Interreg
Italia-Österreich
European Regional Development Fund

EUROPEAN UNION

CONCRETE

Oberflächenvergütung von Betonbauwerken – Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch neuartige Schutzmaßnahmen

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4
1.1 Stand der Technik 4
1.2 Ziel des Forschungsprojektes 5

2 Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel 6
2.1 Nicht reaktive organische Beschichtungen 6
2.2 Reaktive anorganische oder anorganisch/organische Oberflächenvergütungsmittel 6
2.3 Eingesetzte Oberflächenvergütungsmittel 7

3 Versuchsablauf und Vorbereitungsmaßnahmen 8
3.1 Work-Packages 8
3.1.1 Work-Packages 1 und 2: Projektmanagement und Kommunikationsmaßnahmen 8
3.1.2 Work-Package 3: Einfluss der Logistik, der Petrographie und der Umwelt 8
3.1.3 Work-Package 4: Einfluss des Zementsteins 12
3.1.4 Work-Package 5: Einfluss des Porensystem, des Bindemittelgehaltes und des W/B-Wertes 14
3.1.5 Work-Package 6: Sonstige relevante Einflüsse 14
3.1.6 Work-Package 7: Praxisversuche an Bauwerken 16
3.2 Relevante Prüfmethoden 18
3.2.1 Von der Norm abweichende Prüfmethoden 18

4 Versuchsdurchführung und Auswertung 21
4.1 Work-Package 3 21
4.1.1 Verwendete Betonsorten und deren Eigenschaften 22
4.1.2 Auswertung der Hauptversuche 25
4.1.3 Zusatzuntersuchungen im Rahmen des Work-Package 3 30
4.1.4 Erkenntnisse aus dem Work-Package 3 33
4.2 Work-Package 4 34
4.2.1 Verwendete Betonsorten und deren Eigenschaften 35
4.2.2 Auswertung der Versuche 36
4.2.3 Schlussfolgerung 39
4.3 Work-Package 5 40
4.3.1 Betonherstellung und Eigenschaften 40
4.3.2 Auswertung der Versuche 42
4.3.3 Schlussfolgerung 44
4.4 Work-Package 6 45
4.4.1 Umweltbedingungen und Nachbehandlung 45
4.4.2 Dauerhaftigkeit und nachträgliche Applikation 49
4.4.3 Brandversuche 52
4.5 Work-Package 7 56
4.5.1 A12 Galerie Senftenberg 56

4.5.2 A12 Anschlussstelle Kufstein Süd 58
4.5.3 S16 Sannabrücke 60
4.5.4 A13 Europabrücke Randbalken 61
4.5.5 B180 Niklasgalerie 63
4.5.6 L13 Tafelweggalerie 64
4.5.7 L36 Loipenüberführung Seefeld 65
4.5.8 LS114 Pfelders 66
4.5.9 SS44 Jaufenpass Kehre 10 67
4.5.10 SS238 Gampenpassstraße KM 10 68
4.5.11 SS238 Gampenpassstraße KM 16 69
4.6 Zusammenfassung 70
4.6.1 Wirkung der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel 70
4.6.2 Wirkung der nicht reaktiven Beschichtungen 71
4.6.3 Weitere Erkenntnisse 71

5 Kommunikationsmaßnahmen 72
5.1 Besprechungen 72
5.2 Öffentliche Veranstaltungen 73
5.3 Flyer 74
5.4 Homepage 75
5.5 Medienberichte 76
5.6 Plakat und Roll-Up 77

A Verzeichnisse 79
A.1 Literatur 79
A.2 Tabellenverzeichnis 79
A.3 Abbildungsverzeichnis 80
A.4 Diagramme 81

1 Einleitung

Die Schwierigkeiten bei Bauausführungen machen vor nationalen Grenzen nicht Halt und betreffen das Bundesland Tirol sowie die Region Südtirol in selber Weise. Strategische Betonbauwerke sind den regionalen Einflüssen ausgesetzt, welche maßgeblich durch die klimatisch vorherrschenden Rahmenbedingungen und die territorial vorhandenen Rohstoffressourcen des Alpenraums charakterisiert werden. Diese regionalen Besonderheiten finden jedoch in den europäischen bzw. nationalen Gesetzen und Normen, teilweise unzureichende Beachtung. Die Konsequenzen dieser fehlenden Einbindung der regionalen Gegebenheiten führen, abhängig von Bauwerk und Belastung, zu teils stärker auftretenden Schädigungen, die maßgeblichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Bauwerke haben. Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll überregionales Knowhow gebündelt und zu einem gemeinsamen Wissenspool zusammengeführt werden.

Durch neuartige Oberflächenvergütungen sollen die Instandsetzungsintervalle bzw. der gesamte Lebenszyklus von Betonbauwerken maßgeblich erhöht werden. Laboruntersuchungen, Praxisanwendungen und ein Monitoring an Bauwerken sind das Fundament des gegenständlichen Forschungsvorhabens. Die Anwendung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis sollen die Plausibilität von Laboruntersuchungen und die Anwendungstauglichkeit sicherstellen.

1.1 Stand der Technik

Je nach Bauwerk und Belastung zeigen sich teils sehr unterschiedliche Arten von Bauwerksschädigungen. Diese reichen bei Betontragwerken von lokalen Schäden bis hin zu großflächigen Abplatzungen und einem vorzeitigem Totalverlust der Gebrauchstauglichkeit bzw. Tragsicherheit.

Vor allem die Oberfläche von Bauteilen stellt einen empfindlichen Angriffspunkt dar, wodurch die Dauerhaftigkeit einzelner Teile oder der Gesamtkonstruktion maßgeblich beeinflusst wird. Daher ist es unumgänglich, Schutzmaßnahmen (z.B. Herstellung von Beschichtungen) zu ergreifen oder, bei Notwendigkeit, intensive Instandsetzungsarbeiten vorzunehmen. Die zurzeit angewandten Verfahren sind jedoch aufgrund ihrer geringen Langlebigkeit als sehr fragwürdig einzustufen.

(a) (b) (c)

Abbildung 1.1: Exemplarische Schadensbilder

1.2 Ziel des Forschungsprojektes

Zielsetzung dieses Forschungsprojektes ist es, neuartige Oberflächenvergütungen bei Betontragwerken einzusetzen, um die Lebensdauer von Betonbauwerken im Rahmen eines optimierten Bauwerks- und Erhaltungsmanagementsystems zu erhöhen.

Nachstehende Ziele sind darum unbedingt anzustreben:

- Minimierung der Zwischeninstandsetzungen
- Verlängerung der Generalinstandsetzungsintervalle
- Erhöhung der Lebensdauer
- Reduktion der Kosten für notwendige Schutz- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen

Der Fokus liegt dabei auf Ingenieurbauwerken im Bereich der Infrastruktur im alpinen Raum, da diese besonderen Rahmenbedingungen unterliegen.

Diese sind unter anderem:

- Klimatische Bedingungen
- Beanspruchung durch Taumittel

2 Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel

Laut der Arbeit von Park u. a. (2014) lassen sich die Oberflächenvergütungsmittel (OVG) in die Gruppe der nicht reaktiven organischen Beschichtungen und in die Gruppe der reaktiven anorganischen oder anorganisch/organischen Oberflächenvergütungsmittel einteilen.

2.1 Nicht reaktive organische Beschichtungen

Mit organischen Beschichtungen wird versucht, die Betonoberfläche zu hydrophobieren und somit das Eindringen von Wasser in die Betonoberfläche zu verhindern und auch die Betonoberfläche zu schützen. Diese Beschichtungen haben den Vorteil, dass sie günstig und einfach zu applizieren sind. Allerdings enthalten die Beschichtungen oft flüchtige organische Verbindungen, welche sowohl bei der Herstellung als auch bei der Applikation mit der Emission von Luftschadstoffen verbunden sind.

Die Beschichtungen sind auch in ihrer Lebensdauer begrenzt, da sie abweichende physikalische Eigenschaften zum Betonuntergrund haben. Neben den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen ist auch das Schrumpfen der Schutzschicht nach dem Auftragen zu erwähnen. Meist wird auch die Diffusion von Wasserdampf behindert, dadurch kommt es zu einer Blasenbildung und in weiterer Folge zum Ablösen der Beschichtung.

2.2 Reaktive anorganische oder anorganisch/organische Oberflächenvergütungsmittel

Basis dieser Oberflächenvergütungsmittel ist der Einsatz von Wassergläsern, die vorrangig mit dem Zementstein, bei silikatischen Gesteinskörnung auch mit diesen, reagieren.

In Park u. a. (2014) und Youn (2010) werden Wassergläser als wasserlösliche Alkalisilikate, mit der Formel $Me_2O \cdot n\,SiO_2$, oder deren wässrigen Lösungen beschrieben. Wobei Me für die Elemente Natrium (Na), Kalium (K) oder Lithium (Li) steht und n für das molare Verhältnis des Siliziumdioxid (SiO_2, Kielselsäure) zum Alkalimetalloxid (Me_2O).

Die verfestigende Wirkung der Wassergläser erfolgt durch eine hydratische Neutralisation. Dabei reagiert das Wasserglas mit dem Kalziumhydroxid ($Ca(OH)_2$) und bildet dadurch neue Kalziumsilikathydratphasen (CSH-Phasen). Zusätzlich entsteht durch Kondensation aus der wässrigen Lösung auch hochmolekulare Metakieselsäure mit einer verfestigenden Kieselgelbildung. Neben der verfestigenden Wirkung werden auch vorhandene freie Porenräume durch das entstehende Kieselgel und die Kristallphasen verringert und vorhandene Mikrorisse verfüllt und mit dem Betongefüge verbunden (siehe Abbildung 2.1). Dadurch wird die Durchlässigkeit der Betonoberfläche stark herabgesetzt.

Die entstehenden CSH-Phasen und das Kieselgel sind bereits Teil des unvergüteten Zementsteines und haben somit die gleichen physikalischen Eigenschaften wie dieser. Im Gegensatz zu den nicht reaktiven Beschichtungen (Kapitel 2.1) wird auch keine Schutzschicht aufgetragen sondern das Betongefüge an der

Oberfläche verändert. Dies führt dazu, dass es zu keiner Ablösung durch thermische oder mechanische Einwirkungen kommt.

Bei der Herstellung von Betonen, die gegen den Frostangriff mit und ohne Taumittel beständig sind (Umweltklasse XF2 bis XF4), werden künstliche Mikroluftporen in den Frischbeton eingebracht, um somit die Kapillaren zu unterbrechen und einen Expansionsraum für die Eisbildung zu schaffen. Durch den Einsatz von Wassergläsern könnten diese Mikroluftporen verschlossen oder deren Volumen reduziert werden und somit die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit und ohne Taumittel reduziert werden.

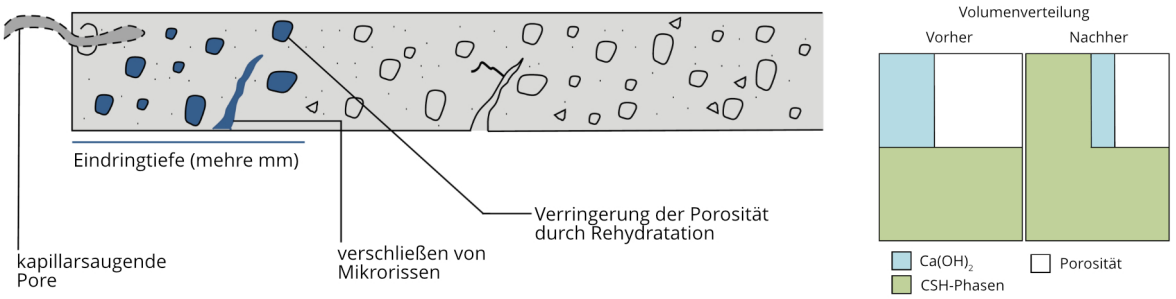


Abbildung 2.1: Einfluss der Wassergläser auf das Porensystem. Nach Park u. a. (2014)

2.3 Eingesetzte Oberflächenvergütungsmittel

Der Tabelle 2.1 können alle Oberflächenvergütungsmittel entnommen werden, die in diesem Forschungsvorhaben eingesetzt wurden. Für die Hauptuntersuchungen wurden die *Oberflächenvergütungsmittel 1* und *2* eingesetzt. Aufgrund von Erkenntnissen bei der Auswertung der ersten Versuche wurden zusätzlich die *Oberflächenvergütungsmittel 3* bis *5* in den Umfang der Hauptuntersuchungen aufgenommen.

Die *Oberflächenvergütungsmittel 6* bis *9* wurden nur im Rahmen der Vorstudie zu diesem Forschungsprojekt eingesetzt. Im Rahmen dieser Vorstudie wurden bereits Flächen an Bauwerken (siehe dazu Kapitel 3.1.6) appliziert.

Eingesetzte Oberflächenvergütungsmittel	
OVG 1	Lithiumhaltiges anorganisches Bindemittel auf Basis von Kaliumsilikat
OVG 2	Anorganisches Bindemittel auf Basis von Alkalisilikat
OVG 3	Imprägnierungsmittel auf Basis von reinen modifizierten Lithiumsilikaten
OVG 4	Hydrophobierung auf Basis von Alkyl-Alkoxysilan
OVG 5	Beschichtung auf Akrylat Basis
OVG 6	Silikathaltiges Bindemittel auf Basis von Lithiumsalzen
OVG 7	Anorganisches Bindemittel auf Basis von Kaliumsilikat
OVG 8	Hydrophobierung auf Basis von Triethoxyisobutylsilan
OVG 9	Hydrophobierung auf Basis von Alkyl-Alkoxysilan

Tabelle 2.1: Eingesetzte Oberflächenvergütungsmittel

3 Versuchsablauf und Vorbereitungsmaßnahmen

3.1 Work-Packages

Der Einsatz und die Funktionsfähigkeit der Oberflächenvergütungsmittel (OVG) hängen von unterschiedlichen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen zueinander ab. Um eine systematische Betrachtung zu gewährleisten, wurden die in der Tabelle 3.1 angeführten Work-Packages (WPs) definiert.

Ziel war es, die Einflüsse so gut wie möglich zu trennen, um die Wechselwirkungen auf ein Minimum zu reduzieren. Im Rahmen der Untersuchungen konnten allerdings nicht vorhersehbare Wechselwirkungen festgestellt werden, welche Änderungen im geplanten Versuchsprogramm notwendig machten.

Work-Package	Titel
WP 1	Projektmanagement
WP 2	Kommunikationsmaßnahmen
WP 3	Einfluss der Logistik, der Petrographie und der Umwelt
WP 4	Einfluss des Zementsteins
WP 5	Einfluss des Porensystem, des Bindemittelgehaltes und des W/B-Wertes
WP 6	Sonstige relevante Einflüsse
WP 7	Praxisversuche

Tabelle 3.1: Einteilung der Work-Packages

3.1.1 Work-Packages 1 und 2: Projektmanagement und Kommunikationsmaßnahmen

Die Work-Packages 1 und 2 beinhalten unterstützende Abläufe, welche eine geordnete Abwicklung und eine koordinierte Kommunikation nach innen und nach außen sicherstellen sollen.

Berichte von Seminaren und Tagungen, Protokolle von Besprechungen, Homepage- und Medienberichte sind im Kapitel 5 dargestellt.

3.1.2 Work-Package 3: Einfluss der Logistik, der Petrographie und der Umwelt

Im Work-Package 3 wurden von außen wirkende Einflüsse und der Einfluss der Gesteinskörnung auf die Funktionsfähigkeit der eingesetzten Oberflächenvergütungsmittel untersucht.

Folgende Einflussgrößen wurden dabei betrachtet:

- Schalungshaut
- Bauteilorientierung
- Vorbehandlung
- Umgebungstemperatur
- Applikationsart der Oberflächenvergütungsmittel
- Gesteinskörnung

Da der Einfluss des Bindemittels erst in einem späteren Work-Package untersucht wurde, wurde als Bindemittel bei allen Betonagen ein Normalzement der Familie CEM II/A-M(S-L) 42,5 N verwendet. Während

der Versuchsdurchführung an den Prüfkörpern der ersten Betonage wurde festgestellt, dass die eingesetzte Betonsorte keine ausreichende Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel besaß, weshalb diese Betonage mit einer geänderten Betonrezeptur wiederholt wurde (Details in Kapitel 4.1).

Für die Hauptuntersuchungen des Work-Package 3 wurden Versuchsplatten mit einer Größe von 80 cm × 60 cm × 10 cm im Labor in stehenden Schalungen hergestellt. Zum Verdichten konnte aufgrund der Masse der gefüllten Schalungen kein Rütteltisch eingesetzt werden, deshalb erfolgte die Verdichtung mit einem Flaschenrüttler verdichtet. Dabei wurde für jede untersuchte Einflussgröße und für jedes untersuchte Oberflächenvergütungsmittel eine eigene Versuchsplatte hergestellt. Die Prüfkörperanordnung innerhalb einer Versuchsplatte und die Abmessungen dieser können aus Abbildung 3.1 entnommen werden.

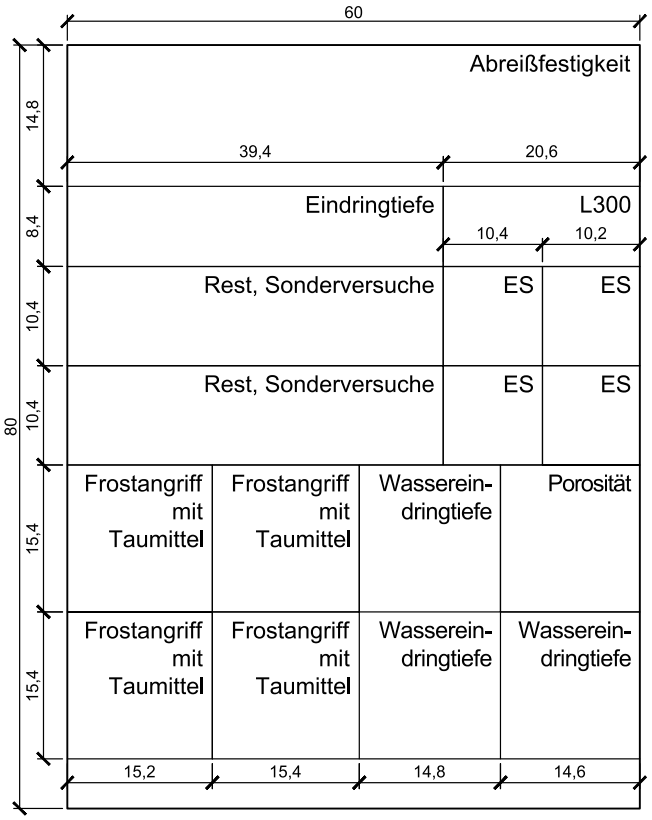


Abbildung 3.1: Prüfkörperanordnung innerhalb der Versuchsplatten. Alle Maße in cm.
ES… Lösender Angriff (Essigsäurelagerung)

Schalungshaut

Vor allem bei der Betonage von stehenden Bauteilen stellt sich an den Schalungsflächen ein erhöhter Wassergehalt (erhöhtes Wasser-Bindemittelverhältnis: W/B-Wert) ein. Der Wasserüberschuss führt zur Bildung einer höheren Anzahl an Kapillarporen an der Betonoberfläche und damit zu einer höheren Gesamtporosität, welche wiederum zu einer Beeinträchtigung der Qualität des Betongefüges führt. Saugende Schalungshäute können einen Teil dieses überschüssigen Wassers an der Schalungsfläche aufnehmen und somit zu einer Qualitätsverbesserung beitragen. Da die Herstellung und vor allem die Anwendung von saugenden Schalungshäute aus sägerauen Brettern mit einem zeitlichen und finanziellen Mehraufwand verbunden sind, werden teilweise auch Vliese, die eine ähnliche Wirkungsweise haben, eingesetzt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Einfluss von unterschiedlichen Schalungshäuten auf die Betonqualität an der Schalungsfläche und deren Einfluss auf die Wirkungsweise von Oberflächenvergü-

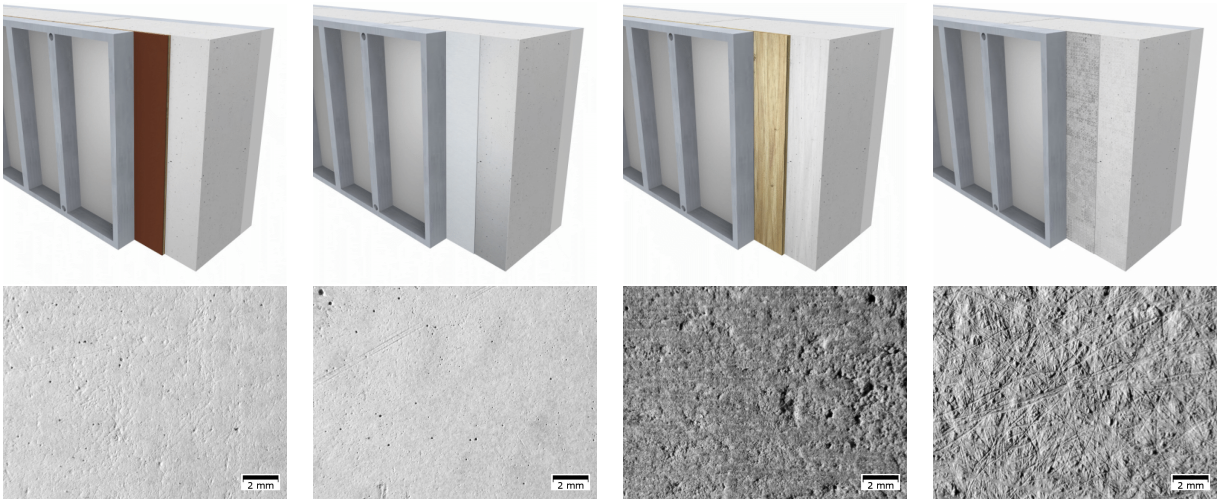
tungsmitteln untersucht.

Dabei kamen folgende Schalungshäute zum Einsatz:

- Betoplan (Film-Film-Platte)
- Stahl
- Multiplex-Platte, unbeschichtet (nachfolgend als Holz bezeichnet)
- Vlies

Anstelle von sägerauen Brettern wurden in ihrer Oberflächenstruktur homogene Multiplex-Platten verwendet, da sich die Inhomogenitäten von sägerauen Brettern, bezogen auf die relativ kleinen Prüfflächen, maßgeblich auf die Untersuchungsergebnisse auswirken können. Die Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau der Schalungen und die bei der ersten Betonage mit den jeweiligen Schalungshäute erzielten Oberflächenstrukturen.

Damit der Probekörperumfang nicht den umsetzbaren Aufwand übersteigt, wurde je untersuchtem Oberflächenvergütungsmittel und Schalungshaut eine Versuchsplatte hergestellt und wie in Abbildung 3.3(b) zu sehen appliziert. Für die restlichen Untersuchungen wurden alle Versuchsplatten mit der Betoplanschalungshaut hergestellt.



(a) Betoplan (b) Stahl (c) Holz (d) Vlies

Abbildung 3.2: Untersuchte Schalungshäute mit zugehöriger Oberflächenstruktur

Bauteilorientierung

Um den Einfluss der Bauteilorientierung auf das Eindringverhalten der Oberflächenvergütungsmittel bewerten zu können, erfolgte die Applikation der Versuchsplatten mit den Oberflächenvergütungsmitteln in horizontaler (Abbildung 3.3(a)) und vertikaler Lage (Abbildung 3.3(b)), wie auch über Kopf (Abbildung 3.3(c)). Wie in Abbildung 3.3 ersichtlich, wurde der Einfluss der Bauteilorientierung auch bei den weiteren untersuchten Einflussgrößen mit berücksichtigt.

Vorbehandlung

Für das Eindringen und die Wirksamkeit der Oberflächenvergütungsmittel ist die Verfügbarkeit von offenen Kapillarporen maßgeblich. Anhand einer intensiven Oberflächentrocknung bei 50 °C im Alter von vier Tagen (Abbildung 3.3(d) bis Abbildung 3.3(f)), wurde versucht, dem Porensystem die Feuchtigkeit zu entziehen, um dadurch die Aufnahme der Oberflächenvergütungsmittel zu verbessern. Des Weiteren wurde durch hochdruckreinigen mit ca. 200 bar die Betonoberfläche von Schalölrückständen befreit. Diese Maßnahmen wurden aber nur bei Versuchsplatten angewandt, bei der das Oberflächenvergütungsmittel horizontal appliziert wurde (Abbildung 3.3(g)).

Umgebungstemperatur

Da sich in den höheren Lagen des alpinen Raumes bereits in den Herbstmonaten Temperaturen unter dem Gefrierpunkt einstellen können und dadurch die rheologischen Eigenschaften der Oberflächenvergütungsmittel verändert werden, wurde auch das Verhalten der Oberflächenvergütungsmittel bei Umgebungs- und Betonoberflächentemperaturen von −5 °C untersucht (Abbildung 3.3(h) bis Abbildung 3.3(j)). Um die gewünschte Oberflächentemperatur zu erreichen, wurden die Versuchsplatten vor der Applikation für 24 h bei −5 °C gelagert. Die Applikation wurde auch bei dieser Temperatur durchgeführt und die Versuchsplatten anschließend für weitere 24 h bei einer Temperatur von −5 °C gelagert. Die Lagerung bis zum Beginn der Untersuchungen erfolgte bei 20 °C.

Applikationsart der Oberflächenvergütungsmittel

Die Applikation von Oberflächenvergütungsmitteln mittels Sprühen stellt arbeitstechnisch die effektivste Methode dar. Da allerdings ein positiver Effekt durch das Einwalzen nicht ausgeschlossen werden konnte, wurde auch dieser Einfluss untersucht (siehe Abbildung 3.3(k) bis Abbildung 3.3(m)).

Gesteinskörnung

Gesteinskörnungen können ein unterschiedliches Saugvermögen aufweisen, wodurch ein Einfluss auf die Aufnahme der Oberflächenvergütungsmittel und somit auf deren Wirksamkeit nicht ausgeschlossen werden kann. Daher wurden zwei typische Gesteinskörnungen aus dem Bundesland Tirol und der Region Südtirol näher betrachtet und in die Untersuchungen mit einbezogen.

- kalzitisch/dolomitische Gesteinskörnung (Tirol)
- silikatische Gesteinskörnung (Südtirol)

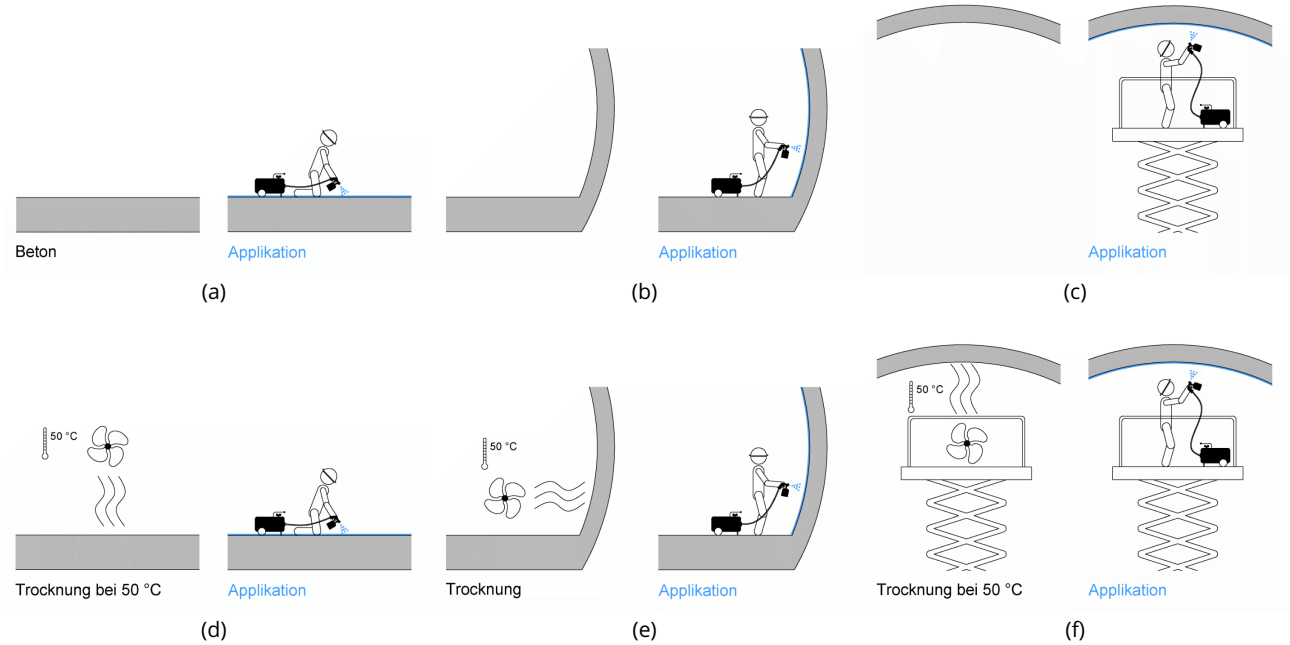


Abbildung 3.3: Piktogramme der untersuchten Bauteilorientierungen, Vorbehandlungen, Umgebungstemperaturen und Applikationsarten

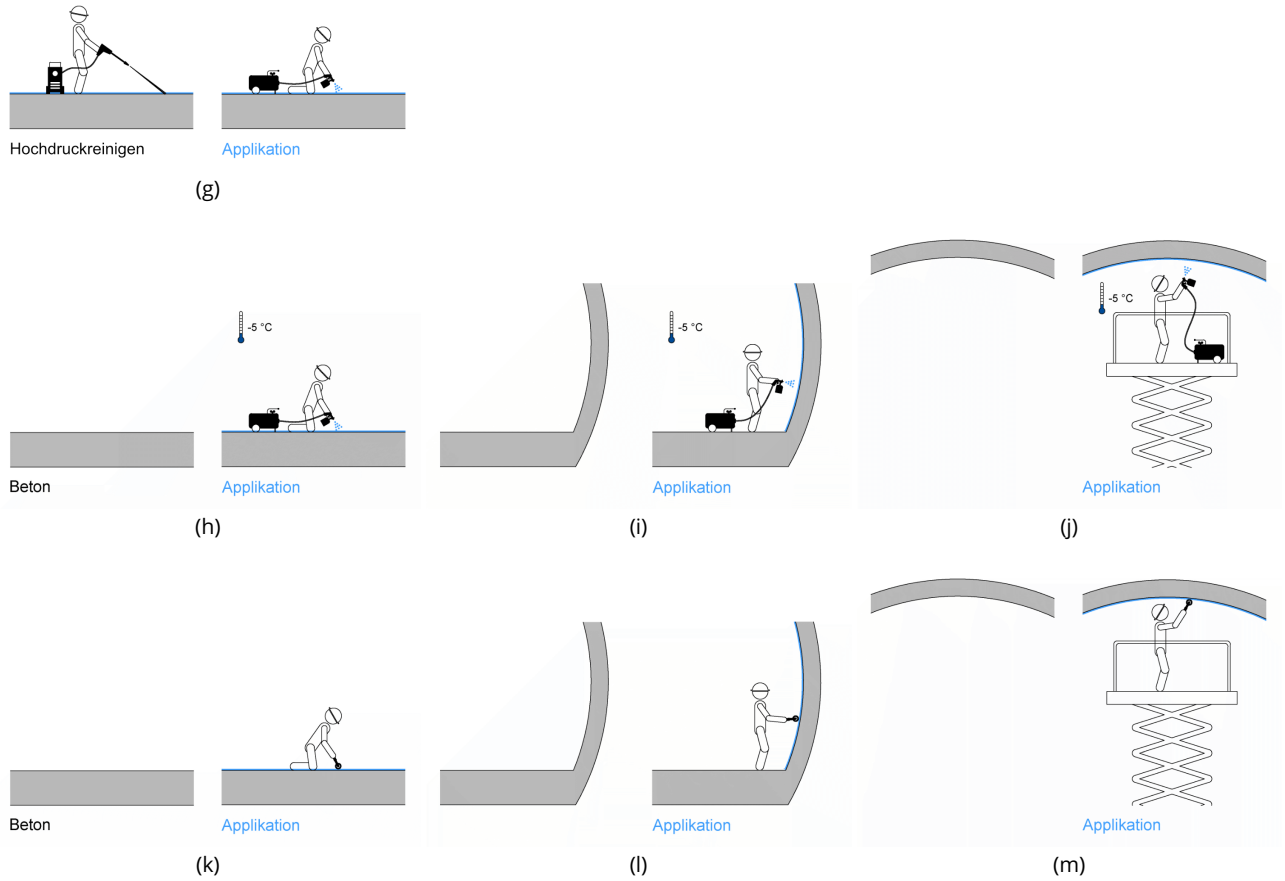


Abbildung 3.3: Piktogramme der untersuchten Bauteilorientierungen, Vorbehandlungen, Umgebungstemperaturen und Applikationsarten

3.1.3 Work-Package 4: Einfluss des Zementsteins

Da die Wassergläser wie in Kapitel 2.2 beschrieben mit dem freien Kalziumhydroxid ($Ca(OH)_2$) des Zementsteines reagieren, wurde davon ausgegangen, dass das verwendete Bindemittel einen großen Einfluss auf die Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel hat. Durch den Einsatz von Normalzementen mit Kalksteinmehl als Zumahlstoff (Kurzbezeichnung LL) wie er in der Region Südtirol vor allem Verwendung findet, wurde versucht den Gehalt an Kalziumhydroxid zu erhöhen.

Im Work-Package 4 wurde deshalb der Einfluss folgender Familien der Normalzemente untersucht:

- CEM II/A-M(S-L) 42,5 N (Standard Bindemittel in Tirol)
- CEM I 42,5 R C_3A-frei
- CEM II/A-LL 32,5 R (Standard Bindemittel in Südtirol)

Die im Work-Package 3 untersuchten Oberflächenvergütungsmittel zeigten bei den Untersuchungen nicht die gewünschte positive Wirkungsweise, deshalb wurden für im Work-Package 4 drei zusätzliche Oberflächenvergütungsmittel (OVG 3 bis 5) in die Untersuchungen mit einbezogen. Aufgrund von festgestellten Inhomogenitäten der im Labor hergestellten Versuchsplatten des Work-Package 3 (im Detail in Kapitel 4.1.4), wurden bei diesem Work-Package die Versuchsplatten in einer Größe von 100 cm $\times$ 140 cm $\times$ 10 cm in einem Fertigteilwerk hergestellt. Je untersuchter Zementfamilie wurden fünf dieser Versuchsplatten hergestellt. Eine davon wurde als Ersatz für die im Work-Package 3 betonierten

Versuchsplatten, für die Langzeitversuche des Work-Package 6 verwendet.

Youn (2010) untersuchte die Wirksamkeit von Wassergläsern zur Verbesserung des Verschleißwiderstandes bei Industrieböden. Allerdings konnte keine signifikante Verbesserung des Verschleißwiderstandes erkannt werden. Neben dem Verschleißwiderstand wurde nur die Kapillarewasseraufnahme mittels Karsten-Röhrchen untersucht. In Gesprächen mit Herstellern von Industrieböden wurde erwähnt, dass durch den Einsatz von Oberflächenvergütungsmitteln die Abreißfestigkeit erhöht werden kann. Da diese Wirkung im Rahmen der Untersuchungen des Work-Package 3 nicht klar zu erkennen war, wurde beschlossen, zwei der Versuchsplatten an der abgezogenen Betonoberfläche und zwei an der untenliegenden Schalungsfläche zu prüfen. Da auch Randbalken die Hauptbelastung an der abgezogenen Betonoberfläche erfahren, wurde beschlossen, auch die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel an der abgezogenen Betonoberfläche zu untersuchen.

Aus den Versuchsplatten wurden im Anschluss die für die Untersuchungen benötigten Prüfkörper entnommen. Wie in Abbildung 3.4 zu sehen, wurde auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der einzelnen Prüfkörper über die gesamte Versuchsplatte geachtet. Die Prüfkörper wurden vor der Applikation mittels Hochdruckreiniger mit ca. 200 bar von möglichen Schalölrückständen und sonstigen Verunreinigungen befreit. Die Oberflächenvergütungsmittel wurden im Alter von 21 Tagen bei 20 °C appliziert.

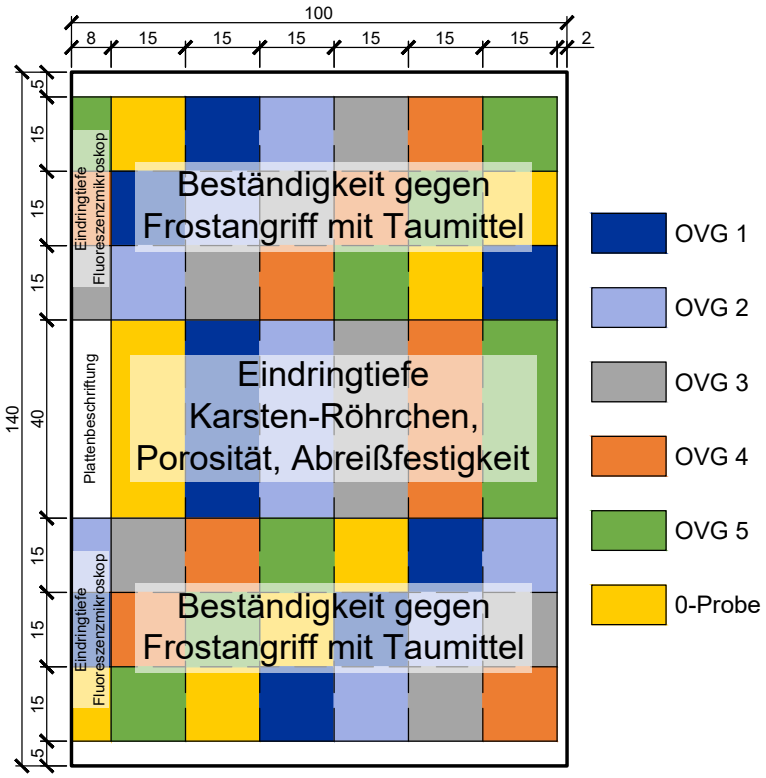


Abbildung 3.4: Prüfkörperanordnung innerhalb der Versuchsplatten. Alle Maße in cm. Die Farben zur Unterscheidung der Oberflächenvergütungsmittel werden auch bei der Auswertung der Untersuchungen in Kapitel 4 verwendet.

Aufgrund der gewonnen Erkenntnisse aus dem Work-Package 3 wurde nur mehr die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel, die Gesamtporosität und die Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel untersucht. Um den Einfluss von Homogenitätschwankungen auf das Untersuchungsergebnis zu reduzieren, wurde die Anzahl der Prüfkörper je Untersuchungsserie und somit die Anzahl der Einzelergebnisse erhöht. Ziel war es, die unvermeidbaren Spitzenwerte besser erkennen und somit aus der Untersuchung ausschließen zu können.

3.1.4 Work-Package 5: Einfluss des Porensystem, des Bindemittelgehaltes und des W/B-Wertes

Das Einbringen von künstlichen Mikroluftporen erhöht einerseits die Beständigkeit des Betons gegen den Frostangriff mit Taumitteln, führt andererseits aber zu einer Unterbrechung der Kapillaren und folglich zu einer Verminderung der Saugfähigkeit. Aufgrund der verminderten Saugfähigkeit wird angenommen, dass die Oberflächenvergütungsmittel eine geringere Eindringtiefe aufweisen. Weiters kann, wie in Kapitel 2.2 erwähnt, nicht ausgeschlossen werden, dass die Mikroluftporen durch die Oberflächenvergütungsmittel verschlossen werden oder ihr Volumen verringert wird, was sich wiederum negativ auf die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumitteln auswirkt.

Die für das Eindringen den Oberflächenvergütungsmittel entscheidenden Kapillarporen entstehen durch das Überschusswasser bei der Hydratation des Bindemittelleimes. Deshalb wurde angenommen, dass auch der W/B-Wert einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel hat. Ziel dieses Work-Packages war es deshalb, den Einfluss des Porensystems, des Bindemittelgehaltes und des W/B-Wertes auf die Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel zu untersuchen.

Da im Work-Package 3 die Untersuchungen zum Einfluss der Applikation durch Sprühen und Walzen der Oberflächenvergütungsmittel sowie zum Einfluss der Gesteinskörnung aufgrund der Streuung der Messergebnisse keine klaren Aussagen brachten, erfolgte eine Wiederholung dieser Untersuchungen in diesem Work-Package.

Die günstigste Wirkung im Work-Package 4 zeigten die Oberflächenvergütungsmittel an einem Beton, der mit Normalzement der Familie CEM II/A-LL 32,5 R hergestellt wurde. Dieser wurde auch für die Herstellung aller weiteren Prüfkörper eingesetzt.

Um eine möglichst homogene Verdichtung des Betons zu erreichen, wurden Balken mit den Abmessungen 15 cm $\times$ 10 cm $\times$ 60 cm hergestellt und diese auf einem Rütteltisch verdichtet. Im Anschluss wurden die Prüfkörper aus den Balken gewonnen, gereinigt und im Alter von 21 Tagen die Oberflächenvergütungsmittel appliziert.

Auf den Einsatz der nicht reaktiven organischen Beschichtungen, *Oberflächenvergütungsmittel 4* und *5*, wurde verzichtet. Aufgrund der Erkenntnisse des Work-Package 4 wurden wiederum, wie im Work-Package 3, die *Oberflächenvergütungsmittel 1* und *2* eingesetzt, da diese im Mittel die günstigste Wirkung der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel zeigten.

3.1.5 Work-Package 6: Sonstige relevante Einflüsse

Die Untersuchungen des Work-Package 6, in deren Umfang die Ergebnisse der Work-Packages 3 bis 5 einflossen, wurden in folgende Gruppen unterteilt:

Umweltbedingungen und Nachbehandlung

Durch Trenn- und Nachbehandlungsmittel kann das Porensystem an der Betonoberfläche verschlossen werden, wodurch das Eindringverhalten der Oberflächenvergütungsmittel negativ beeinflusst wird. Weiters kann eine frühzeitige Applikation der Oberflächenvergütungsmittel eine ähnliche Wirkungen wie ein Nachbehandlungsmittel zeigen und durch eine Verminderung des Wasserentzugs und somit des Schwindens zu einer Verbesserung des Betongefüges führen.

Wie bereits im Work-Package 5 wurden wiederum Balken mit den Abmessungen 15 cm $\times$ 10 cm $\times$ 60 cm herstellt. Zur Untersuchung des Einflusses der Trenn- und Nachbehandlungsmittel, wurde bei jeweils einer Serie dieser Balken auf eine Reinigung vor der Applikation verzichtet. Um die Einsatzmöglichkeit der Oberflächenvergütungsmittel auch als Nachbehandlungsmittel zu untersuchen, wurden Balken unmittelbar nach dem Ausschalen appliziert.

Weiters wurde auch die Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel bei niederen Umgebungstemperaturen untersucht. Deshalb wurden zusätzlich Balken bei 5 °C hergestellt, wobei eine Serie dieser Balken unmittelbar nach dem Ausschalen mit den Oberflächenvergütungsmitteln appliziert wurde, die zweite Serie erst nach sieben Tagen. Alle Balken dieses Untersuchungsabschnittes wurden bis zu einem Alter von sieben Tagen nach der Herstellung bei 5 °C gelagert.

Da die Untersuchungen zum Einfluss der Applikationstemperatur im Rahmen des Work-Package 3 keine klaren Aussagen brachten, wurden diese Versuche wiederholt. Da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass die Oberflächenvergütungsmittel erst nach dem Auftauen in die Oberfläche eindrangen, wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurde versucht, die gefrorenen und noch nicht eingedrungenen Oberflächenvergütungsmittel mit Sprühwasser abzuwaschen, indem die applizierten Flächen nach der Lagerung bei −5 °C während des Auftauens mit Wasser besprüht wurden.

Dauerhaftigkeit und nachträgliche Applikation

Die für diese Untersuchung benötigten Versuchsplatten wurden bereits im Rahmen des Work-Package 4 hergestellt und im Anschluss in folgende drei Teilplatten aufgeteilt:

- Aus der ersten Teilplatte mit einer Größe von 100 cm × 60 cm × 10 cm wurden Prüfkörper zu Bewertung der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumitteln entnommen, welche gereinigt und im Alter von 21 Tagen mit den restlichen Prüfkörpern des Work-Package 4 appliziert wurden. Deshalb wurden auch alle im Work-Package 4 untersuchten Oberflächenvergütungsmittel appliziert. Im Anschluss wurden diese Prüfkörper monatlich mit einem Hochdruckreiniger mit ca. 200 bar gereinigt.
- Die zweite Teilplatte mit einer Größe von 75 cm × 50 cm × 10 cm wurde nur einer Karbonatisierung durch Luft-CO_2 unterzogen.
- Die dritte Teilplatte mit einer Größe von 75 cm × 50 cm × 10 cm wurde an der Prüffläche je eine Woche einer Lagerung in einer gesättigten NaCl-Lösung und eine Woche einer Luftlagerung unterzogen. Dieser Zyklus wurde über ein Jahr beibehalten.

Nach einem Jahr wurden aus der zweiten und dritten Teilplatte Prüfkörper geschnitten und mit den *Oberflächenvergütungsmitteln 1* und *2* appliziert. Im Anschluss wurden bei allen Prüfkörper aus den drei Teilplatten die Untersuchungen zur Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel durchgeführt.

Brandversuche

Durch die Erwärmung des Betons im Brandfall verändern sich aufgrund von chemisch-mineralogischen und physikalischen Vorgängen die Betonstruktur und die technischen Eigenschaften. Neben der thermischen Dehnung des Betons und der chemischen Umwandlung von Gesteinen kann auch ein Schwinden des Zementsteines festgestellt werden. Aufgrund dieser Veränderungen kommt es zu einem Festigkeitsverlust und zu Abplatzungen an der Oberfläche. Über die Branddauer kann dadurch der Querschnitt entscheiden geschwächt bzw. die Bewehrung frei gelegt werden, wodurch die Tragfähigkeit der Bauteile eingeschränkt wird.

Abbildung 3.5: Rendering des Brandstandes im Planungsstadium

Bei Temperaturen bis 100 °C verdampft im Beton das freie und physikalisch gebundene Wasser. Bei höheren Temperaturen wird auch chemisch gebundenes Wasser aus dem Zementstein ausgetrieben. Aufgrund der Wirkungsweise der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel kommt es zu einer Verringerung der Porosität des Betons (siehe dazu Kapitel 2.2). Durch die verringerte Porosität wird die Permeabilität eingeschränkt, wodurch sich im Beton ein Dampfdruck aufbauen kann.

Um zu untersuchen, ob durch die geringere Permeabilität die Abplatzungen zunehmen oder diese durch die Gefügeverbesserung verringert werden, wurden Brandversuche durchgeführt. Da in der Region

kein geeigneter Versuchsstand vorhanden ist, wurde ein Versuchsstand konzipiert (siehe Abbildung 3.5) und gebaut.

Neben Schwierigkeiten, geeignete Partner für die Umsetzung zu finden, war es zu Beginn auch nicht einfach, die richtigen Ansprechpartner auf Behördenseite zu finden, um das Konzept in einen genehmigungsfähigen Zustand zu bringen, wodurch sich die Konzeptphase über mehrere Monate hinzog. Aufgrund der Nähe zu den Nachbargrundstücken musste am geplanten Betriebsort auch eine Brandschutzmauer errichtet werden.

3.1.6 Work-Package 7: Praxisversuche an Bauwerken

Im Zuge von Infrastrukturneubauten bzw. -instandsetzungen wurden im Bundesland Tirol und der Region Südtirol Bauteile mit unterschiedlichen Oberflächenvergütungsmitteln behandelt, um die Wirkung im Praxiseinsatz bewerten zu können. Dabei wurden vor allem stark beanspruchte Bauteile wie Randbalken und Tunnelportale in den Untersuchungsumfang mit einbezogen. Teilweise wurden diese Bauteile schon im Rahmen der Tastversuche appliziert, weshalb einige Oberflächenvergütungsmittel nur in diesem Work-Package zum Einsatz kommen.

A12 Galerie Senftenberg

In den Monaten Juni bis September 2016 wurde die Galerie Senftenberg an der A 12 Innntalautobahn zwischen der Anschlussstelle Mils und der Halbanschlussstelle Schönwies in Fahrtrichtung Innsbruck instandgesetzt. Dabei wurde über die gesamte Länge eine Innenschale eingebaut.

Die erste Applikation in der Nähe des östlichen Portals erfolgte am 20.07.2015. Im Bereich des westlichen Portales erfolgte die Applikation am 21.09.2015. Bei beiden Applikation wurden je sechs Oberflächenvergütungsmittel appliziert und ein zusätzlicher Block als *0-Probe* ausgewählt. Die restliche Röhre wurde mit einem herkömmlichen Tunnelanstrich versehen.

Aufgrund der höheren Belastung wurden die weiteren Untersuchungen auf die Versuchsflächen im Bereich des westlichen Portales, es handelt sich dabei um das Einfahrtsportal der Richtungsfahrbahn Innsbruck, beschränkt. Um das Bauwerk möglichst wenig zu schädigen, beschränkten sich die weiteren Untersuchungen auf die Bestimmung des Chloridgehaltes in zwei Tiefenstufen bis 4 cm Tiefe. Die Probennahme dazu wurden am 09.07.2019 durchgeführt.

A12 Anschlussstelle Kufstein Süd

Die Zubringerbrücke von der B173 Eiberg Straße zur Anschlussstelle Kufstein-Süd der A12 Inntalautobahn wurde im Jahr 2015 instandgesetzt. Die Betonage des Randbalkens im Versuchsbereich erfolgte 15.07.2015. Davon wurden vier Blöcke an der Nordseite der Brücke am 22.07.2015 je zur Hälfte mit einem Oberflächenvergütungsmittel appliziert, der Rest dieser Blöcke dient als *0-Probe*.

Wie in der Galerie Senftenberg wurden am 09.07.2019 Proben zur Bestimmung des Chloridgehaltes entnommen.

S16 Sannabrücke

Durch den Bau der zweiten Röhre des Perjentunnels war es notwendig, im Bereich der Anschlussstelle Landeck-West eine neue Brücke über die Sanna zu errichten. Die Versuchsflächen für die vier Oberflächenvergütungsmittel und die *0-Probe* befinden sich am süd-östlichen Randbalken (rechter Fahrbahnrand) und wurden am 08.11.2015 appliziert.

Da die Verkehrsfreigabe für die 2. Tunnelröhre und damit auch für die Sannabrücke erst am 17.12.2018 erfolgte, war der Randbalken für eine Untersuchung zu geringen Belastungen ausgesetzt.

A13 Europabrücke

Im Zuge der Instandsetzung der Begleitbrücke BB14b zwischen der Raststation Schönberg und der Europabrücke wurde auch der Randbalken der darüber liegenden Richtungsfahrbahn Innsbruck der A13 Brennerautobahn erneuert. Der Randbalken wurde am 26.08.2015 betoniert und die vier Versuchsbereiche am 03.11.2015 appliziert.

Wie in der Galerie Senftenberg wurden am 09.07.2019 Proben zur Bestimmung des Chloridgehaltes entnommen. Aufgrund der Baustellensituation auf der Europabrücke konnte die Probenahme nur auf der Oberseite des Randbalken erfolgen.

B180 Niklasgalerie

Im Jahr 2015 wurde im Bereich der Festung Nauders die Niklasgalerie errichtet. Am 21.04.2016 wurden vier der 18 Blöcke mit Oberflächenvergütungsmitteln appliziert.

L13 Tafelweggalerie

Aufgrund eines Hangrutsches im Jahr 2015 der die L13 Sellraintalstraße für mehrere Wochen unpassierbar machte, wurde zur Sicherung dieses Straßenabschnittes beschlossen, eine Murenschutzgalerie in den Monaten Juni und Juli 2016 zu errichten. Die Versuchsflächen für die zwei Oberflächenvergütungsmittel befinden sich im Bereich des östlichen Portals und wurden am 20.06.2017 appliziert.

L36 Loipenüberführung Seefeld

In den Monaten September und Oktober 2016 wurde eine Loipenüberführung über die L36 Möserer Landesstraße im Bereich des WM-Stadions errichtet. Die Versuchsflächen für die zwei Oberflächenvergütungsmittel befinden sich an der Nördlichen Ulmen im Bereich des Portals auf Seefelder Seite und wurden am ebenfalls am 20.06.2017 appliziert.

LS114 Pfelders

Im Jahr 2017 wurde das Bankett im Bereich des Straßenkilometer 8,0 der SP/LS114 zwischen Moos in Passeier und Pfelders instandgesetzt. Es wurden zwei Bereiche am 03.07.2017 mit Oberflächenvergütungsmittel appliziert und dazwischen ein Referenzbereich als *0-Probe* eingeteilt.

SS44 Jaufenpass Kehre 10

Das Bankett wurde im Bereich der Kehre 10 der SS44 Jaufenpass im Jahr 2015 instandgesetzt. Der Randbalken wurde am 07.07.2015 ausgeschalt und gereinigt. Die Applikation der vier Oberflächenvergütungsmittel erfolgte am 15.07.2016.

SS238 Gampenpassstraße KM 10

Im Bereich des Straßenkilometers 10,0 der SS238 wurde am 24.10.2017 ein neues Bankett betoniert. Am 30.10.2017 wurden an zwei Bereichen Oberflächenvergütungsmittel appliziert und dazwischen eine *0-Probe* frei gelassen. Am 04.04.2018 wurde dieser Bereich optisch bewertet.

SS238 Gampenpassstraße KM 16

Im Zuge der Vorstudie wurde bereits am 22.09.2015 im Bereich des Straßenkilometers 16,0 ein Bankettbereich mit vier Oberflächenvergütungsmittel appliziert.

3.2 Relevante Prüfmethoden

Betonprüfungen	Regelwerk
Bestimmung der Konsistenz	EN 12350-5
Bestimmung der Frischbetondichte	EN 12350-6
Luftgehalt des Frischbetons	EN 12350-7
Bestimmung des Gesamtwassergehalts im Frischbeton	ONR 23303
Bestimmung von Luftporen-Kennwerten im Festbeton	EN 480-11
Bestimmung der Wassereindringtiefe unter Druck	EN 12390-8
Bestimmung der Beständigkeit gegen lösenden Angriff	ÖNORM B 3303 (1983)
Bestimmung der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel	in Anlehnung an ONR 23303
Bestimmung der Gesamtporosität	in Anlehnung an ÖNORM B 3122
Bestimmung der Abreißfestigkeit	EN 1542
Brandbeständigkeit	öbv Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrs-bauwerke aus Beton“
Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes	EN 13295
Bestimmung des Chloridgehaltes	ÖNORM EN 14629
Bestimmung der Eindringtiefe der Oberflächenvergü-tungsmittel	Siehe Kapitel 3.2.1.6

Tabelle 3.2: Liste der Prüfmethoden

3.2.1 Von der Norm abweichende Prüfmethoden

3.2.1.1 Bestimmung der Wassereindringtiefe unter Druck

Die Druckstufe der Wasserbeaufschlagung erfolgte gemäß EN 12390-8 (drei Tage bei 5 bar mit einem Beaufschlagungsdurchmesser von 75 mm). Bei der Auswertung zeigten sich allerdings große Schwankungen in der maximalen Wassereindringtiefe. Deshalb wurde für die Auswertung der Mittelwert (Seitenlänge des flächengleichen Rechteckes unter der Prüffläche mit ⌀ 100 mm) nach ONR 23303 herangezogen.

3.2.1.2 Bestimmung der Frostbeständigkeit mit Taumittel

Abweichend zur Norm wurde nicht die Schnittfläche von (50 ± 2) mm dicken Prüfkörpern, sondern die Schal- bzw. Betonoberfläche von ca. 100 mm dicken Prüfkörpern beprobt.

3.2.1.3 Bestimmung der Gesamtporosität

Diese Prüfmethode ist für die Bestimmung der Porosität von Gestein definiert, ist allerdings auch zur Bestimmung der Gesamtporosität von Betonproben geeignet.

Im Rahmen des Work-Package 3 zeigte sich, dass der Einfluss sowohl der Oberflächenvergütungsmittel als auch der Schalungshäute in einer Tiefe >2 cm nicht mehr feststellbar war. Deshalb wurden nur die Ergebnisse an der Oberfläche in die Auswertung miteinbezogen.

Wie in Kapitel 4.1.2 gezeigt wird, konnte bei der Auswertung des Work-Package 3 keine klare Korrelation der Gesamtporosität und der Eindringtiefe erkannt werden. Deshalb wurden die Prüfkörper des Work-Package 4 direkt unter den Prüfflächen der Karsten-Röhrchen (siehe Kapitel 3.2.1.6) entnommen.

3.2.1.4 Brandbeständigkeit

Die Versuche werden in Anlehnung an die öbv Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“ durchgeführt, wobei auf die Einbringung von Kunststoffmikrofasern verzichtet wurde, um nur die Veränderungen aufgrund der Oberflächenvergütungsmittel zu untersuchen. Die Befürchtung war, dass eine mögliche inhomogene Verteilung der Kunststoffmikrofasern die Beständigkeit deutlich stärker beeinflusst und die Effekte der Oberflächenvergütungsmittel daneben verschwinden.

Wie sich bei den Einstellversuchen des Brandstandes zeigte, ist die Beständigkeit ohne Kunststoffmikrofasern nicht gegeben, deshalb wurden die Versuche auch mit reduzierter Brennerleistung und somit geringeren Brandraumtemperaturen durchgeführt. Zusätzlich wurden die Versuche 5 min nach den ersten hörbaren Abplatzungen beendet, da zu diesem Zeitpunkt die Abplatzungen bereits unter die vergütete Schicht reichten.

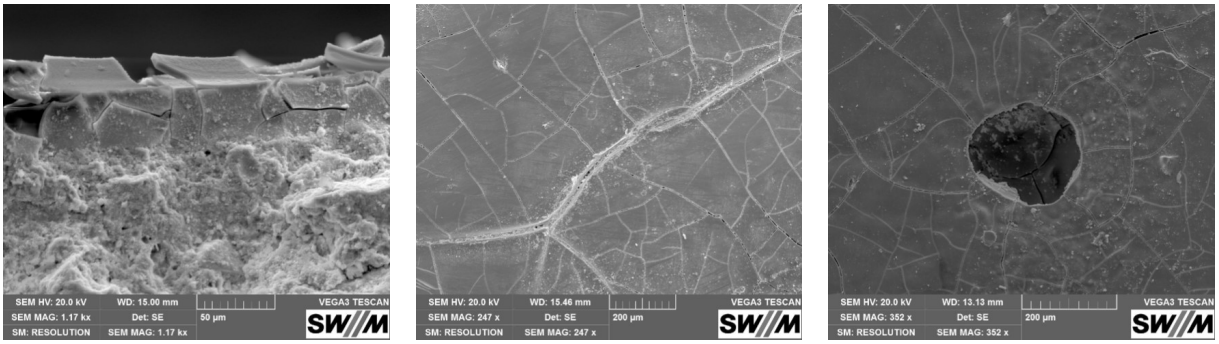
3.2.1.5 Bestimmung des Chloridgehaltes

Abweichend zu dem Aufschluss mit Salpertersäure und der anschließenden potentiometrische Titration wurden die Chloride mittels entionisiertem Wasser extrahiert und der Chloridgehalt photometrisch bestimmt. Dies führt dazu, dass die Chloridgehalte im Allgemeinen unterschätzt werden, allerdings ist die Auswertung für vergleichenden Versuche zwischen *0-Proben* und den einzelnen Oberflächenvergütungsmittel ausreichend genau.

3.2.1.6 Bestimmung der Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel

Um einen tieferen Einblick über die Funktionsfähigkeit der verwendeten Oberflächenvergütungsmittel zu erhalten, ist es von großer Bedeutung, Erkenntnisse über das Eindringverhalten in den Beton zu gewinnen.

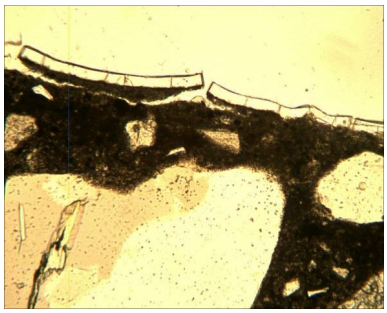
Im ersten Schritt wurde versucht, den Oberflächenvergütungsmitteln verschiedene Mengen an Natriumwolframat beizufügen, um die Wiederfindung im Beton zu verbessern. Die zugegebenen Konzentrationen waren jedoch zu niedrig angesetzt, um eine Aussage über das Eindringverhalten mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) (siehe Abbildung 3.6) zu erhalten. Eine Erhöhung der Natriumwolframatkonzentration konnte aufgrund der zunehmenden Viskosität nicht vorgenommen werden.



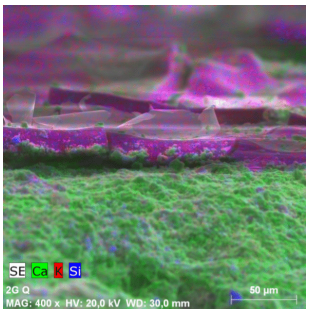
(a) (b) (c)

Abbildung 3.6: REM Aufnahmen der Oberflächenqualität der Oberflächenvergütungsmittel

Daher wurden in einem weiteren Schritt Dünnschliffe hergestellt und diese mit einer Kombination aus optischer Polarisations- und Durchlichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Anhand der Durchlichtmikroskopie konnte eine Vergütungsschicht an der Betonoberfläche visualisiert werden, wie in Abbildung 3.7(a) zu erkennen ist. Elementverteilungsanalysen ließen auf eine Anreicherung von Komponenten der Oberflächenvergütungsmittel am Rand der Betonmatrix schließen. Die in Abbildung 3.7(b) stark ausgeprägte Reliefunterschiede ermöglichten jedoch keine präzise Analyse.



(a) Durchlichtmikroskopische Aufnahme mit 10-facher Vergrößerung

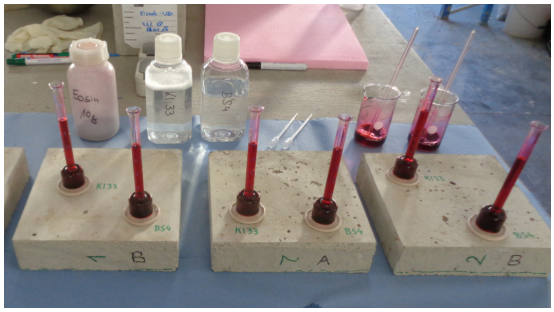


(b) Elementanalyse der Betonoberfläche mittels REM

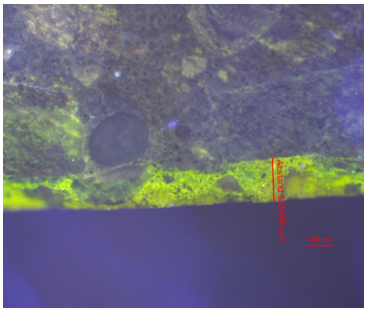
Abbildung 3.7: Oberflächenanalysen der Oberflächenvergütungsmittel

Da die vorangegangenen Untersuchungen zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen geführt haben, wurde begonnen, nach einer neuen Herangehensweise zu suchen. Man entschied, die Oberflächenvergütungsmittel mit einem fluoreszierenden Farbstoff zu versetzten, um die Eindringtiefe über Auflichtmikroskopie zu quantifizieren. Bei dem fluoreszierenden Farbstoff handelt es sich um „Eosin Y" (Tetrabromfluoresceindinatriumsalz). Er stammt aus der Gruppe der Xanthenfarbstoffe, ist gut wasserlöslich und reagiert schwach alkalisch. Darüber hinaus zeigt die Lösung eine grüne Fluoreszenz, welche besonders vor dunklem Hintergrund sichtbar wird. Zur Bestimmung der Eindringtiefe soll dieser Farbstoff als Indikator dienen.

Zur ersten Bestimmung der Aufnahmefähigkeit der Oberflächenvergütungsmittel wurden Karsten-Röhrchen eingesetzt (Abbildung 3.8(a)). Die benötigte Menge an Eosin von 3 g/L wurde im Rahmen von Tastversuchen eruiert. Die mit Eosin eingefärbten Oberflächenvergütungsmittel wurde auf die Betonoberfläche appliziert und getrocknet. Da durch das Schneiden der Prüfkörper eine Verschleppung der Oberflächenvergütungsmittel nicht auszuschließen ist, wurden die Prüfkörper zerbrochen und die Bruchflächen analysiert. Mit Hilfe der Auflichtmikroskopie konnte eine Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel von 1 mm bis 2 mm nachgewiesen werden. Ein stark fluoreszierender Bereich kennzeichnet die Grenze der eingedrungenen Oberflächenvergütungsmittel (Abbildung 3.8(b)).



(a) Karsten-Röhrchen Versuch



(b) Floureszenzmirkoskopie

Abbildung 3.8: Bestimmung der Eindringtiefen

Diese Art der Bestimmung der Eindringtiefe ermöglicht eine aussagekräftige Analyse. Aus diesem Grund wurde beschlossen, diese Analysemethode bei den anstehenden Versuchsreihen anzuwenden.

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1 Work-Package 3

Im Rahmen des Work-Package (WP) 3 wurden im Gegensatz zur Planung drei Hauptbetonagen durchgeführt. Wie in der Auswertung der Versuche in den folgenden Kapiteln zu erkennen ist, war eine klare Aussage, im Rahmen des geplanten Untersuchungsprogrammes, aufgrund unterschiedlicher unvorhergesehener Nebeneinflüsse nicht möglich, was zusätzliche Untersuchungen erforderlich machte.

In der folgenden Auswertung werden die drei Hauptbetonagen des Work-Package 3 zusammenfasst.

Der Herstellungsablauf der Versuchsplatten bis zum Schneiden der Prüfkörper ist beispielhaft in Abbildung 4.1 zu erkennen.

(a) Reinigen der Schalungen (b) Betonage der Versuchsplatten (c) Reinigen mit Hochdruckreiniger

(d) Applikation durch sprühen (e) Applikation durch walzen (f) Schneiden

Abbildung 4.1: Eindrücke zur ersten Betonage

4.1.1 Verwendete Betonsorten und deren Eigenschaften

4.1.1.1 Erste Betonage

Im Rahmen der ersten Betonage wurde ein Frost-Taumittelbeständiger Beton ausgewählt, der wesentliche normativen Anforderungskriterien der ÖNORM B 4710-1 nicht erfüllt. Ziel war es, durch den Einsatz von Oberflächenvergütungsmitteln, dennoch eine ausreichende Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumitteln zu erreichen.

Folgende Abweichungen von den Anforderungskriterien wurden dabei festgelegt:

- Erhöhter Wassergehalt (normatives Anforderungskriterium W/B-Wert $\leq$ 0,45)
- Zu geringer Luftporengehalt im Frischbeton (normatives Anforderungskriterium $\geq$ 4 %)
- Zu geringer Luftporengehalt im Festbeton (normatives Anforderungskriterium L300 $\geq$ 1,8 % und AF $\leq$ $\leq$0,18 mm)

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde eine kalzitische/dolomitsche Gesteinskörnung verwendet. Die Applikation erfolgte sieben Tagen nach der Betonage. In Tabelle 4.1 sind die Betonrezeptur sowie die Frisch- und Festbetonparameter angeführt.

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Kalzit/Dolomit	
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	389 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt*	W/B = 0,48	187 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,70 % v.B.
	Lufporenbildner	0,02 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Ausbreitmaß nach 90 min	38 cm	
Luftporen im Frischbeton*	2,7 %	
Luftporen im Festbeton*	L300 = 0,25 %, AF = 0,58 mm	
Druckfestigkeit nach 28 d	55,5 MPa	

* normative Anforderungen nicht erfüllt

Tabelle 4.1: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten der ersten Betonage Work-Package 3

4.1.1.2 Zweite Betonage

Da der Beton der ersten Betonage, auch mit Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel, an der Schalungsfläche keine ausreichende Beständigkeit gegen der Frostangriff mit Taumittel zeigte, wurden die Versuche an einem höherwertigen Beton wiederholt. Diesmal wurden die Anforderungen der ÖNORM B 4710-1 für einem Beton der Umweltklasse XF4 eingehalten. Es wurde wiederum eine kalzitische/dolomitsche Gesteinskörnung verwendet und die Oberflächenvergütungsmittel ebenfalls nach sieben Tagen appliziert. Die verwendete Betonrezeptur sowie die Frisch- und Festbetonparameter können Tabelle 4.2 entnommen werden.

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Kalzit/Dolomit	
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	421 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,44	185 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,65 % v.B.
	Lufporenbildner	0,16 % v.B.
	Verzögerer	0,39 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Ausbreitmaß nach 90 min	43 cm	
Luftporen im Frischbeton	6,5 %	
Luftporen im Festbeton	L300 = 2,21 %, AF = 0,07 mm	
Druckfestigkeit nach 28 d	43,0 MPa	

Tabelle 4.2: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten der zweiten Betonage Work-Package 3

4.1.1.3 Dritte Betonage

Bei der dritten Betonage kam im Gegensatz zu den ersten beiden Betonagen eine silikatische Gesteinskörnung zum Einsatz. Damit die Vergleichbarkeit zwischen den Betonagen gegeben war, wurde bei der dritten Betonage die identischen Frischbetonparameter wie bei der zweiten Betonage angestrebt. Da die erste Betongage wiederholt werden musste und nach der zweiten Betonage bereits zu erkennen war, dass zusätzliche Untersuchungen notwendig sind, wurden neben den Versuchsplatten, noch Balken für Zusatzuntersuchungen hergestellt. Der Einfluss der Schalungshäute war bereits bei den ersten beiden Betonagen eindeutig erkennbar und bewertbar, deshalb wurden im Rahmen der dritten Betonage alle Versuchsplatte nur mehr mit der Betonplanschalungshaut hergestellt.

Wie in Tabelle 4.3 zu erkennen ist, konnte trotz eines Luftgehaltes im Frischbeton von 6,5 % (Luftgehalt wie bei der zweiten Betonage), die normative Anforderung an den L300-Wert von mindestens 1,8 % nicht eingehalten werden. Auch der Abstandsfaktor ist in Relation zu der zweiten Betonage erhöht, liegt aber unterhalb des Grenzwertes von 0,18 mm.

Rezeptur		
Gesteinskörnung		Silikat
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	424 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,44	187 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	1,00 % v.B.
	Lufporenbildner	0,20 % v.B.
	Verzögerer	manuelle Zugabe: 0,40 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Ausbreitmaß nach 90 min		42 cm
Luftporen im Frischbeton		6,5 %
Luftporen im Festbeton		L300 = 1,27 %, AF = 0,15 mm
Druckfestigkeit nach 28 d		47,8 MPa

Tabelle 4.3: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten der dritten Betonage Work-Package 3

Ursachenvermutung des zu geringen Luftporengehaltes im Festbeton

Durch den hohen Fließmitteleinsatz kann es, infolge einer sich einstellenden Klebrigkeit des Betons, zu einer mangelnden Entlüftung des Betons und somit zu einem festgestellten höheren Luftgehalt (inkl. nicht entwichener Grobluftporen) im Frischbeton kommen. Im Festbeton konnte nur ein geringerer Gehalt an Feinluftporen nachgewiesen werden, obwohl im Frischbeton der dritten Betonage der selbe Luftgehalt wie im Frischbeton der zweiten Betonage gemessen wurde.

4.1.2 Auswertung der Hauptversuche

In diesem Kapitel werden neben der generellen Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel (OVG), auch mögliche Einflüsse auf die Wirksamkeit untersucht.

4.1.2.1 Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel

Um die Einflüsse der unterschiedlichen Schalungshäute auszuschließen, werden in diesem Kapitel nur die Probekörper, die mit einer Betoplanschalungshaut hergestellt wurden berücksichtigt. Die dargestellten Werte entsprechen dabei einem Mittelwert über alle untersuchten Versuchsplatten. Die Zuordnung der Oberflächenvergütungsmittel in Diagramm 4.1 ist Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Legende
OVG 1
OVG 2
0-Probe

Tabelle 4.4: Legende OVGs

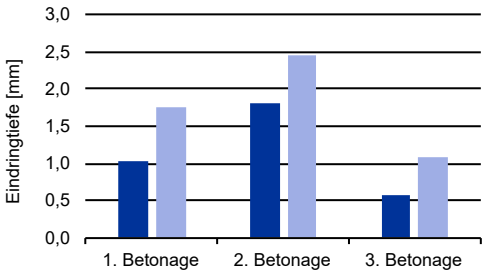
Eindringtiefe und Gesamtporosität

Wie in Diagramm 4.1(a) zu erkennen ist, drangen die Oberflächenvergütungsmittel im Mittel weniger als 2,5 mm tief in den Beton ein. Dies ist bedeutend geringer als die 20 mm bis 30 mm, die von einem Herstellern von Oberflächenvergütungsmitteln angeben wurden. Erkennbar ist auch, dass das *Oberflächenvergütungsmittel 2* ein etwas tieferes Eindringverhalten zeigt. Dabei ist kein wesentlicher Einfluss der Gesamtporosität auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel zu erkennen (vgl. Diagramm 4.1(b)).

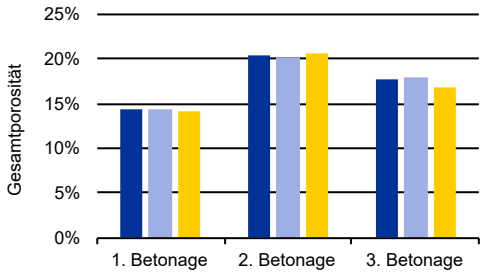
Es ist festzuhalten, dass vor allem die zweite Betonage eine große Schwankungsbreite von 16 % bis 25 % bei den Einzelwerten der Gesamtporositäten an der Oberfläche zeigte. Da diese Streuungen nicht nur zwischen einzelnen Versuchsplatten, sondern auch innerhalb dieser auftraten, ist von einer Inhomogenität der Betonoberfläche durch schwankende Luftporengehälter auszugehen.

Wie bereits in Kapitel 4.1.1.3 beschrieben, wurde bei der dritten Betonage der gleiche Luftgehalt im Frischbeton wie bei der zweiten Betonage nachgewiesen. Neben dem bereits beschriebenen Einfluss des hohen Fließmittelgehaltes auf die Luftverteilung im Frischbeton, kann dieser aber auch zu einer Stabilisierung des Betons an der Schalungsfläche führen. Dadurch kann auch die im Vergleich zur zweiten Betonage homogenere Verteilung der Gesamtporosität erklärt werden.

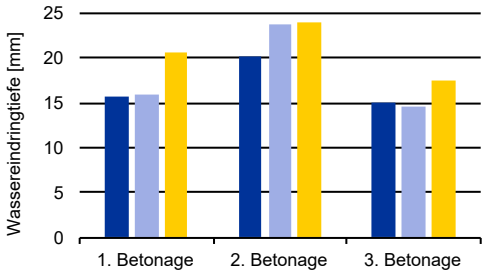
Die Prüfkörper der ersten Betonage zeigen einen maximalen Unterschied von 1 % zwischen den einzelnen Gesamtporositäten, was auf die Verwendung eines Betons mit einem sehr geringen Anteil an künstliche Luftporen zurückgeführt wurde.



(a) Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel



(b) Gesamtporosität



(c) Wassereindringtiefe

Diagramm 4.1: Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel

Wassereindringtiefe

Eine geringe Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel auf die Wassereindringtiefe ist in Diagramm 4.1(c) zwar erkennbar aber vernachlässigbar, da die Anforderungen der Umweltklasse XW2 (bzw. XD4, für beide: Wassereindringtiefe $\leq$25 mm) von allen Versuchsplatten im Mittel eingehalten werden.

Die Auswertung der Einzelergebnisse der Wassereindringtiefe zeigte deutlich größere Schwankungen bei der zweiten Betonage im Vergleich zu der ersten und dritten Betonage. Diese Schwankungen konnten sowohl zwischen einzelnen Versuchsplatten als auch innerhalb dieser festgestellt werden. Dies deutet, wie schon die festgestellten Schwankungen bei der Gesamtporosität, auf eine Inhomogenität des Betongefüges an der Oberfläche hin.

Beständigkeit gegen lösenden Angriff (Essigsäurelagerung)

Die Ergebnisse im Diagramm 4.1(d) stellen die neutralisierte Essigsäure am Ende der Untersuchung dar. Je geringer dieser Wert ist, desto weniger Essigsäure wurde neutralisiert und somit auch weniger Beton gelöst.

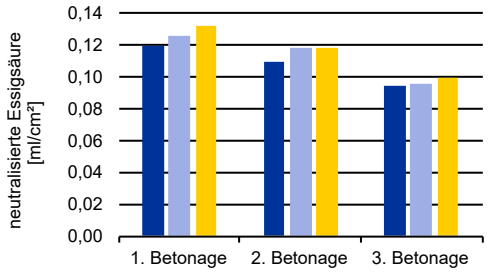
Durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel kann die Beständigkeit gegen den lösenden Angriff leicht erhöht werden. Ein möglicher Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel zur Beschichtung von Klärbecken ist jedoch im Detail zu untersuchen, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Oberflächenvergütungsmittel einen negativen Einfluss auf die Bildung eines schützenden Biofilms an der Betonoberfläche haben.

Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel

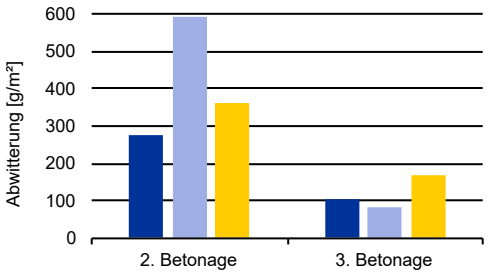
Wie bereits in Kapitel 4.1.1.2 erwähnt, zeigte der Beton der ersten Betonage eine sehr massive Abwitterung. Deshalb mussten die Versuche nach 14 Frost-Tauwechseln abgebrochen werden.

Somit sind die Ergebnisse der ersten Betonage nicht mit den Ergebnissen der folgenden Betonagen vergleichbar, weshalb in Diagramm 4.1(e) nur die Ergebnisse der zweiten und dritten Betonage dargestellt sind.

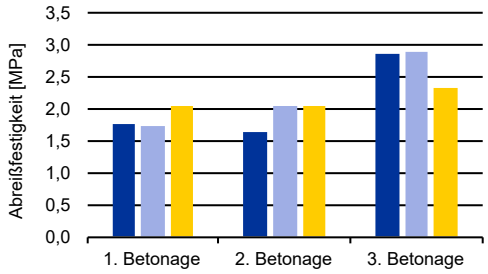
Wie in diesem Kapitel schon festgestellt, zeigten die Versuchsplatten der zweite Betonage große Schwankungen an der Betonoberfläche. Dies ist vor allem bei der Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumitteln erkennbar. Die deutlich erhöhte Mittlere Abwitterung bei Einsatz des *Oberflächenvergütungsmittel 2*, ist auf die massive Abwitterung einzelner Prüfkörper aus dem unteren Bereich der Versuchsplatten zurückzuführen, welche den Mittelwert stark beeinflussten. Generell zeigten die Prüfkörper aus dem unteren Bereich der Versuchsplatten die höchsten und auch am inhomogensten verteilten Abwitterungen (Details in Kapitel 4.1.3.1). Werden nur die Prüfkörper 1 und 2 in die Auswertung mit aufgenommen, diese wurden in der Mitte der Versuchsplatten entnommen, liegen die festgestellten Abwitterungen im Bereich von 300 g/m^2 bis 400 g/m^2.



(d) neutralisierte Essigsäure



(e) Abwitterung an der Schalfläche



(f) Abreißfestigkeit

Diagramm 4.1: Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel

Bei der dritten Betonage konnte eine deutliche Verbesserung durch die eingesetzten Oberflächenver-

gütungsmittel festgestellt werden. Dabei zeigen beide Oberflächenvergütungsmittel einen vergleichbaren positiven Effekt gegenüber der *0-Probe*.

Abreißfestigkeit

Der teilweise in Diagramm 4.1(f) zu erkennende Abfall der Abreißfestigkeit durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel ist durch den ungenügenden Haftverbund des Klebers mit der vergüteten Betonoberfläche zu erklären. Was zum Teil auf die deutlich glattere Betonoberfläche nach der Applikation der Oberflächenvergütungsmittel (verfüllen der Unebenheiten durch Rückstände) und daraus resultierend einer geringeren Verzahnung des Klebers mit der Betonoberfläche zurückzuführen ist. Teilweise wurde auch nur der an der Oberfläche verbleibende Film der Oberflächenvergütungsmittel (vermutlich Rückstände von Zusatzmitteln in den Oberflächenvergütungsmitteln) abgerissen.

Der geringe Haftverbund an vergüteten Betonoberflächen ist vor allem bei Instandsetzungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Dazu wurden auch Zusatzversuche durchgeführt, welche in Kapitel 4.1.3.3 dargestellt werden.

4.1.2.2 Einfluss der Schalungshaut

Wie bereits in Kapitel 4.1.1.3 erwähnt wurde bei der dritten Betonage der Einfluss der unterschiedlichen Schalungshäute nicht mehr untersucht, da aus den ersten beiden Betonagen klare Erkenntnisse gewonnen werden konnten.

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, wurden die Versuchsplatten zur Untersuchung des Einflusses der Schalungshaut nur wie in Abbildung 3.3(b) dargestellt nachbehandelt und appliziert. Durch die großen Schwankungen der Ergebnisse der zweiten Betonage war es allerdings nötig, den Mittelwert über alle in einer Betoplanschalungshaut hergestellten Versuchsplatten als Vergleichswert heranzuziehen.

Legende
Betoplan
Stahl
Holz
Vlies

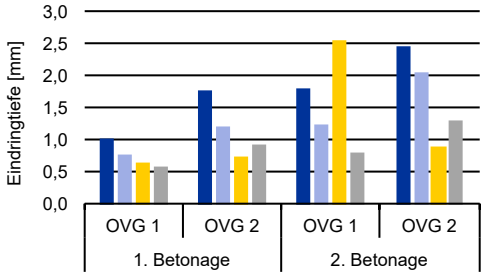
Tabelle 4.5: Legende Schalungshaut

Die Zuordnung der Schalungshäute in Diagramm 4.2 ist Tabelle 4.5 zu entnehmen.

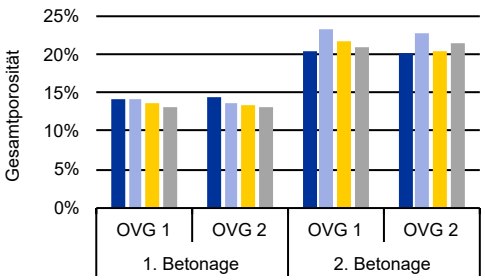
Eindringtiefe und Gesamtporosität

Wie in Diagramm 4.2(b) zu erkennen, ist die Gesamtporosität bei den Versuchsplatten, die in den saugenden Schalungshäuten hergestellt wurden, um 1 % bis 2 % gegenüber den Versuchsplatten, die in einer Betoplanschlungshaut hergestellt wurden reduziert. Dies kann auf einen reduzierten W/B-Wert an den Schalungsflächen und damit auf eine Reduktion der Kapillarporen zurückgeführt werden. Die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel war wie in Diagramm 4.2(a) zu erkennen, ebenfalls bei den Versuchsplatten, die in den saugenden Schalungshäute hergestellt wurden, reduziert. Ungewöhnlich ist, dass sowohl die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel als auch die Gesamtporosität bei den Versuchsplatten der ersten Betonage, die mit einer Stahlschalungshaut hergestellt wurden, im Vergleich zu den Versuchsplatten, die in der ebenfalls nicht saugenden Betoplanschalungshaut hergestellt wurde, verringert waren.

Aufgrund der großen Streuungen der Untersuchungsergebnisse der zweiten Betonage, kann keine klare Aussage



(a) Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel



(b) Gesamtporosität

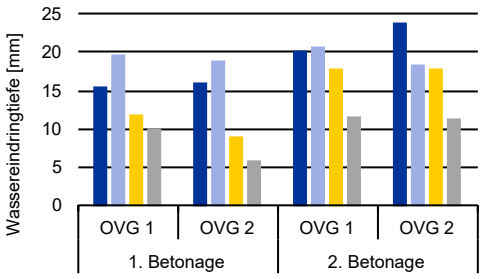
Diagramm 4.2: Einfluss der Schalungshaut

getroffen werden. Vor allem die hohe Eindringtiefe des *Oberflächenvergütungsmittel 1* kann nur durch die Inhomogenität der Betonoberfläche erklärt werden.

Dabei wurde angenommen, dass das lokale Feinluftporengefüge (durch den Einsatz von Luftporenbildnern) an der Betonoberfläche einen deutlich größeren Einfluss auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel und die Gesamtporosität hat, als die zur Herstellung der Versuchsplatten verwendete Schalungshaut.

Wassereindringtiefe

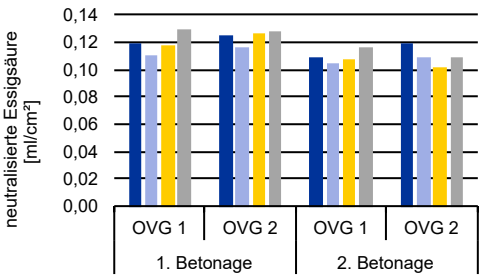
Durch die Verwendung saugender Schalungshäute ist in Diagramm 4.2(c) eine deutliche Reduktion der Wassereindringtiefe zu erkennen. Bei den Versuchsplatten, die mit einer Vliesschalungshaut hergestellt wurden, konnte die Wassereindringtiefe halbiert werden. Auch dieses Ergebnis deutet auf ein dichteres Betongefüge an der Oberfläche hin.



(c) Wassereindringtiefe

Beständigkeit gegen lösenden Angriff (Essigsäurelagerung)

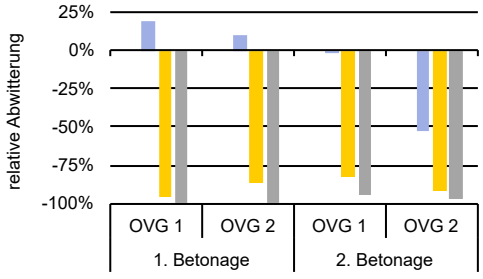
Trotz der deutlich raueren Betonoberfläche der mit den saugenden Schalungshäuten hergestellten Versuchsplatten und der damit verbunden größeren Angriffsfläche, ist kaum eine Auswirkung auf die Beständigkeit gegen den lösenden Angriff in Diagramm 4.2(d) festzustellen. Die erkennbaren Unterschiede liegen im Bereich der Messunsicherheit der Prüfmethode.



(d) neutralisierte Essigsäure

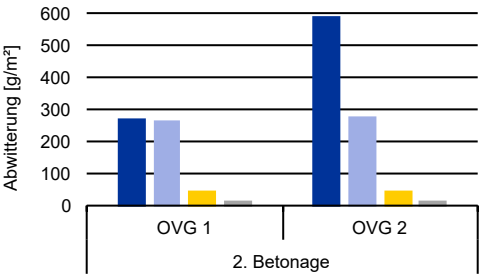
Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel

Am deutlichsten waren die Auswirkungen der saugenden Schalungshäute auf die Betonoberfläche bei der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel (siehe Diagramm 4.2(e)) erkennbar. Dabei ist nochmals festzuhalten, dass die Prüfung bei der ersten Betonage nach 14 Frost-Tauwechseln abgebrochen werden musste. Um die Ergebnisse der ersten und zweiten Betonage dennoch vergleichen zu können, sind die Abwitterung in Relation zur Abwitterung der Versuchsplatten, die in der Betoplanschalung hergestellt wurde dargestellt.



(e) Relative Abwitterung an der Schalungsfläche

Bei der zweiten Betonage zeigten die Versuchsplatten, die mit der Betoplanschalhaut hergestellt wurden, eine große Streuung der Abwitterung. Wie in Diagramm 4.2(f) zu sehen und auch in Kapitel 4.1.2.1 beschrieben, führte diese hohe Streuung zu einer deutlich höheren mittleren Abwitterung der Versuchsplatten, die mit dem *Oberflächenvergütungsmittel 2* behandelt wurden. Dadurch scheint der positive Einfluss der saugenden Schalungshäute bei diesen Versuchsplatten noch deutlicher ausgeprägt zu sein. Betrachtet man allerdings die Absolutwerte der Abwitterung in Diagramm 4.2(f), erkennt man, dass mit beiden Oberflächenvergütungsmittel die gleiche mittlere Abwitterung erreicht werden kann. Dasselbe gilt für die Versuchsplatten, die mit einer Stahlschalungshaut herge-



(f) Abwitterung an der Schalungsfläche

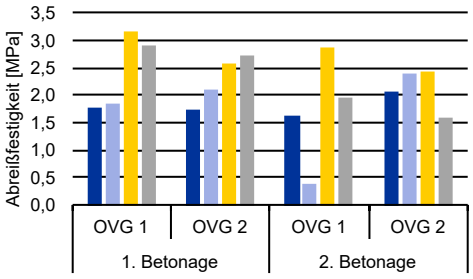
Diagramm 4.2: Einfluss der Schalungshaut

stellt wurden.

Die besten Ergebnisse lassen sich mit einer Vliesschalungshaut erreichen. Die Abwitterungen erreichen dabei sogar Werte, die geringer sind als die Abwitterungen an den Schnittflächen, wie im Vergleich mit Diagramm 4.8 (Kapitel 4.1.3.2) zu sehen ist. Dabei ist aber zu beachten, dass die saugenden Schalungshäute die Abwitterung nur verzögern, nicht stoppen. Dies zeigte sich deutlich bei den Prüfkörpern der ersten Betonage. Da die Prüfkörper der Versuchsplatten, die mit saugenden Schalungshäute hergestellt wurden, sehr geringe Abwitterungen zeigten, wurden diese bis zum 28. Frost-Tauwechsel weiter belastet. Nach weiteren 14 Frost-Tauwechseln versagten auch diese Prüfkörper.

Abreißfestigkeit

Wie bereits in Kapitel 4.1.2.1 aufgezeigt, beeinträchtigen die Oberflächenvergütungsmittel vor allem den Haftverbund des Klebers. Bei den Versuchsplatten der zweiten Betonage, die mit der Stahlschalungshaut hergestellt wurden und die mit dem *Oberflächenvergütungsmittel 1* behandelt wurden, konnte kein Haftverbund hergestellt werden und alle Stempel rissen fast vollständig an der Grenzfläche des Klebers zur Oberfläche.



(g) Abreißfestigkeit

Diagramm 4.2: Einfluss der Schalungshaut

Durch die rauere Oberfläche bei den Prüfkörpern, die mit einer saugenden Schalungshaut hergestellt wurden, kommt es zu einer besseren Verzahnung und damit zu höheren Abreißfestigkeiten. Dieser Einfluss lässt sich nicht von der Gefügeverbesserung durch den Einsatz einer saugenden Schalungshaut trennen.

4.1.2.3 Einfluss der Applikationsrichtung

Wie in Diagramm 4.3 zu erkennen ist, hat die Applikationsrichtung keinen wesentlichen Einfluss auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel. Allerdings ist auch hier wieder die deutlich größere Streuung der Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel bei der zweiten Betonage zu erkennen.

Werden die weiteren Untersuchungen nach der Applikationsrichtung gruppiert, lassen sich, wie bei der Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel, nur Unterschiede innerhalb der Messunsicherheit der einzelnen Prüfmethoden erkennen. Deshalb wurde auf eine Darstellung der Auswertung der weiteren Untersuchungen verzichtet.

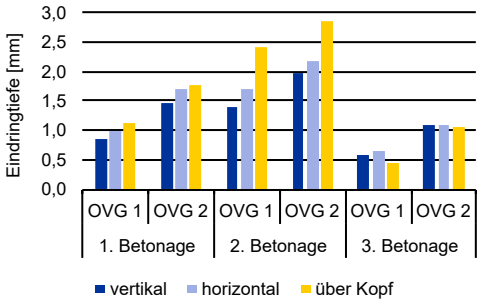


Diagramm 4.3: Einfluss der Applikationsrichtung auf die Eindringtiefe

4.1.2.4 Einfluss der Vorbehandlung

Durch das eingeschränkte Untersuchungsprogramm der dritten Betonage wurde die Untersuchung des Einflusses der Vorbehandlung durch Hochdruckreinigen bei dieser Betonage nicht durchgeführt. Obwohl Unterschiede bei der Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel aufgrund der Vorbehandlung, wie in Diagramm 4.4 zu erkennen, festgestellt werden können, waren diese nicht signifikant genug, um auch bei den weiteren Untersuchungen einen erkennbaren Einfluss zu zeigen.

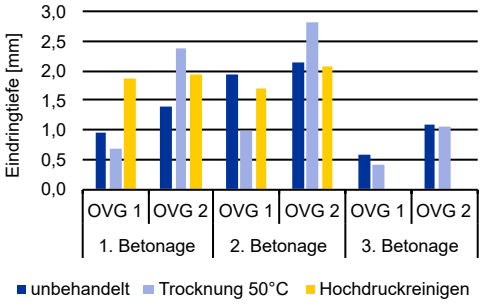


Diagramm 4.4: Einfluss der Vorbehandlung auf die Eindringtiefe

Deshalb wurde auch hier auf eine Darstellung der Auswertung der weiteren Untersuchungen verzichtet.

4.1.2.5 Einfluss der Applikationstemperatur

Entgegen der Erwartungen zeigte sich kein Einfluss der Applikationstemperatur auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel, wie in Diagramm 4.5 zu erkennen ist. Bei der Applikation konnte zwar teilweise die Bildung von Eis an der −5 °C kalten Oberfläche festgestellt werden, das Oberflächenvergütungsmittel war aber entweder noch vor der Eisbildung oder während des Auftauens der Eisschicht in die Betonoberfläche eingedrungen.

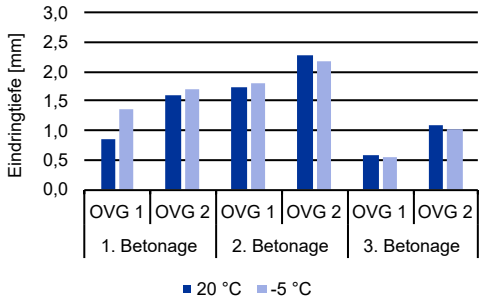


Diagramm 4.5: Einfluss der Applikationstemperatur auf die Eindringtiefe

Auch bei den weiteren Untersuchungen konnte kein Einfluss der Applikationstemperatur auf die Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel festgestellt werden. Wie schon in den vorherigen Kapiteln wurde deshalb auf eine Darstellung der Auswertung der weiteren Untersuchungen verzichtet.

4.1.2.6 Einfluss der Applikationstechnik

Eine erhöhte Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel durch das Einwalzen konnte, wie in Diagramm 4.6 zu erkennen, bei der ersten und dritten Betonage nicht festgestellt werden. Die leicht höhere Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel bei der zweiten Betonage liegen innerhalb der Streuung der Einzelergebnisse.

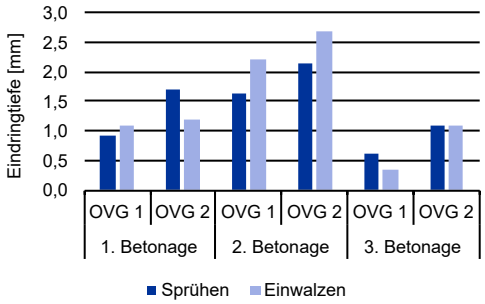


Diagramm 4.6: Einfluss der Applikationstechnik auf die Eindringtiefe

Wie bereits bei den vorhergehend untersuchten Einflüssen konnte auch kein Einfluss der Applikationstechnik festgestellt werden. Weshalb auch hier wiederum auf eine Darstellung der Auswertung der weiteren Untersuchungen verzichtet wurde.

4.1.2.7 Einfluss der Gesteinskörnungen

Um den Einfluss der Gesteinskörnungen bewerten zu können, wurde die dritte Betonage durchgeführt. Wie in den Diagrammen 4.1 bis 4.6 zu erkennen ist, konnte kein Unterschied in der Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel aufgrund der Gesteinskörnung festgestellt werden. Die im Allgemeinen besseren Ergebnisse der dritten Betonage zeigen sich auch bei der nicht applizierten *0-Probe* und sind somit auf den Beton selbst und nicht auf die Oberflächenvergütungsmittel zurückzuführen.

Durch die geringe Streuung der Einzelergebnisse ist aber der positive Einfluss der Oberflächenvergütungsmittel deutlicher zu erkennen. Dies gilt vor allem bei der Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel (siehe Diagramm 4.1(e)). Dabei ist bis auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel kein Unterschied zwischen den beiden untersuchten Oberflächenvergütungsmitteln feststellbar.

4.1.3 Zusatzuntersuchungen im Rahmen des Work-Package 3

Wie bereits in der Einleitung des Kapitels 4.1 beschrieben, waren zusätzliche Untersuchungen notwendig, um die nicht vermuteten Nebeneinflüsse untersuchen zu können.

Nach der Auswertung der ersten und zweiten Betonage stellten sich folgende Fragen:

- Hat die Betonagerichtung einen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse?

- Hat die Positionierung der Prüfkörper innerhalb der Versuchsplatten einen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse?
- Entsprechen die Abwitterungen an den Schnittflächen den normativen Vorgaben (bei normativer Prüfkörpervorbereitung)?
- Kann der Haftverbund verbessert werden, indem das Korngerüst freigelegt wird?

Neben den vorhandenen Prüfkörpern mussten auch neue Prüfkörper hergestellt werden, um diese Fragen beantworten zu können.

4.1.3.1 Einfluss der Betonagerichtung und Verteilung der Probekörper

Um den Einfluss der Betonagerichtung bewerten zu können, wurden insgesamt drei Versuchsplatten mit einer Größe von 60 cm × 60 cm × 10 cm betoniert. Dazu wurde ein Beton, der den Anforderungen an die Zusammensetzung für die Umweltklasse XF4 entspricht, aus der regulären Produktion eines Betonwerks verwendet, um eine möglichst homogene Betonzusammensetzung zu erreichen.

Eine der Versuchsplatten wurde liegend, die anderen zwei stehend betoniert. Im Anschluss wurden aus den Versuchsplatten je neun Prüfkörper gewonnen. Davon wurde ein Prüfkörper zur Bestimmung des L300-Wertes und je vier zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumitteln an der Schalungs- bzw. Schnittfläche (siehe Kapitel 4.1.3.2) verwendet. Da bei dieser Untersuchung nur der Einfluss der Betonagerichtung und der Prüfkörperverteilung innerhalb der Versuchsplatten bestimmt wurde, wurden keine Oberflächenvergütungsmittel appliziert.

-17%	-26%	-39%
5%		4%
-9%	21%	60%

Abbildung 4.2: Abwitterungsverteilung bei vertikaler Befüllung

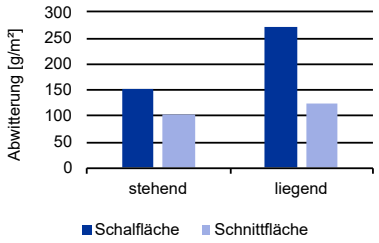


Diagramm 4.7: Einfluss der Betonagerichtung auf die Abwitterung

Abbildung 4.2 stellt die Abwitterung der einzelnen Prüfkörperpositionen, der Versuchsplatten die stehend betoniert wurden, im Verhältnis zum Mittelwert der Abwitterungen dieser Versuchsplatten dar. Dabei wurden sowohl die Abwitterungen an der Schalungs- als auch an der Schnittfläche in die Auswertung mit einbezogen, da an beiden Prüfflächen ein Einfluss der Prüfkörperposition zu erkennen war. Es zeigte sich, dass die Abwitterungen im unteren Bereich der Versuchsplatten höher sind und auch größeren Schwankungen unterliegen. Da auch die Prüfkörper für die Bestimmung der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel aus dem unteren Bereich, der ebenfalls stehend betonierten, Versuchsplatten entnommen wurden, kann dadurch ein Teil der Schwankungen und erhöhten Abwitterungen erklärt werden.

Wie in Diagramm 4.7 zu erkennen, ist die Abwitterung an der Schalungsfläche bei der liegend betonierten Versuchsplatte gegenüber den stehend betonierten Versuchsplatten deutlich erhöht. Der Einfluss der Betonagerichtung war bei den Prüfkörpern, die an der Schnittfläche untersucht wurden, nicht so ausgeprägt. Stellt man die Einzelergebnisse beider Betonagerichtungen gegenüber, zeigt sich, dass die Abwitterungen im unteren Bereich der stehend betonierten Versuchsplatten mit denen der liegend betonierten Versuchsplatte vergleichbar sind.

Als Ursache für die höheren Abwitterungen wurde angenommen, dass durch die punktuelle Verdichtung mit dem Flaschenrüttler das Überschusswasser an der Schalungshaut inhomogen verteilt war. Dadurch entstanden Bereiche, in den der W/B-Wert an der Betonoberfläche erhöht war. Dies führte zu einer

höheren Anzahl an Kapillarporen und damit zu einer negativen Beeinflussung der Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel.

4.1.3.2 Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel an Schalungs- und Schnittflächen

Da die Prüfkörper der zweiten Betonage eine höhere Abwitterung zeigten als angenommen, wurde beschlossen, bei der dritten Betonage zusätzlich Prüfkörper sowohl an der Schalungs- als auch an einer Schnittfläche zu untersuchen. Damit diese Prüfkörper zum Versuchsbeginn das selbe Betonalter hatten, wurden Balken mit einer Größe von 60 cm × 20 cm × 20 cm hergestellt und in der Mitte geteilt. Die geteilten Balken wurden jeweils an der Schalungs- bzw. der Schnittfläche appliziert und anschließend die einzelnen Prüfkörper entnommen.

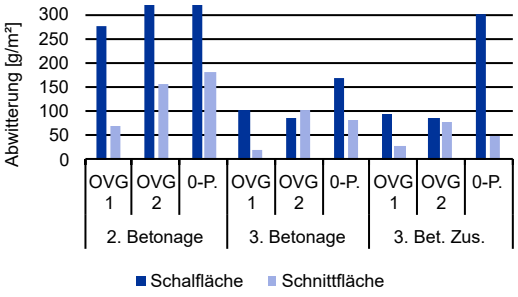


Diagramm 4.8: Abwitterung an Schalungs- und Schnittflächen

Nachdem die ersten Zwischenergebnisse dieser Untersuchung vorlagen und vor allem bei der *0-Probe* deutliche Unterschiede in der Abwitterung der Prüfflächen feststellbar war, wurde beschlossen, auch ausgewählte Prüfkörper der regulären Versuchsplatten an der Schnittfläche zu untersuchen, um einen Vergleichswert zu erhalten. Dazu wurden die bereits untersuchten Prüfkörper zugeschnitten und die Schnittfläche unter Einhaltung der Randbedingung mit dem jeweiligen Oberflächenvergütungsmittel appliziert. Da diese Probekörper ein deutlich höheres Betonalter zu Prüfbeginn hatten, sind die erreichten Abwitterungen nur für eine qualitative Bewertung geeignet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Diagramm 4.8 dargestellt. Dabei wurde die Skalierung der Abwitterung auf 300 g/m^2 begrenzt, um auch die geringeren Abwitterungen an der Schnittfläche besser erkennen zu können. Die Abwitterungen der Prüfkörper der zweiten Betonage können dem Diagramm 4.2(f) entnommen werden. Im Vergleich dieser beiden Diagramme ist auch die positive Wirkung einer Vliesschalungshaut auf die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel an der Betonoberfläche zu erkennen.

Wie in Diagramm 4.8 sind die Abwitterungen an den Schnittflächen deutlich reduziert. Dabei sind auch die Einzelwerte homogener verteilt. Durch den Einsatz des *Oberflächenvergütungsmittels 1* konnten die Abwitterung weiter reduziert werden. Im Gegensatz dazu hatte das *Oberflächenvergütungsmittel 2* bei den Prüfkörpern der dritten Betonage einen negativen Einfluss auf die Abwitterung.

4.1.3.3 Abreißfestigkeit nach Freilegen des Korngerüstes

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erwähnt, entstanden durch die Oberflächenvergütungsmittel Probleme mit dem Haftverbund zwischen Kleber und Betonoberfläche bei den Abreißversuchen. Um zu untersuchen, ob eine Freilegung des Korngerüstes den Haftverbund verbessern kann, wurden ausgewählte Probekörper HDW-gestrahlt. Im Anschluss wurde erneut die Abreißfestigkeit untersucht.

Im Mittel konnte durch die Freilegung des Korngerüstes die Abreißfestigkeit nur gering erhöht werden, allerdings konnte das Bruchbild vor allem bei der zweiten Betonage deutlich verbessert werden (siehe Diagramm 4.9).

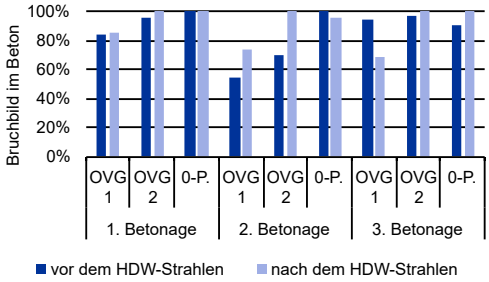


Diagramm 4.9: Bruchbild im Beton nach HDW-Strahlen

4.1.4 Erkenntnisse aus dem Work-Package 3

Eine klare positive Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel konnte nur bei der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel festgestellt werden. Bei allen anderen Untersuchungen war der Einfluss der Oberflächenvergütungsmittel entweder sehr gering oder lag innerhalb der Messunsicherheit der Prüfmethoden. Es konnte in diesem Work-Package auch kein klarer Einfluss der untersuchten Randbedingungen auf die Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel festgestellt werden.

Als wesentliches Ergebnis kann festgehalten werden, dass durch die untersuchten Oberflächenvergütungsmittel ein ungeeigneter Beton, wie er bei der ersten Betonage verwendet wurde, nicht die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel eines höherwertigen Betones erreichen kann. Allerdings konnte die Beständigkeit durch die Oberflächenvergütungsmittel an den geprüften Schalungsflächen erhöht werden.

Wie die Auswertung der Abreißfestigkeit gezeigt hat, ist teilweise ein Abfall des Haftverbundes zwischen Kleber und Betonoberfläche zu erkennen. Deshalb ist es wichtig, vor Instandsetzungsmaßnahmen die oberste Schicht, zum Beispiel durch HDW-strahlen, abzutragen und das Korngerüst freizulegen.

Die positive Wirkung von saugenden Schalungshäuten konnte eindeutig nachgewiesen werden. Wobei nicht nur eine Gefügeverbesserung, sondern auch ein homogeneres Gefüge feststellbar war. Vor allem die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel konnte durch die Betonage mit saugenden Schalungshäuten erhöht werden.

Neben den Erkenntnissen zur Wirkungsweise konnten auch folgende Probleme bei der Abwicklung dieses Work-Packages festgestellt werden:

- Die ersten beiden Betonagen waren vom Umfang zu groß. Dadurch wurde vor allem bei der zweiten Betonage der Erstarrungsbeginn bereits vor der Betonage der letzten Versuchsplatten erreicht.
- Durch eine zu große Rüttelflasche wurde zu viel Rüttelenergie (Entmischung) eingebracht.
- Die Prüfkörper zur Bewertung der Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel wurden aus einer ungeeigneten Position innerhalb der Versuchsplatten entnommen.
- Mangelnde Vergleichbarkeit der Betone mit kalzitischer und silikatischer Gesteinskörnungen.
- Inhomogenität der verwendeten silikatischen Gesteinskörnung.
- Keine ausreichende Sättigung der Probekörper mit den Oberflächenvergütungsmitteln.
- Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die vergütete Betonoberfläche durch die Entnahme der Prüfkörper gestört wurde

4.2 Work-Package 4

Aufgrund der Erkenntnisse des Work-Package 3 wurden die Versuchsplatten in einem Fertigteilwerk hergestellt und es wurde auf das Einbringen von künstlichen Feinluftporen verzichtet. Damit alle Prüfungen gleichzeitig durchgeführt werden konnten, wurde die Betonage aller drei Betonrezepturen innerhalb von drei Tagen durchgeführt.

Für die drei hergestellten Mischungen wurden folgende Zielwerte vorgegeben:

- W/B-Wert = 0,43
- Bindemittelgehalt = 380 kg/m^3
- daraus folgt: Gesamtwassergehalt = 163 kg/m^3

Bei allen Betonagen wurde eine kalzitische/dolomitische Gesteinskörnung verwendet.

Der Herstellungsablauf der Versuchsplatten bis zum Applizieren der Prüfkörper ist beispielhaft in Abbildung 4.3 zu erkennen.

(a) Schalungen vor dem Betonieren

(b) Glätten der Oberfläche nach der Betonage

(c) Beschriften der Prüfkörper vor dem Schneiden

(d) Reinigen mit Hochdruckreiniger

(e) sortierte Prüfkörper vor der Applikation

(f) Applikation durch sprühen

Abbildung 4.3: Eindrücke zur Prüfkörper Herstellung

4.2.1 Verwendete Betonsorten und deren Eigenschaften

4.2.1.1 Erste Betonage

Im Rahmen dieser Auswertung wird diese Betonrezeptur als *R1* bezeichnet.

Für die erste Betonage wurde als Bindemittel ein Normalzement der Familie CEM II/A-M (S-L) 42,5 N eingesetzt. Dies ist das Standardbindemittel im Bundesland Tirol.

Die verwendete Betonrezeptur sowie die Frisch- und Festbetonparameter können Tabelle 4.6 entnommen werden.

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Kalzit/Dolomit	
Bindemittel	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	384 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,43	167 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,85 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Ausbreitmaß nach 60 min	34 cm	
Luftporen im Frischbeton	1,1 %	
Frischbetonrohdichte	2.520 kg/m^3	
Druckfestigkeit nach 28 d	64,3 MPa	

Tabelle 4.6: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten der ersten Betonage (*R1*) des Work-Package 4

4.2.1.2 Zweite Betonage

Im Rahmen dieser Auswertung wird diese Betonrezeptur als *R2* bezeichnet.

Für die zweite Betonage wurde als Bindemittel ein Normalzement der Familie CEM I 42,5 R - C_3A-frei eingesetzt. Dieses Bindemittel wurde aufgrund der geringen Wärmeentwicklung, wodurch es sehr gut für massige Bauteile und zum Betonieren bei hohen Lufttemperaturen geeignet ist, verwendet.

Die verwendete Betonrezeptur sowie die Frisch- und Festbetonparameter können Tabelle 4.7 entnommen werden.

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Kalzit/Dolomit	
Bindemittel	CEM I 42,5 R - C_3A-frei	382 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,43	166 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,70 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Ausbreitmaß nach 45 min	38 cm	
Luftporen im Frischbeton	1,0 %	
Frischbetonrohdichte	2.520 kg/m^3	
Druckfestigkeit nach 28 d	65,1 MPa	

Tabelle 4.7: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten der zweiten Betonage (*R2*) des Work-Package 4

4.2.1.3 Dritte Betonage

Im Rahmen dieser Auswertung wird diese Betonrezeptur als *R3* bezeichnet.

Für die dritte Betonage wurde als Bindemittel ein Normalzement der Familie CEM II/A-LL 32,5 R eingesetzt. Dies ist das Standardbindemittel in der Region Südtirol.

Die verwendete Betonrezeptur sowie die Frisch- und Festbetonparameter können Tabelle 4.8 entnommen werden.

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Kalzit/Dolomit	
Bindemittel	CEM II/A-LL 32,5 R	382 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,43	165 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,80 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Ausbreitmaß nach 45 min	33 cm	
Luftporen im Frischbeton	0,5 %	
Frischbetonrohdichte	2.540 kg/m^3	
Druckfestigkeit nach 28 d	59,2 MPa	

Tabelle 4.8: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten der dritten Betonage (*R3*) des Work-Package 4

4.2.2 Auswertung der Versuche

Legende
OVG 1
OVG 2
OVG 3
OVG 4
OVG 5
0-Probe

Tabelle 4.9: Legende OVGs

Die Zuordnung der Oberflächenvergütungsmittel in Diagramm 4.10 und Diagramm 4.11 ist der Tabelle 4.9 zu entnehmen. Die abgezogen Oberfläche wir in Diagramm 4.10 und Diagramm 4.11 nur als Oberfläche bezeichnet.

Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel

Nach den ersten positiven Erfahrungen mit der Bestimmung der Eindringtiefen der Oberflächenvergütungsmittel mittels Karsten-Röhrchen, wurde der Versuch auch in diesem Work-Package durchgeführt. Aufgrund des dichten Betongefüges und der vergleichsweise kleinen Prüffläche der Karsten-Röhrchen von 7 cm^2, konnte bei diesen Untersuchungen keine Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel bestimmt werden.

Durch die Größe der Versuchsplatten war es allerdings auch möglich, Prüfkörper zur Bestimmung der Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel mittels Fluoreszenzmikroskopie herzustellen (siehe Abbildung 3.4). Wie in Diagramm 4.10 zu erkennen, drang das *Oberflächenvergütungsmittel 2* wie schon im Work-Package 3 tiefer ein als das *Oberflächenvergütungsmittel 1*. Von den neuen Oberflächenvergütungsmitteln drang nur das *Oberflächenvergütungsmittel 3* in die Betonoberfläche ein. Dabei war kein klarer Unterschied zwischen der Schalungsfläche und der abgezogenen Oberfläche zu erkennen.

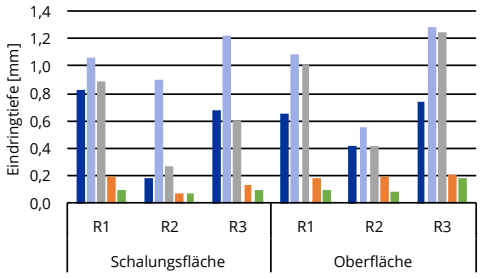
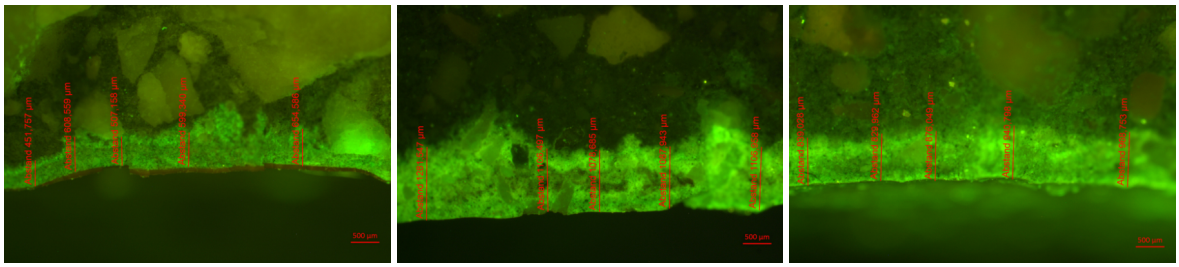
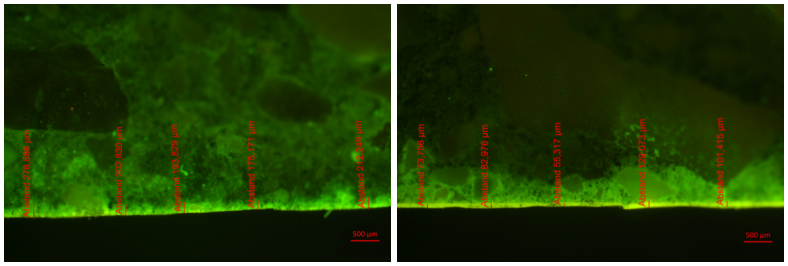


Diagramm 4.10: Eindringtiefe Oberflächenvergütungsmittel - Work-Package 4

Die *Oberflächenvergütungsmittel 4* und *5* bildeten nur einen oberflächlichen Schutzfilm aus und drangen kaum in den Beton ein. Die Ausbildung dieses Schutzfilmes ist in Abbildung 4.4(e) gut zu erkennen.



(a) Oberflächenvergütungsmittel 1 (b) Oberflächenvergütungsmittel 2 (c) Oberflächenvergütungsmittel 3

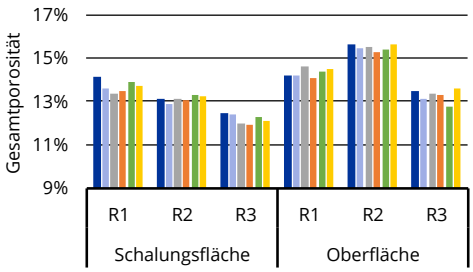


(d) Oberflächenvergütungsmittel 4 (e) Oberflächenvergütungsmittel 5

Abbildung 4.4: Aufnahmen der Eindringtiefe unter dem Fluoreszenzmikroskop. Die Bilder stammen von unterschiedlichen Versuchsplatten.

Gesamtporosität

Vergleicht man die Ergebnisse der Gesamtporosität in Diagramm 4.11(a) an der Schalungsfläche mit dem Luftgehalt der Frischbetonprüfung in Tabelle 4.6 bis 4.8, so ist eine Korrelation der beiden Werte zu erkennen. An der abgezogenen Oberfläche war die Gesamtporosität wie zu erwarten höher. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel im Verhältnis zur Probekörperabmessung war kein Einfluss der Oberflächenvergütungsmittel auf die Gesamtporosität zu erkennen.



(a) Gesamtporosität

Diagramm 4.11: Ergebnisse des Work-Package 4

Klar zu erkennen war, dass die Probekörper sowohl an der Schalungsfläche als auch an der abgezogenen Oberfläche ein sehr homogen verteiltes Porensystem zeigten. Auch die Unterschiede zwischen den Versuchsplatten einer Rezeptur waren $<1\,\%$ und liegen somit im Bereich der Messunsicherheit dieses Verfahrens.

Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel

Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Work-Package 3 wurden die Untersuchungen nach einer Abwitterung von $\geq 1.000\,g/m^2$ abgebrochen, da im Regelfall die Prüffläche im Randbereich nicht mehr abgedichtet werden konnten. Zusätzlich erreichten die Abwitterungen eine Tiefenstufe in der die Oberflächenvergütungsmittel nicht eingedrungen waren und somit auch keine Wirkung zeigen konnten. Um die tatsächliche Anzahl der Frost-Tauwechsel bis zum Erreichen dieses Grenzwertes genauer bestimmen zu können, wurde die Abwitterung in einem Intervall von sieben und nicht wie normativ vorgesehen von 14 Frost-Tauwechseln bestimmt. Da bei den hergestellten Betonen auf das Einbringen von künstlichen Feinluftporen verzichtet wurde, mussten alle *0-Proben* aufgrund ihrer geringen Beständigkeit vorzeitig abgebrochen werden.

Zur Bewertung der Beständigkeit hat sich die durch linearen Ausgleich berechnete Anzahl der Frost-

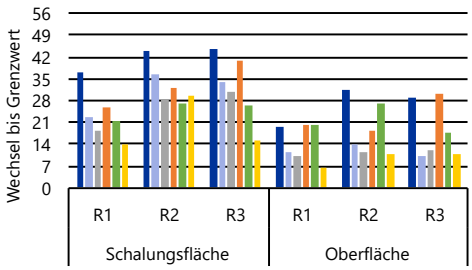
Tauwechsel bis zum Erreichen einer Abwitterung von 300 g/m^2 als geeignet herausgestellt. In Diagramm 4.11(b) ist die Anzahl der Frost-Tauwechsel bis zum Erreichen des Grenzwertes dargestellt. Um die Wirksamkeit der einzelnen Oberflächenvergütungsmittel besser erkennen zu können, ist in Diagramm 4.11(c) die Anzahl der Frost-Tauwechsel in Bezug auf die jeweilige *0-Probe* dargestellt.

Aufgrund der großen Anzahl von Prüfkörpern musste die Untersuchung in drei Teilserien durchgeführt werden. Der Verlauf der Beständigkeit der *0-Proben* ist in Diagramm 4.11(d) dargestellt. Bei den Rezepturen *R1* und *R3* ist dabei kein signifikanter zeitlicher Verlauf der Beständigkeiten feststellbar. Im Gengensatz dazu kann bei der Rezeptur *R2* ein Abfall der Beständigkeit festgestellt werden.

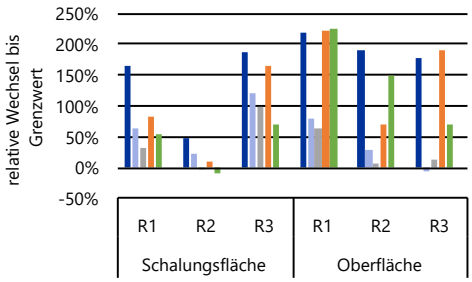
Aufgrund der Zusammensetzung der Betone konnten nur vereinzelte Prüfkörper die gesamte Prüfdauer von 56 Frost-Tauwechseln mit Abwitterungen geringer als 300 g/m^2 überstehen. Wie zu erwarten zeigten die Prüfkörper an der abgezogenen Oberfläche deutlich größere Abwitterungen und auch die größeren Schwankungen zwischen den einzelnen Prüfkörpern.

Die *0-Probe* des Betons der Rezeptur *R2* zeigt an der Schalungsfläche die höchste Beständigkeit, wodurch hier auch kaum eine Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel feststellbar ist. An der abgezogenen Oberfläche ist bei den *0-Probe* kein signifikanter Unterschied feststellbar.

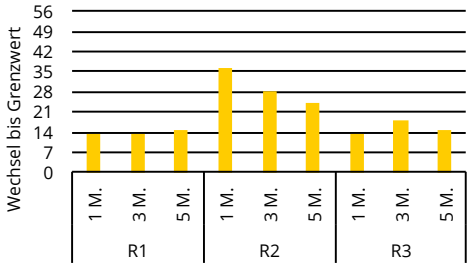
Die Oberflächenvergütungsmittel sind getrennt nach ihrer Wirkungsweise zu betrachten. Einerseits die reaktiven Oberflächenvergütungsmittel, *Oberflächenvergütungsmittel 1* bis *3*, andererseits die nicht reaktiven Beschichtungen *Oberflächenvergütungsmittel 4* und *5*. Die reaktiven Oberflächenvergütungsmittel zeigten eine eher lineare Zunahme der Abwitterung über die Versuchsdauer, hingegen zeigten die nicht reaktiven Beschichtungen kaum eine Abwitterung bis die Schicht gestört wurde. Im Anschluss nahmen die Abwitterungen ähnlich schnell wie die *0-Probe* zu. Dieses Verhalten lässt sich gut mit der Wirkungsweise der einzelnen Oberflächenvergütungsmittel erklären.



(b) Beständigkeit



(c) relative Beständigkeit



(d) Zeitlicher Verlauf der Beständigkeit der *0-Proben* an der Schalungsfläche.

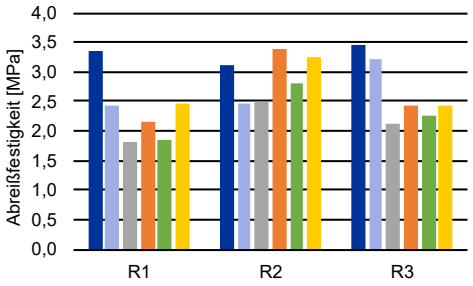
Diagramm 4.11: Ergebnisse des Work-Package 4

Während der Einsatz der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel das Betongefüge an der Oberfläche verändert, bilden die nicht reaktiven Beschichtungen eine Schutzschicht aus. Treten über die Dauer Störungen in dieser Schutzschicht auf, kann das Taumittel ungehindert in den darunterliegenden Beton eindringen. Dadurch wird die Schutzschicht weiter geschädigt, wodurch letztendlich an der gesamten Oberfläche der Beton frei liegt.

An der Schalungsfläche des Betons mit der Rezeptur *R3* zeigten die Oberflächenvergütungsmittel die deutlichste Wirkung. Über alle Untersuchungen hinweg ist klar zu erkennen, dass das *Oberflächenvergütungsmittel 1* die deutlichste Wirkung zeigt, auch, wenn wie in Diagramm 4.10 zu erkennen, die *Oberflächenvergütungsmittel 2* und *3* meist tiefer eingedrungen sind.

Abreißfestigkeit

Die Abreißfestigkeit wurde nur an der abgezogenen Oberfläche der Versuchsplatten untersucht. Für das *Oberflächenvergütungsmittel 1* war eine klare Verbesserung in Kombination mit den Betonen *R1* und *R3* und für das *Oberflächenvergütungsmittel 2* in Kombination mit dem Beton *R3* feststellbar. Die restlichen Oberflächenvergütungsmittel zeigten keinen klaren Einfluss auf die Abreißfestigkeit. Wie schon in Work-Package 3 konnte eine Verschlechterung des Haftverbundes durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel festgestellte werden.



(e) Abreißfestigkeit

Diagramm 4.11: Ergebnisse des Work-Package 4

4.2.3 Schlussfolgerung

Durch die Verwendung von Betonen ohne künstliche Luftporen und die Herstellung in einem Fertigteilwerk konnten deutlich homogenere Ergebnisse erzielt werden. Aufgrund der Zwischenergebnisse nach dem Auswerten der ersten beiden Teilserien zur Bestimmung des Widerstandes gegen den Frostangriff mit Taumitteln wurde beschlossen, für die weiteren Untersuchungen das Rezept *R3* als Basis zu verwenden und wie schon im Work-Package 3 nur mehr den Einfluss der *Oberflächenvergütungsmittel 1* und *2* zu untersuchen.

Im Gegensatz zum Work-Package 3 konnte im Rahmen dieses Work-Packages die Wirksamkeit unterschiedlicher Oberflächenvergütungsmittel in Kombination mit unterschiedlichen Bindemitteln auf die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Tausalz nachgewiesen werden. Auf die Abreißfestigkeit ist der Einfluss im Allgemeinen gering, nur die *Oberflächenvergütungsmittel 1* und *2* konnten in Kombination mit dem Beton des Rezeptes *R3* eine signifikante Verbesserung erzielen.

4.3 Work-Package 5

Für die Untersuchungen des Work-Package 5 war es notwendig, mehrere unterschiedliche Betonmischungen herzustellen. Ziel war es, die vorgegebenen Frischbetonkennwerte möglichst genau zu erreichen, deshalb wurden alle Betonmischungen mit einem Labormischer hergestellt. Da der Mischer nur ein Fassungsvermögen von 60 l hat, mussten teilweise die selben Betonmischungen mehrfach hergestellt werden. Um möglichst gleichwertige Betone, im speziellen in Bezug auf den Wassergehalt herzustellen, wurden deshalb alle Gesteinskörnung trocken zugegeben.

Die Probekörper des Work-Package 5 wurden von 21. bis 24.08.2018 hergestellt (siehe Abbildung 4.5).

(a) Entnahme aus Mischer (b) Füllen der Schalungen (c) Beschriften der Prüfkörper

(d) Schneiden der Prüfkörper (e) Applizieren Sprühen (f) Prüfkörper nach Frostangriff mit Taumittel

Abbildung 4.5: Eindrücke zur Prüfkörper Herstellung

4.3.1 Betonherstellung und Eigenschaften

Wie in Kapitel 4.2.3 dargestellt, zeigte die Rezeptur *R3* des Work-Package 4, welche mit einem Normalzement der Familie CEM II/A-LL 32,5 R hergestellt wurde, die deutlichsten Wirkungen der Oberflächenvergütungsmittel. Deshalb bildete diese Rezeptur die Grundlage für alle Untersuchungen in diesem Work-Package.

Tabelle 4.10 gibt einen Überblick über die hergestellten Betonrezepturen und deren Frischbetoneigenschaften. Wenn mehrere Chargen der selben Mischung hergestellt wurden, sind die Werte der einzelnen Mischungen aufgelistet. Wie zu erkennen ist, konnten die Zielwerte bei allen Mischungen sehr gut erreicht werden. Auch waren die Schwankungen Frischbetonkennwerte über die einzelnen Chargen derselben Mischung im Rahmen der Messunsicherheit der Prüfverfahren.

Die Mischung *M1* stellt dabei die Referenz zu den Untersuchungen des Work-Package 4 dar. Der Vergleich mit den Frischbetonkennwerten in Tabelle 4.8 zeigt, dass diese gut übereinstimmen. Der Einfluss einer Applikation durch Walzen wurde mit der Mischung *M2* untersucht, weshalb diese die selbe Mischungszusammensetzung besitzt. Die Mischungen *M3* bis *M5* stellen abweichende Bindemittelgehalte und Wasser-Bindemittelwerte dar. Der Einfluss einer silikatischen Gesteinskörnung wurde erneut mit den drei Chargen der Mischung *M8* untersucht

Da in diesem Work-Package auch der Einfluss des Luftgehaltes auf die Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel bzw. eine mögliche Beeinträchtigung der Mikroluftporen durch das Oberflächenvergütungs-

mittel untersucht wurde, wurde für die Mischung *M6* ein Zielwert von 4,0 % und für die Mischung *M7* ein Zielwert von 8,0 % für den Luftgehalt im Frischbeton angestrebt. Damit entspricht die Mischung *M6* dem unteren Grenzwert und die Mischung *M7* dem oberen Grenzwert für einen Beton der Expositionsklasse XF4. Der Zielwert konnte bei der Mischung *M6* erreicht werden. Die Mischung *M7* zeigte allerdings einen deutlich Abfall des Luftporengehaltes über die Verarbeitungszeit von anfänglich ca. 10 % bis 11 % (aus Rohdichte 2.280 kg/m^3 geschätzt) auf 7,0 % (Rohdichte 2.390 kg/m^3) nach 60 min.

Bei der Auswertung der Luftporenkennwerte im Festbeton konnten folgende Luftporenkennwerte ermittelt werden. Zum Vergleich sind auch die Anforderungen der Expositionsklasse XF4 angegeben.

- *M6*: L300 = 1,15 %, AF = 0,18 mm
- *M7*: L300 = 2,59 %, AF = 0,09 mm
- Expositonsklasse XF4: L300 $\geq$ 1,8 %, AF $\leq$ 0,18 mm

Damit konnte die Mischung *M6* die Anforderungen an die Luftporenkennwerte im Festbeton nicht erfüllen, die Mischung *M7* hingegen sehr deutlich.

M[a]	Gesteins-körnung	Zielwerte			Frischbetonprüfung			
		W/B-Wert soll	Bindemit-telgehalt	Zusatz-mittel	W/B-Wert ist	Rohdichte	Luftporen	Ausbreit-maß
		-	kg/m^3	% v.B.	-	kg/m^3	%	cm
1	kalzitisch	0,43	382	FM[b]: 0,60	0,43 0,43	2.560 2.540	1,1 1,6	35 35
2	kalzitisch	0,43	382	FM[b]: 0,60	0,43 0,44	2.560 2.570	1,0 0,8	36 37
3	kalzitisch	0,48	382	FM[b]: 0,30	0,49	2.530	0,5	42
4	kalzitisch	0,43	440	FM[b]: 0,25	0,43	2.540	0,4	39
5	kalzitisch	0,43	340	FM[b]: 1,00	0,44	2.590	0,3	36
6	kalzitisch	0,43	382	FM[b]: 0,60 LM[c]: 0,17	0,41	2.470	4,0	37
7	kalzitisch	0,43	382	FM[b]: 0,25 LM[c]: 0,21	0,42	2.390	7,0	42
8	silikatisch	0,43	382	FM[b]: 1,40	0,43 0,44 0,43	2.540 2.550 2.560	0,9 0,8 1,0	28 28 28

[a] M…Mischungsnummer [b] FM…Fließmittel [c] LM…Luftporenmittel

Tabelle 4.10: Übersicht Betonsorten Work-Package 5

4.3.2 Auswertung der Versuche

Wie schon erwähnt, wurde der Untersuchungsumfang wieder auf zwei Oberflächenvergütungsmittel reduziert. Die Zuordnung der Oberflächenvergütungsmittel und der 0-Probe in Diagramm 4.12 ist Tabelle 4.11 zu entnehmen.

Legende
OVG 1
OVG 2
0-Probe

Tabelle 4.11: Legende OVGs

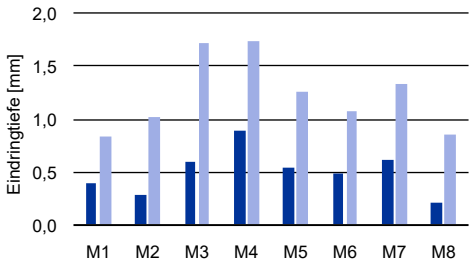
Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel

Die Eindringtiefen der Oberflächenvergütungsmittel ist in Diagramm 4.12(a) dargestellt. Vergleicht man die Referenzmischung *M1* mit den Eindringtiefen des Work-Package 4 in Diagramm 4.10 so erkennt man, dass diese im selben Größenbereich liegen. Auch der Trend, dass das *OVG* 2 tiefer eindringt, ist klar zu erkennen. Ein Einfluss durch das Walzen auf die Eindringtiefe ist, wie bereits in Kapitel 4.1.2.6 festgestellt, nicht zu erkennen.

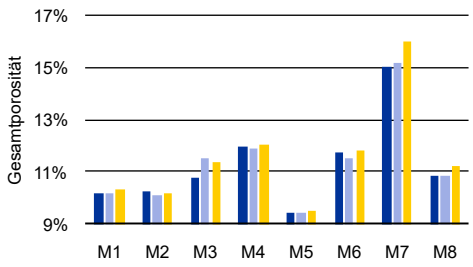
Durch einen höheren Wasser-Bindemittelwert (*M3*) oder einen höheren Bindemittelgehalt (*M4*) konnte die Eindringtiefe erhöht werden. Dies ist auf die höhere Kapillarporosität im Zementstein beziehungsweise auf den höheren Zementsteingehalt und damit auf eine höhere Saugwirkung zurück zu führen. Dieser Trend ist bei der Mischung *M5* nicht feststellbar. Dies wird zum Teil auf den deutlich höheren Gehalt an Fließmittel zurück geführt, welches notwendig war, um eine vergleichbare Verarbeitbarkeit zu erreichen.

Das Einbringen von künstlichen Luftporen erhöht zwar die Gesamtporosität des Betons, unterbricht allerdings auch die Kapillarporen. Deshalb ist kein signifikanter Einfluss des Gehaltes an künstlichen Luftporen auf die Eindringtiefe feststellbar.

Ein Einfluss der Gesteinskörnung auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel war im Rahmen dieser Untersuchungen nicht feststellbar.



(a) Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel



(b) Gesamtporosität

Diagramm 4.12: Ergebnisse des Work-Package 5

Gesamtporosität

Die Gesamtporosität in Diagramm 4.12(b) ist im Gegensatz zum Work-Package 4 um rund 2 % geringer. Dies ist auf die geänderten Probekörperabmessungen und das manuelle Verdichten auf dem Laborrütteltisch zurückzuführen. Der Einfluss der Unterschiedlichen Wasser-Bindemittelwerte und Bindemittelgehalte der Mischungen *M3* bis *M5* ist klar zu erkennen.

Der um 3 % höhere Gehalt an Luftporen im Frischbeton der Mischung *M6* in Relation zu den Mischungen *M1* und *M2* führt zu einem Anstieg der Gesamtporosität von rund 2 %. Bei der Mischung *M7* ist die Differenz im Frisch- und Festbeton jeweils rund 6 %. Es ist dies auch die einzige Mischung, bei der eine geringe Abnahme der Gesamtporosität durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel feststellbar ist, welche aber noch im Bereich der Messunsicherheit liegt.

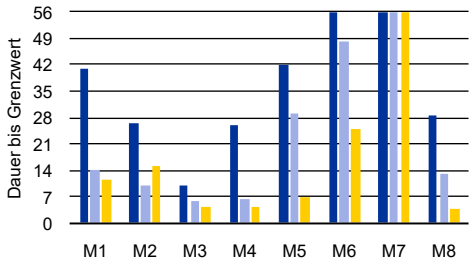
Die leicht höhere Gesamtporosität der Mischung *M8*, welche mit einer silikatischen Gesteinskörnung hergestellt wurde, ist auf die höhere Wasseraufnahme dieser Gesteinskörnungen zurück zu führen. Dies deckt sich nicht mit dem Trend in Diagramm 4.1(a) des Work-Package 3, allerdings waren im Work-Package 3 die Gesamtporositäten deutlich höher und inhomogener.

Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel

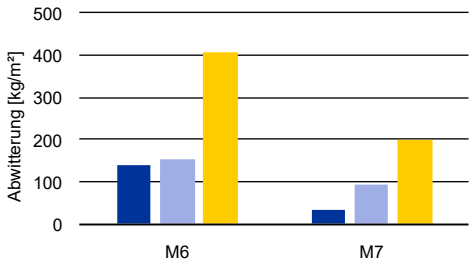
Der Vergleich der Referenzmischung *M1* in Diagramm 4.12(c) mit den Ergebnissen in Diagramm 4.11(b) zeigt eine gute Übereinstimmung der Beständigkeit für das *Oberflächenvergütungsmittel 1* und die *0-Probe*, allerdings hat sich die Beständigkeit der Prüfkörper, welche mit dem *Oberflächenvergütungsmittel 2* appliziert wurden, mehr als halbiert. Durch das Applizieren der Oberflächenvergütungsmittel durch Walzen konnte im Rahmen dieser Untersuchungen eine geringere Wirkung als durch Sprühen festgestellt werden.

Der Versuchsablauf und die Auswertung der Ergebnisse erfolgt analog zur Vorgehensweise in Kapitel 4.2.2.

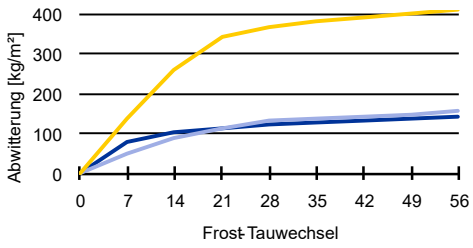
Ein Erhöhung des Wasser-Bindemittelwertes und auch des Bindemittelgehaltes führte zu einer deutlichen Reduktion der Beständigkeit. Dies ist auf den selben Mechanismus wie die Auswirkungen auf die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel zurückzuführen. Allerdings konnte das *Oberflächenvergütungsmittel 1* durch den höheren Bindemittelgehalt der Mischung *M4* eine deutliche Erhöhung der Beständigkeit bewirken. Im Rahmen dieser Untersuchungen stellte der Bindemittelgehalt der Mischung *M1* ein Optimum in Bezug auf die Beständigkeit der *0-Probe* dar. Eine Reduktion des Bindemittelgehaltes wie in Mischung *M5* verringerte die Beständigkeit. Allerdings zeigte diese Mischung die deutlichsten Steigerungen der Beständigkeit durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel. Es wird vermutet, dass dies auf einen Einfluss des Fließmittels zurück zu führen ist. Im Rahmen diese Forschungsprojektes wurden dazu allerdings keine detaillierten Untersuchungen durchgeführt, weshalb eine definitive Aussage nicht möglich ist. Die Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel in Relation zur *0-Probe* bei höheren Wasser-Bindemittelwerten der Mischung *M3*, war im Rahmen dieser Untersuchungen allerdings deutlich reduziert.



(c) Beständigkeit



(d) Abwitterung nach 56 Frost-Tauwechseln der Mischungen mit künstlichen Luftporen



(e) Zeitlicher Verlauf der Abwitterungen an der Mischung *M6*

Diagramm 4.12: Ergebnisse des Work-Package 5

Der Einsatz der silikatischen Gesteinskörnung zeigte in diesem Work-Package, im Gegensatz zu Kapitel 4.1.2.7 eine Abnahme der Beständigkeit in Bezug auf die kalzitisch/dolomitsche Gesteinskörnung. Dadurch wird die Aussage in Kapitel 4.1.4 in Bezug auf die Inhomogenität und die Probleme bei der Herstellung bestätigt. Auf die Wirksamkeit der Oberflächenvergütungsmittel in Bezug auf die *0-Probe* konnten allerdings keine Auswirkungen festgestellt werden.

Durch das Einbringen von künstlichen Luftporen konnte die Beständigkeit soweit erhöht werden, dass eine Auswertung mit Diagramm 4.12(c) nicht sinnvoll ist. Deshalb ist in Diagramm 4.12(d) die gesamte Abwitterung nach 56 Frost-Tauwechseln dargestellt. Der positive Einfluss des höheren Gehaltes an künstlichen Luftporen in der Mischung *M7* ist in einer Reduktion der Abwitterungen auf die Hälfte zu erkennen. Die geringen Abwitterungen der *0-Proben* konnten durch die Applikation der Oberflächenvergütungsmittel nochmals deutlich reduziert werden.

In Diagramm 4.12(e) ist der zeitliche Verlauf der Abwitterungen über die 56 Frost-Tauwechsel zu er-

kennen. Es ist zu erkennen, dass durch die Oberflächenvergütungsmittel die initiale Abwitterung über die ersten 21 Forst-Tauwechsel deutlich reduziert wird, der weitere Verlauf bis zu 56 Frost-Tauwechseln dann aber annähernd parallel zu der Abwitterung der *0-Probe* verläuft. Dies kann durch die Stabilisierung des Betongefüges an der Oberfläche erklärt werden, wodurch mögliche Oberflächendefekte wie Mikrorisse, die nach dem Erstarren vorhanden sind, durch die Oberflächenvergütungsmittel im Idealfall repariert, zumindest aber reduziert werden. Durch die Oberflächenvergütungsmittel kann allerdings der grundsätzliche Mechanismus der Abwitterung durch den Frostangriff mit Taumitteln nicht aufgehalten werden.

Die in Kapitel 3.1.4 beschriebene Befürchtung, dass durch die Oberflächenvergütungsmittel die künstlichen Luftporen verschlossen werden und ihre Wirkung deshalb nicht mehr entfalten können, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht bestätigt werden. Im Gegenteil konnten die Abwitterung durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel auf bis zum einem Viertel reduziert werden.

Generell lässt sich aus den Untersuchungen zur Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel, wie schon in den vorherigen Work-Package, die deutliche Wirkung des *Oberflächenvergütungsmittel 1* erkennen.

4.3.3 Schlussfolgerung

Es konnten in den Laborversuchen sehr homogene Balken hergestellt werden, aus welchen die Prüfkörper geschnitten wurden. Auch die verwendete Betonrezeptur hat sich als geeignet erwiesen und es konnten die gewünschten Abwandlungen der Rezeptur bei gleichbleibender Verarbeitbarkeit erreicht werden. Aus diesen Gründen wird diese Rezeptur und auch die Dimension der Balken auch für die Untersuchungen zu den Umweltbedingungen und Nachbehandlungen im Work-Package 6 wieder verwendet werden.

Im Rahmen dieses Work-Packages konnten folgende Erkenntisse gewonnen werden:

- Der Einfluss von unterschiedlichen Wasser-Bindemittelwerten und Bindemittelgehalten auf die Gesamtporosität konnte bestätigt werden.
- Es konnte wie schon in den vorherigen Work-Packages keine eindeutige Korrelation der Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel und der Gesamtporosität erkannt werden.
- Die positive Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel auf die Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel konnte eindeutig nachgewiesen werden.
- Die Wirkung von künstlichen Luftporen wird durch die Oberflächenvergütungsmittel nicht behindert.
- Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte ein optimaler Bindemittelgehalt für den verwendeten Normalzement der Familie CEM II/A-LL 32,5 R von 382 kg/m^3, in Bezug auf die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel, festgestellt werden. Eine weitere Erhöhung des Bindemittelgehaltes führte zu einer Reduzierung der Beständigkeit.
- Durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel wird vor allem die Abwitterung innerhalb der ersten 21 Forst-Tauwechsel deutlich reduziert. Dies lässt auf eine Verfestigung der Oberfläche schließen, welche allerdings den grundsätzlichen Mechanismus der Abwitterung nicht verhindert.

4.4 Work-Package 6

4.4.1 Umweltbedingungen und Nachbehandlung

4.4.1.1 Prüfkörperherstellung und Zuordnung

Die nachfolgende Tabelle 4.12 gibt eine Überblick über die hergestellten Balken und deren Nachbehandlung. Alle Mischungen wurden auf Basis des Rezeptes *R3* des Work-Package 3 hergestellt.

Balken Nr.	Bezeichnung	Lagerungs-temperatur	Applikation Alter	Applikation Temperatur	Reinigen	PF[a]
	Referenzproben					
6-10	Referenz Schalungsfläche	20 °C	21 Tage	20 °C	Ja	S
6-11	Referenz abgezogene Oberfläche					O
	Einfluss der Trenn- und Nachbehandlungsmittel					
6-12	Trennmittel	20 °C	21 Tage	20 °C	Nein	S
6-13	Nachbehandlungsmittel I				Ja	Oberfläche
6-14					Nein	
6-15	Nachbehandlungsmittel II				Ja	
6-16					Nein	
6-17	OVGs als Nachbehandlungsmittel		A[b]		Nein	
	Betonieren bei 5 °C					
6-18	Referenz 5 °C	7 Tage 5 °C, Rest 20 °C	21 Tage	20 °C	Ja	O (S)
6-19	OVGs als Nachbehandlung bei 5 °C		A[b]		Nein	O
	Applikation bei −5 °C					
6-20	Applikation −5 °C	−5 °C 1 Tag vor Appl.	21 Tage	−5 °C	Ja	S
6-11	Applikation −5 °C und Sprühwasser					

[a] PF…Prüffläche mit S…Schalungsfläche und O…abgezogene Oberfläche [b] A…unmittelbar nach dem Ausschalen

Tabelle 4.12: Übersicht der hergestellten Balken des Work-Package 6 zur Untersuchung des Einflusses der Umweltbedingungen und der Nachbehandlung

Die Balken wurde im Labor der ISB hergestellt. Da dort nur ein Labormischer mit 45 l Nutzvolumen zur Verfügung stand, wurde nur bei der ersten Referenzmischung eine Frischbetonprüfung durchgeführt. Dabei konnten folgenden Werte ermitteln werden:

- Ausbreitmaß = 40 cm
- Rohdichte = 2.540 kg/m^3
- Wassergehalt = 166 kg/m^3 und damit W/B-Wert = 0,43
- Luftporen im Frischbeton = 1,0 %

Damit besitzt der Frischbeton vergleichbare Eigenschaften zu den Betonten der Work-Packages 3 und 4.

Zur Untersuchung des Einflusses des Trennmittels (Balken *6-12*) wurde eine größere Menge an Trennmittel als üblich aufgetragen. Das überschüssige Trennmittel stieg während dem Verdichten an der Schalungsfläche auf und verteilte sich beim Abziehen über die gesamte Oberfläche. Die Balken *6-13* bis *6-17* wurden an der freien Oberfläche mit dem entsprechenden Nachbehandlungsmittel beziehungsweise

Oberflächenvergütungsmittel unmittelbar nach der Betonage behandelt. An den Schalungsflächen erfolgte die Behandlung unmittelbar nach dem Ausschalen.

Das *Nachbehandlungsmittel I* ist ein lösemittelfreies, sprühbares Nachbehandlungsmittel auf Basis einer wässrigen Mineralölemulsion mit einem guten Sperrfaktor und ist für nachfolgende Beschichtungen geeignet. Das *Nachbehandlungsmittel II* ist ein lösemittelfreies, sprühbares Nachbehandlungsmittel auf Basis einer wässrigen Wachsemulsion mit einem hohen Sperrfaktor. Aufgrund der Wachsbasis ist das *Nachbehandlungsmittel II* nicht für nachfolgende Beschichtungen geeignet.

Um eine Umgebungstemperatur von 5 °C simulieren zu können, wurden alle Bestandteile der Mischungen für 24 h bei 5 °C gelagert. Dadurch konnte ein Frischbetontemperatur von 7,2 °C erreicht werden.

Wie in Abbildung 4.6 zu erkennen, konnten bereits bei der Applikation der Oberflächenvergütungsmittel auf die Prüfkörper, welche nach der Betonage mit dem *Nachbehandlungsmittel II* behandelt wurden, deutliche Unterschiede festgestellt werden. Dies deckt sich mit dem Datenblatt, in dem auf die erhöhte Rutschgefahr bei Nässe hingewiesen wird. Trotz der Reinigung mit einem Hochdruckreiniger mit ca. 200 bar, neigten die Oberflächenvergütungsmittel zur Bildung von Perlen und benetzten augenscheinlich nicht die gesamte Fläche. Durch die Rotfärbung der Oberflächenvergütungsmittel durch den Fluoreszierenden Farbstoff Eosin sind in Abbildung 4.6(a) die Perlen besonders deutlich zu erkennen. Dabei handelt es sich um die Prüfkörper aus den Balken *6-15* und *6-16*.

(a) Vergleich nach der Applikation der Prüfkörper zur Bestimmung der Eindringtiefe

(b) Vergleich nach der Applikation

Abbildung 4.6: Vergleich der Oberflächen nach der Applikation

4.4.1.2 Auswertung der Versuche

Die Zuordnung der Oberflächenvergütungsmittel und der 0-Probe in Diagramm 4.13 ist Tabelle 4.13 zu entnehmen. Die abgezoge Oberfläche wird im nachfolgenden Diagramm 4.13 nur als Oberfläche bezeichnet.

Legende
OVG 1
OVG 2
0-Probe

Tabelle 4.13: Legende OVGs

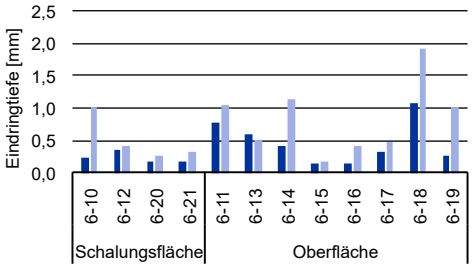
Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel

Die Eindringtiefen der Oberflächenvergütungsmittel ist in Diagramm 4.13(a) dargestellt. Vergleicht man die Referenzproben *6-10* und *6-11* mit den Eindringtiefen des Work-Package 4 in Diagramm 4.10 so erkennt man, dass diese mit Ausnahme des *Oberflächenvergütungsmittel 1* an der Schalungsfläche im selben Größenbereich liegen. Aufgrund der geringen Eindringtiefe und des kleinen Messausschnittes (siehe dazu auch Abbildung 4.4), liegt die Abweichung aber noch im Bereich der Messunsicherheit.

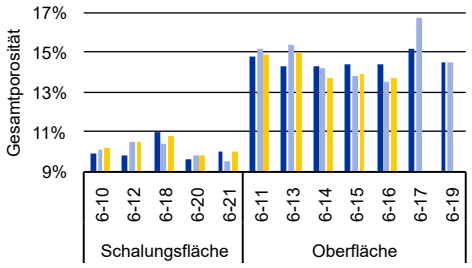
An der Schalungsfläche lässt sich erkennen, dass durch das Trennmittel die Eindringtiefe des *Oberflächenvergütungsmittel 2* deutlich reduziert wird. Im Gegensatz zu den Untersuchungen des Work-Package 3

wurde auch die Eindringtiefe durch die Applikation bei −5 °C deutlich reduziert. Es konnte allerdings keine weitere Reduktion der Eindringtiefe durch das Sprühwasser festgestellt werden. Es wird angenommen, dass die Oberflächenvergütungsmittel noch vor dem Gefrieren bis in die gemessenen Tiefen eindringen konnten.

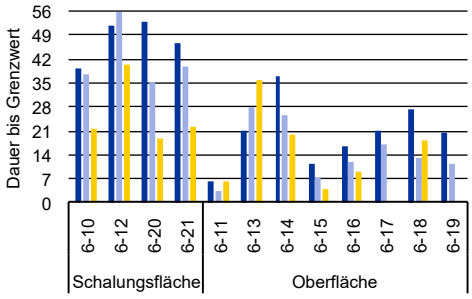
Die Messungen der Eindringtiefe an der abgezogenen Oberfläche sind generell mit einem größeren Fehler behaftet, da auf Grund der Oberflächenrauigkeit einerseits die genaue Lage der Oberfläche schwer zu erkennen ist und andererseits der kürzeste Abstand zur Betonoberfläche außerhalb der Betrachtungsebene liegen kann. Dennoch können folgenden Aussagen aus dem Diagramm getroffen werden. Durch die Nachbehandlungsmittel, im speziellen das Nachbehandlungsmittel II, wird das Eindringen der Oberflächenvergütungsmittel behindert.



(a) Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel



(b) Gesamtporosität



(c) Beständigkeit

Diagramm 4.13: Ergebnisse des Work-Package 6 Umweltbedingungen und Nachbehandlung

Gesamtporosität

Vergleicht man die Gesamtporosität in Diagramm 4.13(b) mit den Gesamtporosität des Work-Package 4 in Diagramm 4.11(a), so kann man feststellen, dass die Gesamtporosität an der Schalungsfläche um ca. 2 % abgenommen, an der Oberfläche hingegen um ca. 1 % zugenommen hat. Damit liegen die Gesamtporositäten im Bereich des Work-Package 5. Die Abweichungen zum Work-Package 4 können somit auf die unterschiedlichen Verdichtungsweisen und Abmessungen zurückgeführt werden.

Es ist aber zu erkennen, dass die Ergebnisse an der Schalungsfläche und an der abgezogenen Oberfläche in sich sehr homogen sind. Dies ist ein Indiz für eine sehr gleichmäßige Herstellung und Verarbeitung der einzelnen Mischungen.

Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel

Der Versuchsablauf und die Auswertung der Ergebnisse erfolgt analog zur Vorgehensweise in Kapitel 4.2.2.

Die Beständigkeiten der *0-Proben* der Referenzproben *6-10* und *6-11* in Diagramm 4.13(c) sind mit den Beständigkeiten des Work-Package 4 vergleichbar. Allerdings konnte an der Schalungsfläche im Rahmen dieser Untersuchungen das *Oberflächenvergütungsmittel 2* die selbe Wirkung erreichen wie das *Oberflächenvergütungsmittel 1*. An der abgezogegen Oberfläche konnte keines der beiden Oberflächenvergütungsmittel eine Wirkung zeigen.

Durch das Trennmittel (*6-12*) wurde die Beständigkeit der *0-Proben* deutlich erhöht. Dies wird auf die Versuchsanordnung zurück geführt, wodurch das Trennmittel an der Oberfläche verbleibt und nicht abgewaschen wird. Deshalb kann das Eindringen der Prüfflüssigkeit durch die hydrophobe Wirkung des Trennmittels beeinträchtige werden. Dennoch stellt das Trennmittel im realen Einsatz keinen Schutz dar, da es einfach abgewaschen werden kann. Auf die Wirksamkeit der Oberflächenvergütungsmittel hatte das Trennmittel allerdings keinen negativen Einfluss, auch wenn die relative Wirksamkeit gegenüber der *0 Probe* geringer als bei der Referenzprobe erscheint.

Eine Auswertung der Ergebnisse der Untersuchungen an der abgezogenen Oberfläche ist aufgrund der

höheren Streuung der Messergebnisse schwierig und teilweise sind widersprüchliche Trends zu erkennen. Durch das *Nachbehandlungsmittel I* konnte die Beständigkeit der *0 Probe* deutlich erhöht werden, allerdings liegen die Wirkungen der Oberflächenvergütungsmittel im Streubereich der *0 Probe*. Umgekehrt sieht dies beim *Nachbehandlungsmittel II* aus. Auf die Beständigkeit der *0 Probe* ist kein signifikanter Einfluss zu erkennen, hingegen zeigen die Oberflächenvergütungsmittel eine deutliche Wirkung. Die Untersuchung der Wirksamkeit der Nachbehandlungsmittel war allerdings nicht das Ziel dieses Forschungsprojektes. In Bezug auf die Beeinflussung der Oberflächenvergütungsmittel, müsste diese nach dem derzeitigen Stand für jedes Nachbehandlungsmittel getrennt untersucht werden.

Betrachtet man den Zeitpunkt der Applikation der Oberflächenvergütungsmittel, so sind ebenfalls Widersprüche zu erkennen. Werden die Oberflächenvergütungsmittel bei Betonagetemperaturen von 20 °C als Nachbehandlungsmittel eingesetzt ist eine deutliche Erhöhung der Beständigkeit gegenüber der Applikation nach 21 Tagen zu erkennen. Bei Betonagetemperaturen von 5 °C dreht sich das Verhalten um.

Eine Applikation bei −5 °C behindert die Wirksamkeit der Oberflächenvergütungsmittel nicht. Auch eine Behandlung mit Sprühwasser während des Auftauens hatte im Rahmen dieser Untersuchungen keinen negativen Einfluss. Dies bestätigt die Erkenntnisse aus dem Work-Package 3.

4.4.1.3 Schlussfolgerung

Im Rahmen diese Teiles des Work-Package 6 konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Durch Trennmittel wird die Wirksamkeit der Oberflächenvergütungsmittel gegen den Frostangriff mit Taumittel nicht behindert. Dennoch scheint eine Reinigung der Oberfläche sinnvoll, um eine höhere Eindringtiefe und damit einen potentiell höheren Schutz durch die Oberflächenvergütungsmittel zu erreichen.
- Allgemein kann keine klare Aussage zu den Wechselwirkungen mit Nachbehandlungsmitteln getroffen werden. Nach derzeitigem Stand muss dies für jede Kombination aus Nachbehandlungsmittel und Oberflächenvergütungsmittel getrennt untersucht werden. Eine vorherige Reinigung führte im Rahmen dieser Untersuchungen zwar nicht zwangsläufig zu einem besseren Ergebnis, ist aber dennoch zu empfehlen.
- Die untersuchten Oberflächenvergütungsmittel zeigten eine bedingte Eignung als Nachbehandlungsmittel. Dabei wurden die Auswirkungen auf die Entwicklung anderer Betonparameter als die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel nicht untersucht. Auch eine Veränderung von Sichtbetoneigenschaften wurde nicht untersucht.
- Die untersuchten Oberflächenvergütungsmittel eignen sich auch für eine Applikation auf Betonbauteile bei Temperaturen um −5 °C. Somit können diese auch noch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes eingesetzt werden.

4.4.2 Dauerhaftigkeit und nachträgliche Applikation

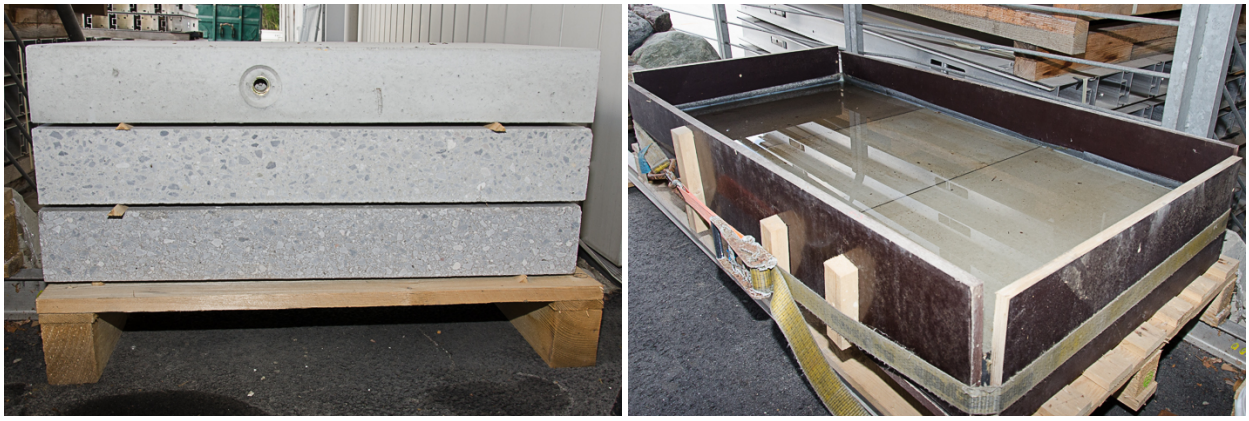
4.4.2.1 Herstellung und Lagerung

Wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben wurden die Versuchsplatten bereits im Rahmen des Work-Package 4 hergestellt. Deshalb sei auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften in Kapitel 4.2.1 verwiesen.

Hier sei nur nochmals die Zuordnung der eingesetzten Bindemittelfamilie zu den Rezepten dargestellt:

- Rezept *R1*: CEM II/A-M (S-L) 42,5 N
- Rezept *R2*: CEM I 42,5 R - C_3A-frei
- Rezept *R3*: CEM II/A-LL 32,5 R

In Abbildung 4.7 ist die Lagerung der Platten zu erkennen.



(a) Karbonatisierung

(b) Karbonatiesierung und Chloridbelastung - Abbildung mit aufgebrachter gesättigter NaCl-Lösung

Abbildung 4.7: Lagerung der Versuchsplatte

Bei den nachträglich applizierten Prüfkörpern wurden nur mehr die *Oberflächenvergütungsmittel 1* und *2* eingesetzt.

4.4.2.2 Auswertung der Versuche

Im Rahmen des Work-Package 4 wurde eine größere Anzahl von Oberflächenvergütungsmitteln untersucht. Da diese schon appliziert waren, wurden auch diese Prüfkörper mit untersucht. Die Zuordnung der Oberflächenvergütungsmittel und der 0-Probe in Diagramm 4.14 ist Tabelle 4.14 zu entnehmen.

Die Prüfkörper, die bereits im Rahmen des Work-Package 4 appliziert wurden und anschließend monatlich mit einem Hochdruckreiniger mit ca. 200 bar gereinigt wurden, werden in Diagramm 4.14 als 12x waschen bezeichnet.

Legende
OVG 1
OVG 2
OVG 3
OVG 4
OVG 5
0-Probe

Tabelle 4.14: Legende OVGs

Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel

Die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel der monatlich gereinigten Prüfkörper wurde bereits im Rahmen des Work-Package 4 anhand der Prüfkörper des Work-Package 4 bestimmt, da diese zugleich hergestellt und appliziert wurden.

Wie in Diagramm 4.14(a) zu erkennen ist, konnten Oberflächenvergütungsmittel nach einem Jahr reiner Karbonatisierung etwas tiefer eindringen. Durch die Umwandlung des Calciumhydroxid in Calciumcarbonat nimmt das Volumen zu und es werden vor allem kleine Poren verschlossen bzw. verkleinert. Dadurch werden die Kapillaren nicht mehr unterbrochen und die Oberflächenvergütungsmittel könnten tiefer in den Zementstein gesaugt werden.

Hingegen wurde durch die zusätzliche Chloridbelastung die Eindringung behindert. Dies wird auf einen Verschluss der Poren durch schwer lösliche Salzkristalle zurück geführt, die durch die Reinigung vor der Applikation nicht gelöst werden konnten.

Gesamtporosität

Ebenso wie die Eindringtiefe wurde auch die Gesamtporosität der monatlich gereinigten Prüfkörper bereits im Rahmen des Work-Package 4 bestimmt und wurde im Rahmen dieser Untersuchungen nicht erneut bestimmt. Es ist aber davon auszugehen, dass die Ergebnisse in der Größenordnung der rein karbonatisierten Prüfkörper liegen.

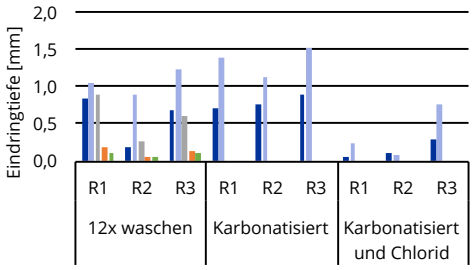
Durch die reine Karbonatisierung fiel die Gesamtporosität bei allen Rezepturen auf ca. 11 %. Wurden die Prüfkörper noch mit Chloriden belastet, fiel die Gesamtporosität auf ca. 10 %. Dies kann, wie schon die Auswirkungen auf die Eindringtiefe, auf das reduzierte Porenvolumen durch die Karbonatisierung und das Verschließen von Poren durch schwer lösliche Salzkristalle erklärt werden, wodurch in beiden Fällen die Gesamtporosität reduziert wurde.

Beständigkeit gegen Frostangriff mit Taumittel

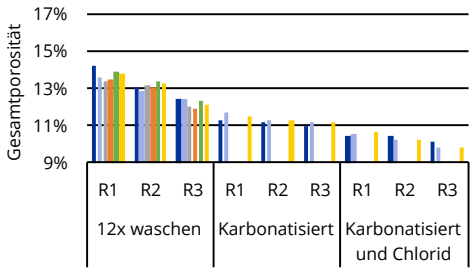
Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse der monatlich gereinigten Prüfkörper und der nachträglich applizierten Prüfkörper in Diagramm 4.14(c) und Diagramm 4.14(d) dargestellt.

Bei allen reaktiven Oberflächenvergütungsmitteln ist zu erkennen, dass diese, nachdem sie ein Jahr appliziert waren und dabei monatlich gereinigt wurden, keine Wirkung mehr zeigen. Die Prüfkörper, die mit den nicht reaktiven Beschichtungen appliziert wurden, konnten Beständigkeiten in der Größenordnung des Work-Package 4 erreichen. Eine Abtragung der vergüteten Betonoberfläche durch das Reinigen ist auszuschließen, da bei keinem Probekörper eine solche Abtragung zu erkennen war.

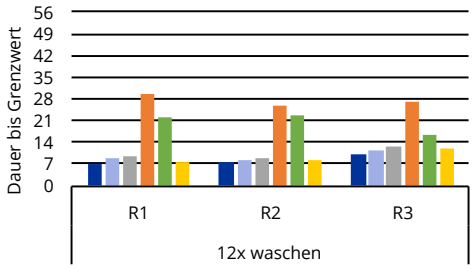
Es wird angenommen, dass die gesamten neu gebildeten CSH-Phasen über das erste Jahr karbonatisiert wurden und somit keinen stabilisierenden Effekt auf die Betonoberfläche hatten. Die nicht reaktiven Beschichtungen wurden auch durch das Reinigen nicht von der Oberfläche gelöst und konnten somit ihre hydrophobierende Wirkung zeigen.



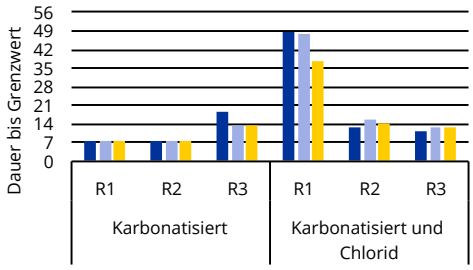
(a) Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel



(b) Gesamtporosität



(c) Beständigkeit der 12x gewaschenen Prüfkörper



(d) Beständigkeit der nachträglich applizierten Prüfkörper

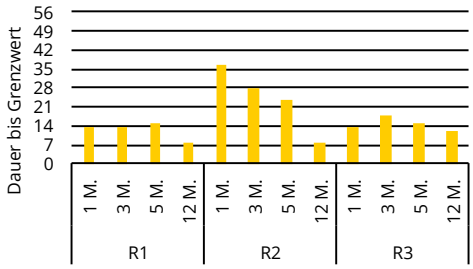
Diagramm 4.14: Ergebnisse des Work-Package 6 Dauerhaftigkeit und nachträgliche Applikation

Wurden die Prüfkörper erst ein Jahr nach der Herstellung appliziert, zeigten die Oberflächenvergütungsmittel im Allgemeinen keine Wirkung. Es ist davon auszugehen, dass durch die Karbonatisierung in den oberflächennahen Schichten kein Kalziumhydroxid mehr zur Verfügung steht und somit auch keine Veränderung des Betongefüges stattfinden kann.

Der Abfall der Beständigkeiten der *0-Proben* ist mit den Ergebnissen in Diagramm 4.14(c) vergleichbar.

Eine Ausnahme bilden die Prüfkörper des Rezeptes *R1*, welche einer Karbonatisierung und Chloridbelastung ausgesetzt wurden. Die Beständigkeit der *0-Probe* hat sich im Vergleich zum Work-Package 4 mehr als verdoppelt, auch bei den applizierten Prüfkörper hat sich die Beständigkeit erhöht. Da kein betontechnologischer Grund für die erhöhte Beständigkeit gefunden werden konnten und auch die Prüfkörper aller anderen Serien eine deutliche Reduktion der Beständigkeit zeigten, wird angenommen, dass aus nicht erklärbaren Gründen die Salzrückstände zu einer gesättigten NaCl-Lösung geführt haben, bei der der Gefrierpunkt bei −21 °C liegt. Da der kältesten Punkt in einem Intervall von −18 °C bis −21 °C liegt, ist es möglich, dass die Prüfflüssigkeit bei diesen Prüfkörper nicht gefroren ist und somit auch zu keiner Schädigung der Betonoberfläche geführt hat. Um diese Vermutung bestätigen zu können oder eine andere Ursache zu finden, wären weitere Untersuchungen nötig, die allerdings nicht mehr im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt werden konnten.

Diagramm 4.14(e) stellt den zeitlichen Verlauf der Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel geordnet nach dem Alter der *0-Proben* zum Start der Prüfungen dar. Bei allen untersuchten Rezepturen konnte ein Abfall nach einem Jahr festgestellt werden. Besonders deutlich ist dies bei der Rezeptur *R2*.



(e) Zeitlicher Verlauf der Beständigkeit über zwölf Monate

Diagramm 4.14: Ergebnisse des Work-Package 6 Dauerhaftigkeit und nachträgliche Applikation

4.4.2.3 Schlussfolgerung

Im Rahmen der Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Oberflächenvergütungsmittel konnte gezeigt werden, dass die reaktiven Oberflächenvergütungsmittel ihre Wirkung nach einem Jahr bereits verlieren. Es wird angenommen, dass sich die neu gebildeten CSH-Phasen in den oberflächennahen Schichten durch Karbonatisierung umwandeln und somit keine Vergütung der Betonoberfläche mehr vorhanden ist. Hingegen wurden die nicht reaktiven Beschichtungen auch nicht durch das zwölfmalige Reinigen abgetragen.

Die reaktiven Oberflächenvergütungsmittel sind nicht dazu geeignet, zu einem späteren Zeitpunkt appliziert zu werden, da in den oberflächennahen Schichten nicht mehr ausreichend Kalziumhydroxid vorhanden ist, um mit den Oberflächenvergütungsmitteln zu reagieren und das Betongefüge zu verbessern. Ob die Beständigkeit durch eine nachträgliche Applikation von nicht reaktiven Beschichtungen verbessert werden kann, wurde in diesem Forschungsprojekt nicht untersucht, da dies zu Beginn nicht geplant war und nach dem Ende dieses Work-Packages keine Prüfkörper mehr zur Verfügung standen.

Des Weiteren konnte eine Reduktion der Beständigkeit gegenüber dem Frostangriff mit Taumitteln mit zunehmendem Alter der Prüfkörper festgestellt werden. Da diese Effekte erst zum Ende des Forschungsprojektes festgestellt werden konnten, konnte diese auch nicht mehr im Detail untersucht werden.

4.4.3 Brandversuche

4.4.3.1 Herstellen und Spannen der Versuchskörper

Für die Betonage der Versuchskörper wurde ein Beton in Anlehnung an den Beton der Galerie Fallenderbach, welcher die Grundlage für die Betonrezeptur der Galerie Senftenberg darstellte, verwendet. Die Frisch- und Festbetonparameter können Tabelle 4.15 entnommen werden.

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Dolomit	
Bindemittel	CEM I 42,5 HS	290 kg/m^3
	Hydraulit M	80 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,44	180 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,64 % v.B.
	Lufporenbildner	0,28 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	26,1 °C	
Ausbreitmaß nach 10 min	51 cm	
Luftporen im Frischbeton	5,6 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	47,9 MPa	

Tabelle 4.15: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - Work-Package 6 Brandversuche

(a) Vorbereiten der Schalung (b) Betonage (c) Spannen

(d) Einheben in den Brandstand (e) Versuchsdurchführung (f) Blick in den Ofen nach einem Versuch

Abbildung 4.8: Eindrücke zur Herstellung der Brandversuchsplatten und der Brandversuche

Nach der Betonage wurde die Brandversuchsplatten für 14 Tage abgedeckt auf den Schaltafeln gelagert. Im Anschluss wurden die Platten mit einem Kran aufgestellt und stehend bis zum Spannen der Litzen gelagert. Die Oberflächenvergütungsmittel wurden nach 21 Tagen appliziert. Zwei Tage vor Versuchsbeginn wurden die Platten wieder umgelegt und auf Kanthölzern gelagert um die Prüfflächen nicht zu beschädi-

gen. In dieser Lagen wurden dann die Litzen in Längsrichtung mit 175 kN und in Querrichtung mit 180 kN gespannt.

4.4.3.2 Auswertung der Versuche

Wie bereits in Kapitel 3.2.1.4 erklärt, wurden die Versuche mit reduzierter Brennerleistung durchgeführt. Durch die reduzierte Leistung und das schnelle Versagen der Brandversuchsplatten konnte sich im Brandraum keine homogene Temperaturverteilung aufbauen, deshalb wurde die Temperatur an zwei Stellen in der Nähe der Prüffläche gemessen. Der erste Temperaturfühler wurde dabei in der Mitte der Platte und der zweite im Bereich des Rauchabzuges positioniert. Da es sich um Fühler in einem dünnen Metallschutzrohr handelte, kann die Position durch die ersten Abplatzungen verschoben worden sein. Die Lage der Sensoren kann Abbildung 4.9 entnommen werden.

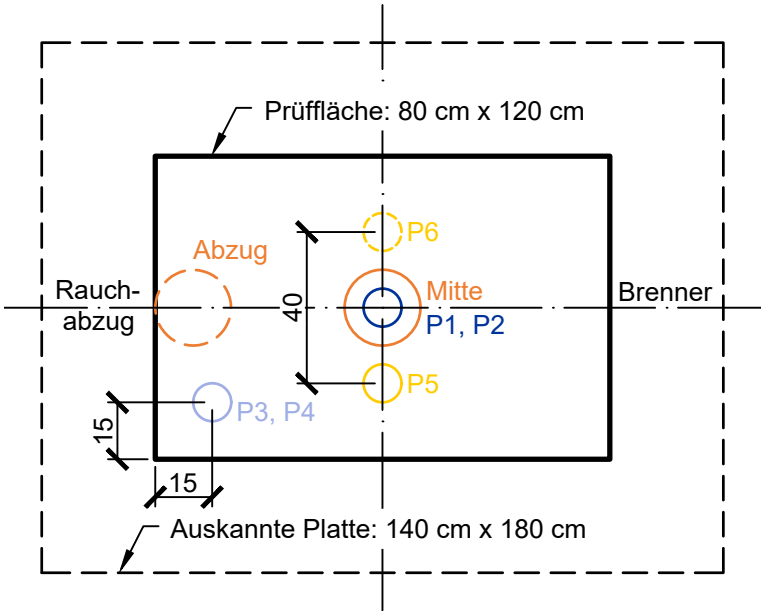
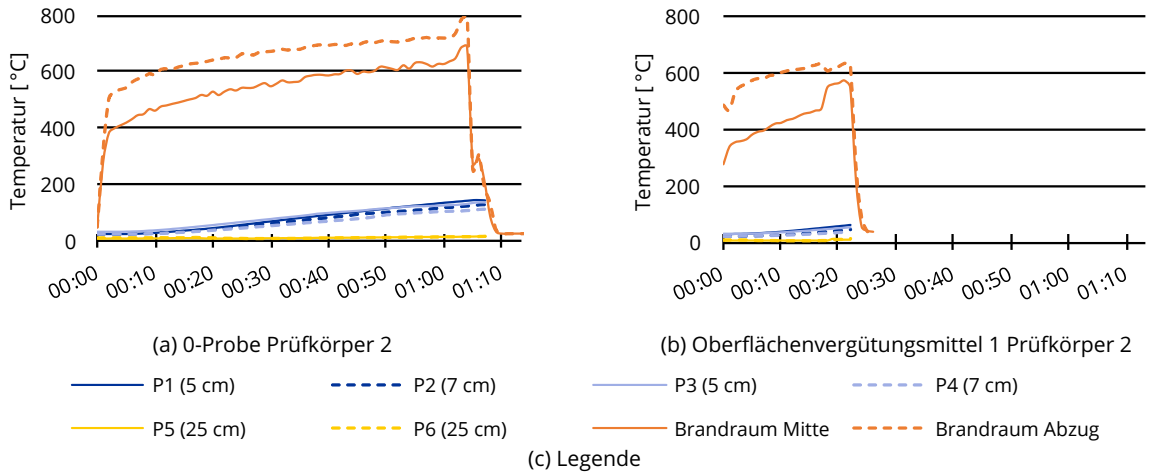


Abbildung 4.9: Lage der Sensoren in der Brandversuchsplatte. Die Farben stimmen mit den Linien in Diagramm 4.15 überein.

Diagramm 4.15 stellt exemplarisch zwei Temperaturkurven während der Brandversuche dar. In Diagramm 4.15(a) ist zu erkennen, dass die Brennerleistung nach einer Stunde angehoben wurde und die Temperaturen im Brandraum weiter anstiegen. Drei Minuten später löste sich die gesamte Prüffläche bis in eine Tiefe von 1 cm bis 2 cm schlagartig ab. Durch das schlagartige Lösen wurde die Flamme des Brenners gelöscht und der Brenner in den Störungsmodus geschaltet, deshalb konnte der Versuch nicht wie geplant für weitere fünf Minuten fortgeführt werden. Abbildung 4.10(a) zeigt die Prüffläche direkt nach dem Abheben vom Brandstand. Die gleichmäßige Abplatzung über die gesamte Fläche ist deutlich zu erkennen.

Diagramm 4.15(b) stellt den typischen Temperaturverlauf der Brandversuchsplatten, die mit einem Oberflächenvergütungsmittel appliziert wurden dar. In diesem Fall konnten nach 18 min erste Abplatzgeräusche wahrgenommen werden. Dies führte dazu, dass der Temperatursensor an der Plattenoberfläche im Bereich der Brandraum-Mitte verschoben wurde und einen Temperaturanstieg registrierte, da dieser näher an der Flamme gebogen wurde. Fünf Minuten nach den ersten Abplatzgeräuschen wurde der Versuch beendet. Wie in Abbildung 4.10(b) zu erkennen ist, waren die Abplatzungen nicht homogen über die gesamte Fläche verteilt, dies ist, wie eingangs erwähnt, auf die kurze Versuchsdauer zurück zu führen.



(a) 0-Probe Prüfkörper 2

(b) Oberflächenvergütungsmittel 1 Prüfkörper 2

(c) Legende

Diagramm 4.15: Temperaturkurven der Brandversuche

(a) 0-Probe Prüfkörper 2

(b) Oberflächenvergütungsmittel 1 Prüfkörper 2

Abbildung 4.10: Abplatzungen nach den Brandversuchen

Wie Tabelle 4.16 zu entnehmen ist, fiel die Dauer bis zu den ersten hörbaren Abplatzungen von 51 min bei der *0-Probe* auf 19 min bei den applizierten Prüfkörpern. Es wird deshalb angenommen, dass die Poren durch die Oberflächenvergütungsmittel verschlossen werden und der entstehende Wasserdampf nicht mehr aus dem Beton entweichen kann. Durch den entstehenden Dampfdruck kommt es deshalb bereits sehr früh zu den ersten Abplatzungen.

Aufgrund der sehr inhomogenen Verteilung der Abplatzungen wurde auf eine Bestimmung der Abplatzungstiefe verzichtet, da diese in den betroffenen Bereichen deutlich die Eindringtiefe von maximal 2 mm der Oberflächenvergütungsmittel überschreitet.

Versuchsplatte	Erste hörbare Abplatzung nach Versuchsbeginn		
	Teilplatte 1	Teilplatte 2	Mittelwert
0-Probe	38 min	63 min	51 min
Oberflächenvergütungsmittel 1	18 min	19 min	19 min
Oberflächenvergütungsmittel 2	19 min	19 min	19 min

Tabelle 4.16: Ergebnisse Brandversuche

4.4.3.3 Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass die Poren durch die Oberflächenvergütungsmittel soweit verschlossen werden, dass die Brandbeständigkeit des Betones deutlich abnimmt. Deshalb sind die untersuchten Oberflächenvergütungsmittel nicht geeignet, wenn aufgrund der Einbausituation von hohen Brandbelastungen auszugehen ist.

4.5 Work-Package 7

4.5.1 A12 Galerie Senftenberg

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde im Rahmen der Herstellung der Innenschale eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Dolomit	
Bindemittel	CEM I 42,5 R SR0	295 kg/m^3
	Fluasit	82 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,5	180 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,38 % v.B.
	Lufporenbildner	0,23 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	25,4 °C	
Ausbreitmaß nach 10 min	56 cm	
Luftporen im Frischbeton	4,7 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	35,0 MPa	

Tabelle 4.17: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - A12 Galerie Senftenberg

In Abbildung 4.11 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche innerhalb der Tunnelröhre der Richtungsfahrbahn Innsbruck kann Abbildung 4.12 entnommen werden.

(a) Bewehrung und Schalwagen (b) Reinigen der Innenschale (c) Applikation

Abbildung 4.11: A12 Galerie Senftenberg

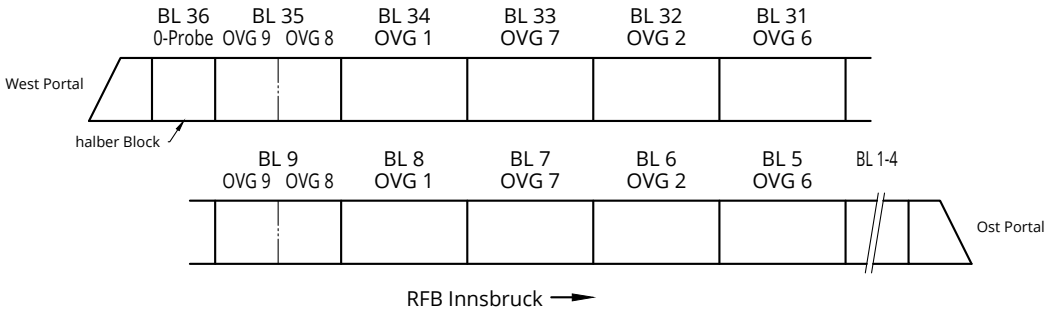


Abbildung 4.12: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

Chloridgehalt und Eindringtiefe

Der Chloridgehalt wurde ausgehend vom Westportal in den Tiefenstufen 0 cm bis 2 cm und 2 cm bis 4 cm untersucht. Dabei entspricht die Anordnung der Oberflächenvergütungsmittel in Diagramm 4.16 der Anordnung am Bauwerk ausgehend vom Westportal. Dies ist auch die Fahrtrichtung des Verkehrs.

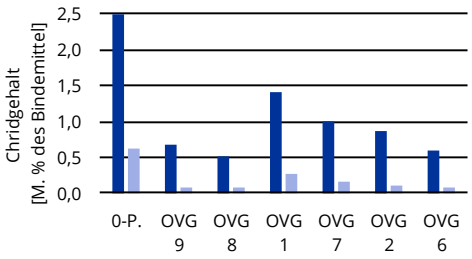


Diagramm 4.16: Chloridgehalt in zwei Tiefenstufen - A12 Galerie Senftenberg

Betrachtet man nur die *0-Probe* und die reaktiven Oberflächenvergütungsmittel (OVG 1, 2, 6 und 7 im Diagramm), so ist ein annähernd linearer Abfall des Chloridgehaltes in beiden Tiefenstufen zu erkennen. Diese ist durch die Abnahme des Sprühnebels nach der Einfahrt in den Tunnel zu begründen und nicht auf die Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel zurückzuführen. Lediglich die nicht reaktiven Beschichtungen (OVG 8 und 9 im Diagramm) können die Chlorideindringung effektiv verringern.

4.5.2 A12 Anschlussstelle Kufstein Süd

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Dolomit	
Bindemittel	CEM I 42,5 R SR0	390 kg/m^3
	Fluasit	30 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,42	173 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,60 % v.B.
	Lufporenbildner	0,45 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	27,6 °C	
Ausbreitmaß nach 45 min	49 cm	
Luftporen im Frischbeton	7,2 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	43,2 MPa	

Tabelle 4.18: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - A12 Anschlussstelle Kufstein Süd

In Abbildung 4.13 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.14 ersichtlich.

(a) Applikation (b) nach Applikation (c) Detailansicht Oberflächenvergütungsmittel 2

Abbildung 4.13: A12 Anschlussstelle Kufstein Süd

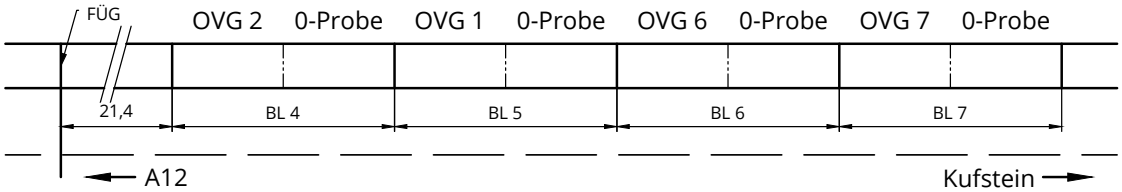


Abbildung 4.14: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

Chloridgehalt und Eindringtiefe

Die Probenahme erfolge im annähernd senkrechten Bereich des Randbalkens in den Tiefenstufen 0 cm bis 2 cm und 2 cm bis 4 cm. Wie in Diagramm 4.17 zu erkennen, ist in beiden Tiefenstufen keine Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel zu erkennen. Da im Gegensatz die Sprühnebelbelastung über den Verlauf des Tragwerkes nicht abnimmt kann angenommen werden, dass alle Prüfflächen der annähernd gleichen Chloridbelastung ausgesetzt waren.

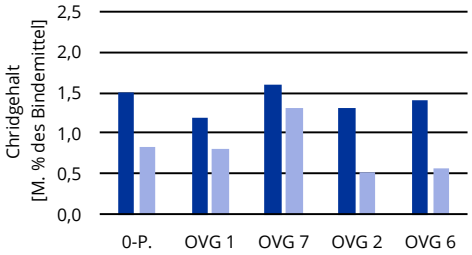


Diagramm 4.17: Chloridgehalt in zwei Tiefenstufen - A12 Anschlussstelle Kufstein Süd

4.5.3 S16 Sannabrücke

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Dolomit	
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	400 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,43	173 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	1,00 % v.B.
	Lufporenbildner	0,23 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	19,1 °C	
Ausbreitmaß nach 45 min	48 cm	
Luftporen im Frischbeton	5,8 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	64,0 MPa	

Tabelle 4.19: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - S16 Sannabrücke

In Abbildung 4.15 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.16 ersichtlich.

(a) Glätten nach Betonage (b) Aufbringen Besenstrich (c) Detailansicht Oberflächenvergütungsmittel 1

Abbildung 4.15: S16 Sannabrücke

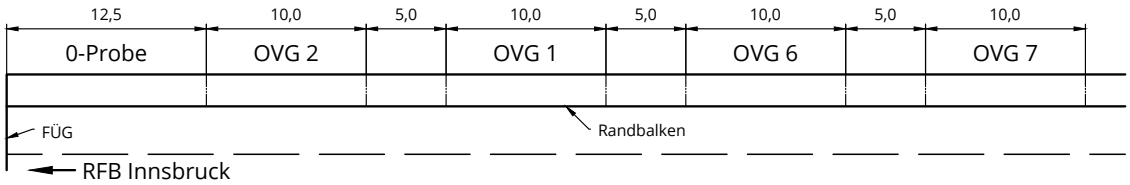


Abbildung 4.16: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.4 A13 Europabrücke Randbalken

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Dolomit	
Bindemittel	CEM I 42,5 R SR0	420 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,43	182 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	1,10 % v.B.
	Lufporenbildner	0,30 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	22,8 °C	
Ausbreitmaß nach 60 min	51 cm	
Luftporen im Frischbeton	8,6 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	43,8 MPa	

Tabelle 4.20: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - A13 Europabrücke Randbalken

In Abbildung 4.17 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.18 ersichtlich.

(a) Übersicht (b) Bereich mit Oberflächenvergütungsmittel 1 appliziert (c) Bereich mit Oberflächenvergütungsmittel 4 appliziert

Abbildung 4.17: A13 Europabrücke Randbalken

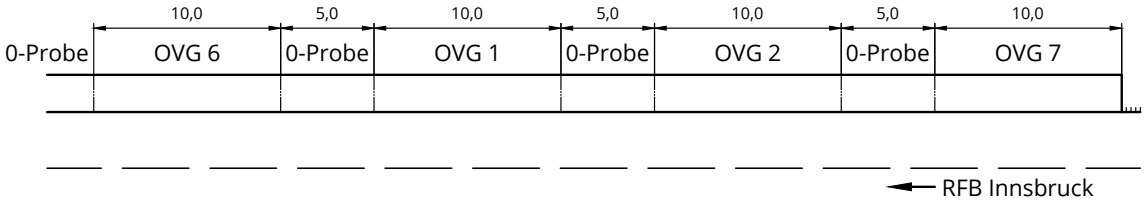


Abbildung 4.18: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

Chloridgehalt und Eindringtiefe

Die Probenahme erfolge im annähern horizontalen Bereich des Randbalkens, da der Fahrstreifen für die Probenahme nicht gesperrt werden konnte, in den Tiefenstufen 0 cm bis 2 cm und 2 cm bis 4 cm. Wie in Diagramm 4.18 zu erkennen, ist in beiden Tiefenstufen keine Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel feststellbar. Wie schon in Kapitel 4.5.2 ist davon auszugehen, dass alle Prüfflächen der annähernd gleichen Chloridbelastung ausgesetzt waren.

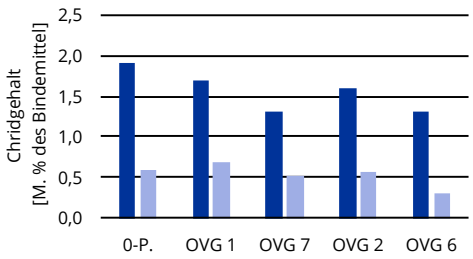


Diagramm 4.18: Chloridgehalt in zwei Tiefenstufen - A13 Europabrücke Randbalken

4.5.5 B180 Niklasgalerie

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung der Innenschale eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Dolomit	
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	369 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,51	188 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,90 % v.B.
	Lufporenbildner	0,12 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	25,6 °C	
Ausbreitmaß nach 90 min	48 cm	
Luftporen im Frischbeton	4,8 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	50,8 MPa	

Tabelle 4.21: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - B180 Niklasgalerie

In Abbildung 4.19 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.20 ersichtlich.

(a) Betonage (b) Applikation (c) Applikation

Abbildung 4.19: B180 Niklasgalerie

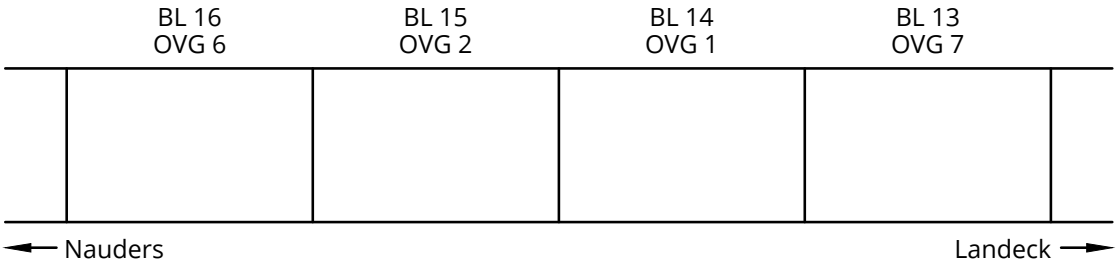


Abbildung 4.20: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.6 L13 Tafelweggalerie

Die folgende Betonrezeptur wurde zur Herstellung der Innenschale eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Silikat / Karbonat	
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	390 kg/m^3
	Fluasit T	25 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,43	175 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	1,03 % v.B.
	Lufporenbildner	0,47 % v.B.

Tabelle 4.22: Betonrezeptur - L13 Tafelweggalerie

In Abbildung 4.21 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.22 ersichtlich.

(a) Reinigen (b) Applikation (c) Übersicht

Abbildung 4.21: L13 Tafelweggalerie

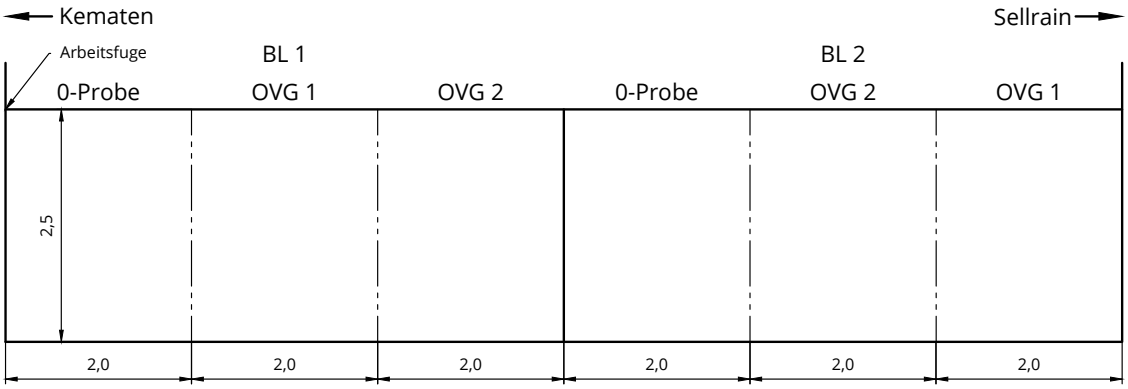


Abbildung 4.22: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.7 L36 Loipenüberführung Seefeld

Die folgende Betonrezeptur wurde zur Herstellung der Innenschale eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Silikat / Karbonat	
Bindemittel	CEM II/A-M 42,5 N	327 kg/m^3
	Hydraulit M	35 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,48	172 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,48 % v.B.
	Lufporenbildner	0,17 % v.B.

Tabelle 4.23: Betonrezeptur - L36 Loipenüberführung Seefeld

In Abbildung 4.23 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.24 ersichtlich.

(a) Reinigen (b) Applikation (c) Übersicht

Abbildung 4.23: L36 Loipenüberführung Seefeld

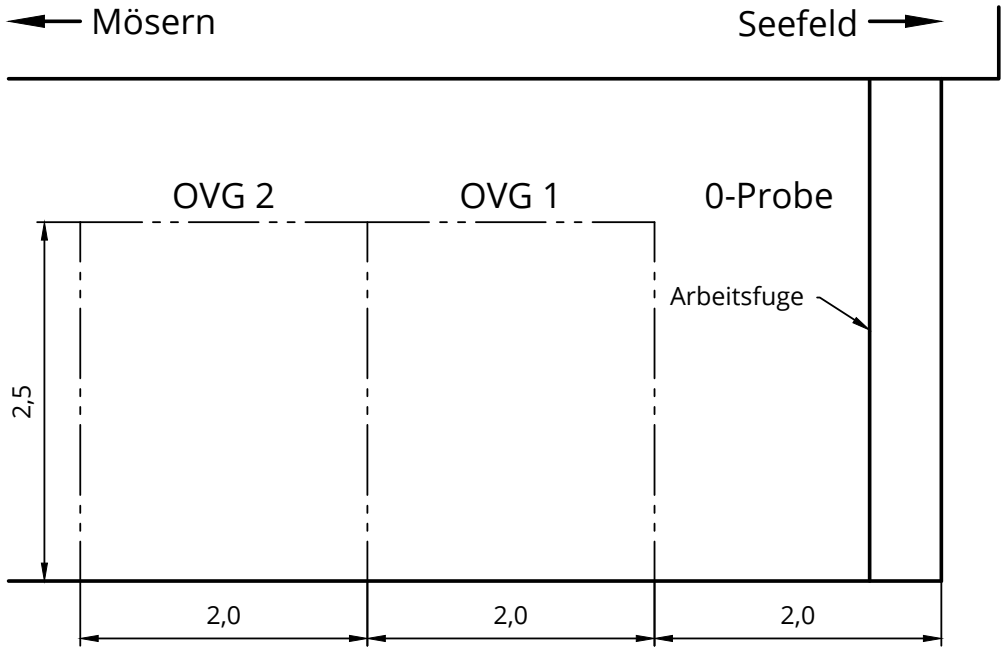


Abbildung 4.24: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.8 LS114 Pfelders

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Gneiss / Quarz-Amphibolit	
Bindemittel	CEM I 42,5 R SR0	420 kg/m^3
	Durabind	20 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,44	191 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,18 % v.B.
	Lufporenbildner	0,10 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	25,5 °C	
Ausbreitmaß nach 90 min	52 cm	
Luftporen im Frischbeton	8,0 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	38,6 MPa	

Tabelle 4.24: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - LS114 Pfelders

In Abbildung 4.25 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.26 ersichtlich.

(a) Betonage (b) Applikation (c) Applikation

Abbildung 4.25: LS114 Pfelders

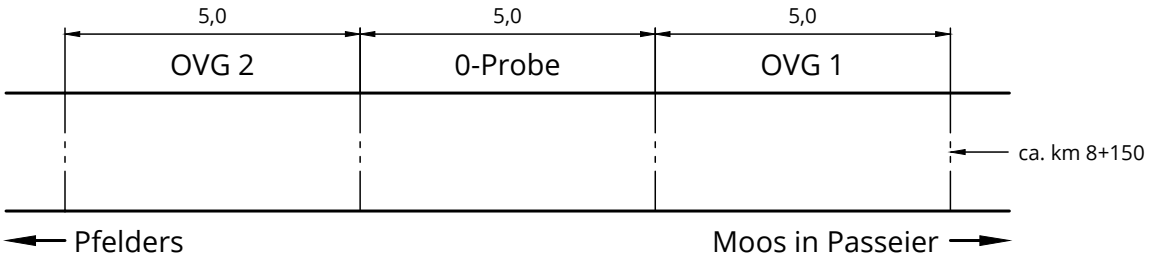


Abbildung 4.26: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.9 SS44 Jaufenpass Kehre 10

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	75 % Gneiss und 25 % Quarz-Amphibolit	
Bindemittel	CEM I 42,5 R SR0	420 kg/m^3
	Rofament	20 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,45	193 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,18 % v.B.
	Lufporenbildner	0,10 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	29,9 °C	
Ausbreitmaß nach 90 min	46 cm	
Luftporen im Frischbeton	6,0 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	nicht geprüft	

Tabelle 4.25: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - SS44 Kehre 10 Jaufenpass

In Abbildung 4.27 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.28 ersichtlich.

(a) Ausschalen (b) Reinigen (c) Bereich mit Oberflächenvergütungsmittel 4 appliziert

Abbildung 4.27: SS44 Kehre 10 Jaufenpass

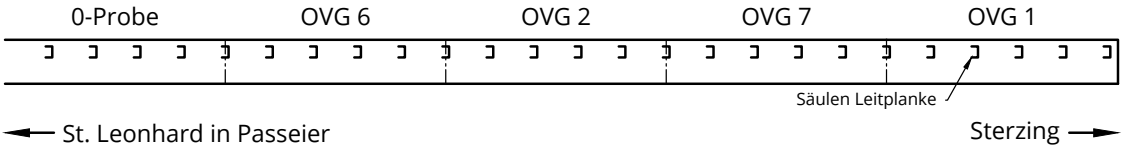


Abbildung 4.28: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.10 SS238 Gampenpassstraße KM 10

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Silikatisch	
Bindemittel	CEM II/A-LL 42,5 R	400 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,45	182 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,75 % v.B.
	Lufporenbildner	0,36 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	19,3 °C	
Ausbreitmaß nach 10 min	44 cm	
Luftporen im Frischbeton	6,5 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	nicht geprüft	

Tabelle 4.26: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - SS238 KM 10 Gampenpassstraße

In Abbildung 4.29 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.30 ersichtlich.

(a) Vorbereiten Betonage und Frischbetonprüfung

(b) Vorbereiten Applikation

(c) Bereich mit 0 Probe

Abbildung 4.29: SS238 KM 10 Gampenpassstraße

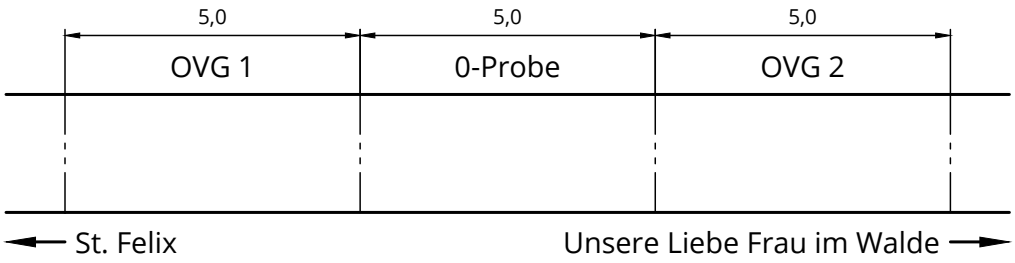


Abbildung 4.30: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.5.11 SS238 Gampenpassstraße KM 16

Die folgende Rezeptur mit den zugehörigen Frisch- und Festbetonkenndaten wurde zur Herstellung des Randbalkens eingesetzt:

Betonrezeptur		
Gesteinskörnung	Quarz/ Porphyr/ Basalt/ Granit	
Bindemittel	CEM II/A-LL 42,5 R	390 kg/m^3
	Micro Pozz	60 kg/m^3
W/B-Wert - Wassergehalt	W/B = 0,47	193 kg/m^3
Zusatzmittel	Fließmittel	0,92 % v.B.
	Lufporenbildner	0,23 % v.B.
Frisch- und Festbetonkenndaten		
Frischbetontemperatur	25,8 °C	
Ausbreitmaß nach 10 min	44 cm	
Luftporen im Frischbeton	7,0 %	
Druckfestigkeit nach 28 d	nicht geprüft	

Tabelle 4.27: Betonrezeptur, Frisch- und Festbetonkenndaten - SS238 KM 16 Gampenpassstraße

In Abbildung 4.31 sind die durchgeführten Arbeiten ersichtlich. Die Positionierung der Versuchsbereiche ist in Abbildung 4.32 ersichtlich.

(a) Vorbereiten Betonage und Frischbetonprüfung (b) Vorbereiten Applikation (c) Bereich mit 0 Probe

Abbildung 4.31: SS238 KM 16 Gampenpassstraße

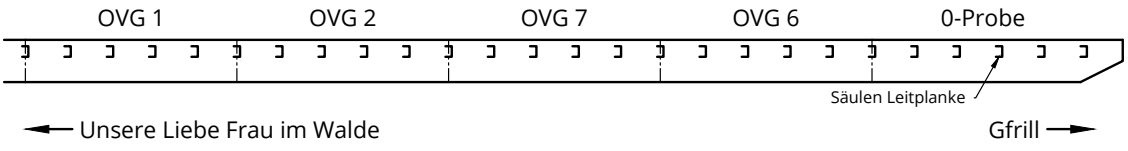


Abbildung 4.32: Positionsskizze der Vergütungsbereiche

4.6 Zusammenfassung

4.6.1 Wirkung der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel

Über die einzelnen Work-Packages konnten folgende Erkenntnisse zur Wirkungsweise der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel gewonnen werden.

- Die Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel wurde weder durch die Applikationsrichtung (vertikal, horizontal, über Kopf), eine mögliche Vorbehandlung (Trocknung bei 50 °C oder Hochdruckreinigen), eine Applikation bei tiefen Temperaturen (−5 °C) und die Belastung durch Sprühwasser, die Applikationstechnik (Sprühen oder Walzen) noch durch die eingesetzte Gesteinskörnung (kalzitisch/dolomitsch oder silikatisch) signifikant beeinflusst.
- Für die untersuchten Betonrezepturen konnte eine maximale Eindringtiefe der Oberflächenvergütungsmittel von rund 2,5 mm festgestellt werden. Dies liegt deutlich unter den Herstellerangaben von 20 mm bis 30 mm.
- Die Gesamtporosität wird durch die Applikation, bedingt durch die geringe Eindringtiefe, nicht signifikant verändert.
- Die Wassereindringtiefe konnte durch die Oberflächenvergütungsmittel geringfügig reduziert werden. Dies lässt auf eine Reduzierung des Porenvolumens schließen, welche aber zu gering ist, um auf die Gesamtporosität in den obersten 2 cm des Betons einen Einfluss zu haben. Trotz der verringerten Wassereindringtiefe konnte die Eindringung von Chloriden in den Praxisuntersuchungen nicht beeinflusst werden.
- Durch den Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel kann die Beständigkeit gegen den lösenden Angriff leicht erhöht werden. Ein möglicher Einsatz der Oberflächenvergütungsmittel zur Beschichtung von Klärbecken ist jedoch im Detail zu untersuchen, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Oberflächenvergütungsmittel einen negativen Einfluss auf die Bildung eines schützenden Biofilms an der Betonoberfläche haben.
- Es konnte eine deutliche Erhöhung der Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumitteln festgestellt werden. Diese Erhöhung ist vom verwendeten Bindemittel und dessen Gehalt an Kalziumhydroxid abhängig. Sinkt der Gehalt an Kalziumhydroxid, sinkt auch die Möglichkeit der reaktiven Oberflächenvergütungsmittel, neu CSH-Phasen zu bilden. Im Rahmen der Untersuchungen konnte deshalb an Betonen, die ein Jahr alt waren, keine Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel mehr erkannt werden. Zusätzlich nimmt die Beständigkeit mit dem zunehmenden Alter der Vergütung ab. Bereits nach einem Jahr konnte kein Effekt gegenüber den *0-Proben* mehr festgestellt werden.
- Die Abreißfestigkeit wird durch die Oberflächenvergütungsmittel im Allgemeinen leicht erhöht. Allerdings wird aufgrund der glatteren Oberfläche auch der Haftverbund zu aufgebrachten Schichten reduziert.
- Werden die Oberflächenvergütungsmittel zur Vergütung von Betonen mit künstlichen Luftporen eingesetzt, wird deren Wirksamkeit zur Erhöhung der Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel deutlich erhöht. Dieser Effekt konnte vor allem bei den ersten 21 Frost-Tauwechseln beobachtet werden. Dies lässt auf eine Verfestigung der Oberfläche schließen, welche allerdings den grundsätzlichen Mechanismus der Abwitterung nicht verhindert.
- Die reaktiven Oberflächenvergütungsmittel zeigten eine bedingte Eignung zum Einsatz als Nachbehandlungsmittel. Dabei wurden die Auswirkungen auf die Entwicklung anderer Betonparameter als die Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel nicht untersucht. Auch eine Veränderung von Sichtbetoneigenschaften wurde nicht untersucht.
- Eine Beeinflussung der Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel durch Nachbehandlungsmittel ist von der Kombination der beiden Mittel abhängig und muss im Praxiseinsatz einzeln untersucht

werden. Eine Reinigung der Oberfläche von den Nachbehandlungsmitteln führte dabei nicht zwangsläufig zu einer besseren Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel.
- Die Brandbeständigkeit des untersuchten Betons ohne Kunststoffmikrofasern wurde durch die Oberflächenvergütungsmittel deutlich reduziert.

4.6.2 Wirkung der nicht reaktiven Beschichtungen

Die nicht reaktiven Beschichtungen wurden nur am Rande untersucht, da diese nicht das Hauptziel der Untersuchungen waren. Dennoch konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

- Wie zu erwarten, legten sich die Beschichtungen nur über die Oberfläche der Prüfkörper und drangen nicht wesentlich in das Betongefüge ein.
- Aufgrund der hydrophobierenden Wirkung konnte das Eindringen von wässrigen Lösungen in das Betongefüge deutlich reduziert werden. Dadurch konnte einerseits das Eindringen von Chloriden reduziert werden. Andererseits konnten auch das Wasser und später die Taummittellösung im Rahmen der Untersuchungen zur Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumitteln schlechter Eindringen wodurch die Beständigkeit gegen diese Belastung deutlich erhöht wurde. Dieser Effekt konnte auch noch nach einem Jahr in fast unvermindertem Ausmaß festgestellt werden. Allerdings zeigte sich, dass dieser Schutz schon durch geringste Defekte in der Beschichtung aufgehoben wird, da das Betongefüge nicht verändert wird. Es ist davon auszugehen, dass diese Beschichtungen deshalb in regelmäßigen Abständen erneuert werden müssen.

Es blieben viele Fragen zu den nicht reaktiven Beschichtungen unbeantwortet, da die Beantwortung dieser den Rahmen des Forschungsprojektes gesprengt hätte.

4.6.3 Weitere Erkenntnisse

Neben der Wirkungsweise der Oberflächenvergütungsmittel konnten auch noch folgende Erkenntnisse im Rahmen diese Forschungsprojektes gewonnen bzw. bestätigt werden.

- Für Untersuchungen in diesem Umfang ist vor allem eine sehr homogene Betonqualität von entscheidender Bedeutung. Diese konnte zu Beginn der Untersuchungen nicht gewährleistet werden, wodurch eine generelle Umstrukturierung des Untersuchungsablaufes nötig wurde. Durch die Herstellung von Großversuchskörpern in einem Fertigteilwerk und die sorgfältige Herstellung einzelner Mischungen im Labormaßstab konnten diese Probleme gelöst werden.
- Die Verwendung von saugendem Schalungshäuten konnte die Betonqualität an der Oberfläche deutlich erhöhen. Dies wird einerseits durch die Aufnahme von Überschusswasser in die Schalungshaut zu Beginn der Hydratation, welche den Wasser-Bindemittelwert an der Oberfläche reduziert und andererseits durch eine Rückgabe dieses Wassers im Laufe der Hydratation, welche das Schwinden reduziert ermöglicht.
- Sowohl mit steigendem Wasser-Bindemittelwert als auch mit steigendem Bindemittelgehalt nimmt die Gesamtporosität des Betons zu.
- Eine Erhöhung des Bindemittelgehalts führt nicht zwangsläufig zu einer höheren Beständigkeit gegen den Frostangriff mit Taumittel. Es konnte nach Überschreiten eines optimalen Bindemittelgehaltes eine deutliche Reduktion der Beständigkeit festgestellt werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass abhängig vom verwendeten Bindemittel und den eingesetzten Zusatzmitteln ein optimaler Bindemittelgehalt gefunden werden kann, der einerseits den Ressourceneinsatz und andererseits die Dauerhaftigkeit von Betonoberflächen optimieren kann.
- Für den Korrosionsschutz der Bewehrung ist eine ausreichenden Betondeckung von entscheidender Bedeutung, da der Chloridgehalt in den oberflächennahen Schichten bereits nach wenigen Jahren die Grenzwerte überschreiten kann.

5 Kommunikationsmaßnahmen

5.1 Besprechungen

Besprechungen			
Datum	Ort	Teilnehmer	Uhrzeit
17.01.2017	Vahrn, ISB	Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Georg Schiner, Florian Schnitzler, Jessica Stablum, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	13:00 - 17:30 Uhr
01.02.2017	Vahrn, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	09:00 - 12:00 Uhr
01.02.2017	Vahrn, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	13:00 - 15:00 Uhr
23.02.2017	Vahrn, ISB	Patrick Gasteiger, Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Georg Schiner, Florian Schnitzler, Andrea Thaler	09:00 - 15:00 Uhr
27.04.2017	Vahrn, ISB	Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler	11:00 - 15:00 Uhr
18.05.2017	Vahrn, ISB	Gianluca Liberi, Angelo Locaspi, Marco Morgante, Georg Schiner, David Quattrociocchi, Stefan Vivaldelli, Gerardo Vuocolomga	-
22.06.2017	Ötztal-Bahnhof, TIQU	Lisa Eiterer, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	16:00 - 17:00 Uhr
26.07.2017	Vahrn, ISB	Julian Kritzinger, Daniel Müllauer	09:00 - 11:00 Uhr
25.10.2017	Vahrn, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	09:00 - 12:00 Uhr

Tabelle 5.1: Termine und Teilnehmer Besprechungen

Besprechungen			
Datum	Ort	Teilnehmer	Uhrzeit
22.11.2017	Vahrn, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	09:00 - 12:00 Uhr
05.02.2018	Ötztal-Bahnhof, TIQU	Lisa Eiterer, Patrick Gasteiger, Julian Kritzinger, Jürgen Mayr, Daniel Motz, Bernhard Primisser, Georg Sammer, Alexander Schweigl, Heinz Thaler, Dietmar Thomaseth, Stefan Wallnöfer, Vertreter Hersteller Wasserglas	13:00 - 17:00 Uhr
09.02.2018	Ötztal-Bahnhof, TIQU	Lisa Eiterer, Alexander Schweigl, Heinz Thaler, Dietmar Thomaseth, Stefan Wallnöfer	13:00 - 17:00 Uhr

Tabelle 5.1: Termine und Teilnehmer Besprechungen

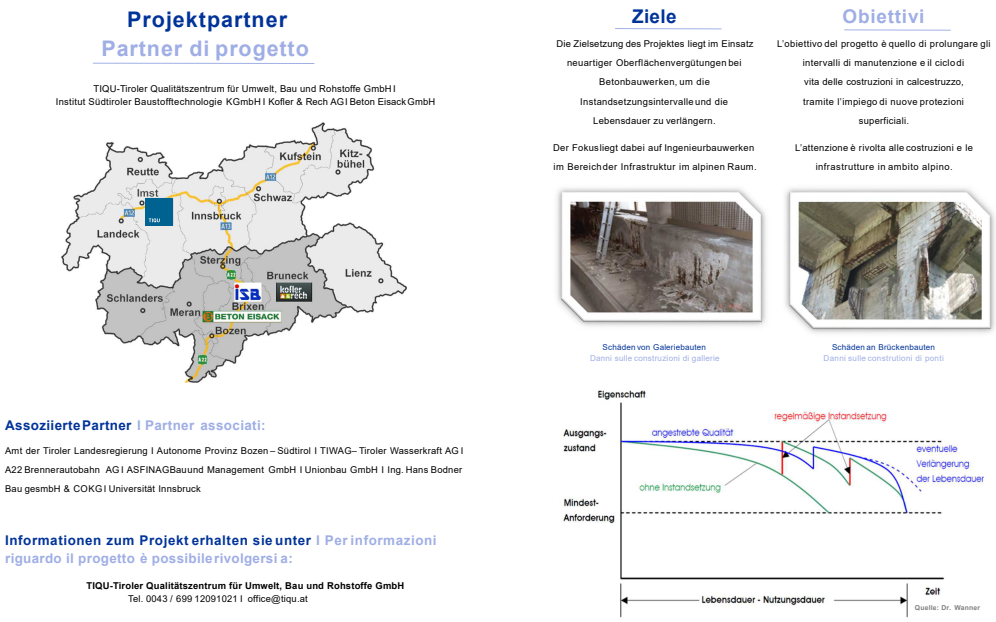
5.2 Öffentliche Veranstaltungen

Öffentliche Veranstaltungen		
Datum	Veranstaltung	Ort
10.03.2015	1. Kick-Off Veranstaltung	Brenner „Plessi Museum - Brennerautobahn AG“
01.02.2017	2. Kick-Off Veranstaltung	Vahrn, ISB
15.09.2017	Tag der offenen Tür	Vahrn, ISB
25.10.2017	Tagung der Projektsteuergruppe Interreg ITAT 1004 Concrete	Vahrn, ISB
16. - 17.11.2017	Interalpine Bautage	Brixen
08.10.2018	3. Kick-Off Veranstaltung	Vahrn, ISB
18.12.2019	Schlussbesprechung INTERREG-Concrete	Vahrn, ISB

Tabelle 5.2: Termine der öffentlichen Veranstaltungen

5.3 Flyer

(a) Außenseite



(b) Innenseite

Abbildung 5.1: Flyer

5.4 Homepage

Die Homepage zum Forschungsvorhaben ist unter tiqu.at/interreg zu erreichen. Abbildung 5.2 stellt die aktuelle Startseite dar.

Abbildung 5.2: Homepage

5.5 Medienberichte

AKTUELL LAUFEN ERSTE UNTERSUCHUNGEN AUF BAUSTELLEUN UND IN DEN LABORS

FÜR BAUTEN EIN **LÄNGERES LEBEN**

Abbildung 5.3: Artikel in der Zeitschrift „Tirol Kommunal - Das offizielle Magazin des Tiroler Gemeindeverbandes“ („FÜR BAUTEN EIN LÄNGERES LEBEN“) - 05.06.2017

12 Interreg Interreg

Interreg Interreg 13

GRENZENLOSE ZUSAMMENARBEIT

COOPERAZIONE SENZA FRONTIERE

Immer wieder hört man von Interreg-Projekten. Doch was sind diese Projekte genau und inwieweit betreffen sie die Bevölkerung in der Europaregion?

Was haben eine „Freundschafts-Fahrradroute“ zwischen München und Venedig über den Brenner mit dem Projekt „Donne“ für Frauen in Entscheidungs- und Führungsfunktionen gemeinsam? Beide erhalten Gelder aus dem Fördertopf des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung EFRE, beide stärken die gemeinsamen Beziehungen über die Landesgrenzen hinaus und beide sorgen dafür, dass die gemeinsame Zusammenarbeit den Menschen in der Region zugutekommt. INTERREG-Projekte kommen jedoch nicht nur aus den touristischen und sozialen Bereichen – die Bandbreite reicht von Kultur über Politik und Wirtschaft bis hin zu Gesundheit, Zivil- und Katastrophenschutz. Die Strategie der Kooperationspartnerschaften ist es, auf die Herausforderungen, Stärken und Bedürfnisse der Regionen einzugehen, wobei die Vorgaben und Ziele von Europa 2020 und der Europäischen Territorialen Zusammenarbeit die Basis sind. So bilden Forschung und Innovation, Natur und Kultur sowie Institutionen und Regionalentwicklung die vier Themenkomplexe, die im Rahmen des Kooperationsprogramms INTERREG zwischen Italien und Österreich gefördert werden.

Neue Ansätze im Wintertourismus

Eine aktuelle Initiative namens „WinHealth“ betrifft gesunden Wintertourismus - ein Thema, bei dem sich Südtirol und Tirol sowie Salzburg einbringen. Der Wintertourismus stellt für alle drei Regionen einen wesentlichen Wirtschafts- und Arbeitsmarktfaktor dar. Allerdings ist der Wintertourismus schneeabhängig. Um sich für die Zukunft zu rüsten, wird gemeinsam nach Alternativen und neuen Angeboten geforscht. Großes Potenzial sieht das Expertenteam dabei vor allem im Gesundheitsbereich.

Geschütztes Bauen

Probleme bei Schäden von Betonbauwerken machen vor Grenzen keinen Halt und stellen eine große Herausforderung an Infrastrukturbetreiber. Das INTERREG-Projekt mit dem sperrigen Namen „Oberflächenvergütung von Betonbauwerken – Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch neuartige Schutzmaßnahmen“ hat das konkrete Ziel, den gesamten Lebenszyklus von Betonbauwerken zu verlängern. Das spart nicht nur Kosten und schont die Umwelt, sondern reduziert die Ausfallzeiten und sogar die Bildung von Autostaus.

Factbox Interreg:

INTERREG V-A Italien-Österreich 2014-2020

Das Kooperationsprogramm INTERREG V-A Italien-Österreich ist Teil der Förderprogramme im Rahmen des Ziels Europäische territoriale Zusammenarbeit für die Periode 2014-2020. Es fördert die ausgewogene, nachhaltige Entwicklung sowie harmonische Integration im Grenzraum zwischen Italien und Österreich und wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und nationale öffentliche Beiträge in Höhe von insgesamt rund 98 Millionen Euro finanziert.

Mit diesen Mitteln fördert das Programm italienisch-österreichische Kooperationsprojekte in den Bereichen Forschung und Innovation, Natur und Kultur, Ausbau institutioneller Kompetenz und Regionalentwicklung auf lokaler Ebene.

Interreg Italia-Österreich

Bei der EVTZ-Vorstandssitzung in Rovereto am 26. Mai 2016: Die Landeshauptleute von Tirol, Südtirol und Trentino mit Vertreterinnen der Interreg-Räte, die ihren Sitz in der Euregio haben. („Terra Raetica“ im Vinschgau und Tiroler Oberland sowie Engadin; „Wipptal“ in Nord- und Südtirol; „Dolomiti live“ mit Pustertal, Osttirol und Belluno)

Si sente sempre parlare di progetti INTERREG, ma di che cosa si tratta esattamente? In che misura questi progetti coinvolgono la popolazione dell’Euregio?

Che cosa accomuna la “Ciclabile dell’amicizia” da Monaco a Venezia attraverso il Brennero e il progetto dal titolo “Donne che decidono”? In entrambi i casi si tratta di iniziative finanziate dal Fondo europeo per lo sviluppo regionale FESR, volte a rafforzare i rapporti transfrontalieri e ad assicurare una ricaduta concreta delle attività di cooperazione a vantaggio della popolazione locale.

I progetti INTERREG non riguardano soltanto l’ambito turistico e sociale, ma interessano un ampio spettro di problematiche, dalla cultura alla politica e all’economia, dalla salute alla protezione civile e alla prevenzione delle catastrofi. La strategia dei partenariati di cooperazione consiste nell’affrontare le sfide analizzando i punti di forza e le esigenze dei territori, sulla base delle indicazioni e degli obiettivi di Europa 2020 e della cooperazione territoriale europea.

Ricerca e innovazione, natura e cultura, istituzioni e sviluppo regionale rappresentano quindi i quattro ambiti tematici sviluppati nell’ambito del programma di cooperazione INTERREG tra Italia e Austria.

Nuovi approcci al turismo invernale

Tra le attività in corso rientra l’iniziativa dal titolo “WinHealth”, che mira a correlare il turismo invernale al benessere fisico e coinvolge la Provincia di Bolzano così come i Land Tirolo e Salisburgo, dal momento che in tutti e tre i territori il turismo invernale riveste un ruolo essenziale per l’economia e l’occupazione, ma risulta inevitabilmente condizionato dalla presenza della neve. Un gruppo di esperti è impegnato a ricercare alternative e nuove proposte per affrontare preparati il futuro, sfruttando in particolare il potenziale individuato nella promozione della salute.

I presidenti del Tirolo, Alto Adige e Trentino con i rappresentanti dei cd “Interreg-Räte” (Consigli interreg) che hanno sede nel territorio dell’Euregio (“Terra Raetica” nella Val Venosta e il Tiroler Oberland, insieme con la Bassa Engadina svizzera; “Wipptal” nella due parti sud -Alto Adige- e nord -Tirolo-; “Dolomiti live” con la Val Pusteria e il distretto di Lienz -Tirolo orientale-, insieme con il GAL Alto Bellunese). (Assemblea del GECT - 25 maggio 2016, Rovereto)

Factbox Interreg:

INTERREG V-A Italia-Austria 2014-2020

Il programma di cooperazione INTERREG V-A Italia-Austria è parte dei programmi di finanziamento previsti dall’obiettivo della cooperazione territoriale europea per il periodo 2014-2020. Esso mira a promuovere lo sviluppo equilibrato e sostenibile nonché l’integrazione armoniosa dei territori di confine tra Italia e Austria attraverso risorse provenienti dal Fondo europeo per lo sviluppo regionale (FESR) e da contributi pubblici nazionali per un importo complessivo di 98 milioni di euro.

Con tali risorse il programma promuove progetti di cooperazione tra Italia e Austria nei settori ricerca e innovazione; natura e cultura, potenziamento delle competenze istituzionali e sviluppo regionale a livello locale.

Edilizia sicura

Le difficoltà correlate al danneggiamento delle opere in calcestruzzo non si fermano davanti alle frontiere nazionali e rappresentano una grande sfida per i gestori di infrastrutture. Il progetto INTERREG dall’impegnativo titolo “Protezione superficiale di opere in calcestruzzo – Aumento della durabilità tramite protezioni innovative” persegue l’obiettivo concreto di migliorare il ciclo di vita complessivo delle opere in calcestruzzo, riducendo non solo i costi e l’impatto ambientale, ma anche le interruzioni del traffico e la formazione di code.

Abbildung 5.4: Tiroler Landeszeitung - Ausgabe 4/ September 2017

5.6 Plakat und Roll-Up

Abbildung 5.5: Plakat

Abbildung 5.6: Roll-Up

A Verzeichnisse

A.1 Literatur

Park, Sang-Soon u. a. (2014). „Evaluation of Concrete Durability Performance with Sodium Silicate Impregnants“. English. In: *Advances in Materials Science and Engineering* 2014, S. 1–11.

Youn, B.Y. (2010). *Beurteilung der Wirksamkeit von Wasserglas zur Verbesserung des Verschleißwiderstandes bei Industrieböden*. Bauforschung / T. Fraunhofer-IRB-Verlag. ISBN: 9783816783527. URL: https://books.google.at/books?id=Elf8ZwEACAAJ.

A.2 Tabellenverzeichnis

2.1 Eingesetzte Oberflächenvergütungsmittel . . . 7

3.1 Einteilung der Work-Packages . . . 8
3.2 Liste der Prüfmethoden . . . 18

4.1 Rezeptur und Betonkenndaten - erste Betonage - WP 3 . . . 22
4.2 Rezeptur und Betonkenndaten - zweite Betonage - WP 3 . . . 23
4.3 Rezeptur und Betonkenndaten - dritte Betonage - WP 3 . . . 24
4.4 Legende untersuchte Oberflächenvergütungsmittel - WP 3 . . . 25
4.5 Legende untersuchte Schalungshäute - WP 3 . . . 27
4.6 Rezeptur und Betonkenndaten - erste Betonage (*R1*) - WP 4 . . . 35
4.7 Rezeptur und Betonkenndaten - zeite Betonage (*R2*) - WP 4 . . . 35
4.8 Rezeptur und Betonkenndaten - dritte Betonage (*R3*) - WP 4 . . . 36
4.9 Legende untersuchte Oberflächenvergütungsmittel - WP 4 . . . 36
4.10 Übersicht Betonsorten Work-Package 5 . . . 41
4.11 Legende untersuchte Oberflächenvergütungsmittel - WP 5 . . . 42
4.12 Übersicht der hergestellten Balken des Work-Package 6 zur Untersuchung des Einflusses der Umweltbedingungen und der Nachbehandlung . . . 45
4.13 Legende untersuchte Oberflächenvergütungsmittel - WP 6 Umwelt und Nachbehandlungsmittel . . . 46
4.14 Legende untersuchte Oberflächenvergütungsmittel - WP 6 Dauerhaftigkeit . . . 49
4.15 Rezeptur und Betonkenndaten - Work-Package 6 Brandversuche . . . 52
4.16 Ergebnisse Brandversuche . . . 54
4.17 Rezeptur und Betonkenndaten - A12 Galerie Senftenberg . . . 56
4.18 Rezeptur und Betonkenndaten - A12 Anschlussstelle Kufstein Süd . . . 58
4.19 Rezeptur und Betonkenndaten - S16 Sannabrücke . . . 60
4.20 Rezeptur und Betonkenndaten - A13 Europabrücke . . . 61
4.21 Rezeptur und Betonkenndaten - B180 Niklasgalerie . . . 63
4.22 Betonrezeptur - L13 Tafelweggalerie . . . 64

4.23 Betonrezeptur - L36 Loipenüberführung Seefeld 65
4.24 Rezeptur und Betonkenndaten -LS114 Pfelders 66
4.25 Rezeptur und Betonkenndaten -SS44 Kehre 10 Jaufenpass 67
4.26 Rezeptur und Betonkenndaten -SS238 KM 10 Gampenpassstraße 68
4.27 Rezeptur und Betonkenndaten -SS238 KM 16 Gampenpassstraße 69

5.1 Termine und Teilnehmer Besprechungen 72
5.2 Termine der öffentlichen Veranstaltungen 73

A.3 Abbildungsverzeichnis

1.1 Exemplarische Schadensbilder 4

2.1 Einfluss der Wassergläser auf das Porensystem 7

3.1 Prüfkörperanordnung innerhalb der Versuchsplatten - WP 3 9
3.2 Untersuchte Schalungshäute - WP3 10
3.3 Piktogramme der untersuchten Einflüsse - WP 3 11
3.4 Prüfkörperanordnung innerhalb der Versuchsplatten - WP 4 13
3.5 Rendering des Brandstandes im Planungsstadium - Brandversuche WP 6 15
3.6 REM Aufnahmen der Oberflächenqualität der Oberflächenvergütungsmittel 19
3.7 Oberflächenanalysen der Oberflächenvergütungsmittel 20
3.8 Bestimmung der Eindringtiefen 20

4.1 Eindrücke zur ersten Betonage - WP 3 21
4.2 Abwitterungsverteilung bei vertikaler Befüllung - Zusatzversuche WP 3 31
4.3 Eindrücke zur Prüfkörper Herstellung - WP 4 34
4.4 Aufnahmen der Eindringtiefe unter dem Fluoreszenzmikroskop - WP 4 37
4.5 Eindrücke zur Prüfkörper Herstellung - WP 5 40
4.6 Vergleich der Oberflächen nach der Applikation - WP 6 Umweltbedingungen und Nachbehandlung 46
4.7 Lagerung der Versuchsplatte - WP 6 Dauerhaftigkeit 49
4.8 Eindrücke zur Prüfkörper Herstellung - WP 6 Brandversuche 52
4.9 Lage der Sensoren - WP 6 Brandversuche 53
4.10 Abplatzungen nach den Brandversuchen 54
4.11 A12 Galerie Senftenberg 56
4.12 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - A12 Galerie Senftenberg 56
4.13 A12 Anschlussstelle Kufstein Süd 58
4.14 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - A12 Anschlussstelle Kufstein Süd 58
4.15 S16 Sannabrücke 60
4.16 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - S16 Sannabrücke 60
4.17 A13 Europabrücke Randbalken 61
4.18 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - A13 Europabrücke Randbalken 61
4.19 B180 Niklasgalerie 63
4.20 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - B180 Niklasgalerie 63
4.21 L13 Tafelweggalerie 64
4.22 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - L13 Tafelweggalerie 64

4.23 L36 Loipenüberführung Seefeld . . . 65
4.24 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - L36 Loipenüberführung Seefeld . . . 65
4.25 LS114 Pfelders . . . 66
4.26 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - LS114 Pfelders . . . 66
4.27 SS44 Kehre 10 Jaufenpass . . . 67
4.28 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - SS44 Kehre 10 Jaufenpass . . . 67
4.29 SS238 KM 10 Gampenpassstraße . . . 68
4.30 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - SS238 KM 10 Gampenpassstraße . . . 68
4.31 SS238 KM 16 Gampenpassstraße . . . 69
4.32 Positionsskizze der Vergütungsbereiche - SS238 KM 16 Gampenpassstraße . . . 69

5.2 Homepage . . . 75
5.3 Artikel in der Zeitschrift „Tirol Kommunal“ - 05.06.2017 . . . 76
5.4 Tiroler Landeszeitung - Ausgabe 4/ September 2017 . . . 76
5.5 Plakat . . . 77
5.6 Roll-Up . . . 78

A.4 Diagramme

4.1 Wirkung der Oberflächenvergütungsmittel - WP 3 . . . 25
4.2 Einfluss der Schalungshaut - WP 3 . . . 27
4.3 Einfluss der Applikationsrichtung - WP 3 . . . 29
4.4 Einfluss der Vorbehandlung - WP 3 . . . 29
4.5 Einfluss der Applikationstemperatur - WP 3 . . . 30
4.6 Einfluss der Applikationstechnik - WP 3 . . . 30
4.7 Einfluss der Betonagerichtung auf die Abwitterung - Zusatzversuche WP 3 . . . 31
4.8 Abwitterung an Schalungs- und Schnittflächen - Zusatzversuche WP 3 . . . 32
4.9 Bruchbild im Beton nach HDW-Strahlen - Zusatzversuche WP 3 . . . 32
4.10 Eindringtiefe Oberflächenvergütungsmittel - WP 4 . . . 36
4.11 Ergebnisse - WP 4 . . . 37
4.12 Ergebnisse - WP 5 . . . 42
4.13 Ergebnisse - WP 6 Umweltbedingungen und Nachbehandlung . . . 47
4.14 Ergebnisse - WP 6 Dauerhaftigkeit . . . 50
4.15 Temperaturkurven der Brandversuche . . . 54
4.16 Chloridgehalt in zwei Tiefenstufen - A12 Galerie Senftenberg . . . 57
4.17 Chloridgehalt in zwei Tiefenstufen - A12 Anschlussstelle Kufstein Süd . . . 59
4.18 Chloridgehalt in zwei Tiefenstufen - A13 Europabrücke Randbalken . . . 62