzen zu reagieren. Eine flächige Leckage-Erkennung integriert in einem Monitoringsystem macht hier besonders Sinn. Durch den Einbau von Messsensoren können Messdaten in festgelegten Intervallen erfasst und gespeichert werden. Warnungen und Alarmer sind direkt von der Messeinheit ausgelöst.

Leckagen in der Abdichtung führen zu Staunässe in der Fahrbahnplatte und in der Folge oft zu der beschriebenen Schädigung (Degradation) durch holzerstörende Pilze.

Die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung kann heute zuverlässig mit leitfähigem Glasvlies oder mit Bandsensoren überwacht werden. Beide Lösungen stützen sich auf Potentialmessungen. Bei Veränderung der Feuchte oder bei Vorhandensein von Wasser ändert sich das elektrische Potential.

Der Fahrbahnaufbau bei Holzbrücken kann auf Grundlage dieses Projekts zukünftig sowohl mit einem Abdichtungssystem ohne Verbund wie auch mit einem Abdichtungssystem mit Verbund ausgeführt werden. Bei beiden Systemlösungen sind die Schadens- bzw. Feuchtweiterleitungsmechanismen im Fall einer Leckage sehr unterschiedlich. Bei einem Aufbau mit Verbund, verursacht die Leckage eine lokale Erhöhung der Holzfeuchte in der Trägerplatte. Der Verbund zwischen Abdichtung und Unterlage verhindert die Ausbreitung des eindringenden Wassers unter der Abdichtung.

Für Fahrbahnaufbauten im Verbund wurde im Zuge des Projektes die Eignung leitfähiger Glasvliese zur Überwachung von Wassereintritt infolge Leckagen nachgewiesen. Mittels der elektrischen Eigenschaften dieser Vliese und einer Gegenelektrode an der Oberfläche (vgl. Stand der Technik) kann eine Potentialmessung durchgeführt und eine Leckage einfach erkannt werden. Mittels Versuche wurde die Eignung, die elektrischen und

mechanischen Eigenschaften und der Einbau von leitfähigen Glasvliesen in der Epoxidharz-Versiegelung nachgewiesen.

Bei einem Aufbau ohne Verbund kann sich die eindringende Feuchtigkeit in der Trennlage (oft aus mehrlagigen Glasvliesbahnen) verteilen. Eine Erhöhung der Holzfeuchte über eine grössere Fläche der Fahrbahnplatte ist die Folge.

Weisst die Fahrbahnplatte ein (Quer-) Gefälle auf reicht es aus Bandsensoren unterhalb der Abdichtung entlang der Brückenränder einzubauen. Diese Sensoren bestehen aus Kunststoffbänder, in die Edelstahldrähte eingewoben sind. Die Sensorbänder können in Verbindung mit der Messeinheit und der Auswertung der Daten, Nässe unter der Abdichtung feststellen.

Ergänzt werden beide Monitoringsysteme i.d.R. durch Klimasensoren (Lufttemperatur und Luftfeuchte), Holzfeuchtesensoren nach dem Prinzip des elektrischen Widerstands und Temperatursensoren in den Holzbauteilen.

Die Sensoren sind mit einer Messeinheit und einer Datenübertragungsstelle mit SIM-Karte mit dem Mobilfunknetz verbunden und überträgt die Daten in die Daten-Cloud

Die Messeinheit kann z.B. an das öffentliche Beleuchtungsnetz angeschlossen und mit einer Batteriepufferung ausgestattet werden.

Für die Überprüfung von Holzfeuchten und Temperatur auch in nicht direkt zugänglichen Holzbauteilen bietet sich heute als kostengünstiges und weitgehend wartungsfreies Überwachungssystem die Radio Frequency Identification Methode mittels im Bauteil installierten (RFID)-Tags an.

Passive RFID-Tags benötigen keine interne Stromquelle, sondern werden durch die elektromagnetische Energie gespeist, die von einem RFID-Lesegerät beim Auslesevorgang übertragen wird.

Das Auslesen der RFID Codes für Holzfeuchte und Temperatur erfolgt mit einem handelsüblichen Auslesegerät im Zuge von regelmässig durchgeführten Kontrollen und Inspektionen. Eine kontinuierliche online Datenübertragung wie bei den zuvor beschriebenen Monitoringsystemen, ist jedoch nicht möglich.

Die durchgeführten Untersuchungen haben eindeutig aufgezeigt, dass zur Messung der Holzfeuchte der Einbau der RFID-Tags im Holz notwendig ist. Hierzu muss bei der Herstellung der Bauteile jeweils eine ca. 100 mm lange, 30 mm breite und ca. 20 mm tiefe Nut eingefräst werden, die nach Anbringen des Tags z.B. im Herstellwerk durch passgenaue Abdeckleisten wieder verschlossen werden. Die Lage der Tags muss dokumentiert werden, da die Tags bei fachgerechter handwerklicher Ausführung an der Bauteiloberfläche nicht mehr erkennbar sind.

5 Anschlüsse von Brückenabdichtungen

Die Herstellung der Fahrbahnaufbauten ist in der Fläche meist unproblematisch und kann in der Regel in hoher Qualität dauerhaft hergestellt werden. Die Erfahrungen aus den Inspektionen und von der Instandhaltung von bestehenden Holzbrücken zeigen, dass die seitlichen Anschlüsse der Abdichtung z.B. an den Schrammborden, an den Fahrbahnübergängen und an den Entwässerungssystemen (Abläufen) oft mangel- bzw. schadensanfällig sind. Leckagen an diesen Anschlüssen sind meist nur schwer früh erkennbar und können bei Fahrbahnplatten aus Holz sehr schnell zu unkontrolliertem Feuchteintritt führen.

Bislang stehen keine gesicherten Standardlösungen für Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz zur Verfügung. Obwohl sich bei einer Vielzahl von gebauten Holzbrückenprojekten wichtige Detaillösungen bereits bewährt haben, werden von den Planern immer wieder neue individuelle Lösungen erarbeitet. Abgesicherte Standardlösungen würden als Basisdetails die Planung von Holzbrücken erheblich vereinfachen und die Qualität der Holzbrücken langfristig erhöhen.

Dieses Ziel wurde im laufenden Forschungsprojekt konsequent verfolgt. In mehreren Workshops und Arbeitssitzungen wurde von allen beteiligten Holzbrückenbauerfahrenen Experten und Mitglieder der Begleitkommission in einer Auslegeordnung, alle in den vergangenen Jahren erarbeiteten und baulich umgesetzten Detaillösungen gesammelt. Durch intensive Fachdiskussionen wurden die spezifischen Anforderungen an die Fahrbahnübergänge, Schrammbordanschlüsse und Entwässerungspunkten von Holzbrücken formuliert. Mit dieser Grundlage konnten die vorgelegten Detaillösungen zu abgestimmten Regelanschlüssen als Basisdetaillösungen weiterentwickelt werden.

5.1 Publierte Detaillösungen im Brückenbau

5.1.1 Detaillösungen im Holzbrückenbau

Detaillösungen für Holzbrücken sind in verschiedenen Quellen veröffentlicht worden. Sie dienen meist dem Versuch abgesicherte Standardlösungen für Holzbrücken zu definieren und damit auch den Stand der Technik abzubilden. Traditionell gibt es länderspezifische Unterschiede. Die skandinavischen Länder und die Schweiz bilden aus ihren grossen Erfahrungen heraus Prinzipien ab und überlassen die Detailausbildung der Kompetenz der Ingenieure. In Zentraleuropa (Deutschland) werden in einer hohen Detaillierungstiefe Lösungen angeboten, die nur wenig Abweichungen in der Planung zulassen.

Bei dem Gesamtaufbau der Fahrbahnplatten gibt es in den europäischen Ländern ebenfalls wesentliche Unterschiede. In der Schweiz und in den skandinavischen Ländern werden die Abdichtungssysteme und Fahrbahnbeläge direkt auf der tragenden Konstruktion (Fahrbahnplatte) appliziert. Insbesondere in Deutschland werden der Fahrbahnaufbau und die tragende Konstruktion mittels auf Abstand verlegten, quer zur Hauptspannrichtung verlaufende Kanthölzern, getrennt und konsequent eine Kontroll- und Belüftungsebene zwischen Fahrbahnaufbau und Fahrbahnplatte ausgebildet (Details von Gerold (2010) und dem Informationsdienst Holz (2019).

Für Holzbrücken können folgende Details gefunden werden:

- In Pousette et al. (1997) werden zwei Detaillösungen aufgeführt, in welchen die PBD-Bahnen an den Rändern bzw. entlang der Schrammborde hochgeführt, oder in der zweiten Variante in gleicher Ebene auf der Fahrbahnplatte bis zum Rand der Brücke weitergeführt werden. Dabei wird das Wasser auf der Fahrbahn seitlich über den Rand abgeführt. In Skandinavien werden in der Regel quervorgespannte Fahrbahnplatten ausgeführt.

- In Milbrandt und Schellenberg (1998) werden mehrere Detaillösungen zum Fahrbahnübergang und zu den Randanschlüssen gezeigt. Randanschlüsse ohne Schrammbord werden mit Stahlprofilen ausgebildet. Die direkt bewitterten Schrammborde werden in Hartholz ausgeführt.

In allen Detaillösungen wird die Abdichtung immer konsequent auf der Fahrbahnplatte bis zum Plattenrand durchgeführt. Im Bereich von Aufkantungen, Randwinkel oder Schrammborden wird eine zusätzliche Lage aufgeschweisst und «hochgeführt». In allen Detaillösungen ist der Fugenverguss an den Rändern dargestellt. An den Widerlagern ist insbesondere bei dem dargestellten offenen Fahrbahnübergang, ein ausreichend breiten Luftraum zwischen Widerlager und Holzkonstruktion und die Ausbildung eines Quergefälles auf der Auflagerbank dargestellt.

- In den Musterzeichnungen von Harrer Ingenieure aus Karlsruhe, Deutschland (Gerold, 2010) wird die Fahrbahnplatte von der tragenden Konstruktion durch einen Kontroll- u. Hinterlüftungsebene getrennt. Es werden Details von geschlossenen und offenen Fahrbahnübergängen in hoher Detaillierungstiefe vorgeschlagen. In den Stahl-Randprofilen werden Entwässerungslöcher empfohlen, damit im Falle eines undichten Fugenverguss das Wasser abfließen kann, bevor es zu Unterläufigkeit der Abdichtungsebene kommt. Randanschlüsse werden mit und ohne Schrammbord vorgeschlagen, wo nötig auch mit Entwässerungen innerhalb des Fahrbahnbereichs.
- Im Holzbau Handbuch «Musterzeichnungen für Holzbrücken» (Reihe 1, Teil 9, Folge 3) wurden Musterzeichnungen aus dem Projekt 'ProTimb' und aus Gerold (2010) übernommen. Das Handbuch bietet eine Übersicht von Detaillösungen für Holzbrücken mit Fahrbahnbelägen aus Holz und Asphalt. Neu sind auch geschlossene Fahrbahnübergänge aufgeführt, bei welchen mit einem Schleppblech die Fuge zum Widerlager überbrückt wird.

Alle aufgeführten Details stützen sich weiter auf das Prinzip, dass die Fahrbahn und die Tragkonstruktion durch eine Kontroll- und Hinterlüftungsebene voneinander getrennt werden.

5.1.2 Beispiele aus Betonbrücken:

- In Lehmann und Bernhard (2014) werden im 'Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6- Anschlüsse von Brückenabdichtungen' Randanschlüsse für Betonbrücken aufgeführt. Diese Details sind für Fahrbahnaufbauten im Verbund mit Abdichtungssystemen unter Verwendung von Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD) und Flüssigkunststoffabdichtungen (FLK) aufgearbeitet. Im Gegensatz zu den Holzbrücken werden hier auch Lösungen vorgeschlagen, bei denen die PBD-Bahn am Schrammbord hochgeführt werden. Die Abdichtungsbahn wird dabei am Schrammbord mit Klemmleisten fixiert. Als Alternative wird in einer Detaillösung die PBD-Bahn auf der Platte bis an den Rand geführt und mit Flüssigkunststoff der Anschluss am Schrammbord ausgeführt.

Grundsätzlich kann eine Vielzahl an vorliegenden Detaillösungen als Grundlage für Basisdetails bei Holzbrücken in diesem Projekt verwendet werden. Die in grosser Anzahl aus Deutschland vorliegenden Detaillösungen können jedoch nicht direkt übernommen werden, da dort wie beschrieben die Fahrbahn und Tragkonstruktion durch eine Kontroll- u. Belüftungsebene, voneinander getrennt sind.

Publizierte Detaillösungen aus der Literatur umfassen insbesondere die nachfolgend aufgeführten Detailpunkte und gelten sowohl für alle Fuss- und Radwegbrücken, als auch für Strassenbrücken einschl. der Schwerlastbrücken.

1. Fahrbahnübergänge
 - a. Offen
 - b. Geschlossen (Bitumen, Gummi, Schleppblech)
2. Randanschlüsse
 - a. Mit Schrammbord
 - b. Mit Geländer ohne Schrammbord
 - c. Mit Leitplanke
3. Entwässerungen
 - a. Mittig
 - b. Seitlich

5.2 Anwendung und Ziele der Aufstellung von Basisdetails

Die erarbeiteten Detaillösungen sind Basisdetails. Masse sind teilweise bewusst nicht angegeben, damit sie gemäss den Anforderungen infolge der Verkehrslasten, Randbedingungen im Projekt oder Geometrie der Brücke angepasst werden können.

In allen aufgeführten Detaillösungen werden auf Fahrbahnplatten aus Holz in der Fläche Polymerbitumen-Dichtungsbahnen als Abdichtung und für die Schutz- und Deckschicht Gussasphalt verwendet. Dies gilt unabhängig davon, ob der Fahrbahnaufbau ohne Verbund (VSS-40451) oder mit Verbund ausgeführt wird.

Bei den Detaillösungen muss der Anspruch erhoben werden, dass sie wirtschaftlich, selbst unter Zeitdruck gut ausführbar und unterhaltsarm sind. Die regelmässige (periodische) Wartung und Unterhalt des Eigentümers kann vorausgesetzt werden. Das Entwässerungskonzept ist gemäss der ASTRA Richtlinie 12004 zu erstellen.

5.3 Basisdetails der Fahrbahnübergänge (FÜ)

5.3.1 Allgemein

Fahrbahnübergänge (FÜ) sind erfahrungsgemäss wartungs- und unterhaltsintensive Bauteile einer Brücke. Sie müssen sorgfältig geplant und ausgeführt werden, damit Leckagen und Wassereintritt in die Konstruktion vermieden werden.

Fahrbahnübergänge haben folgende generelle Anforderungen gemäss ASTRA Richtlinie 12004 zu erfüllen:

- Tragsicherheit
- Ermüdungssicherheit
- Funktionstüchtigkeit (Verformungskapazitäten, Elastizität)
- Dauerhaftigkeit unter Betriebs- und Umwelteinwirkungen
- Verkehrssicherheit
- geringe Lärmemission
- günstige Voraussetzungen für die Erhaltung und den Ersatz

Die Arbeitsgruppe hat darauf aufbauend allgemeine Empfehlungen abgegeben. Die Fahrbahnübergänge werden vom Verkehr überwiegend stossartig belastet und müssen gleichzeitig dauerhaft wasserdicht sein.

- Am Fahrbahnübergang müssen Brücke und Widerlager eine ähnliche Steifigkeit im Gesamtaufbau aufweisen, um an der Schnittstelle des Fahrbahnübergangs, grosse Differenzen bei den vertikalen Verformungen zu vermeiden.
- Die maximalen Verformungen (relative vertikale und horizontale Verschiebungen) sind nach ASTRA Richtlinie 12004 nachzuweisen. Geringe relative Verschiebungen verringern den Verschleiss des Belags in der Zone des Fahrbahnübergangs und erhöhen die Lebensdauer des Details.
- Wenig steife Fahrbahnplatten können im Bereich der Fahrbahnübergänge mit Randverstärkungen (z.B. Stahlprofilen) verstärkt werden. Diese sind so steif (verformungsarm) mit der Holzplatte zu verbinden, dass die Abdichtung über dem Stoss (Schnittstelle zur Fahrbahnplatte aus Holz) nicht durch Materialermüdung geschädigt wird und dies zu einem Wassereintrag in die Holzplatte führt
- Zu weiche Fahrbahnübergänge führen neben grossen vertikalen Verformungen zu Verdrehungen sowohl in den Stahl-Randprofilen wie auch in der Fahrbahnplatte, Dichtungsfugen, etc. Verstärkte dynamische Einwirkungen auf den Fahrbahnbelag im Bereich der Fahrbahnübergänge sind die Folge.
- Die Asphaltarten und -schichten sind auf Widerlagerseite (mindestens 1 Meter) mit dem Belagsaufbau der Brücke abzustimmen. (z.B. an beide Seiten 80 mm dicker Gussasphalt)
- Das Widerlager und die Brücke müssen im Bereich der Fahrbahnübergänge ein identisches Gefälle haben, damit der Fahrzeugverkehr keine zusätzliche (stossartige) vertikale Belastung an der Fahrbahn(platte) verursacht.
- Die Anschlüsse der Abdichtung an den Randprofilen bzw. Stahlbauteilen sollen mit Flüssigkunststoff (PMMA) ausgeführt werden. Die Polymerbitumen-Dichtungsbahn der Abdichtung ist auf die Fläche der Holzbauteile zu begrenzen.
- Im Bereich der Randprofile, insbesondere an den Fahrbahnübergängen sollte, anstelle von vielfach vorgeschlagenen Bohrungen in den Profilen, mit Drain-/Omega-Profilen (z.B. ETADRAIN), die (Not-) Entwässerung im Fall einer Leckage sichergestellt werden. Das eintretende Wasser kann damit planmässig bis zu einem Entwässerungspunkt geführt werden.
- Im Bereich der Widerlager/Fahrbahnübergänge, muss durch einen ausreichend dimensionierte Luftraum bzw. Abstand der Bauteile, das Austrocknungsvermögen der angrenzenden Holzbauteile sichergestellt werden. Zusätzlich sind die Stirnseiten der Holzbauteile durch eine geeignete Abdeckung etc. konstruktiv zu schützen.

5.3.2 Geschlossene Fahrbahnübergänge

- Geschlossene Fahrbahnübergänge sind bei Verkehrsbrücken i.d.R. mit «Joint Fugen» auszuführen.
- Joint Fugen eignen sich sehr gut als «leise» Fahrbahnübergänge bei Brücken mit hoher Verkehrsbelastung oder in sensiblem Umfeld (Wohngebieten).
- Bei Verwendung von Joint Fugen ist zu beachten, dass sich infolge horizontaler Bremskräfte Rückstellkräfte bilden können.
- Obwohl Joint-Fugen für unterschiedliche Relativverschiebungen zwischen Brücke und Widerlager ausgebildet werden können (z.B. 5 mm vertikal und 12,5 mm horizontal), ist wie beschrieben ein steifer Fahrbahnübergang zu empfehlen.

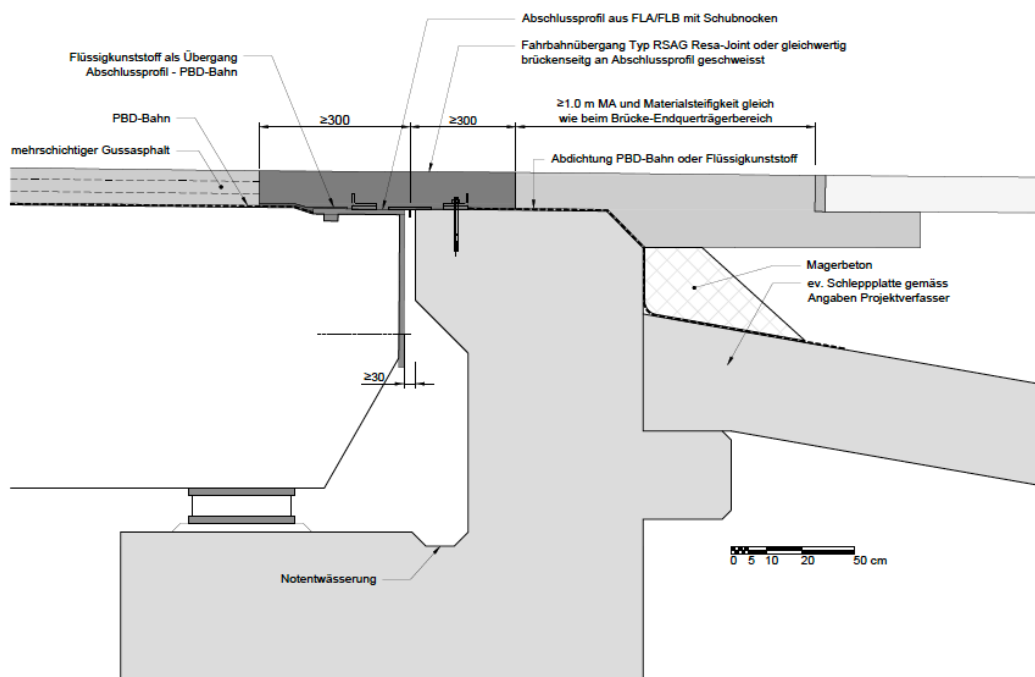


Abbildung 87: Detaillösung, Geschlossener Fahrbahnübergang mit Jointfuge.

- Alternativ können geschlossene Fahrbahnübergänge mit einem Dichtungsprofil (z.B. einzelligen Fahrbahnübergänge für Dehnwege bis 80 mm, Typ «mageba Tensa-Grip» oder gleichwertiges) ausgeführt werden.
- Fahrbahnübergänge mit Dichtungsprofilen eignen sich für Geh- und Radwegbrücken oder für Brücken mit einer geringen Verkehrsbelastung und Langsamverkehr. Sie können bei Geschwindigkeiten über 30 km/h zu Lärmemissionen führen.
- Fahrbahnübergänge die mit einem Dichtungsprofil (z.B. Tensa Grip oder gleichwertig) ausgeführt werden, benötigen zwingend ein Stahlquerträger/Randprofil zum brückenseitigen Anschweißen der Dichtungsprofile
- Mit dieser Randverstärkung wird die Steifigkeit am Fahrbahnübergang erhöht

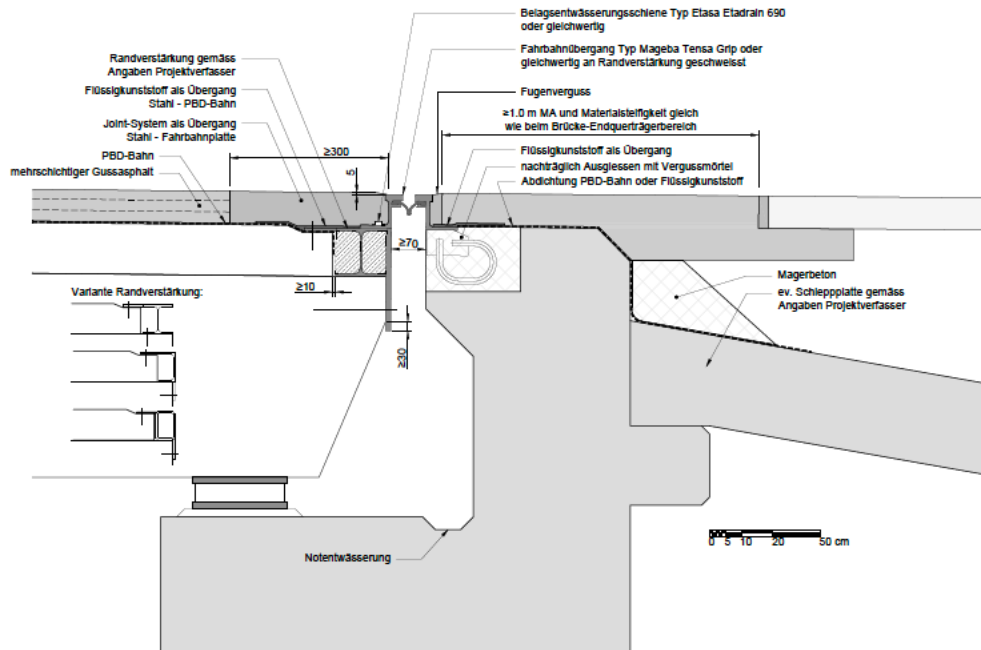


Abbildung 88: Detaillösung, Geschlossener Fahrbahnübergang mit Standard-Dichtungsprofil.

Von Fahrbahnübergängen unter Verwendung von Schleppblechen wird abgeraten, da diese bei Schnellverkehr (>30 km/h) zu Lärmbelastung führen können

5.3.3 Offene Fahrbahnübergänge

- Offene Fahrbahnübergänge sind aus Gründen des konstruktiven Holzschutzes nur in Ausnahmefällen einzusetzen und eignen sich nur für Geh- und Radwegbrücken oder für Brücken mit einer geringen Verkehrsbelastung und Langsamverkehr.
- Offene Fahrbahnübergänge können bei Geschwindigkeiten von >30 km/h zu Lärmbelastung führen.
- Offene Fahrbahnübergänge müssen genügend Möglichkeit zum Entwässern, Reinigen, Wartung, usw. bieten.
- Bleche mit Tropfnasen können Wasser von der Stirnholzseite des Holzes (Träger oder Platte) wegführen.
- Ein genügend grosser Luftraum im Bereich des Widerlagers verbessert das Austrocknungsvermögen und erleichtert den Unterhalt. Der Zustand des FÜ kann besser überwacht und erfasst werden.
- Eine gute Entwässerung unter dem Fahrbahnübergang muss eingeplant werden.
- Offene Fahrbahnübergänge dürfen i.d.R. nicht mehr als 20 mm breit sein.
- Stahlprofile müssen ca. 5 mm niedriger als das Niveau der Gussasphaltschicht ausgeführt werden. Dies verhindert mechanische Beschädigungen des geschweissten Stahlprofils durch den Schneepflug

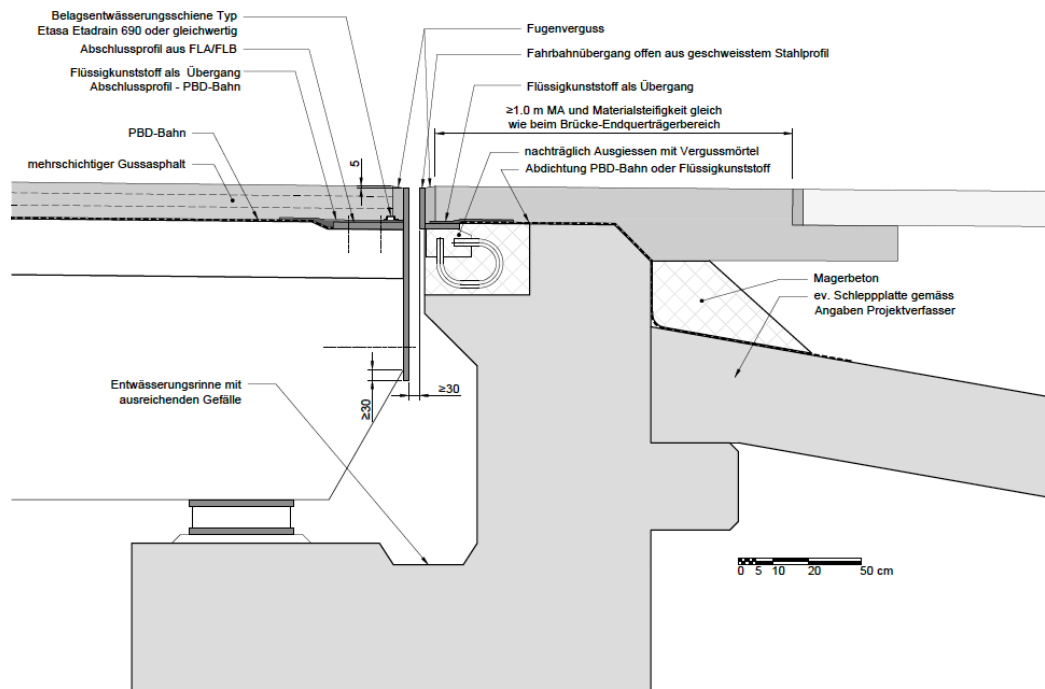


Abbildung 89: Detailausbildung für offene Fahrbahnübergänge.

5.4 Basisdetails der Randanschlüsse und Schrammborde

5.4.1 Allgemein

Als Notentwässerung im Bereich des Randvergusses an den Randprofilen sollten anstelle von den vielfach vorgeschlagenen Bohrungen in den Profilen, Entwässerungsspiralen (\varnothing 15 mm) verwendet werden. Mit den sogenannten Omega-Profilen (z.B. ETADRAIN) kann im Fall einer Leckage im Randverguss, das eintretende Wasser planmässig bis zu einem Entwässerungspunkt/-rinne geführt werden.

Die Polymerbitumen-Dichtungsbahn sollte wie bereits beschrieben nicht am Randprofil hochgezogen und angeschweisst werden. Hier ist der wasserdichte Anschluss mit einem Flüssigkunststoff-Abdichtungssystem sicherzustellen.

Ecken und Ränder in der Abdichtung müssen vermieden werden. Wenn die Ecke zu weich ist kann eine Polymerbitumen-Dichtungsbahn oder die PMMA-Membran durch Materialermüdung reißen.

5.4.2 Randanschlüsse ohne Schrammbord

- Empfohlen wird, mittels einer Leitschranke oder Holzlatte (Verschleissteil) den Rand gegen Schäden von Schneepflügen (Winterdienst) zu schützen. (Hinweis: Die Räumschilder der Schneepflüge sind i.d.R. etwas gerundet und schräg gestellt)
- Die Ecke zwischen Fahrbahnbelag und Randprofil soll zusätzlich mit einem Kittkeil geschützt werden. Diese erhöht der Lebensdauer der Bitumenfuge.
- Randprofile aus Stahl brauchen alle ca. 6 m eine 8 mm breite Dilatationsfuge. Es wird empfohlen diese Randprofile aus Standardprofilen herzustellen. Geschweisste Profile können sich beim Verzinken verziehen und -biegen (Restspannungen vom Schweißen).
- Die Randanschlüsse der Abdichtungsbahnen an die Stahlprofile ist mit Flüssigkunststoff-Abdichtungssystem auszuführen. Dabei kann sowohl die Flüssigkunststoff-Abdichtung (PMMA) die Polymerbitumen-Abdichtungsbahn überlappen, wie auch umgekehrt. Das Aufbringen von PMMA auf verzinkte Stahlprofile ist kein Problem, auf Farbe ist es eher schwierig.

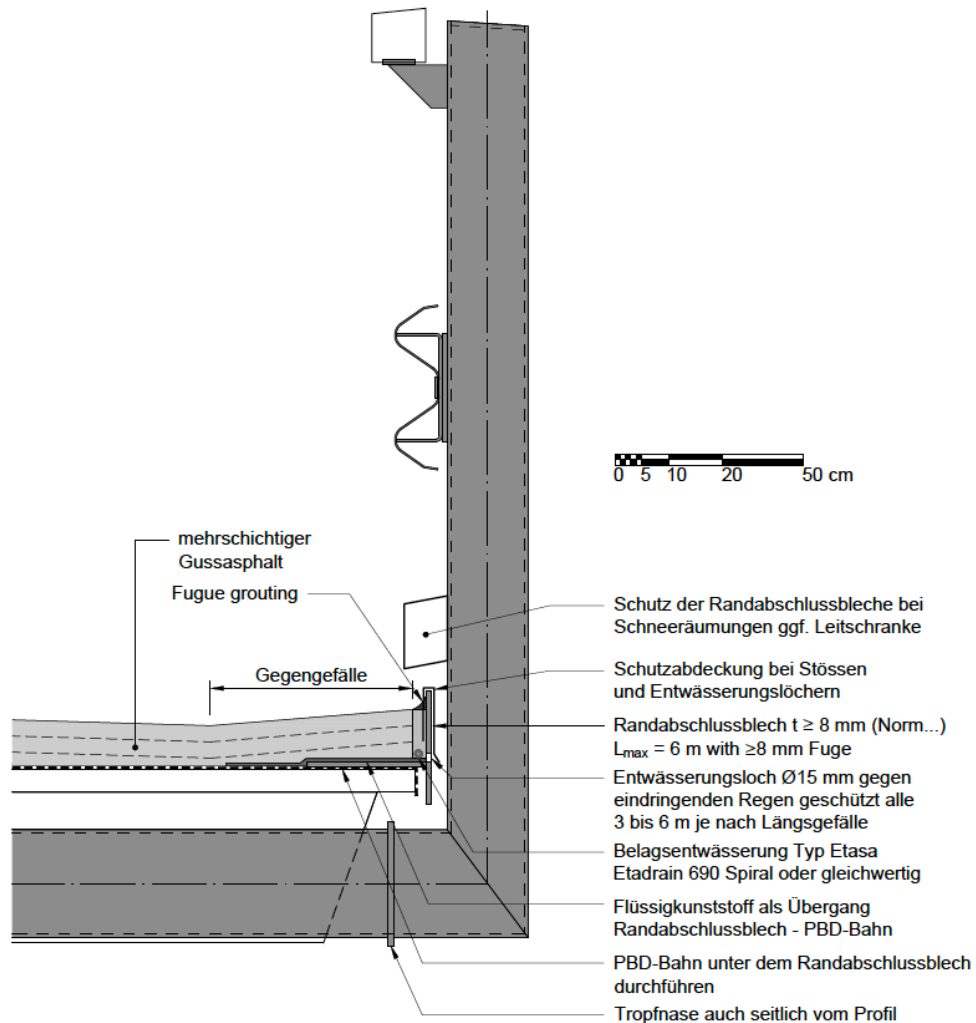


Abbildung 90: Detaillösung, Randanschluss ohne Schrammbord.

5.4.3 Randanschlüsse mit Schrammbord

- Aufgrund der hohen Beanspruchung werden die Schrammborde i.d.R. aus Ortbeton oder vorgefertigten Betonelementen erstellt.
- Die Abdichtung ist unter den Schrammbord durchzuführen. Wenn Stauässe entsteht, muss das Wasser abfliessen können.
- Das Schrammbord sollte mit Schubnocken fest mit der Brücke verbunden werden. Grosse Horizontalkräfte vom Schrammbord lassen sich nur sehr schwer über Schrauben und andere mechanische Verbindungsmittel verformungsfrei in die Fahrbahnplatte leiten. Verformungen des Schrammbordes können zu Rissen in der Abdichtung führen. Ein weiterer Nachteil bei der Anwendung von Schrauben ist, dass diese die Abdichtung durchdringen und damit die Gefahr von Leckagen besteht. Diese ist unter dem Schrammbord nicht zu erkennen.
- Schrammborde können als Anprallschutz und als Leitelement für die Schneeräumung dienen. Sie schützen vor mechanischen Einwirkungen auf die Geländer und der seitlichen Bekleidungen.
- Schrammborde müssen als Verschleissteil auswechselbar ausgebildet werden.

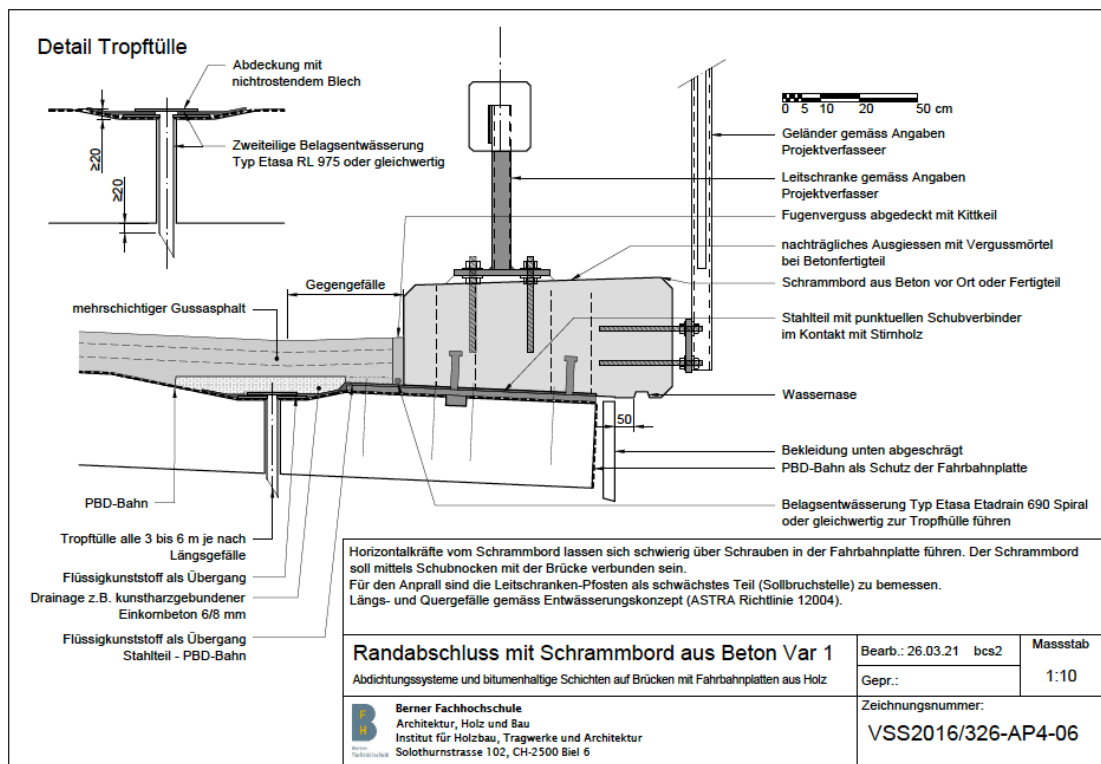


Abbildung 91: Detaillösung, Randabschluss mit Schrammbord.

5.5 Entwässerungen

Die Standarddetails und bewährten Systeme für die Entwässerung von Fahrbahnplatten aus Beton können direkt auf die Holzbrücken übertragen und angewendet werden.

5.6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Erfahrungen aus Inspektionen und von der Instandhaltung von bestehenden Holzbrücken zeigen, dass neben einem robusten Systemaufbau, die seitlichen Anschlüsse der Abdichtungssysteme an den Fahrbahnübergängen, an den Schrammborden und an den Entwässerungssystemen (Abläufen) wesentlich für die Dauerhaftigkeit und damit verbunden den Aufwand für Unterhalt resp. Instandsetzung von Holzbrücken sind. Leckagen an diesen Anschlüssen können oft nicht rechtzeitig erkannt werden und führen sehr schnell zu unkontrolliertem Feuchteintritt bei Fahrbahnplatten aus Holz.

Mit der Erarbeitung von Basisdetails stehen sehr gute Grundlagen für die darauf aufbauende individuelle Planung für Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz zur Verfügung. Dies erhöht signifikant die Wirtschaftlichkeit sowohl im Planungsprozess wie auch bei der Ausführung und stellt ein hohes Qualitätsniveau sicher. Gleichwohl ist die regelmässige (periodische) Wartung und der Unterhalt in Verantwortung des Eigentümers unverzichtbar.

In allen aufgeführten Detaillösungen werden auf Fahrbahnplatten aus Holz als Systemaufbau Polymerbitumen-Dichtungsbahnen als Abdichtung und für die Schutzschicht und Decke Gussasphalt verwendet. Dies für das System mit Verbund sowie wie auch ohne Verbund mit der Fahrbahnplatte. Die Herstellung der Fahrbahnaufbauten ist in der Fläche bei der Verwendung von robusten Systemen meist unproblematisch und kann in hoher Qualität dauerhaft hergestellt werden.

6 Instandsetzungs- und Sanierungssysteme

Instandstellungen von Brücken sind meist mit hohen Kosten verbunden. Durch die Entwicklung von standardisierten Lösungen können die Planungskosten reduziert sowie die Qualität und Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmassnahmen erhöht werden. Leckagen in der Abdichtungsebene verursachen oft hohe Holzfeuchten von über 30M% in den Fahrbahnplatten aus Holz. Dies erschwert das Aufbringen der Grundierung/Versiegelung (Nasshaftung) und ruft eine verstärkte Blasenbildung beim Einbau des heissen Gussasphalts hervor. Aus diesem Grund wird bei der Erneuerung oft ein Gesamtaufbau ohne Schubverbund gewählt. Die 2-lagige Glasvliesbahn unter der Abdichtung wirkt dabei als Dampfdruckausgleichs- bzw. -verteilschicht. Die Entlüftungselemente unter der Abdichtung durch Bohrungen in der Fahrbahnplatte aus Holz können dabei zur Dampfdruckentspannung aktiviert werden. Nach dem Entfernen der Abdichtung ist die Oberfläche meist beschädigt. Ausgerissene Holzfasern, Beschädigung durch Werkzeuge beim Entfernen etc., erfordern eine Sanierung der Oberfläche.

6.1 Geplante Instandsetzungsmassnahmen

Eine Erneuerung der Abdichtungssysteme im Schubverbund mit dem Untergrund (Fahrbahnplatte) ist immer eine Herausforderung. Bei Holzbrücken ist diese Thematik noch neu und bisher noch nicht erforscht. Im Zuge der im Projekt durchgeführten Feldversuchen an der Obermattbrücke im Emmental konnte die Erneuerung von Fahrbahnaufbauten erprobt und Empfehlungen bzw. Lösungsvorschläge abgeleitet werden.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Instandstellung ist es, die einzelnen Schichten voneinander getrennt zu entfernen, ohne dabei die Tragstruktur zu beschädigen. Bei nur feldweiser Erneuerung ist es von grosser Bedeutung, die abdichtende Schicht (PBD) mit der nötigen Überlappung erneut anzuschliessen, um einen dauerhaften und wasserdichten Anschluss gewährleisten zu können. Daher müssen die Asphaltsschichten und die Abdichtung separat entfernt werden. Anschliessend können die besandete Epoxidharzgrundierung und die eventuell beschädigte Holzunterkonstruktion entfernt und neu aufgebaut werden.

In Abbildung 92 ist der geplante Sanierungsabschnitt bei der Obermattbrücke dargestellt. Die Abmessungen betragen ca. 5.20m entlang der rechten Fahrbahn und ca. 1.25m vom rechten Fahrbahnrand entfernt.

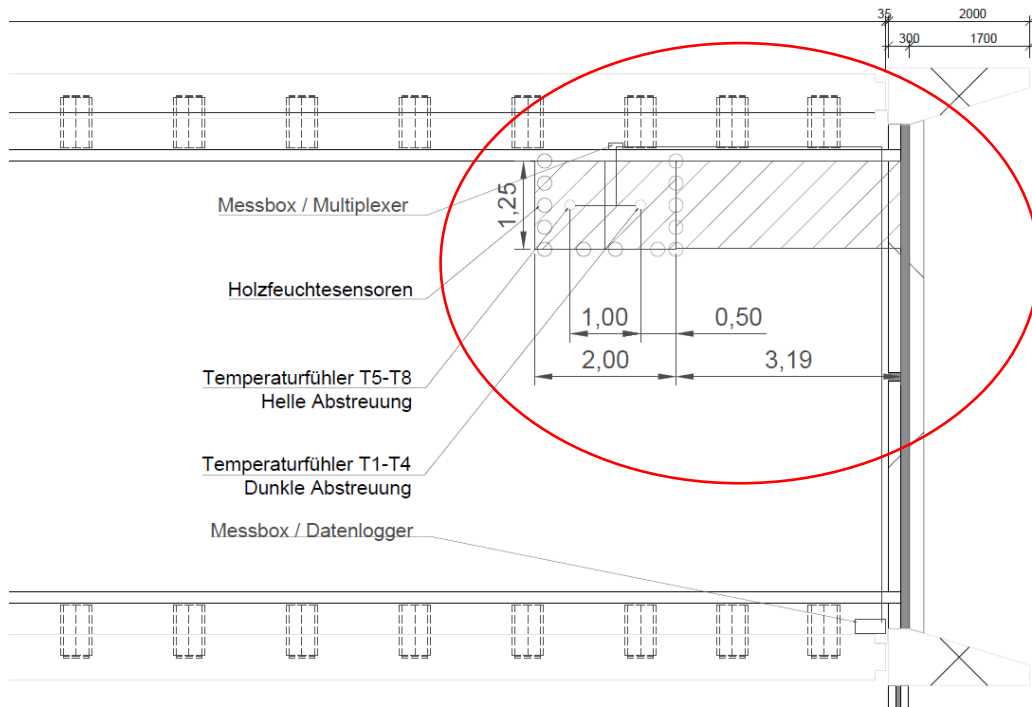


Abbildung 92: Grundriss (unmasstäblicher Planausschnitt) mit der Position des Versuchsfeldes auf der Brücke, sowie die Lage der Temperatur- und Feuchtesensoren

6.1.1 Entfernen und Ausbau der Schichten

Das Entfernen des Fahrbahnaufbaus im Versuchsfeld ist in folgenden Schritten erfolgt:

- Demontage des Schrammbord
- Einschneiden des Asphalts bis wenige Millimeter oberhalb der PBD-Abdichtung (Abbildung 93)
- Zerkleinern und Ablösen des Asphalts von der Abdichtung (Abbildung 94)
- Erhitzen des Spatels/Kratzers zum vollständigen Entfernen der Asphalt- und Abdichtungsreste auf der Epoxidharzversiegelung (Abbildung 95)
- Einschneiden der PBD-Bahn mit ausreichendem Abstand (10 – 15 cm) zur Kante der bestehenden Asphalttschicht, zur Sicherstellung einer ausreichenden Überlappung und somit wasserdichten Anschluss der neuen PBD-Bahn an die bestehende Abdichtung
- Reinigen des Untergrunds (besenrein)
- Variante 1: Abschleifen der Epoxidgrundierung mittels Schleifscheibe (Abbildung 96, rechts)
- Variante 2: Sandstrahlen der Epoxidgrundierung (Abbildung 96, links)
- Ausbessern/Entfernen von Schadstellen im Holz durch Abhobeln bzw. vollständiges Heraussägen der geschädigten Fahrbahnplatte (Abbildung 97)

Nach dem Entfernen aller Schichten oberhalb der Epoxidgrundierung, konnte in einem weiteren Arbeitsschritt die Epoxidgrundierung entfernt werden. Hier wurden zunächst zwei Varianten erprobt. In Variante 1 wurde die Grundierung mittels Schleifscheibe und in einer zweiten Ausführungsvariante mittels Sandstrahlen entfernt (siehe Abbildung 96). Dabei zeigte sich, dass das Entfernen mit der Schleifscheibe problemlos möglich ist und gleichzeitig die Oberfläche der Holzplatte deutlich weniger beschädigt.

Da vor Ort festgestellt wurde, dass die Schädigungen der Fahrbahnplatte aus Holz weitreichender war als ursprünglich angenommen, wurde der Fahrbahnaufbau am Fahrbahnübergang auf einer Breite von ca. 2 m entfernt.

Sofern die Fahrbahnplatte aus Holz bereits durch holzerstörende Pilze geschädigt ist, muss der geschädigte Bereich von einem Fachspezialisten präzise festgestellt werden.

Im vorliegenden Fall konnten Bereiche identifiziert werden, die bereits vollkommen zerstört waren (Brückenkopf ca. 1.5m vom Fahrbahnrand und ca. 20cm in Fahrrichtung). Teilweise waren Bereiche nur durchfeuchtet (mit zunehmendem Abstand vom Brückenkopf, ca. 1m vom rechten Fahrbahnrand und mit einem Abstand von ca. 20cm vom Brückenkopf bis ca. 2m in Fahrrichtung).

In denen als beschädigt bzw. durchfeuchtet bewerteten Bereiche konnten Holzfeuchten deutlich höher als 15 M.-% festgestellt werden. Die vollkommen geschädigten Bereiche am Brückenaufleger wurden entfernt und völlig neu aufgebaut.



Abbildung 93: *Einschneiden in den Asphalt bis einige mm über die darunterliegende Abdichtung*



Abbildung 94: Ausbrechen des Asphaltes im Schubverbund mittel Presslufthammer



Abbildung 95: Ablösen des restlichen Asphaltes und der PBD von der besandeten Epoxidharzgrundierung mittels Brenner und Spatel/Kratzer



Abbildung 96: Oberflächenstruktur der Fahrbahnplatte nach Entfernen der Epoxidharzgrundierung mittels Schleifen (Variante 1) im rechten Bildbereich und mittels Sandstrahlen (Variante 2) in der linken Bildhälfte

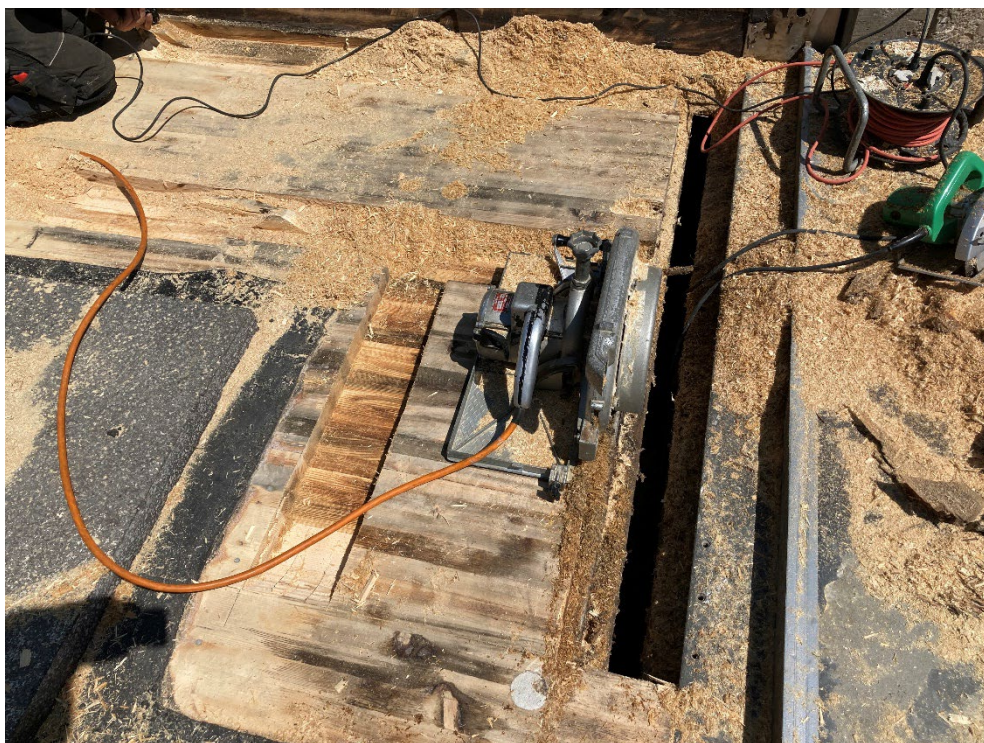


Abbildung 97: Aussägen und abhobeln der beschädigten Bereiche in der Holzunterkonstruktion, rechts: ausgesägtes Brückenaufleger mit vollständig zerstörter Holzunterkonstruktion, links: Abhobeln der durchfeuchteten Bereiche

6.1.2 Neuaufbau der Abdichtung im Verbund

Für die Instandsetzung der geschädigten Fahrbahnplatte wurden die ausgeschnittenen Bereiche mit Furnierschichtholz-Platten ersetzt. Diese wurden mittels Schraubenpressverklebung mit der noch vorhandenen Tragstruktur kraftschlüssig verbunden (siehe Abbildung 98). Zur Sicherstellung eines ebenen Untergrunds für die Epoxidharzgrundierung, wurden die Schraubenlöcher mit PU-Holzleim versiegelt.

Zum Schutz der frisch aufgetragenen Epoxidharzgrundierung und -versiegelung während des Aushärtens, wurde ein Wetterschutzzelt aufgebaut und mit einem Asphaltfugenband als Sperre entlang des Randes des Sanierungsbereichs vor ablaufenden Oberflächenwasser bei Regenereignissen auf den Bestandsasphalt geschützt (siehe Abbildung 99).

Zum Schutz der Fahrbahnplatte aus Holz, wurde die Abdichtungsbahn mittels FLK (Flüssigkunststoff) und zusätzlichem Armierungsgewebe am Randprofil angeschlossen. Hierzu wurde für eine bessere Haftung der bestehenden Stahlwinkel angeschliffen und mit einer Grundierung vor Korrosion geschützt (siehe Abbildung 100).

Wie im Projekt durch Vorversuche erarbeitet, wurde die Schutzschicht bereits mit einer Dicke von 35 mm eingebaut. Obwohl an der bestehenden Fahrbahnplatte die Holzfeuchte teilweise > 15 M% betrug, konnte die Schutzschicht im Verbund ohne grössere Blasenbildung eingebaut werden (siehe Abbildung 102).

Die ebenfalls 35 mm Deckschicht aus Gussasphalt wurde zu Versuchszwecken sowohl mit einer hellen wie auch mit einer dunklen Abstreuerung hergestellt (siehe *Abbildung 102*, *Abbildung 103* und *Abbildung 104*). Mit zuvor eingebauten Temperatursensoren kann so der Einfluss der Oberfläche (hell oder dunkel) auf den sommerlichen Temperaturverlauf im Aufbau ermittelt werden.



Abbildung 98: Neu beschichtete Holzunterkonstruktion mit besandeter Epoxidharzgrundierung, darunter verleimte und verschraubte Furnierschichtholz platten um die Tragfähigkeit der Unterkonstruktion wiederherzustellen



Abbildung 99: Links: Witterungsschutz der noch nicht ausgehärteten Epoxidharzgrundierung, Rechts: Bituminöses Asphaltfugenband auf Bestandsasphalt leicht angedrückt



Abbildung 100: FLK (Flüssigkunststoff) Abdichtung mit eingelegtem Armierungsgewebe



Abbildung 101: Bituminöser Randanschluss



Abbildung 102: *Eingebachte Asphaltenschutzschicht*



Abbildung 103: *Eingebachte Asphaltdeckschicht mit dunkler Abstreifung*



Abbildung 104: *Eingebrachte Asphaltdeckschicht mit heller Abstreuung für Versuchszwecke*

Der Neuaufbau des Systems wurde in den folgenden Schritten durchgeführt:

- Sanieren der beschädigten Holzkonstruktionen durch Verleimen und Verschrauben von Furnierschichtholz-Platten auf die ausgehobelten bzw. vollständig entfernten Bereiche
- Aufbringen der neuen Epoxidharzgrundierung
- Installation eines FLK (Flüssigkunststoff) Abdichtungssystems an den Randanschlüssen und dem Fahrbahnübergang
- Aufschweißen der PBD Abdichtungsbahn
- Aufbringen der ersten Gussasphaltschicht (Schutzschicht)
- Aufbringen der zweiten Gussasphaltschicht (Deckschicht)
- Abstreuen der Oberflächen mit dunkler bzw. heller Abstreuung
- Randfugenverguss mit Flüssigbitumen
- Montage des Schrammbordes

6.2 Temperatur- und Feuchtemonitoring

Um den Einfluss der Einfärbung der Oberfläche auf den Temperaturverlauf in den Schichten festzustellen, wurden acht Temperatursensoren (K-Fühler) im neuen Fahrbahnaufbau installiert.

Die Fühler wurden jeweils auf die Schichten gelegt und mit Silberklebeband fixiert. Die Fühler T1 (dunkle Abstreuung) und T5 (helle Abstreuung) sind auf der ersten Schicht (gesandetes Epoxidharz) aufgebracht worden (siehe Abbildung 105). Fühler T2 (dunkle Abstreuung) und T6 (helle Abstreuung) sind auf der PBD-Abdichtung installiert. In die Gussasphaltschutzschicht sind die Fühler T3 (dunkle Abstreuung) und T7 (helle Abstreuung) ca. 30 mm oberhalb der PDB Abdichtung eingelegt worden. Die letzten Fühler sind auf der Gussasphaltschutzschicht aufgebracht, T4 (dunkle Abstreuung) und T8 (helle Abstreuung).

Bei der Fertigstellung der Fahrbahnoberfläche wurde das Kabel des Fühlers T8 beschädigt. Somit können die Daten der Fühler T4 und T8 nicht mehr zu Vergleichszwecken herangezogen werden.



Abbildung 105: Einbau der Sensoren auf der ersten Schicht (besandete Epoxidharzgrundierung), Linker Fühler für dunkle Abstreuerung (T1), Rechter Fühler für helle Abstreuerung (T5)

Um die Dichtheit des Überganges der PBD-Abdichtung überprüfen zu können, wurden entlang des Sanierungsabschnittes, auf der Unterseite der Tragstruktur Feuchtesensoren installiert. Die Sensorschrauben wurden in ca. 10cm tiefe (von der Unterseite gemessen) in die Holzunterkonstruktion eingebaut. Diese messen mittels Widerstandsmethode (vgl. auch 4.1.1) die Holzfeuchte. Es wird kein effektiver Wert der Holzfeuchte berechnet, sondern nur die Widerstände der einzelnen Sensoren überprüft. Bei einem Absinken des Widerstandes würde dies bedeuten, dass aufgrund von Feuchtigkeitseintrag die elektrische Leitfähigkeit sich verbessert und somit die Holzfeuchte ansteigt und die Abdichtung vermutlich undicht ist.

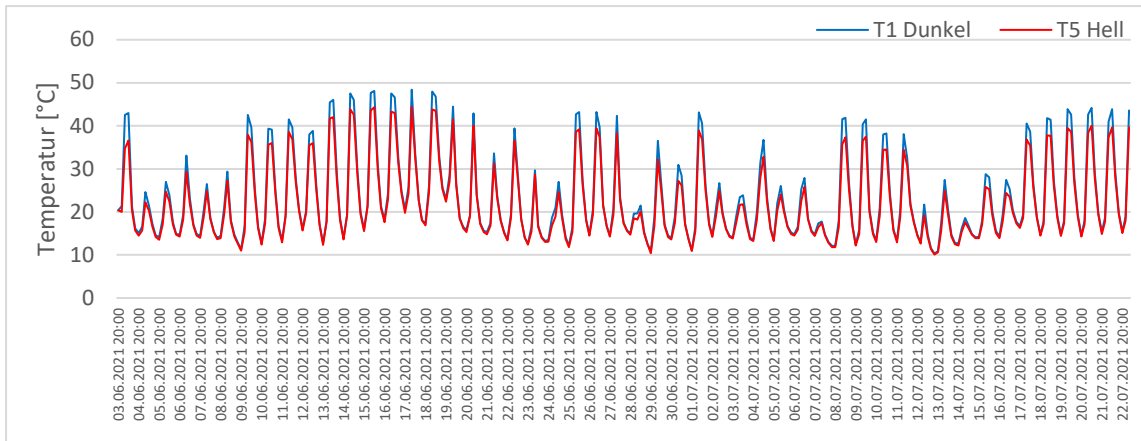


Abbildung 106: Temperaturen im Vergleich zwischen hellem und dunklem Abstreugut in der ersten Tiefe, auf Epoxidharzgrundierung

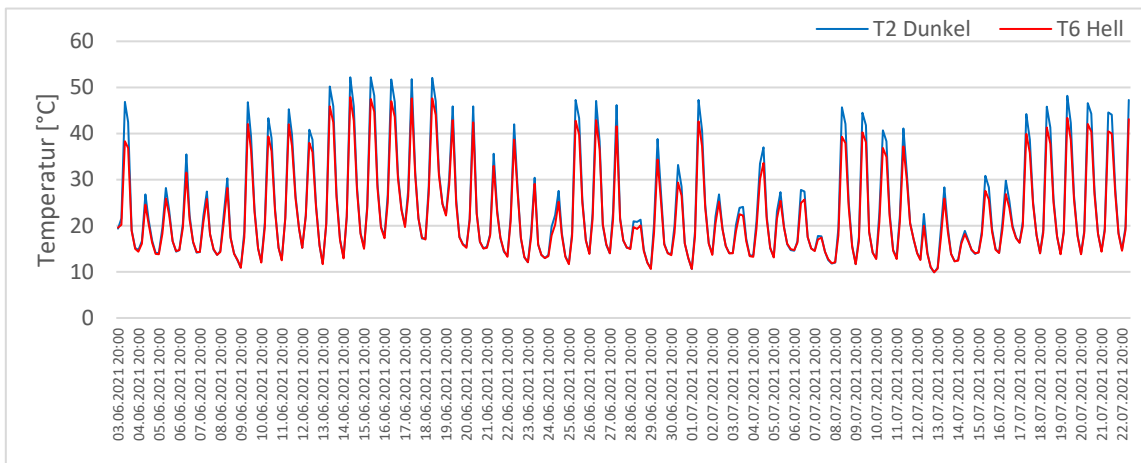


Abbildung 107: Temperaturen im Vergleich zwischen hellem und dunklem Abstreugut in der zweiten Tiefe, auf PBD

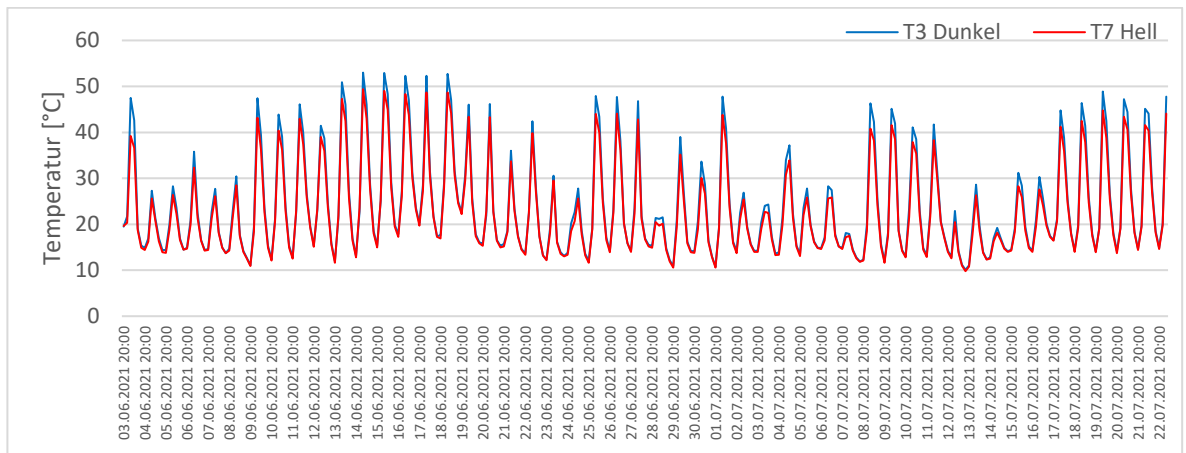


Abbildung 108: Temperaturen im Vergleich zwischen hellem und dunklem Abstreugut in der dritten Tiefe, in Asphaltenschutzschicht

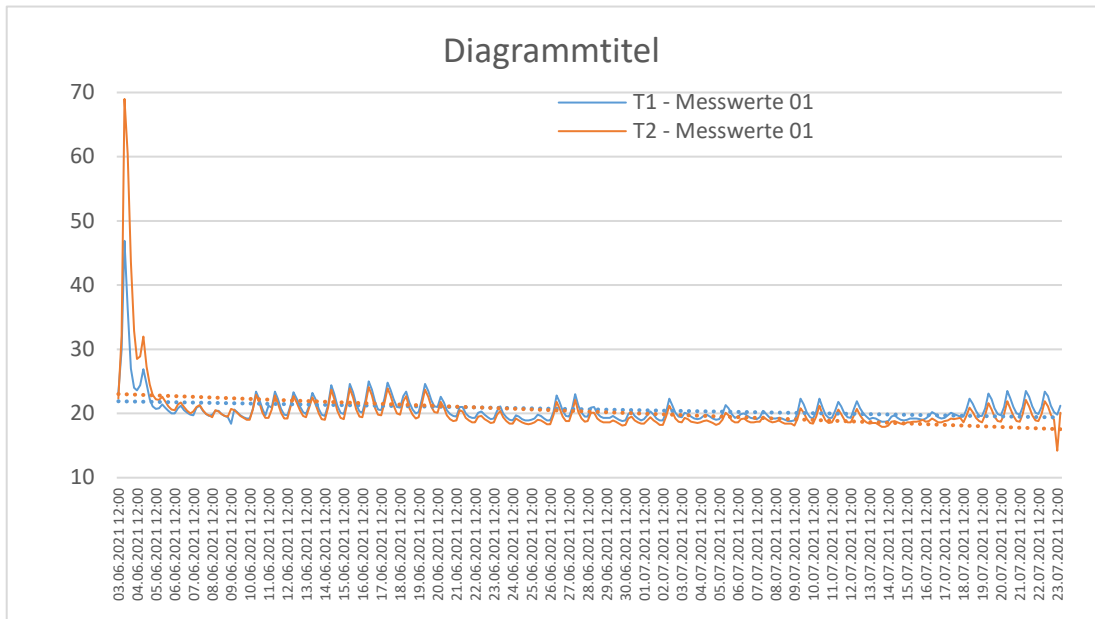


Abbildung 109: Darstellung des gemessenen Feuchtwiderstands der beiden Messreihen unter der Abdichtung auf der Unterseite der Holztragkonstruktion

6.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Feldversuche und die Instandsetzungsmassnahmen sind erfolgreich verlaufen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind hilfreich, um für zukünftige Instandstellungsmassnahmen Empfehlungen ableiten zu können.

Erfreulicherweise konnte bestätigt werden, dass auch bei der Instandsetzung und Vorliegen von erhöhten Holzfeuchten in der Fahrbahnplatte, ein Aufbau im Verbund möglich ist. Auch unter diesen erschwerten Bedingungen war der Einbau der Schutzschicht mit einer (erhöhten) Dicke von 35 mm erfolgreich. Die sorgfältige Instandsetzung der Fahrbahnplatte, insbesondere deren Oberfläche, ist hierfür eine wichtige Grundvoraussetzung. Ferner gilt es festzuhalten, dass die Instandstellung von einem sehr «holzbückenerfahrenen» Betrieb mit grösster Sorgfalt ausgeführt wurden.

Die Auswertung der Feuchtesensoren in Abbildung 109 zeigen zwar immer noch eine erhöhte Holzfeuchte an, die gemessenen Werte liegen aber deutlich unter dem Fasersättigungsgrad der Holzart Fichte/Tanne von 28-30M%, sodass eine weitere Schädigung durch holzerstörende Pilze nicht zu erwarten ist.

Die Temperaturen im Asphalt sind in den Abbildung 106, Abbildung 107 und Abbildung 108 dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, sind die Temperaturen der dunklen Abstreifung kontinuierlich höher als bei den Fühlern der hellen Abstreifung. Die Temperaturunterschiede sind jedoch sehr gering und es wird erwartet, dass sich mit fortschreitender Abnutzung der Abstreifung und zusätzlicher Verschmutzung, der temperaturreduzierende Effekt der hellen Abstreifung verringern wird.

Da die Messungen in der Sommerperiode mit hohen Temperaturen erfolgten, können die gewonnenen Feststellungen als erste wichtige Tendenz gewertet werden.

Zum Verifizieren der bislang gewonnenen Erkenntnisse müssen die Temperaturmessungen über mehrere Sommer-Winter-Zyklen fortgesetzt werden.



Abbildung 110: Sanierter Fahrbahnbelag ca. 30 Tage nach Einbau

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Norm VSS-40451

7.1 Systemaufbauten mit Verbund auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz

Systemaufbauten mit Verbund sind auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz möglich

Systemaufbauten mit Epoxidharzversiegelung und Abdichtungen aus Polymerbitumen-Dichtungsbahnen führen nur zu geringer Blasenbildung und einer sehr guten Verbundfestigkeit.

Bei den durchgeführten Versuchen konnte das Abdichtungssystem auch bei bis zu 10% Dehnungen nicht von der Holzplatte getrennt werden.

Versiegelungen aus PMMA sind durch das bessere Austrocknungsvermögen zwar schneller und damit wirtschaftlicher einzubauen, es ist im Projekt aber nicht gelungen eine ausreichende Haftung (Verbund) mit der Fahrbahnplatte, insbesondere an «Fehlstellen» in der Plattenoberflächen infolge z.B. Äste und Harzgallen, zuverlässig herzustellen. Als Ursache werden hierfür die Terpene im Harz vermutet.

Ferner ist die Film- /Schichtdicke bei Abdichtungen aus PMMA zu dünn, um infolge der hohen Temperaturen auf der Holzoberfläche beim Einbau der Schutzschicht zu bestehen. Da Holz ein sehr schlechter Wärmeleiter ist, sind die Oberflächentemperaturen direkt auf den Holzplatten gegenüber Betonplatten (guter Wärmeleitung) beim Einbau der Schutzschicht signifikant höher.

Die Verwendung von niederviskosen Gussasphalten ist bei Holzbrücken Standard

Es ist inzwischen insbesondere bei Fahrbahnplatten aus Holz Standard mit niederviskosen (modifizierten) Gussasphalten mit einer max. Einbautemperatur von max. 200 °C die Schutzschicht einzubauen. Unebenheiten durch eventuell entstandene Luftkanäle (Blasenbildung) verschliessen sich wieder zuverlässig beim Einbau der Bindschicht. Die geforderte Ebenheit des Asphaltbelags kann damit gewährleistet werden.

Die Erhöhung der max. Schutzschichtdicke auf 35 mm ist möglich

Gegenüber den heutigen Empfehlungen in der Fachliteratur hat sich im Projekt gezeigt, dass der Einbau der Schutzschicht mit einer Dicke von 35 mm (MA 11) möglich ist.

Der damit verbundene grösseren Wärmeeintrag in das Abdichtungssystem führt nicht notwendigerweise zu höheren Temperaturen in der Versiegelungsschicht. Die bei den Versuchen festgestellte maximale Differenz von 5°C im Vergleich zu der Temperatur bei einer Schichtdicke von 25 mm (MA 8) ist gering. Bei den Prüfkörpern der Laborversuche waren keine wesentlichen Unterschiede in der Oberflächenqualität bzw. bei der Blasenbildung zwischen MA 8 mit 25 mm und MA 11 mit 35 mm feststellbar.

Die Praxiserfahrung auf mehreren Holzbrücken wie z.B. der Obermattbrücke, Islasbrücke und Ova da Berninabrücke bei denen erfolgreich eine 35 mm dicke MA 11 Schutzschicht eingebaut werden konnte, bestätigen hierin die Laborversuche.

Die Oberflächenqualität der Holzplatte ist von Bedeutung

In dem Forschungsprojekt konnte aufgezeigt werden, dass die Oberflächenqualität der Holzplatte einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundwirkung (Haftung der Versiegelung) hat.

Bei Platten aus Furnierschichtholz (LVL) und Brettschichtholzelementen (für quervorgespannte Fahrbahnplatten) reicht meist die von den Herstellern angebotene Industriequalität aus. Bei Brettsperrholzplatten (CLT) ist die üblicherweise gelieferte Industriequalität infolge der Harzgallen und Äste nicht ausreichend. Die Oberfläche sollte verspachtelt und geschliffen sein.

Der heutige Grenzwert der Holzfeuchte von 15M% hat sich bestätigt

Der Einfluss der Holzfeuchte ist geringer als ursprünglich vermutet. Mit Holz- bzw. Ausgleichsfeuchten bis zu 18M% konnte kein nachteiliger Einfluss auf die Haftzugfestigkeit festgestellt werden. Darüber hinaus ist ein Einfluss erkennbar. Dies ist insbesondere bei Instandstellungen von Abdichtungssystemen von Bedeutung. Die im aktuellen Entwurf der VSS 40451 genannte Obergrenze der Holzfeuchte von 15M% als Mittelwert wurde durch das Projekt bestätigt. Da die Feuchteverteilung in den Platten nicht gleichförmig verläuft, sind Einzelwerte bis 18M% unproblematisch.

7.2 Feuchtemonitoring

Der Einbau von Feuchteüberwachungssystemen ist bei Holzbrücken Standard

Langjährige Untersuchungen u.a. der BFH zeigen, dass bei den heute üblichen «geschützten Holzbrücken» eine Ausgleichsfeuchte von 18M% \pm 2% zu erwarten ist. Da dieser günstige Wert auch bei besonderen örtlichen Klimabedingungen nur unwesentlich überschritten wird ist das besondere Augenmerk beim Unterhalt von Holzbrücken auf (unerwartet) eintretende Staunässe z. B. durch Leckagen in der Abdichtung oder im Bereich der mechanisch hoch beanspruchten Fahrbahnübergänge oder Randanschlüsse an den Schrammborden zu legen.

Da die Holzfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Holzbrücken hat, ist der Einbau von Feuchteüberwachungssystemen bei Holzbrücken Standard.

Unterschiedliche Systeme abhängig vom Systemaufbau (mit/ohne Verbund) notwendig

Im Projekt konnte gut aufgezeigt werden, dass die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung heute zuverlässig mit leitfähigem Glasvlies oder mit Bandsensoren überwacht werden kann.

Bei einem Aufbau mit Verbund, verursacht die Leckage eine lokale Erhöhung der Holzfeuchte in der Trägerplatte. Der Verbund zwischen Abdichtung und Unterlage verhindert die Ausbreitung des eindringenden Wassers unter der Abdichtung. Im Zuge des Projektes konnte die Eignung leitfähiger Glasvliese und deren Einbau und Funktionstüchtigkeit in der Epoxidharz-Versiegelung überprüft werden und steht so für erste Anwendungen zur Verfügung.

Bei einem Aufbau ohne Verbund kann sich die eindringende Feuchtigkeit in der Trennlage (oft aus mehrlagigen Glasvliesbahnen) verteilen. Eine Erhöhung der Holzfeuchte über eine grössere Fläche der Fahrbahnplatte ist die Folge. Weisst die Fahrbahnplatte ein (Quer-) Gefälle auf, reicht es Bandsensoren unterhalb der Abdichtung entlang der Brückenränder einzubauen.

7.3 Detaillösungen

Die Aufnahme der Basisdetaillösungen in die VSS 40451 wird empfohlen

Mit der Erarbeitung von Basisdetails stehen sehr gute Grundlagen für die darauf aufbauende individuellen Planung für Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz zur Verfügung. Dies erhöht signifikant die Wirtschaftlichkeit sowohl im Planungsprozess wie auch bei der Ausführung und stellt ein hohes Qualitätsniveau sicher.

Die Basisdetaillösungen bieten den Ingenieuren sehr anwendungsorientierte Hinweise und Regeln, wie die Haltbarkeit über die gesamte Lebensdauer sichergestellt werden kann. Gleichzeitig sind diese so gestaltet, dass die Ingenieure genügend Freiraum für Weiterentwicklungen und standortangepasste Lösungen haben. Es wird empfohlen diese Detaillösungen in die VSS 40451 aufzunehmen.

In allen aufgeführten Detaillösungen werden auf Fahrbahnplatten aus Holz als Systemaufbau sowohl mit Verbund wie auch ohne Verbund in der Fläche Polymerbitumen-Dichtungsbahnen als Abdichtung und für die Schutzschicht und Deckschicht Gussasphalt verwendet.

Aktuell wird die europäische Holzbrückennorm EN 1995-2:202x überarbeitet. Dabei wurden die in diesem Projekt erarbeiteten Detaillösungen von der zuständigen europ. Normenkommission als gut befunden worden und werden nach heutigem Stand in dem Detailkatalog des informativen Annex D teilweise übernommen.

Gleichwohl ist die regelmässige (periodische) Wartung und der Unterhalt in Verantwortung des Eigentümers unverzichtbar.

7.4 Instandstellungen und Sanierungssysteme

Ein Aufbau im Verbund ist auch bei Instandstellungen möglich.

Ein Aufbau im Verbund ist auch bei Instandstellungen unter Verwendung von Epoxidharzversiegelung möglich. Durch die Absperrwirkung ist auch bei hohen Holzfeuchten > 15 M% keine Blasenbildung zu verzeichnen. Selbst die Erhöhung der Dicke der Schutzschicht auf 35 mm hat in den Feldversuchen zu hervorragenden Resultaten geführt.

Eine hohe Oberflächenqualität der Fahrbahnplatte muss auch im Instandstellungsfall gewährleistet werden. Zur Vermeidung von grösseren Sanierungsmassnahmen an der Oberfläche z.B. durch mehrlagige Kratzspachtelung muss das Entfernen der Bestandschichten durch Schleifen erfolgen. Das bei Fahrbahnplatten aus Beton übliche Sandstrahlen führt zu einem «Ausfasern der Oberflächenstruktur der Holzplatte und ist somit nicht empfehlenswert.

7.5 Weiterer Forschungsbedarf

Mit der Erarbeitung von Basisdetails stehen sehr gute Grundlagen für die darauf aufbauende individuelle Planung von Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz zur Verfügung. Dies erhöht signifikant die Wirtschaftlichkeit sowohl im Planungsprozess wie auch bei der Ausführung und stellt ein hohes Qualitätsniveau sicher. Die Praxiserfahrung bei der Anwendung von Systemaufbauten im Verbund sowohl bei Neubauten wie auch Instandstellungen bei Fahrbahnplatten aus Holz müssen über einen längeren Zeitraum

systematisch erfasst und ausgewertet werden. Die Erarbeitung weiterer Basis-Detaillösungen ist notwendig.

Im Zuge der Bearbeitung der Instandsetzung und Sanierungssysteme in Kapitel 6, bot sich die einmalige Gelegenheit von Feldversuchen an, einer im Jahr 2007 erstellten ungedeckten Holzbrücke (Obermattbrücke, Langnau/Lauperswil), bei der Abdichtung und Belag nach dem Verbundsystem eingebaut worden sind. Diese Feldversuche waren ursprünglich nicht Teil des Forschungsprogramms. Dabei wurden unter anderem zur Feststellung des Einflusses der Einfärbung der Oberfläche auf den Temperaturverlauf in den Schichten, acht Temperatursensoren (K-Fühler) im neuen Fahrbahnaufbau installiert (Kapitel 6.2). Mit den erfolgten Messungen in einer ersten Sommerperiode mit hohen Temperaturen, können die gewonnenen Feststellungen als erste wichtige Tendenz gewertet werden. Zum Verifizieren der bislang gewonnenen Erkenntnisse müssen die Temperaturmessungen über mehrere Sommer-Winter-Zyklen fortgesetzt werden.

Die Fortführung der Langzeitfeldversuche bei den Versuchsflächen auf der Obermattbrücke, in Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis IV, Burgdorf, ist wünschenswert.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
AST	Advanced Shear Test (AST)
BSH	Brettschichtholz (BSH)
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
CLT	Cross Laminated Timber (CLT), Brettsperrholz (BSP)
EP	Epoxidharz (EP)
FLK	Flüssigkunststoffabdichtungen (FLK)
HZ	Haftzugprüfungen (HZ)
LVL	Furnierschichtholz, Laminated Veneer Lumber (LVL)
MA	Gussasphalt, (mastic asphalt) (MA)
M%	Massenprozent (M%)
NVA	Niederviskoser Asphalt (NVA)
PBD	Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD)
PFTE	Polytetrafluorethylen (PFTE)
PMMA	Polymethylmethacrylat (PMMA)
RFID	Radio-Frequency IDentification (RFID)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA)
SN	Schweizer Norm (SN)
T_g	Temperaturbeständigkeit (TG-Wert)
UHFB	Ultrahochleistungsfaserverbundbaustoff (UHFB)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Literaturverzeichnis

Normen

[1]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2016), « Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) –Baustoffe, Bemessung und Ausführung », Norm SIA 2052:2016 Bauwesen 592052.
[2]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2017), « Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Beton - Systemaufbauten, Anforderungen und Ausführung », Norm SN 640 450:2017-12.
[3]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), « Asphalt - Prüfverfahren - Teil 2: Korngrößenverteilung », Norm SN 670 402:2016-03.
[4]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2002), « Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren », Norm SN EN 13183-1:2002.
[5]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2002), « Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstandsmessverfahren », Norm SN EN 13183-2:2002-07; Deutsche Fassung EN 13183-2:2002.
[6]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2017), « Abdichtungsbahnen- Abdichtungssysteme auf Beton für Brücken und andere Verkehrsflächen – Bestimmung der Schubfestigkeit », Norm SN-EN 13653.
[7]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), « Walzasphalt - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten », Norm VSS 40 430.
[8]	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), « Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz; Systemaufbauten, Anforderungen und Ausführung », Norm VSS 40451:2019.

Dokumentation

[9]	Angst, Ch (2008), « Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt », VSS 2000/433, Bern.
[10]	Angst Ch (2015), « Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 – Langzeitverhalten des Verbundes », VSS 2006/513; ASTRA-Bericht 1514, Bern.
[11]	Bachofer R. und Konzett J. (2013), « Brücken in Holz, Möglichkeiten und Grenzen », Forschungsprojekt AGB 2003/012 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), Bundesamt für Strassen.
[12]	Bonifacio S. (2020), « Untersuchung der Grundlagen zur Messung des Raumklimas in einen Holzgebäude », Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Bern, Schweiz.
[13]	Brühwiler (2017), « UHFB als Abdichtung von Brückenfahrbahnplatten » vom 30. September 2017, Prof. Dr. E. Brühwiler, Memorandum ENAC Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, EPFL Lausanne.
[14]	Büholzer H. und Fuchs D. (2019), « Historische Holzbrücken der Schweiz bis 1850 », Edition Salus GmbH, 2019, ISBN 9783033074903.
[15]	Burger K., Elter P., Holm K. und Kämmer U. (2018), « Das dichte Flachdach », Bauphysik-Kalender 2018 Feuchteschutz und Bauwerksabdichtung, S. 335-360.
[16]	Dietsch P., Franke S., Franke B., Gamper A. und Winter S. (2005), « Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts », J Civil Struct Health Monit, Bd. 5, Nr. 2, S.115-127.
[17]	Forsén H und Tarvainen V (2000), « Accuracy and functionality of hand-held wood moisture content meters », Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 420, Espoo, Finland.
[18]	Gerold M (2010), « Musterzeichnungen », Bearbeitet im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e. V., Harrer Ingenieure, Karlsruhe, Deutschland.
[19]	Herrmann M. (2009), « Innovationen der Holzfeuchtemessung », Technische Universität München, München.
[20]	Hugi E, Wuersch M, Risi W, Wakili KG (2007), « Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species », Journal of Wood Science, 53:71–75.
[21]	Informationsdienst Holz (2019), « Musterzeichnungen für Holzbrücken (Reihe 1, Teil 9, Folge 3) », Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V., Frielzheim, Deutschland.

-
- [22] Keylwerth R. und Noack D. (1956), «**Über den Einfluss höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip**», *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 14, Nr. 5, S. 162-172.
-
- [23] Lehmann P und Bernhard A (2014), «**Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6-Anschlüsse von Brückenabdichtungen**», *Forschungsprojekt VSS 2006/511*, Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute.
-
- [24] Leutner R (1979), «**Untersuchungen des Schichtenverbunds beim bituminösen Oberbau**», *Fachartikel Bitumen 3/1979*.
-
- [25] Loser R (2020), «**Oxygen Permeability Index (OPI)**», *EMPA Concrete / Construction Chemistry Laboratory*, Dübendorf.
-
- [26] Milbrandt E. und Schellenberg K. (1998), «**Eignung von bituminösen Belägen für Holzbrücken, Schlussbericht, Forschungsauftrag E96/7**», *Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. München*, Deutschland.
-
- [27] Nievergelt A. (2020), «**persönliche Korrespondenz mit Marcus Schiere**», (22.12.2020).
-
- [28] Müller A., Franke B., Schiere M., Franke S. (2017), «**Advantages of moisture content monitoring in timber bridges**». *3. International Conference on Timber Bridges*, Skellefteå, Schweden.
-
- [29] Pousette A (1997), «**Wearing Surfaces on Timber Bridges**», *Nordic Timber Council*, ISBN 91-89002-12-1.
-
- [30] Pousette A., Malo K.A., Thelandersson S., Fortino S., Salokangas L., Wacker J. (Editors) (2013), «**Durable Timber Bridges**», *Final report and guidelines*, RISE Research Institutes of Sweden, SP Rapport 2017:25, ISSN 0284-5172, Skellefteå, Sweden.
-
- [31] Partl M. und Haillesilassie B (2014), «**Research Package on Bridge-deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation**», *VSS 2006/515 Project*, Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
-
- [32] Quartier C (2013), «**Ce que racontent les ponts couverts en suisse (et d'ailleurs)**», Favre, Schweiz.
-
- [33] Raab C und Partl M (2014), «**Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP1. Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung**», *Forschungsprojekt VSS 2006/511*, Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute.
-
- [34] Scharmacher F. und Müller A. (2013), «**Asphaltbeläge auf Holzbrücken Untersuchung bituminöser Fahrbahnbeläge auf Strassenbrücken mit Holztragwerk**», *BAFU*.
-
- [35] Simpson W (1973), «**Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models**», *Wood and Fiber*, 5 (1), 41-49.
-
- [36] Stalder und CC (2000), «**Wettbewerb zur Erneuerung von vier Holzbrücken im oberen Emmental**», *Oberingenieurkreis IV*, TBA Bern, Schweiz.
-
- [37] Smiley S. (2019), «**A Tag, A Label, An Inlay**», *AtlasRFIDstore*, 1 May 2019, www.atlasrfidstore.com/rfid-insider/a-tag-a-label-an-inlay.
-
- [38] Tiefbauamt Bern (2007), «**Dossier Obermattbrücke, Objekt Nummer CC**», *Oberingenieurkreis IV* Dunantstrasse 13, Burgdorf, Schweiz.
-
- [39] Zofka A., Maliszewska M., Bernier A, Josen R., Vaitkus J, and Kleizienė R (2015), «**Advanced shear tester for evaluation of asphalt concrete under constant normal stiffness conditions**», *Road Materials and Pavement Design*, DOI: 10.1080/14680629.2015.1029690.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 07.06.2022

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2016/326
 Projekttitel: Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz
 Enddatum: 30.09.2022

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen des 2018 bewilligten Projekts VSS 2016/326 'Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz' erforschte die Berner Fachhochschule gemeinsam mit IMP-Bautest AG (Oberbuchsiten, SO), die Herstellung von Systemaufbauten im Verbund auf Fahrbahnplatten aus Holz. Die Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten sind die Grundlage für die Normierungs- und Forschungskommission NFK 3.10 „Abdichtungssysteme“ bei einer erneuten Überarbeitung der Norm VSS 40 451.

Im Projekt konnte der Nachweis erbracht werden, dass ein Systemaufbau mit Verbund auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz möglich ist und bei der zukünftigen Überarbeitung der VSS 40451 als Standardaufbau integriert werden kann. Es hat sich jedoch gezeigt, dass nach heutigem Erkenntnisstand nur ein Aufbau unter Verwendung von Epoxidharz für die Grundierung und Versiegelung, sowie Polymerbitumen-Dichtungsbahnen für die Abdichtung zu der geforderten geringen Blasenbildung und einer sehr guten Verbundfestigkeit führen.

Die Verwendung von niederviskosen (modifizierten) Gussasphalten mit einer max. Einbautemperatur von max. 200 °C ist bei Holzbrücken Standard. Im Projekt konnte der Nachweis erbracht werden, dass gegenüber den heutigen Empfehlungen in der Fachliteratur, der Einbau der Schutzschicht mit einer Dicke von 35 mm (MA11) problemlos möglich ist. Der damit verbundene grösseren Wärmeeintrag in das Abdichtungssystem führt zu einer vernachlässigbaren maximalen Differenz von 5°C im Vergleich zu der Temperatur bei einer Schichtdicke von 25 mm (MA8).

In dem Forschungsprojekt konnte klar aufgezeigt werden, dass die Oberflächenqualität der Holzplatte einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundwirkung (Haftung der Versiegelung) hat. Bei Platten aus Furnierschichtholz (LVL) und Brettschichtholzelementen (für quervorgespannte Fahrbahnplatten) reicht die von den Herstellern angebotene Industriequalität aus. Bei Brettspertholzplatten (CLT) ist die üblicherweise gelieferte Industriequalität infolge der Harzgallen und Äste nicht ausreichend. Hier muss die Oberfläche verspachtelt und geschliffen sein.

Der Einfluss der Holzfeuchte ist geringer als ursprünglich vermutet. Mit Holz- bzw. Ausgleichsfeuchten bis zu 18% konnte kein nachteiliger Einfluss auf die Haftzugfestigkeit festgestellt werden. Darüber hinaus ist ein Einfluss erkennbar. Dies ist insbesondere bei Instandstellungen von Abdichtungssystemen von Bedeutung. Die im aktuellen Entwurf der VSS 40451 genannte Obergrenze der Holzfeuchte von 15% wurde durch das Projekt bestätigt.

Der Einbau von Feuchteüberwachungssystemen ist heute bei Holzbrücken Standard. Langjährige Untersuchungen u.a. der BFH zeigen, dass bei den heute üblichen «geschützten Holzbrücken» eine Ausgleichsfeuchte von 18M% +/-2% zu erwarten ist. Da dieser günstige Wert auch bei besonderen örtlichen Klimabedingungen nur unwesentlich überschritten wird, ist das besondere Augenmerk beim Unterhalt von Holzbrücken auf (unerwartet) eintretende Stauässe z. B. durch Leckagen in der Abdichtung oder im Bereich der mechanisch hoch beanspruchten Fahrbahnübergänge oder Randanschlüsse an den Schrammborden zu legen.

Im Projekt konnte erfolgreich aufgezeigt werden, dass die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung heute zuverlässig mit leitfähigem Glasvlies oder mit Bandsensoren überwacht werden kann. In Abhängigkeit von dem gewählten Systemaufbau (mit/ohne Verbund) sind unterschiedliche Systeme notwendig. Bei einem Aufbau mit Verbund, verursacht die Leckage eine lokale Erhöhung der Holzfeuchte in der Trägerplatte. Der Verbund zwischen Abdichtung und Unterlage verhindert die Ausbreitung des eindringenden Wassers unter der Abdichtung. Die Eignung von leitfähiger Glasvliese und deren Einbau und Funktionstüchtigkeit in der Epoxidharz-Versiegelung wurde erbracht und steht so für erste Anwendungen zur Verfügung.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Im Projekt konnte der Nachweis erbracht werden, dass ein Systemaufbau mit Verbund auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz möglich ist und bei der zukünftigen Überarbeitung der VSS 40451 als Standardaufbau integriert werden kann.

Mit den durchgeführten Versuchen konnte belegt werden, dass gegenüber den heutigen Empfehlungen in der Fachliteratur, der Einbau der Schutzschicht mit einer Dicke von 35 mm (MA11) problemlos möglich ist.

In dem Forschungsprojekt konnte aufgezeigt werden, dass die Oberflächenqualität der Holzplatte einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundwirkung (Haftung der Versiegelung) hat. Bei Platten aus Furnierschichtholz (LVL) und Brettschichtholzelementen (für quervorgespannte Fahrbahnplatten) reicht die von den Herstellern angebotene Industriequalität aus.

Der Einfluss der Holzfeuchte ist geringer als ursprünglich vermutet. Mit Holz- bzw. Ausgleichsfeuchten bis zu 18% konnte kein nachteiliger Einfluss auf die Haftzugfestigkeit festgestellt werden.

Im Projekt konnte erfolgreich bewiesen werden, dass die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung heute zuverlässig mit leitfähigem Glasvlies oder mit Bandsensoren überwacht werden kann. In Abhängigkeit von dem gewählten Systemaufbau (mit/ohne Verbund) sind unterschiedliche Systeme notwendig.

Mit den erarbeiteten Basis-Detaillösungen steht eine gute Grundlage für die Planung und Umsetzung von dauerhaften Anschlüssen der Abdichtungssysteme an den Fahrbahnübergängen und an den Randanschlüssen zur Verfügung. Die im Forschungsauftrag AGB 2003/012 formulierte Forderung u. Empfehlung hinsichtlich der Zusammenstellung von Musterzeichnungen wurde in einem ersten Schritt erfüllt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Im Projekt konnte der Nachweis erbracht werden, dass ein Systemaufbau mit Verbund auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz möglich ist und bei der zukünftigen Überarbeitung der VSS 40451 als Standardaufbau integriert werden kann.

Eine Begrenzung der Systemaufbauten auf Epoxidharzversiegelungen und Abdichtungen aus Polymerbitumen-Dichtungsbahnen ist nach heutigem Kenntnisstand notwendig.

Die Praxiserfahrungen bei der Anwendung von Systemaufbauten im Verbund sowohl bei Neubauten wie auch Instandstellungen bei Fahrbahnplatten aus Holz müssen systematisch erfasst werden. Die Erarbeitung weiterer Basis-Detaillösungen scheint sinnvoll.

Publikationen:

- 3 Konferenzbeiträge bei der International Conference on Timber Bridges (ICTB 2021 Plus) im Jahr 2022 in Biel (CH) - Prof. A. Müller, M. Schiere und S. Bonifacio
- Vorträge und Beiträge in Tagungsbänden anlässlich der Brückenkolloquien an der Technischen Akademie in Esslingen (D) in den Jahren 2020 und 2022 - Prof. A. Müller, M. Schiere und S. Bonifacio
- VSS Strasse und Verkehr Sonderheft Holzbrücken (wird im Juli 2022 publiziert)

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Müller

Vorname: Andreas

Amt, Firma, Institut: Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur, Biel/Bienne

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das vorliegende Forschungsprojekt ist aus dem Bedürfnis von Planenden, Ingenieuren und Bauträgerschaften der öffentlichen Hand entstanden, welche sich mit dem Neubau und der Instandstellung von Holzbrücken für den Verkehrswegbau auseinandersetzen. Als Folge des zunehmenden Baus von zweispurigen Holzbrücken auch auf den Hauptstrassennetzen ist das Begehren entstanden, für Fahrbahnplatten aus Holz dieselben Abdichtungssysteme und Belagsaufbauten im Verbund einsetzen zu können wie dies bei Betonfahrbahnplatten möglich ist. Bisher existiert in der Schweiz für Fahrbahnplatten aus Holz nur die Norm VSS 40 451: 2019, und diese behandelt das System für Abdichtungen und Beläge ohne Verbund. Trotzdem sind in der Schweiz im letzten Jahrzehnt einige gedeckte und ungedeckte Holzbrücken mit einem Systemaufbau im Verbund ausgeführt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass mit den Erfahrungen aus dem Betonbrückenbau einiger Belagsspezialfirmen, ein grosses Wissenspotential vorhanden ist, das sich auch im Holzbrückenbau anwenden lässt. Naturgemäss sind Beton und Holz physikalisch sehr unterschiedliche Materialien. Sie zeigen bei der Einwirkung von statischen und dynamischen Kräften ein differentes Verhalten. Die Werte der erreichbaren Restfeuchte bei Holz und Beton vor dem Aufbringen der Abdichtung, liegen weit auseinander und die beiden Baustoffe reagieren bei der Einwirkung von hohen Temperaturen sehr unterschiedlich. Ein Grund also, all diesen Unterschieden nachzugehen und zu erforschen wo sind brauchbare Verfahren, die sowohl auf Beton wie auch auf Holz anwendbar sind und welche Anwendungen sind nicht einsetzbar. Diesen und vielen weiteren Fragen ist das Projektteam mit Berechnungen und Versuchen nachgegangen und hat nach Antworten gesucht und sie auch gefunden. Zum einen sind Modellrechnungen erstellt worden, zum andern sind die Resultate an vielen Versuchsflächen ausgewertet worden.

Umsetzung:

Dank grosszügiger Unterstützung einer Spezialfirma für Gussasphalt hat eine Vielzahl der erstellten Versuchsflächen in der gedeckten und belüfteten Umgebung ihrer Werkhallen erstellt werden können. Diese Möglichkeit hat die Qualität und das Zeitprogramm des Forschungsprojektes positiv beeinflusst. Trotz der schwierigen Zeit während der Pandemiejahre 2020 – 2021, ist die Forschungsarbeit auch in reduzierter Form weitergeführt worden. Weiter hat sich Gelegenheit für die Durchführung von Feldversuchen an einer im Jahr 2007 erstellten ungedeckten Holzbrücke ergeben, bei der Abdichtung und Belag nach dem Verbundsystem eingebaut worden sind. Diese Feldversuche sind ursprünglich nicht im Forschungsprogramm aufgeführt gewesen. Doch dank der Tatsache, dass die Bauträgerschaft (Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis IV) notwendige Instandstellungsarbeiten geplant hat, ist die Möglichkeit entstanden mit diesem Projekt einige Kurzzeitversuche in situ durchführen zu können. Eine tragende Funktion haben neben den beteiligten Projektpartnern auch die Mitglieder der Begleitkommission übernommen. Mit regelmässigen Kommissionssitzungen und Workshops ist die Kommission stark in das Forschungsprojekt eingebunden gewesen. Das Resultat der Forschungsarbeit ist erfreulich und zeigt klar auf, dass eine Verbundlösung für Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz machbar ist.

weitergehender Forschungsbedarf:

Fortführen der Langzeitfeldversuche bei den Versuchsflächen auf der oben erwähnten Obermattbrücke (Langnau / Lauperswil), in Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt de Kantons Bern, Oberingenieurkreis IV, Burgdorf.

Einfluss auf Normenwerk:

VSS40451; EN 1995-2

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Stalder-de Marco

Vorname: Fred

Amt, Firma, Institut: Büro für Projektleitungen und Baufragen, Pestalozzistrasse 27, 3400 Burgdorf

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: