

Smart Minerals GmbH

Reisnerstraße 53
1030 Wien
Österreich

T +43 -1-714 66 81 - 0
F +43 -1-714 66 81 - 66
office@smartminerals.at

2014 01 31
MP/Wö 2088
B 629/14

FFG Projekt Nr. 835705
VIF 2011

Einfluss von Luftporenkennwerten und Nachbehandlung auf die Frost-Taumittel- beständigkeit (FTB) von Betonfahrbahnen

Schlussbericht Smart Minerals GmbH

Autoren: Dipl.-Ing. Dr. Martin PEYERL
Dipl.-Ing. Christian DILLIG
Mag.(FH) Dipl.-Ing. Dr. Stefan KRISPEL

Wien, Jänner 2014

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Einleitung.....	3
2.1	Problemstellung und Ziele des Forschungsvorhabens	3
2.2	Stand der Technik.....	4
2.2.1	Allgemeines.....	4
2.2.2	Historische Entwicklung	4
2.2.3	Wirkungsmechanismen der Frostbeanspruchung	5
2.2.4	Maßnahmen zur Sicherstellung einer ausreichenden Frostbeständigkeit.....	8
2.2.5	Einfluss der Nachbehandlung auf die Beständigkeit	12
2.2.6	Einfluss der Porosität auf die Beständigkeit.....	13
2.2.7	Normative Anforderungen	15
2.2.8	Zusammenfassung.....	16
2.3	Durchgeführte Arbeiten bzw. technische Lösungsvorschläge	17
3	Prüfungsdurchführung.....	19
3.1	Prüfverfahren	19
3.1.1	Frischbetonprüfung	19
3.1.2	Probekörperherstellung.....	22
3.1.3	Festbetonprüfungen	23
3.2	Probekörperherstellung	27
3.2.1	Luftporenverteilung	27
3.2.2	Betonzusammensetzung.....	28
3.3	Vorversuche.....	29
3.3.1	Frischbetonprüfung	30
3.3.2	Festbetonprüfung Luftporenkennwerte	31
3.3.3	Zusammenhänge	32
3.4	Hauptversuche.....	35
3.4.1	Frischbetonprüfung	37
3.4.2	Festbetonprüfung Betonkennwerte.....	38
3.4.3	Festbetonkennwerte Betongüte	39
3.4.4	Simulation Baustellenbedingungen.....	43
3.4.5	Zusammenhänge	44
3.5	Feldversuche	68
4	Zusammenfassung	73
5	Literaturverzeichnis	75
6	Abbildungsverzeichnis.....	77
7	Tabellenverzeichnis.....	79
8	Anhang.....	80

2 Einleitung

Betonfahrbahnen sind im Laufe ihrer Lebensdauer hohen Belastungen aufgrund von Verkehr und Umweltbedingungen ausgesetzt. Daher werden an die Herstellung von Betondecken sehr hohe Anforderungen an die Beständigkeit der Oberflächen gegenüber äußeren Einflüssen – insbesondere der Frost-Taumittel-Beständigkeit – gestellt, die über die gesamte Lebensdauer zu gewährleisten sind. Grundlage hierfür ist Beton mit einer gleichbleibend hohen Qualität (erforderlicher Bindemittelgehalt und W/B-Wert sowie ein adäquates Luftporensystem im Festbeton) und eine gute Nachbehandlung der eingebauten Betondecke. Aufgrund unterschiedlichster Einflussfaktoren beim Herstellungsprozess, aber auch durch äußere Einflüsse zufolge Witterung wurde festgestellt, dass die gestellten Anforderungen nicht immer zielsicher erreicht werden können.

Die derzeit gültigen Richtlinien und Normen definieren Anforderung an den Bindemittelgehalt, an den W/B-Wert und das Luftporensystem. Kommt es zur Nichteinhaltung einer oder mehrerer dieser Grenzwerte, ist diese Beständigkeit gegenüber Umwelteinwirkungen im erforderlichen Maße nicht mehr sichergestellt. Aufgrund dieser Tatsache soll im Rahmen eines Forschungsprogramms geklärt werden, in wie weit sich Unterschreitungen der definierten Grenzwerte oder eine ungenügende Nachbehandlung negativ auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit des Betons über seine Lebensdauer auswirken. Hierfür erfolgen Laboruntersuchen zur Aufstellung von Zusammenhängen zwischen Luftporenverteilung, W/B-Wert, Porosität des Bindemittelsteins und Nachbehandlung in Relation zu Abwitterungserscheinungen infolge Frost-Taumittel-Beanspruchung. Auf Basis dessen erfolgt die Beurteilung von tatsächlich geschädigten Autobahnabschnitten mit den gleichen Bestimmungsmethoden. Auf Basis aller gesammelten Ergebnisse sollen Zusammenhänge zwischen Betonqualität und eventueller Gefügeschädigung durch Frost hergestellt werden. Im Rahmen der Zusammenführung der Ergebnisse wird ein Vorschlag für eine eventuelle Änderung der derzeit gültigen Richtlinien erstellt.

2.1 Problemstellung und Ziele des Forschungsvorhabens

Die Herstellung von Betondecken ist eine anspruchsvolle Bauweise, deren Wirtschaftlichkeit nur dann gegeben ist, wenn diese eine entsprechend hohe Lebensdauer bei geringen Unterhaltungskosten aufweist. Dafür ist es wichtig, dass Betondecken den zu erwartenden Einwirkungen widerstehen und die an sie gestellten Anforderungen dauerhaft über die veranschlagte Lebensdauer von 40 bis 50 Jahren erfüllen. Basis hierfür ist ein Beton mit einer gleichbleibend hohen Qualität (erf. Bindemittelgehalt, W/B-Wert und Luftporensystem) und eine adäquate Nachbehandlung. Aufgrund von baupraktischen Schwankungen können die gemäß Richtlinien und Normen geforderten Ansprüche nicht in allen Fällen zielsicher eingehalten werden. Werden die an die Ausführung gestellten Anforderungen nicht, oder nur teilweise erfüllt, sind Schäden, die oft erst lange nach Ablauf der Gewährleistung sichtbar werden, unvermeidbar.

Ziel des Forschungsvorhabens war, unterschiedliche Schwankungen im gesamten Herstellungsprozess zu erfassen und deren Auswirkungen auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit klar darzulegen. Hierbei wurden sowohl Einflussfaktoren der Betonqualität als auch der baupraktischen Ausführung (Einbau und Nachbehandlung) untersucht. Durch Kenntnis dieser für eine hohe Qualität entscheidenden Parameter soll eine zielsichere und überprüfbare Herstellung der Betondecke möglich sein und so eine hohe Qualität der Fahrbahn über die gesamte Lebensdauer sichergestellt werden. Dies hat sowohl eine positive Auswirkung auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer als auch auf die Arbeitsbedingungen der mit Instandsetzungsmaßnahmen betrauten Baufirmen.

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Allgemeines

Betondecken sind während ihrer Lebensdauer sehr hohen Beanspruchungen durch Verkehr sowie durch einwirkende Umweltbedingungen ausgesetzt. Um diesen Belastungen zu widerstehen, werden grundsätzlich sehr hohe Anforderungen an die Betonzusammensetzung bzw. den Einbauvorgang bei der Herstellung von Betonfahrbahndecken gestellt. Erfolgt eine ordnungsgemäße Herstellung von Betondecken, können diese aufgrund ihrer weitgehend unveränderten Materialeigenschaften eine weit höhere Lebensdauer als Asphaltbefestigungen aufweisen. Betonfahrbahndecken werden daher gerade im österreichischen, hochgelasteten Streckennetz (Anteil etwa 40 Prozent vom Gesamtnetz Autobahnen und Schnellstraßen mit etwa 2100 km) vermehrt eingesetzt [1].

Die hohe Beständigkeit und Wirtschaftlichkeit von Betonfahrbahnen ist aber nur ein Aspekt. Betonfahrbahnen entwickeln sich immer mehr zu einer nachhaltigen Bauweise. Lärm, Helligkeit, Ebenheit, Griffigkeit, erhöhte Brandbeständigkeit, hoher Recyclinganteil, etc. sind nur einige Aspekte von Betondecken, die die Zukunft unserer Gesellschaft positiv beeinflussen. Um diese speziellen Eigenschaften dauerhaft sicherstellen zu können, ist eine hohe Qualität in der gesamten Ausführungskette essentiell. Normen und Richtlinien definieren jeweils Anforderungen auf einem Mindeststandard für Betonherstellung, Einbau und Nachbehandlung und spiegeln so den stetig weiterzuentwickelnden Stand der Technik wider.

2.2.2 Historische Entwicklung

Betonstraßen werden seit Beginn des 20. Jahrhunderts im deutschsprachigen Raum hergestellt. Es setzten sich schon sehr früh Erkenntnisse durch, dass zur Vermeidung von Rissen Querfugen sowie eine sorgfältige Nachbehandlung erforderlich sind. Während die Kenntnisse über Zusammensetzung des Betons und Wasserzement-Wert (W/Z- Wert) noch sehr gering waren, wurde auf eine sorgfältige Nachbehandlung großen Wert gelegt. Es war Praxis, frisch hergestellte Betonfahrbahndecken bis zu 4 Wochen lange mit ständig feucht gehaltenem Sand vor Austrocknung zu schützen [2]. In Österreich wurde die erste Betonfahrbahndecke im Jahr 1904 in Amstetten gebaut. Während im Unterbeton Zementgehalte von lediglich 140 bis 180 kg/m³ eingesetzt wurden erfolgte der Einbau des Oberbetons mit 450 kg/m³ Zement. Die Einbringung erfolgte erdfeucht und die Verdichtung in der Regel durch Stampfen. In Wien wurde die erste Betonfahrbahndecke für eine Müllumladestelle im Jahr 1927 errichtet. Der Einbau erfolgte zweischichtig mit 20 cm Unterbeton und 5 cm Oberbeton [3].

Der großflächige Einbau von Betondecken startete in Österreich ab dem Jahr 1934. In einem groß angelegten Bauprogramm wurden Teile der Wiener Westeinfahrt in Betondeckenbauweise ausgeführt. Die Verdichtung dieser Fahrbahnbefestigungen erfolgte entweder von Hand durch Stampfen oder mittels Rüttelbohlen [3]. In der Zwischenkriegszeit wurden vor allem in Deutschland rund 5000 km Richtungsfahrbahn an Betondecken hergestellt [2]. Das ab 1938 auch in Österreich groß angelegte Bauprogramm kam durch Kriegsbeginn bald zum Erliegen, es wurde lediglich die Betondecke im Autobahndreieck zwischen Walserberg, Gröding und Zilling in Salzburg fertiggestellt [3].

Die Anfänge des modernen Betondeckenbaus ab 1957 begannen mit dem Deckeneinbau auf der Westautobahn. Es wurden zwei Fahrstreifen mit je 3,75 m Breite mit auf Schienen fahrenden Betonfertigern hergestellt. Die Betonmischanlagen waren oft als Brückenmischer ebenfalls auf dem Fertiger aufgebaut, wodurch massive Schienenkonstruktionen erforderlich waren [3]. In diesem Jahr wurden auch die ersten Richtlinien zur Herstellung von Betondecken von der Arbeitsgruppe „Betonstraßen“ der Forschungsgesellschaft für Straßenwesen (einer Vorgängerorganisation der FSV) herausgegeben [4]. Durch zunehmende Verwendung von Auftaumitteln wird in diesem Regelwerk bereits die Verwendung von Luftporenbildenden Betonzusatzmitteln zur Erhöhung der Frost-Taumittel-Beständigkeit empfohlen.

Einen neuerlichen Entwicklungsschritt stellt das Jahr 1965 dar, da in diese Zeit der Bau der Südbahn im Abschnitt Wien – Wr. Neustadt in Betonbauweise fiel. In der neuerlichen Überarbeitung der Richtlinien wurde ein Mindestzementgehalt von 350 kg/m³ für Unter- und Oberbeton festgelegt. Darüber hinaus erfolgte aufgrund der notwendigen höheren Widerstandsfähigkeit der Betondecke gegenüber Frost-Taumittel-Angriff bereits die Vorgabe der Verwendung von Luftporenbildenden Betonzusatzmitteln für den Straßenoberbeton [5]. Das erste österreichische Regelwerk zur Sicherstellung der Wirksamkeit der verwendeten Zusatzmittel hinsichtlich Lufteinführung sowie Porenverteilung stammt ebenfalls aus dieser Zeit [6].

Einen weiteren betontechnologischen Entwicklungsschub erfuhr die Betondeckenherstellung ab 1980. Es erfolgte der erste Einsatz von Fließmitteln für die Betondeckenherstellung sowie die Verwendung von modernen Betondeckenfertigern. Aufgrund dieser neuen Entwicklungen wurde ein Betonvereins-Merkblatt erstellt, welches in Folge in RVS 8.632 bzw. RVS 8S.06.32 übergeführt wurde [7, 8]. Die in diesem Regelwerk angeführten Neuerungen betreffen die Verwendung von Nachbehandlungsmitteln anstatt der Verwendung von Schutzdächern sowie die Möglichkeit der Verwendung von Mikrohohlkugeln anstatt Luftporenmittel [3]. RVS 8S.06.32 ist die Vorgängerversion der heute für Betonherstellung und Einbau gültigen RVS 08.17.02 [9].

2.2.3 Wirkungsmechanismen der Frostbeanspruchung

Die Auswirkung von Frost-Tauwechselbeanspruchung auf den Beton ist abhängig von seinem Feuchtigkeitsgehalt sowie von der Häufigkeit und Intensität der Temperaturänderungen. Generell nimmt die Beanspruchung des Betons mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt zu, wobei zusätzlich aufgebrauchte Taumittel diesen Effekt noch verschärfen. Während Beton bei geringer Umgebungsfeuchte und sachgerechter Ausführung nahezu unempfindlich gegenüber Frost-Tauwechseln ist, ist die Gefahr von Schäden besonders groß, wenn der Beton in durchfeuchteten Zustand mit Einwirkung von Taumitteln oftmaligen Frost-Tauwechseln ausgesetzt ist.

Frostschädigung im Beton tritt immer in Kombination mit Feuchtigkeit auf. Infolge der Phasenzustandsänderung von flüssig zu fest dehnt sich Wasser um ca. 9 Vol.-% aus. Erreicht das Wasser in den Poren des Zementsteins einen kritischen Wert, kann das Wasser bei einer Phasenänderung von flüssig nach fest nicht mehr expandieren ohne einen Sprengdruck auf den umgebenden Zementstein auszuüben. Dies kann zu großen Zugspannungen im Zementstein führen. Überschreiten diese Zugspannungen die maximal aufnehmbaren Zugspannungen des Zementsteins, so kommt es zu einer Mikrorissbildung im Zementstein. Abbildung 1 zeigt die Eisbildung in einer künstlichen Luftpore.

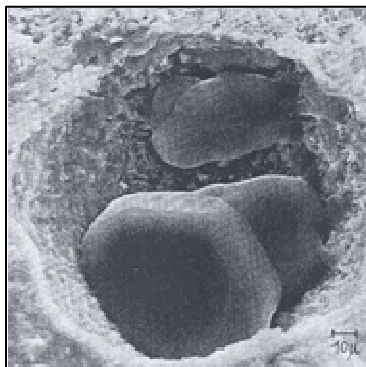


Abbildung 1: Eis in einer künstlich eingeführten Luftpore [10]

Ausschlaggebend für eine Schädigung infolge Frostbeanspruchung ist somit der Sättigungsgrad des Porensystems. Eine kritische Sättigung des Porensystems wird nur bei wiederholter Frost-Tauwechselbeanspruchung mit tiefen Temperaturen erreicht. Das Mikroeislinnenmodell von Setzer gibt eine Erklärung dafür. Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur und der Dehnung eines Betonbauteils während einer Frost-Taubbeanspruchung. Beton wird hierbei vereinfachend als ein System bestehend aus Zementstein, welcher Gelporen enthält, mit eingebetteten Kapillarporen betrachtet.

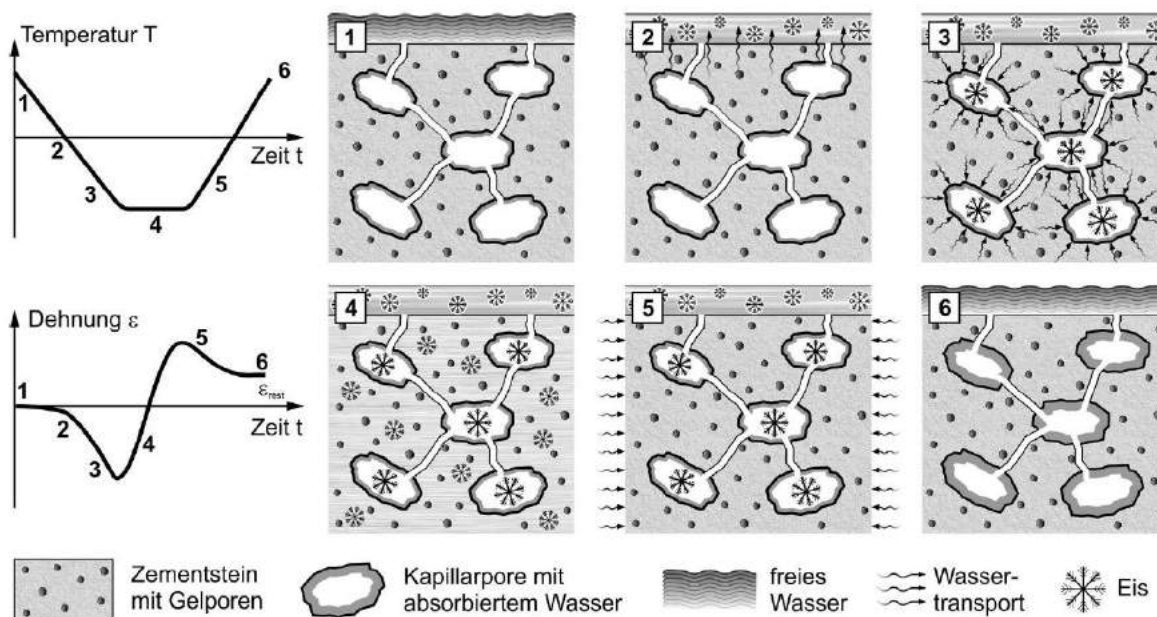


Abbildung 2: Eis in einer künstlich eingeführten Luftpore [11]

Gemäß Abbildung 2 gefriert bei einer Abkühlung des Betons unter 0°C zunächst das Wasser an der Oberfläche des Betons (Stadien 1 und 2). Das restliche Wasser liegt zu diesem Zeitpunkt noch in flüssiger Form vor. Die Abkühlung bewirkt jedoch Dampfdruckveränderungen in den einzelnen Poren. Als Folge dessen gibt der Zementstein Wasser an die Umgebung ab. Makroskopisch verliert der Betonkörper an Volumen. Dies bezeichnet man auch als Gefrierschwinden. Bei einer weiteren Reduktion der Temperatur beginnt auch das Wasser in den größeren Kapillarporen zu gefrieren (Stadium 3). Als Folge kommt es auch hier, infolge starker Austrocknung, zu einer Verminderung des Zementsteinvolumens. Erst bei sehr tiefen Temperaturen von -25°C gefriert das Wasser in den kleinsten Kapillarporen und in den Gelporen (Stadium 4). Steigt die Temperatur anschließend wieder an, so taut zunächst das Eis in den Gelporen und kleineren Kapillarporen. In den größeren Kapillarporen entsteht ein Unterdruck, der durch eine Wasseraufnahme, also einer Erhöhung des Sättigungsgrades, abgebaut wird. Dieser Effekt wird als Frostsaugen bezeichnet. Voraussetzung dafür ist, dass zu diesem Zeitpunkt flüssiges Wasser zur Verfügung steht. Bei der Verwendung von Taumitteln (z.B Chloride) auf der Betonoberfläche wird die Gefrierpunktttemperatur des Wasser herabgesetzt. Dies begünstigt das Frostsaugen. Als Folge tritt dann Wasser, welches mit Chloriden versetzt ist, in das Porensystem ein. Aufgrund der osmotischen Wirkung des Salzes wird das Porensystem weiter gesättigt [11].

Aufgrund der oben beschriebenen Mechanismen sowie dem Umstand, dass sich Wasser bekanntlich beim Gefrieren um etwa 9 % ausdehnt, kommt es ab einem Füllungsgrad der Poren von mehr als 90 % zum Entstehen von Gefrierdruck. Resultierend daraus entstehen im Beton feinste Anrisse, die durch wiederholte Frostbeanspruchung immer größer werden [12]. Dieser Effekt kann versuchstechnisch, wie in Abbildung 3 dargestellt, mittels zunehmender Frostdehnung ermittelt werden. Werden Maßnahmen, wie das Einführen künstlicher Luftporen in den Beton, getroffen (siehe auch Abschnitt 2.2.4) können die auftretenden Dehnungen deutlich reduziert werden.

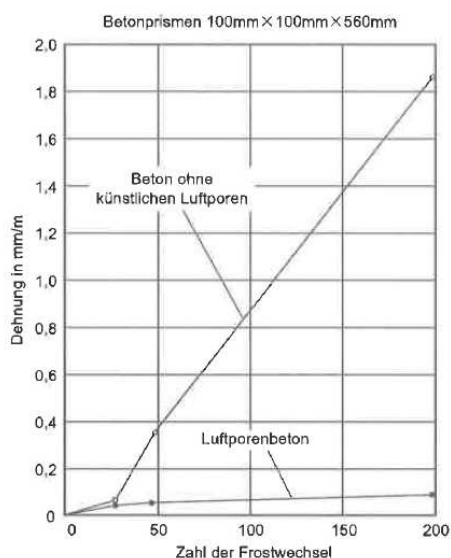


Abbildung 3: Zunehmende Frostdehnung durch das Entstehen von Mikrorissen bei Beton mit und ohne künstliche Luftporen [12]

Der in Abbildung 3 durch Dehnungen gezeigte Schädigungsverlauf äußert sich in einer zunehmenden, von der Oberfläche beginnenden Gefügearauflockerung und der daraus resultierenden Abwitterung der oberflächennahen Betonschichten. Abbildung 4 zeigt typische Frostschäden an ohne Luftporenbildner hergestellten Betonfahrbahndecken.



Abbildung 4: Frostschäden an einer ohne künstliche Luftporen hergestellten Betondecke [Foto VÖZFI]

2.2.4 Maßnahmen zur Sicherstellung einer ausreichenden Frostbeständigkeit

Beton mit hohem Frostwiderstand ist in erster Linie für voll der Witterung ausgesetzte Bauwerke des Wasser-, Brücken- und Hochbaus sowie des Fahrbahnbaues erforderlich. Generell bedingt ein hoher Frostwiderstand und Frost-Taumittel-Widerstand einen dichten Beton. Darüber hinaus ist ein bestimmter Gehalt an künstlich eingeführten Mikroluftporen erforderlich. Die angestrebten Eigenschaften werden aber insbesondere in den oberflächennahen Bereichen nur bei einer wirksamen Nachbehandlung des Betons erreicht. Bei der Frostbeanspruchung ist grundsätzlich zwischen dem Frostwiderstand und dem Widerstand gegen Frost-Taumittel bei gleichzeitiger Einwirkung von Taumitteln zu unterscheiden. Ein Beton, der einen ausreichend großen Widerstand gegen Frosteinwirkung besitzt, kann zerstört werden, wenn Taumittel hinzukommen. Diese werden im Winterdienst eingesetzt, um die Verkehrsflächen bei Temperaturen unter 0 °C eisfrei zu halten. Ihre Wirkung beruht auf der Absenkung des Gefrierpunktes des Wassers (z.B. Taumittel) [10].

Ist die frostbeständige Wirkung von Beton (Bindemittelmatrix oder Gesteinskörnung) nicht gegeben, kommt es zu langsamem Abwittern des Feinmörtels und dadurch, beginnend von der Oberfläche, zur Lockerung des Gefüges. Weitere Folgen sind das Ablösen von Oberflächenschichten sowie das Absprengen von an der Oberfläche liegender Gesteinskörnung [10, 12]. Für den Frostwiderstand des Betons sind, ausreichende frostwiderstandsfähige Gesteinskörnungen vorausgesetzt, die Dichtigkeit seines Gefüges und die Festigkeit der Matrix maßgebend. Die Dichtigkeit begrenzt eine mögliche Wasseraufnahme und damit die Wassermenge, welche im Gefüge gefrieren kann. Generell wird die Betonqualität durch den Bindemittelgehalt sowie das Verhältnis von Wasser zur Gesamtbindemittelmenge (W/B-Wert) definiert. Abbildung 5 zeigt die Wasserdurchlässigkeit von Zement in Abhängigkeit von Kapillarporenraum und W/B-Wert.

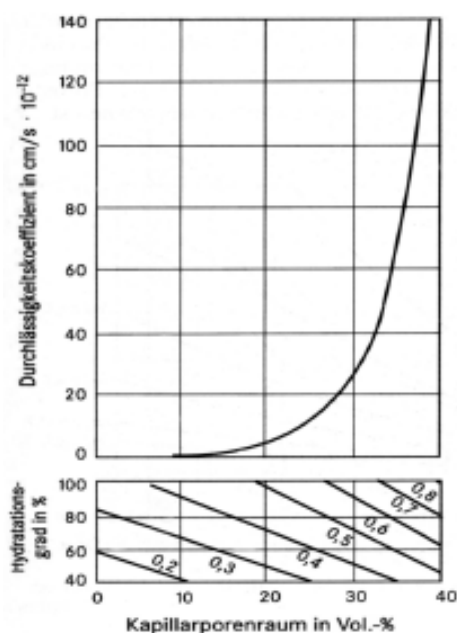


Abbildung 5: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von Kapillarporenraum und W/B-Wert [10]

Gemäß Abbildung 5 wird der Kapillarporenraum umso größer je höher der W/B-Wert bzw. je niedriger der Hydratationsgrad ist. Bei entsprechend vorhandenem Wasser füllt sich dieser Porenraum mit Wasser, welches bei entsprechend tiefen Temperaturen zu frieren beginnt. Da im Porenwasser unterschiedliche Stoffe gelöst sind, beginnt dieses erst bei etwa -5 °C zu gefrieren. Je kleiner die Poren sind, umso tiefer muss die Temperatur gesenkt werden, damit in diesen Poren eine Umwandlung von Wasser in Eis stattfinden kann. Das Wasser in den Mikroporen und das an den Porenwänden adsorptiv gebundene Wasser gefriert beispielsweise erst bei ca. -90 °C [13, 14]. Bei einem Wasser-Zement-Wert von 0,60 sind bei -20 °C nur ca. 25 % des im Gefüge vorhandenen Wassers überhaupt in Eis übergegangen [5]. In einem durch Saugen feuchtegesättigten Beton ist bei einer Abkühlung auf Temperaturen von -50 °C nur ca. 35 % des Wassers gefroren [10]. Durch das Vorhandensein von NaCl im Porenwasser sinkt der Gefrierpunkt der Porenlösung noch weiter ab, als dies bei Vorhandensein von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ der Fall ist. Unter sonst gleichen Bedingungen findet der erste Eisübergang bei einer noch tieferen Temperatur statt als ohne Vorhandensein von NaCl. Das hat zur Folge, dass die Wasserumverteilung infolge Dampfdruckunterschiede zwischen flüssiger und fester Phase nicht so ausgeprägt ist wie ohne des Salzes. Die Wahrscheinlichkeit, dass in den kleineren Poren Wasser in Eis umgewandelt wird, bevor diese Wasser abgeben konnten, steigt und damit auch die Gefahr der Sprengwirkung [10].

Um den Frostwiderstand von Beton deutlich zu erhöhen, werden bei Betonsorten mit hoher Wassersättigung bzw. bei vorhandenem Taumittleintrag (Expositionsklasse XF2, XF3 und XF4 gemäß ONORM B 4710-1 [15]) künstliche Luftporen eingeführt. Künstlich eingeführte Luftporen im Beton entstehen dadurch, dass während des Mischprozesses dem Beton Luftblasen an die Moleküle des Luftporenbildners angelagert werden. Es werden so lange neue Luftporenmoleküle gebildet, bis die Wirksubstanz verbraucht ist. Die zur Luftporenbildung verwendeten Substanzen gehören zu den Tensiden und bewirken, dass die beim Mischen des Betons entstehenden Luftblasen stabilisiert werden. Dadurch verbleiben im erhärteten Beton kugelförmige Luftporen. Während früher als Grundstoffe für die Produktion von Luftporenbildner Seifen aus natürlichen Harzen verwendet wurden, kommen derzeit fast ausschließlich synthetische Stoffe, wie Alkylpolyglykolethersulfate und Alkylsulfate bzw. Sulfonate zum Einsatz. Um eine ausreichende Menge an Luftporen im Frischbeton zu generieren, müssen Luftporenmittel entsprechend dosiert werden, da die Bildung der Luftporen von der Konzentration des im Frischbeton gelösten Luftporenbildners abhängig ist [16].

Ein oft in der Praxis auftretendes Problem ist, dass teilweise zu hohe Luftgehalte beim Einbau von Betonstraßen festgestellt werden. Aufgrund dieser hohen Luftgehalte können erforderliche Eigenschaften, wie Festigkeit bzw. Dauerhaftigkeit deutlich reduziert werden. Ursache ist meist eine nicht ausreichende Mischzeit, wodurch der Luftporenbildner nicht ausreichend aufgeschlossen wird. Wird im Zuge des Einbauvorganges weitere Energie durch Betonverteilung (Verteilerschnecke) oder durch Verdichtung eingebracht, kann dies zu einer weiteren, ungewünschten Erhöhung des Luftgehaltes führen. Wichtig ist daher, auf eine ausreichend lange Mischzeit im Transportbetonwerk zu achten [17].

Der Wirkungsmechanismus zur deutlichen Erhöhung des Frostwiderstandes von Beton durch Einführung von künstlichen Luftporen wurde bisher hauptsächlich darauf zurückgeführt, dass die kleinen, künstlichen, mit Luft gefüllten Poren den beim Gefrieren des Wassers entstehenden Druck aufnehmen [12]. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass das Wassersaugen der ersten Kristallisationskeime durch die Luftporen unterbrochen wird. Fehlen diese künstlichen Poren, wird der Beton mehr und mehr durch das wiederholte Einfrieren geschädigt und es kommt zu einer fortlaufenden Zerstörung [12, 14].

Der Wirkungsmechanismus von Luftporen im Beton ist in Abbildung 6 erklärt. Obwohl durch ihre Größe eine vollständige Wasserfüllung der Luftporen im Allgemeinen verhindert wird, weisen sie dennoch geringe Wassermengen auf. Durch das Vorhandensein dieses makroskopischen Wassers erfolgt eine Eisbildung in den Luftporen bereits bei Temperaturen um den Nullpunkt und es bildet sich, verglichen mit Betonen ohne künstliche Luftporen, zu einem früheren Zeitpunkt ein für Transportvorgänge wirkungsvolles Dampfdruckgefälle im Porensystem aus. Durch den daraus resultierenden Wasserumverteilungsmechanismus ähnlich dem des kapillaren Effektes, sinkt der Füllungsgrad der kleineren Poren und der Aufbau eines Eisdruckes bei weiterer Temperaturabsenkung wird verhindert [18].

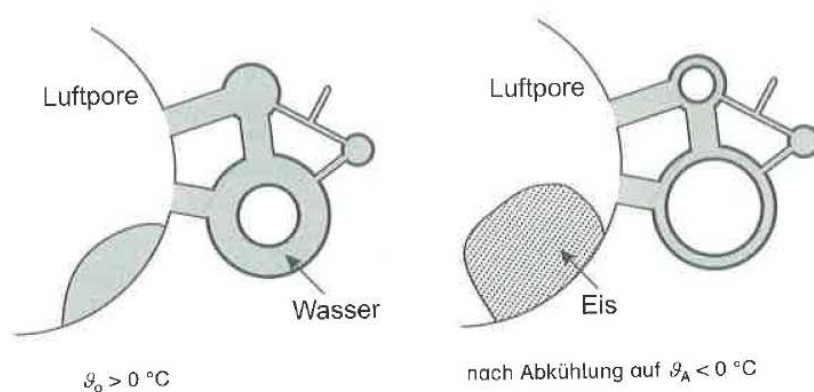


Abbildung 6: Modell von künstlichen Luftporen und Abwanderung von Wasser aus Porenraum in künstliche Luftporen mit Eisbildung (links) [10]

Um eine entsprechende Erhöhung der Frost-Taumittel-Beständigkeit im Beton sicherzustellen, ist es wesentlich, dass Poren sowohl in einer ausreichenden Menge als auch in einer entsprechenden Verteilung vorliegen. Die Erreichung dieser Anforderungen ist jedoch nicht ausschließlich von Dosierung des Luftporenbildners, sondern ebenso von Art und Menge der Betonausgangsstoffe (insbesondere Zement und feine Gesteinskörnung) sowie von dem Zusammenwirken eventuell verwendeter anderer Zusatzmittel abhängig [18, 19]. So ist bei der Anwendung Straßenbeton F52 (für den händischen Einbau gemäß RVS 08.17.02 [20]) die Wirksamkeit der Kombination von Luftporenmittel speziell zu untersuchen. Als Basis für die Festlegungen in RVS 08.17.02 [20] wurden in Österreich bereits Mitte der 1980iger Jahre als auch aktuelle Untersuchungen zur Interaktion von Luftporenbildner und Fließmitteln angestellt [21, 22].

Erste Untersuchungen der erhöhten Frostbeständigkeit von Betonen mit künstlichen Luftporen liegen bereits mehr als 50 Jahre zurück [23]. Neben dem wirkungsvollen Eintrag von möglichst vielen kleinen Luftporen ist auch der Nachweis einer entsprechenden Verteilung wesentlich. Dies erfolgt auf Basis des Messlinienverfahrens nach Rosiwal. Dabei wird der Luftgehalt und Abstandsfaktor indirekt durch Ermittlung von Sehnlängen an definierten Messlängen ermittelt. Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung der relevanten Messwerte. Beispiele für erste Anwendungen dieses Verfahrens können in Österreich bereits ab den 1960iger Jahren gefunden werden [23, 24]. Derzeit wird die exakte Vorgehensweise zur Bestimmung der relevanten Parameter der Luftporenkennwerte (L300 – Mikroluft bis zu einem Durchmesser von 300 µm und AF – Abstandsfaktor als Maß für die Luftporenverteilung) in ONR 23303 [25] beschrieben.

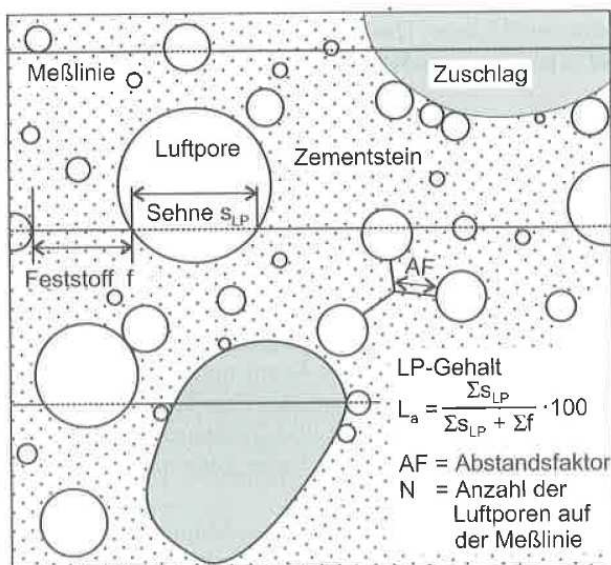


Abbildung 7: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von Kapillarporenraum und W/B-Wert [10 S 465]

Vor der Luftporenauszählung ist der Probekörper auf die entsprechenden Abmessungen (i. d. R. 150x100x40 cm) zu schneiden und grob und fein zu schleifen. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Luftporenanschliffe eine hohe Qualität aufweisen und Poren durch den Schleifvorgang weder ausgerissen noch verstopft werden. Die Auszählung der Luftporen erfolgt gemäß ONR 23303 anhand von über die Prüffläche verteilten Messlinien mit einem Mikroskop mit 100- bzw. 50-facher Vergrößerung. Für jeden Probekörper ist eine Messstrecke von mindestens 1200 mm erforderlich [25]. Mit Hilfe der in ONR 23303 angegebenen Berechnungsformeln werden die Luftporenkennwerte Abstandsfaktor (AF) und L300 (Gehalt an Mikroluftporen mit einem Durchmesser von bis zu 300 µm) ermittelt.

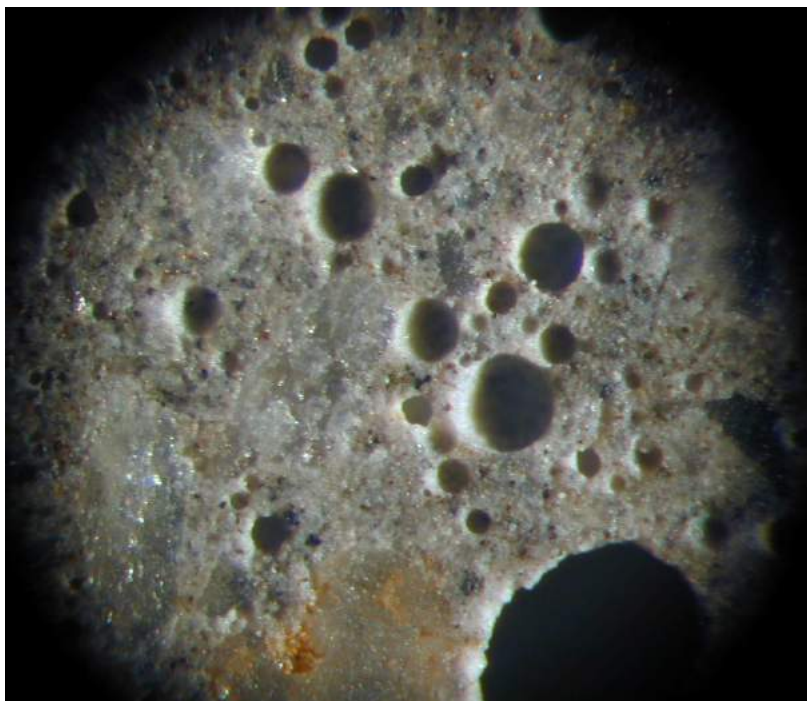


Abbildung 8: Fotografische Aufnahme einer künstlichen Luftpore

2.2.5 Einfluss der Nachbehandlung auf die Beständigkeit

Speziell auf die Oberflächen von frisch hergestellten Betonfahrbahndecken wirken viele Umwelteinwirkungen, die die Betonqualität dieser oberflächennahen Zone beeinträchtigen können. Um diesem Qualitätsverlust vorzubeugen sind die jungen Oberflächen entsprechend vor Austrocknung, Aufheizung etc. zu schützen. Bei nicht entsprechender Nachbehandlung kommt es zu einem deutlichen Qualitätsverlust in den oberflächennahen Betonschichten. Da gerade diese Zone mechanischer Beanspruchung und Witterungseinflüssen ausgesetzt wird, ist zur Sicherstellung eines entsprechend dauerhaften Bauwerkes auf eine adäquate Nachbehandlung ein besonderes Augenmerk zu legen. Abbildung 9 zeigt schematisch den Qualitätsverlust an der Betonoberfläche aufgrund nicht ausreichender Betonnachbehandlung.

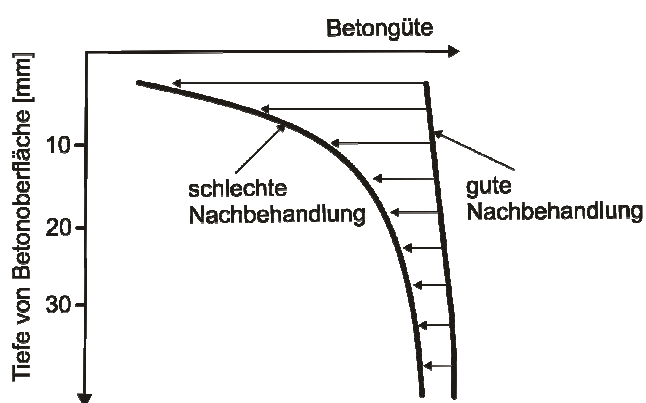


Abbildung 9: Einfluss der Nachbehandlung auf die Betongüte [26]

Bei der Herstellung von Betondecken wird zu Nachbehandlung in der Regel ein flüssiges Nachbehandlungsmittel verwendet. Alternativ kann die Nachbehandlung auch durch Folienabdeckung oder Nassnachbehandlung erfolgen, diese Verfahren werden jedoch kaum noch ausgeführt [1]. Generell ist bei der Herstellung von Betondecken so früh wie möglich ein flüssiges filmbildendes Nachbehandlungsmittel auf die Oberfläche aufzusprühen. Hierbei ist das Nachbehandlungsmittel gleichmäßig und in der erforderlichen Auftragsmenge (bestimmt gemäß RVS 11.06.42 [27]) aufzusprühen.

Bei Betondecken in Waschbetonbauweise ist die Nachbehandlung speziell an dieses Bauverfahren anzupassen. Hier wird unmittelbar nach der Betondeckenherstellung ein Kombinationsmittel aus Kontaktverzögerer und Nachbehandlungsmittel auf die frische Betonoberflächen aufgebracht. Nach Erreichen einer entsprechenden Festigkeit wird durch Ausbürsten die endgültige Waschbetonoberfläche hergestellt. Auf diese wird in weiterer Folge der zweite Verdunstungsschutz aufgebracht [1]. Neue Untersuchungen haben gezeigt, dass die erste Nachbehandlung mit dem Kombinationsmittel nur eine geringe Verbesserung der Betoneigenschaften liefert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des oberflächennahen Mörtels bei der Herstellung von Betondecken mit Waschbetonstruktur wieder von der Oberfläche entfernt wird und daher die Dauerhaftigkeit des Betons durch diese Nachbehandlung nur relativ wenig beeinflusst wird. Der Einfluss der zweiten Nachbehandlung ist grundsätzlich größer. Verschärfend kommt hier hinzu, dass der Beton nach dem Ausbürstvorgang bereits eine gewisse Festigkeit aufweist und so ein Nachtransport des oberflächlich verdunsteten Wassers nur noch kaum aus tieferen Betonschichten erfolgen kann. Versuche haben gezeigt, dass die Abwitterung von Straßenbetonen, hergestellt aus CEM I und CEM III Zementen, durch Verwendung einer ersten Nachbehandlung im Vergleich zu keiner Nachbehandlung nicht merklich reduziert werden können. Wird die zweite Nachbehandlung nicht durchgeführt, wurden bei CEM I Zementen fast doppelt so hohe bzw. bei CEM III Zementen fast 5-fache Abwitterungsraten festgestellt [31].

Ausreichende Nachbehandlung ist ein wesentlicher Faktor zur Sicherstellung einer ausreichenden Betondeckenqualität. Dies wird in der Regel durch Aufsprühen der erforderlichen Menge an Nachbehandlungsmittel garantiert. In der Baupraxis kommt es jedoch immer wieder vor, dass die definierten Vorgaben, z.B. durch extreme Witterung, nicht zur Gänze eingehalten werden können.

2.2.6 Einfluss der Porosität auf die Beständigkeit

Bei der Hydratation des Zementes verbleibt in Abhängigkeit des W/B-Wertes immer ein gewisser Porenraum im Zement. Dieser Zementsteinporenraum in Kombination mit vorhandenen Verdichtungsporen hat direkte Auswirkungen auf die Dichtigkeit bzw. Beständigkeit des Betons. Die Porenverteilung und auch die Größe der Poren sind ein wichtiges Kriterium, ob es zum Einfrieren von in den Kapillarporen eingelagertem Wasser kommt. Die Porosität des Zementsteins ist bei vollständiger Hydratation in der Regel von W/B-Wert sowie von der Nachbehandlung abhängig. Der W/B-Wert (früher mit W/Z-Wert bezeichnet) wirkt sich direkt auf die Anzahl der Kapillarporen im Beton aus. Für eine vollständige Hydratation von Zement ist ein W/B-Wert von etwa 0,40 erforderlich, bei einem höheren W/B-Wert bleiben mit Wasser gefüllte Hohlräume, die nach Austrocknen zu einer höheren Porosität im Bindemittelstein beitragen [28]. Die Bestimmung der Porosität kann mittels Quecksilberdruckporosimeter erfolgen. In Abbildung 10 ist die Veränderung der Porosität im Bindemittelstein aufgrund unterschiedlicher W/Z-Werte zusammengestellt.

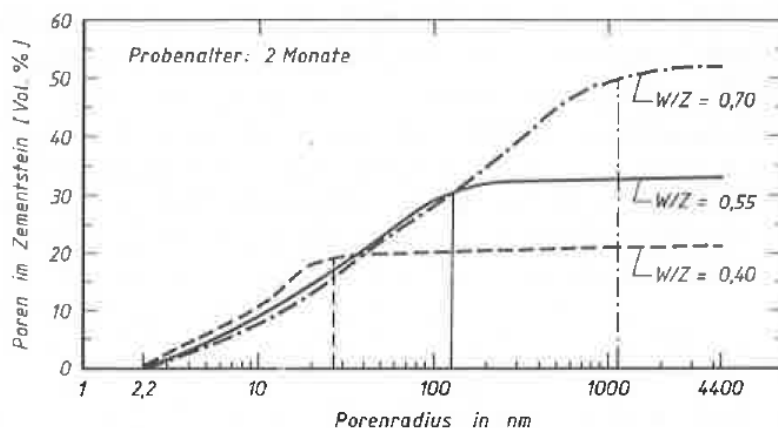


Abbildung 10: Porosität von Zementstein mit unterschiedlichen W/Z Werten [28]

Der in Abbildung 10 dargestellte Porenradius stellt keine Absolutwerte dar, da in der Berechnung von zylindrischen Poren ausgegangen wird. Ein Relativvergleich unterschiedlicher Betonsorten, wie hier dargestellt, ist jedenfalls sinnvoll.

Neben einem veränderten W/B- oder W/Z-Wert wirkt sich auch die Nachbehandlung auf eine veränderte Porosität im Bindemittelstein aus. Im frühen Stadium der Hydratation verliert der Beton bei ungenügender Nachbehandlung sehr viel Wasser. Dies beeinflusst die Betonqualität und die Porosität des Zementsteins nahe der Oberfläche sehr stark. Die Ermittlung der Porosität mittels Quecksilberdruckporosimeter eignet sich daher gut, diese Phänomene zu beschreiben. Abbildung 11 zeigt, dass sich ungenügende Nachbehandlung stark auf die Porosität des Betons an der Oberfläche auswirkt. In tieferen Schichten ist kaum ein Einfluss erkennbar.

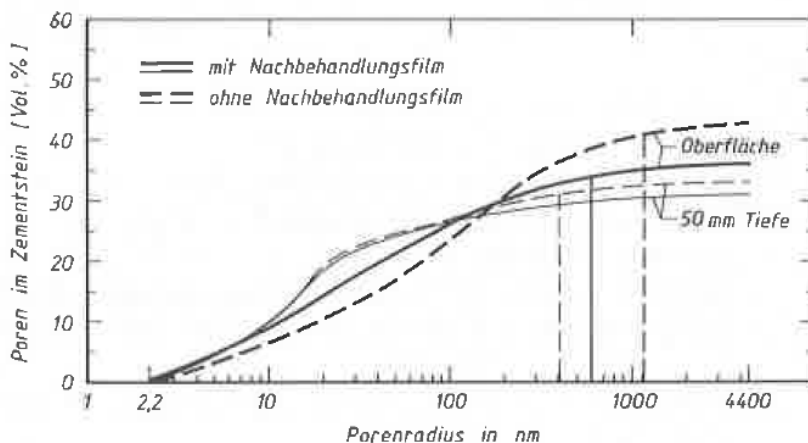


Abbildung 11: Porosität von Zementstein in Abhängigkeit der Nachbehandlung [28]

2.2.7 Normative Anforderungen

Im Folgenden sind die für die Frost-Taumittel-Beständigkeit wesentlichen nationalen und europäischen bzw. deutschen Vorgaben für die Herstellung von Betondecken zusammengestellt. Als wesentliche Parameter zur Sicherstellung der Frost-Taumittel-Beständigkeit können Anforderungen an die Luftporenkennwerte, den Betonbau sowie die Nachbehandlung zusammengefasst werden.

Luftporenkennwerte

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit von Beton ist die Einführung einer ausreichenden Menge von möglichst feinen und eng beieinanderliegenden Luftporen erforderlich. Hierfür werden Anforderungen in europäischen und nationalen Regelwerken definiert. EN 206 [29] spezifiziert lediglich eine Empfehlung für den Mindestgesamtluftgehalt. Eine genaue Definition der Anforderungen erfolgt in den nationalen Regelwerken für Beton in Österreich der ÖNORM B4710-1 [15] sowie in den Regelwerken für die Herstellung von Betonfahrbahndecken in RVS 08.17.02 [9] sowie in Deutschland mit TL Beton-StB [30]. In Tabelle 1 sind die erforderlichen Grenzwerte für die Luftporenkennwerte von Frisch- und Festbeton zusammengestellt.

Tabelle 1: Anforderungen an Luftporenkennwerte

	EN 206	ÖNORM B 4710-1		RVS 08.17.02		TL Beton-StB	
		EP ¹⁾	KP ²⁾	EP ¹⁾	KP ²⁾	EP ¹⁾	EÜ ⁷⁾
Gesamtluftgehalt Frischbeton	≥ 4,0 ⁶⁾	4,0-8,0		4,0-6,0 ⁵⁾		≥ 5,5 (GK 8) ≥ 4,0 (GK 22,32)	
L300 ³⁾	-	≥ 1,8	≥ 1,5	≥ 1,8	≥ 1,5	≥ 1,8	≥ 1,8
AF ⁴⁾	-	≤ 0,18	≤ 0,21	≤ 0,18	≤ 0,21	≤ 0,20	≤ 0,24

- 1) Erstprüfung
- 2) Konformitäts- bzw. Identitätsprüfung
- 3) Mikroluftgehalt L300 bestimmt gemäß ÖNR 23303
- 4) Abstandfaktor bestimmt gemäß ÖNR 23303
- 5) Bei Straßenbeton F52 mit Fließmittel 5,0 – 7,0
- 6) Empfehlung
- 7) Eigenüberwachung

Tabelle 1 zeigt, dass die jeweils national definierten Anforderungen für die Luftporenkennwerte weitgehend ident sind. Straßenbeton ist grundsätzlich in die Expositionsklasse XF4 (Beton mit hoher Wassersättigung mit Taumittel) gemäß EN 206 [29] bzw. ÖNORM B 4710-1 [15] einzuordnen.

Betoneinbau

Für den Betoneinbau sind grundsätzlich die Anforderungen für herkömmliche Betonsorten anzuwenden. EN 206 [29] gibt bezüglich Betoneinbau keine spezifischen Vorgaben, Regelungen diesbezüglich sind jeweils den nationalen Dokumenten zu entnehmen. So ist gemäß ÖNORM B 4710-1 [15] der Beton nach dem Mischen so rasch wie möglich einzubauen, wobei der Beton spätestens 105 Minuten nach Zugabe des Wassers im Mischprozess eingebaut zu sein hat. Die festgelegte Konsistenzklasse (für Straßenbeton in der Regel Verdichtungsmaß) ist bis 90 Minuten nach Wasserzugabe zu garantieren.

Über diese allgemeinen Regelungen hinaus definiert RVS 08.17.02 [9] noch spezifische Anforderungen an den Betoneinbau (z.B. ein- oder zweilagig), die Verdichtungsarten sowie die Oberflächentexturierung (z.B. Besenstrich oder Waschbetonoberfläche). Ähnliche Anforderungen werden auch im deutschen Regelwerk TL Beton-StB [30] definiert.

Wesentlich für den Betoneinbau ist, dass der Beton in der zulässigen Verarbeitungszeit so eingebaut wird, dass dieser ein dichtes, homogenes Gefüge, weitgehend frei von Verdichtungs- und Entmischungerscheinungen, aufweist. Nur so kann eine entsprechende Beständigkeit der Betondecke gegenüber Witterungserscheinungen garantiert werden.

Nachbehandlung

Wesentlich für eine gute Betonqualität in Oberflächennähe ist eine entsprechende Nachbehandlung des noch jungen Betons. Gemäß ÖNORM B 4710-1 [15] sind hierfür entsprechende Maßnahmen zum Schutz des Betons gegen vorzeitiges Austrocknen, zur Verhinderung von zu starkem Erwärmen oder Abkühlen sowie zur Verhinderung von raschen Temperaturänderungen der Oberfläche erforderlich. Ziel der Nachbehandlung ist die Erreichung einer rissarmen, beständigen Oberfläche. Eine Nachbehandlung kann grundsätzlich durch Feuchthalten, Abdecken oder das Aufsprühen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln gemäß RVS 11.06.42 [27] erfolgen. Für Beton mit der relevanten Expositionsklasse XF4 wird eine Mindestdauer von 7 Tagen (Festigkeitsentwicklungsstufe EM, mittlere Tagestemperaturen > 12 °C) gemäß ÖNORM B 4710-1 [11] festgelegt.

Bei der Herstellung von Betondecken ist die Nachbehandlung grundsätzlich dem Herstellungsverfahren anzupassen. Für das hochrangige Straßennetz ist die Herstellung von Betonoberflächen mit Waschbetonstruktur seit Mitte der 1990er Jahre Stand der Technik [3]. Hierfür wird auf die verdichtete, geglättete Oberfläche ein dünner Film eines Kontaktverzögerers bzw. Verdunstungsschutzes oder ein Kombinationsmittel gleichmäßig auf die Oberfläche aufgesprüht. Alternativ kann auch eine Kunststoffolie, welche ohne Blasenbildung auf die frische Betonoberfläche zu legen ist, verwendet werden. Nach dem Ausbürstvorgang ist ein zweiter Verdunstungsschutz auf die Oberfläche aufzutragen. Die erforderliche Auftragsmenge ist durch eine Zulassungs- bzw. Erstprüfung gemäß RVS 11.06.42 [27] nachzuweisen. Die Sperrwirkung des ersten Verdunstungsschutzes in Kombination mit dem Kontaktverzögerer hat mindestens 90 Prozent, die des zweiten Verdunstungsschutzes mindestens 85 Prozent zu betragen [9].

2.2.8 Zusammenfassung

Grundsätzlich ist die Frost-Taumittel-Beständigkeit von Betonoberflächen im Wesentlichen von der Betonzusammensetzung (insbesondere W/B-Wert), der im Beton vorhandenen Mikroluftporen sowie der Nachbehandlung abhängig. Der Nachweis einer ausreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit erfolgt in Österreich in der Regel durch Sicherstellung eines Mindestbindemittelgehaltes, eines höchstzulässigen W/B-Wertes sowie durch Nachweise eines geeigneten Luftporensystems am Festbeton. Alternativ besteht die Möglichkeit, den Frostwiderstand am Festbeton zu prüfen. Diese Nachweismethode ist jedoch nur nach entsprechender Festlegung vor der Bauausführung möglich.

Die Prüfung des Frostwiderstandes an Probekörpern ist generell ein sehr aufwendiges und langwieriges Verfahren, bei dem versucht wird, die tatsächlichen Einwirkungen am Bauwerk durch eine Zeitrafferprüfung zu simulieren. Dabei ist es wichtig, dass die Prüfbedingungen extreme Witterungsbedingungen abdecken können. In Österreich erfolgt diese Prüfung für die bei Deckenbeton erforderliche Expositionsklasse XF4 (Frostbeanspruchung mit Taumittel für hohe Wassersättigung gemäß ÖNORM B4710-1 [15]) durch Prüfung zur Beurteilung der gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF4. Dabei werden Prüfkörper wiederholten Frost-Tauwechsel-Prüfungen ausgesetzt und die Frostbeständigkeit durch Bestimmung der abgewitterten Menge in Relation zu einem Vergleichsbeton nachgewiesen. Da die Beurteilung in Relation zu den Abwitterungen des Vergleichsbetons erfolgt, hat auch dessen ordnungsgemäße Herstellung einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse [25].

Eine Frostprüfung zur direkten Beurteilung der Abwitterungen ist eine Konvention mit vorgegebener Lagerung, Abkühlgeschwindigkeit und Abkühlhäufigkeit. Diese Parameter weichen von den jeweiligen Praxisbedingungen ab. Die Prüfergebnisse sind daher nur bedingt praxisrelevant. Insbesondere können sich daher unterschiedliche Betonzusammensetzungen (Porosität und damit Wasserabgabe und Wasseraufnahme), Luftporenkennwerte und Nachbehandlungen in der Praxis und bei der Prüfung unterschiedlich auswirken. Eine praxisrelevante Beurteilung dieser Parameter ist daher mit einer Frostprüfung nur bedingt möglich. Wenngleich diese Prüfung nie die tatsächlichen Gegebenheiten abbilden kann, stellt diese das einzige Instrument dar, mit der im Labormaßstab direkte Auswirkungen einer Frost-Taumittel-Beanspruchung als Relativvergleich simuliert werden können.

2.3 Durchgeführte Arbeiten bzw. technische Lösungsvorschläge

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Einflüsse der Schwankungen unterschiedlicher Parameter des Herstellungsprozesses auf die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken durchleuchtet. Die Untersuchungen erfolgten in folgenden Arbeitspaketen:

AP 1 Programmerstellung, Datenerhebung und Versuchsbeaufsichtigung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden wesentliche Literaturverweise zusammengetragen. Es erfolgte die Auswahl von entsprechenden und geeigneten Betonausgangsstoffen (Zement, Gesteinskörnung, Luftporenmittel) für die Laborversuche in AP 2. Weiters wurde die Auswahl der Entnahmestellen zur Beurteilung von Frostschäden auf Autobahnabschnitten koordiniert.

AP2 Labortechnische Abschätzung des Risikos von Frostschäden

Erster Schritt war im Rahmen von Vorversuchen die Erstellung von geeigneten Rezepturen für die Laboruntersuchungen. Diese Probemischungen zeigten, mit welcher Dosierung Luftporengehalte erreicht werden können, die die in den derzeitigen Richtlinien definierten Anforderungen erfüllen oder nur teilweise bzw. nicht erfüllen. Hierfür erfolgte die Feststellung, welche Dosierungen an Luftporenmittel erforderlich sind, damit Luftporenkennwerte den Anforderungen nicht entsprechen (etwa 50 % der Anforderungen gemäß RVS 08.17.02 [9]) sowie den Anforderungen entsprechen (etwa 100 % der Anforderungen gemäß RVS 08.17.02 [9]).

Auf Basis dieser Vorversuche erfolgt die Probekörperherstellung für die labortechnische Abschätzung des Risikos von Frostschäden. Hierfür werden 18 Serien Probekörper aus Straßenoberbeton mit unterschiedlichem Luftporensystem (Luftgehalt hoch, den Anforderungen entsprechend und zu nieder) und unterschiedlichen W/B-Werten (Erstprüfung, Bauausführung und zu hoch) hergestellt. Darüber hinaus erfolgte bei jeder Prüfkörperserie die Variation des Nachbehandlungsmittels (gute, schlechte bzw. keine Nachbehandlung). Als Abschluss erfolgten Windkanalversuche zur besseren Simulation der Baustellenbedingungen aus ausgewählten Mischungsverhältnissen.

Im Zuge der Probekörperherstellung erfolgte die Ermittlung der Frischbetonkennwerte (Verdichtungsmaß, Rohdichte, Luftgehalt) für jedes Mischungsverhältnis. Anhand dieser Probekörper wurden die Betoneigenschaften an Proben aus jedem einzelnen Mischungsverhältnis ermittelt. Dazu gehörte die Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton (L300 und AF), die Ermittlung der Abreißfestigkeit, die Ermittlung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4 sowie die Bestimmung der Porosität der oberflächennahen Zone. Die Porosität ist ein wichtiger Indikator für den Wasser-Bindemittel-Wert sowie für die Güte der Nachbehandlung. Daher erfolgt die Bestimmung der Porosität des Bindemittelsteins mittels Quecksilberdruckporosimetrie. Diese Bestimmung liefert auch die Grundlage zur Vernetzung der Erkenntnisse aus den Laborversuchen mit der Beurteilung von tatsächlichen Frostschäden.

Im Rahmen der Versuchsabwicklung der Vorversuche stellte sich heraus, dass die geplante Ermittlung der Festigkeitseigenschaften (Abreißfestigkeiten) der oberen Betonschichte nicht die gewünschten Ergebnisse zeigte. Stattdessen wurden die Eigenschaften dieser Zone durch zusätzliche, ursprünglich nicht geplante Beurteilungen des Abwitterungsverhaltens sowie Windkanalversuche untersucht.

AP 3 Beurteilung von Frostschäden an Autobahnabschnitten

Zur Beurteilung von tatsächlichen Frostschäden auf Autobahnabschnitten erfolgte gemeinsam mit der ASFINAG die Entnahme von Bohrkernen an Stellen, an denen nachweislich die geforderten Luftporenkennwerte nicht eingehalten wurden bzw. auch erste Schäden durch Frost-Taumittel-Beanspruchung auftraten. Aufgrund gemeinsamer Besprechungen mit Vertretern der ASFINAG wurden Entnahmestellen auf S1, Fahrtrichtung Schwechat bei km 4,0 festgelegt, da an diesen Stellen nachweisliche negative Luftporenkennwerte im Rahmen der Abnahmeprüfung festgestellt wurden.

An den sowohl an Stellen mit entsprechenden als auch nicht entsprechenden Luftporenkennwerten entnommenen Bohrkernen wurde die Porosität des Bindemittelsteins mit Quecksilberdruckporosimetrie, der W/B-Wert als auch die Luftporenkennwerte ermittelt.

AP 4 Zusammenführung der Daten

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen sowie der Beurteilung von Frostschäden an Fahrbahnabschnitten wurden Zusammenhänge erstellt, ab welcher Grenzwertunterschreitung mit welcher potentiellen Frost-Taumittel-Schädigung an der Betondecke zu rechnen ist. Die Zusammenhänge zwischen W/B-Wert, Luftporensystem, Porosität und Nachbehandlung zeigten, dass eine entsprechende Einhaltung der in RVS 08.17.02 [9] geforderten Grenzwerte für die Sicherstellung der erforderlichen Dauerhaftigkeit essentiell ist.

AP 5 Zusammenfassung und Abschlussbericht

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die klare und übersichtliche Darstellung aller Ergebnisse sowie die Erarbeitung von Vorschlägen, welche Herstellungsparameter besondere Auswirkungen auf die Beständigkeit haben. Darüber hinaus wurde untersucht, ob die derzeit in den Normen und Richtlinien gewählten Grenzwerte sinnvoll für die Herstellung von Betonfahrbahndecken gewählt wurden. Weiters erfolgte eine Aufarbeitung und Zusammenstellung der verfügbaren Literatur im Rahmen dieses Berichtes.

3 Prüfungsdurchführung

Im Folgenden sind die Prüfungsdurchführung sowie die Einzelergebnisse der Versuche zusammengestellt.

3.1 Prüfverfahren

Im Zuge der Versuchsabwicklung wurden die nachstehend beschriebenen Versuchsverfahren angewandt. Da die einzelnen Versuche im Rahmen der Laborversuche bzw. auch zur Beurteilung der Frostschäden an Autobahnabschnitten wiederholt zu Anwendung kamen, sind diese im Folgenden zusammenfassend erklärt.

3.1.1 Frischbetonprüfung

Die Frischbetonprüfungen erfolgten gemäß ONR 23303 [113] mit den nachfolgend aufgelisteten Bestimmungen.

Temperatur

Die Frischbetontemperatur wurde standartmäßig jeweils 10 und 90 Minuten nach Wasserzugabe mittels eines Temperaturfühlers ermittelt. Abbildung 12 zeigt die Bestimmung der Frischbetontemperatur.



Abbildung 12: Bestimmung der Frischbetontemperatur

Rohdichte

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgte gemäß ONR 23303, Abschnitt 8.2 [25]. Hierzu erfolgt das Befüllen und Verdichten des 8 Liter Luftporentopfes mit Beton. Nach Abziehen und Glätten der Betonoberfläche wird der Behälter mit dem Betoninhalt gewogen. Bei bekanntem Volumen sowie bekannter Leermasse des Behälters kann die Frischbetonrohichte ermittelt werden. Abbildung 13 zeigt die Bestimmung der Rohdichte im 8 Liter Luftporentopf.



Abbildung 13: Bestimmung der Rohdichte am Frischbeton

Luftgehalt am Frischbeton

Die Ermittlung des Luftgehaltes am Frischbeton erfolgte mit dem Druckausgleichsverfahren am 8 Liter Luftporentopf gemäß ONR 23303, Abschnitt 8.3 [25]. Die Betoneinbringung und Verdichtung erfolgt analog zur Rohdichtebestimmung. Danach ist das Verschlussaggregat mit Manometer auf den Behälter aufzusetzen und der Hohlraum entsprechend mit Wasser zu füllen. Danach wird Druck in der Luftkammer aufgebaut. Nach dem Öffnen des Hauptluftventils kann der Luftgehalt des Frischbetons direkt am Manometer abgelesen werden. Abbildung 14 zeigt die Bestimmung des Gesamtluftgehaltes am Frischbeton.



Abbildung 14: Bestimmung des Luftgehaltes am Frischbeton

Konsistenz – Verdichtungsmaß

Die Ermittlung der Konsistenz erfolgte aufgrund der steifen Konsistenz des Betons mit dem Verdichtungsmaß gemäß ONR 23303, Abschnitt 8.1 [25]. Zur Bestimmung des Verdichtungsmaßes wird ein Probekörper mit den Abmessungen 200x200x400 mm ohne Verdichten von allen vier Oberkanten mit Beton gefüllt und die Oberfläche ohne jegliche Verdichtung abgezogen. Nach dem Verdichtungsverfahren kann das Verdichtungsmaß durch Messung des Abstandes zwischen ursprünglicher Oberfläche vor dem Verdichten und neuer Oberfläche nach dem Verdichtungsverfahren bestimmt werden. Abbildung 15 zeigt die Ermittlung des Verdichtungsmaßes durch Messung des Abstandes zwischen der verdichteten Betonoberfläche und der Probekörperoberseite.



Abbildung 15: Bestimmung des Verdichtungsmaßes

3.1.2 Probekörperherstellung

Generell wurden Probekörper zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit sowie zur Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton mit den Abmessungen 120x120x360 mm gemäß ONR 23303 [28] hergestellt. Darüber hinaus wurden zur Prüfung der Abreireisfestigkeit sowie zur Bestimmung der Frostbeständigkeit an tatsächlich ausgeführten Oberflächentexturen jeweils Platten mit den Abmessungen 600x200x50 mm angefertigt. Die Herstellung der Waschbetonoberflächen erfolgte gemäß RVS 08.17.02 [9]. Hierbei wird auf die frisch hergestellte und abgezogene Oberfläche ein Kombinationsmittel aus Verdunstungsschutz und Verzögerer aufgebracht. Nach Erreichen einer entsprechenden Betonfestigkeit des Untergrundes wird die oberflächliche Mörtelschicht mit einer harten Bürste entfernt und dadurch die grobe Gesteinskörnung entsprechend freigelegt. Anschließend erfolgt das Aufbringen eines zweiten Verdunstungsschutzes auf die Betonoberfläche. Abbildung 16 zeigt das Aufbringen des Kombinationsmittels aus Verdunstungsschutz und Verzögerer direkt nach der Herstellung der Oberflächen sowie Abbildung 17 die fertig hergestellte Waschbetonoberfläche.



Abbildung 16: Aufbringen des Kombinationsmittels direkt nach der Herstellung



Abbildung 17: Fertige Waschbetonoberfläche

3.1.3 Festbetonprüfungen

An den hergestellten Rezepturen wurden zur Beurteilung der Eigenschaften die folgend zusammengefassten Festbetonprüfungen durchgeführt.

Luftporenkennwerte

Die Bestimmung der Luftporenkennwerte (Abstandsfaktor AF und Mikroluftgehalt L300) erfolgte gemäß ÖNR 23303, Abschnitt 9.6 [25]. Zur Ermittlung der Luftporenkennwerte wurden je Rezeptur zwei Prüfkörper (100x150x40 mm) aus Würfeln (150x150x150 mm) geschnitten. Die geschnittene Platte wurde grob und fein geschliffen.

Anhand dieser Probekörper erfolgte die mikroskopische Bestimmung der Luftporenkennwerte L300 und AF durch Ablesen einer Reihe von Messlinien auf einer Gesamtlänge von 1200 mm. Abbildung 18 zeigt einen geschliffenen Straßenoberbeton zur Ermittlung der Luftporenkennwerte.



Abbildung 18: Geschliffener Straßenoberbeton unter dem Mikroskop

Zusätzlich zur derzeit genormten Ermittlung der Luftporenkennwerte erfolgte die Bestimmung der Luftporenkennwerte mit einem automatischen Verfahren. Dies erfolgte mit einem Prototyp zur automatischen Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton. Das Gerät ermittelt über eine Optik die Luftporen mit Hilfe von drei jeweils im Winkel von 120° angeordneten Beleuchtungsquellen. Bei einer Messlänge von 2400 mm werden über 16.000 Bilder mit 3 unterschiedlichen Belichtungswinkeln aufgenommen und ausgewertet.

Vergleichsversuche sollten zeigen, inwieweit das neue Gerät die bisher eingesetzten sehr zeitaufwendigen Methoden zur Ermittlung der Luftporenkennwerte ersetzen kann.

Spaltzugfestigkeit

Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit erfolgte gemäß ÖNR 23303, Abschnitt 9.4 [25]. Bei dieser Prüfung wird ein Balken mit den Abmessungen 120x120x360 mm normal zur Längsachse mit einer Druckkraft belastet. Die dadurch im Probekörper eintretende Zugkraft verursacht den Bruch der Probe unter Zugspannung. Die zentrische Zugfestigkeit entspricht etwa 90 Prozent der Spaltzugfestigkeit. Abbildung 19 zeigt die Prüfung der Spaltzugfestigkeit an prismatischen Probekörpern mit Belastungskörpern aus Stahl (1) bzw. Hartfaserstreifen (2).

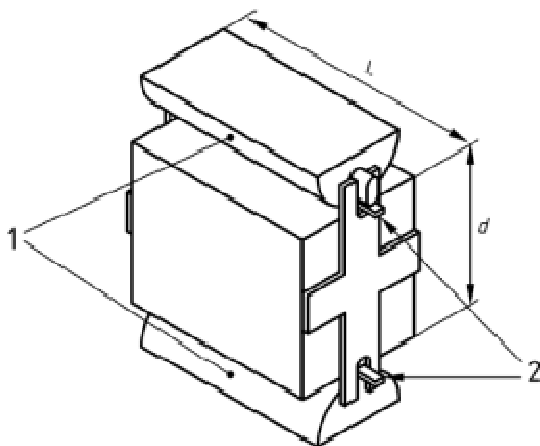


Abbildung 19: Prüfung der Spaltzugfestigkeit an prismatischen Probekörpern [113]

Abreißfestigkeit

Die Ermittlung der Abreißfestigkeit erfolgte zur Ermittlung von Gefügeschädigungen der oberflächennahen Betonzone infolge ungünstiger Herstellungsbedingungen in Anlehnung an ONR 23303, Abschnitt 9.5 [2]. Bei dieser Prüfung wird mit Hilfe eines Kernbohrgeräts (Innendurchmesser 50 mm) bis in eine Tiefe von ~ 10 mm gebohrt. Nach Trockenlegung der Prüfflächen werden Stahlstempel (Durchmesser 50 mm) mit einem Zweikomponentenkleber aufgeklebt. Nach der Aushärtezeit erfolgte die Bestimmung der Abreißfestigkeit durch zentrisches Abziehen des Stahlstempels unter konstanter Belastungsgeschwindigkeit (0,1 N/mm² pro sec). Abbildung 20 zeigt eine Waschbetonoberfläche nach Bestimmung der Abreißfestigkeit (abgezogene Stempel sind jeweils oberhalb der Prüffläche zu finden).

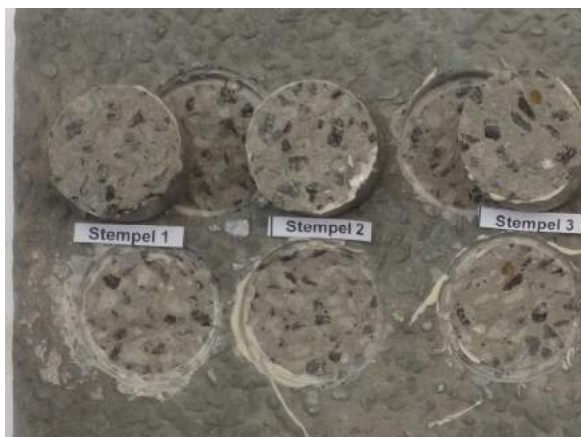


Abbildung 20: Waschbetonoberfläche nach Bestimmung der Abreißfestigkeit

Anmachwassergehalt

Die Ermittlung des Anmachwassergehaltes erfolgte gemäß VÖZFI-Verfahren B01 [33]. Dieses Verfahren dient zur Ermittlung der durch Hydratation entstandenen Kapillarporosität (l/m³) und des durch Hydratation entstandenen chemisch gebundenen Wassers. Mittels dieser Werte kann durch Untersuchung von Festbetonproben die ursprüngliche Menge an Anmachwasser im Frischbeton abgeschätzt werden.

Ungenügende Nachbehandlung kann zu einer Veränderung des Wassergehaltes in der oberflächennahen Schichte führen. Durch die Bestimmung der Kapillarporosität ist es möglich, Aussagen über eine veränderte Betongüte in der oberflächennahen Zone zu tätigen.

Porosität der oberflächennahen Zone

Die Bestimmung der Porenvolumenverteilung durch Quecksilberintrusion erfolgte in Anlehnung an DIN 66133 [32]. Zur Bestimmung der Porosität wurden etwa 1,0 – 1,5 g der betreffenden Probe herangezogen. Vor der Prüfung wurden die Proben unter Vakuum getrocknet. Die Bestimmung des Porenvolumens erfolgte in einem Arbeitsbereich von 0,1 kPa bis 400 kPa mit dem Gerät PASCAL 140 und im Arbeitsbereich von 0,1 MPa bis 200 MPa mit dem Gerät PASCAL 240. Das bei beiden Geräten ermittelte Druck-Volumen-Diagramm wurde mit der Software SOL.I.D der Firma Thermo zusammengeführt und gemäß den in Kapitel 3 definierten Angaben zu einem Zusammenhang zwischen hydraulischer Spaltbreite und Porosität des Zementsteins ausgewertet.

Die Güte des Betons wird maßgebend von der Porosität und der Porenverteilung beeinflusst. Aufgrund Verschiebungen in der Porenverteilung kann somit auf unterschiedliche Beton- bzw. Nachbehandlungsqualitäten geschlossen werden.

Gleichwertige Beständigkeit für die Frostklasse XF4

Die Ermittlung der gleichwertigen Beständigkeit für die Frostklasse XF4 erfolgt in Anlehnung an ONR 23303, Abschnitt 9.11 [25]. In Abänderung zur normativ festgelegten Prüfung wurden nicht gesägte Betonoberflächen, sondern die Waschbetonoberflächen direkt der Frost-Tauwechselbeanspruchung ausgesetzt und das Abwitterungsverhalten an diesen Oberflächen ermittelt. Hierzu wurden aus hergestellten Waschbetonoberflächen Probekörper mit den Abmessungen 150x150x50 mm gewonnen und mit einer Gummischicht umklebt. Die Prüfflächen wurden mit einer 3 %igen NaCl-Lösung beaufschlagt. Alle Seiten, mit Ausnahme der Prüfoberfläche, wurden mit einer Wärmedämmung versehen. Eine Polyethylenfolie verhinderte das Verdunsten der 3 mm dicken Prüfflüssigkeitsschicht von der Oberfläche.

Die Probekörper wurden 56 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt wobei, das abgewitterte Material jeweils nach 7, 14, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechsel ermittelt wurde. Abbildung 21 zeigt die Lagerung der Probekörper in der Frosttruhe zur Ermittlung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4.



Abbildung 21: Prüfkörper während der Prüfung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4

3.2 Probekörperherstellung

Generell erfolgte die gesamte Versuchsplanung auf Basis einer Grundrezeptur mit für die Herstellung von Betonfahrbahndecken mit Waschbetonstruktur typischen Zusammensetzungen bzw. Betonausgangsstoffen. Wesentlich war, dass zur Herstellung der Mischungsverhältnisse zwei unterschiedliche Luftporenmittel verwendet wurden und so Vorversuche zur Ermittlung der erforderlichen Dosierung und Zusatzmittel sowie entsprechenden Mischzeiten durchgeführt werden mussten.

3.2.1 Luftporenverteilung

Zur Variation der Luftporenverteilung zur Sicherstellung einer ausreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit wurden grundsätzlich die in Tabelle 2 angegebenen Zielwerte für den Luftgehalt bzw. die Luftporenkennwerte definiert.

Tabelle 2: Zielwerte Luftgehalt für die Betonherstellung

	Luftgehalt im Frischbeton	L300	AF
Gesamtluftgehalt hoch	> 6,0 %	~ 5,0	~ 0,13
Gesamtluftgehalt normal	4,0 – 6,0 %	~ 3,0	~ 0,17
Gesamtluftgehalt zu nieder	< 4,0 %	~ 1,5	~ 0,25
Anforderung gemäß RVS 08.17.02	4,0 – 6,0 %	$\geq 1,8$ ¹⁾	$\leq 0,18$ ¹⁾

1) Erstprüfung

Neben den Zielwerten für den Luftgehalt wurden auch im Rahmen der Vorversuche 3 unterschiedliche W/B-Werte definiert. Eine Zusammenstellung der W/B-Werte ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Zielwerte W/B-Werte für die Betonherstellung

	Luftgehalt im Frischbeton
W/B-Wert zu hoch	0,47 ¹⁾
W/B-Wert normal	0,42 ²⁾
W/B-Wert nieder	0,38
Anforderung gemäß RVS 08.17.02	- ³⁾

1) W/B-Wert Vorversuche 0,45

2) W/B-Wert Vorversuche 0,41

3) RVS 08.17.02 gibt keine Anforderung vor, gemäß ÖNORM B 4710-1 für XF4 und Erstprüfung $\leq 0,43$

3.2.2 Betonzusammensetzung

Auf Basis der in RVS 08.17.02 [20] definierten Vorgaben erfolgte die Erstellung von Betonrezepturen auf Grundlage von üblichen Betonzusammensetzungen für Waschbetonoberflächen. Die genaue Zusammensetzung für die Vorversuche ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Betonausgangsstoffe wurden von der Fa. Hartsteinwerk Loja, der Fa. Wietersdorfer & Peggauer Zementwerk GmbH, der Fa. TAL Betonchemie Handel GmbH sowie von der Fa. Sika zur Verfügung gestellt.

Tabelle 4: Betonzusammensetzung Oberbeton mit Waschbetonstruktur

Betonsorte: OB GK8	W/B = 0,38 [kg/m ³]	W/B = 0,42 [kg/m ³]	W/B = 0,47 [kg/m ³]
Zement: CEM II/B-S 42,5 N DZ	450	450	450
Gesteinskörnung KK 0/1	527	510	493
Gesteinskörnung KK 4/8	1225	1186	1146
Gesamtwasser	170	190	210
Fließmittel	0,07 – 0,75		
LP-Mittel	0,01 – 0,25		
Frischbetonrohddichte (Zielwert)	2370	2340	2300
W/B-Wert	0,38	0,42	0,47

Auf Basis der in Tabelle 4 zusammengestellten Grundrezepturen wurden alle Probekörper hergestellt.

3.3 Vorversuche

Die Vorversuche dienten als Grundlage, um die Hauptversuche mit der entsprechenden Zusammensetzung zielsicher herstellen zu können und so wesentliche, herstellungsspezifische Auswirkungen auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit von Betonfahrbahndecken mit Waschbetonstruktur untersuchen zu können.

Generell erfolgte die gesamte Versuchsplanung auf Basis einer Grundrezeptur mit für die Herstellung von Betonfahrbahndecken mit Waschbetonstruktur typischen Zusammensetzungen bzw. Betonausgangsstoffen. Wesentlich war, dass zur Herstellung der Mischungsverhältnisse zwei unterschiedliche Luftporenmittel verwendet wurden und so Vorversuche zur Ermittlung der erforderlichen Dosierung und Zusatzmittel sowie entsprechenden Mischzeiten durchgeführt werden mussten.

Generell können die exakten Luftporenkennwerte L 300 und AF, die zur Sicherstellung einer entsprechenden Frost-Taumittel-Beständigkeit in RVS 08.17.02 gefordert werden, erst nach der Betonherstellung am Festbeton zielsicher ermittelt werden. Eine Vorabprüfung des Luftgehaltes am Frischbeton gibt nur einen ersten Anhaltspunkt, ob die jeweiligen Kennwerte eingehalten werden. Generell sind die resultierenden Luftporenkennwerte am Festbeton nicht ausschließlich von der Dosierung des jeweiligen Luftporenmittels, sondern beispielsweise auch vom W/B-Wert, vom Zement, vom Anteil an feiner Gesteinskörnung sowie von der Mischzeit abhängig. Ziel der Vorversuche war daher, für das jeweilige Luftporenmittel eindeutige Zusammenhänge zwischen W/B-Wert, Mischzeit und resultierenden Luftporenkennwerten zu ermitteln. Hierfür wurden in Summe 11 Betonmischen hergestellt. Tabelle 5 zeigt die Mischungsverhältnisse für die Vorversuche inkl. Typ (LP) und Dosierung des Luftporenbildners (LP-Dos.).

Tabelle 5: Mischungsverhältnisse Vorversuche

Mischungsverhältnis	LP	W/B	LP-Dos. [% v. Z.]
MV1	LP1	0,38	0,250
MV2	LP1	0,38	0,100
MV3	LP1	0,38	0,080
MV4	LP1	0,38	0,030
MV5	LP1	0,41	0,030
MV6	LP1	0,45	0,030
MV7	LP1	0,45	0,060
MV8	LP2	0,38	0,160
MV9	LP2	0,38	0,050
MV10	LP2	0,38	0,020
MV11	LP2	0,45	0,012
MV12	LP 3	0,38	1,350

3.3.1 Frischbetonprüfung

Im Zuge der Vorversuche sollten Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen W/B-Wert, der Dosierung des Luftporenmittels und der Luftporenkennwerte gefunden werden. Ziel war nicht, alle Prüfungen in vollem Umfang durchzuführen, da als Basis für die Erstellung weiterer Zusammenhänge die Hauptversuche herangezogen wurden. Im Rahmen der Frischbetonprüfung erfolgten die Ermittlung des Luftgehaltes im Frischbeton (teilweise nach 10 und 60 Minuten), die Ermittlung des Verdichtungsmaßes sowie die Ermittlung der Rohdichte (teilweise nach 10 und 60 Minuten). Alle Prüfungen wurden gemäß ONR 23303 [25] durchgeführt. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Frischbetonprüfung zusammengestellt. L_{10} und L_{60} , V_{10} und V_{60} definieren die Luftgehalts- bzw. Verdichtungsmaßbestimmungen im Frischbeton nach 10 und 60 Minuten. Die Parameter ρ_{10} und ρ_{60} beschreiben die Rohdichte des Frischbetons nach 10 und 60 Minuten.

Tabelle 6: Ergebnisse der Frischbetonprüfung Vorversuche

Mischungsverhältnis	LP	W/B	L_{10} [%]	L_{60} [%]	V_{10} [-]	V_{60} [-]	ρ_{10} [kg/m ³]	ρ_{60} [kg/m ³]
MV1	LP1	0,38	13,5	10,0				
MV2	LP1	0,38	6,8	4,0	1,29	1,37	2358	2433
MV3	LP1	0,38	5,4		1,23		2393	
MV4	LP1	0,38	2,7	2,8			2468	2464
MV5	LP1	0,41	2,8	2,7				
MV6	LP1	0,45	3,3	3,5	1,14			
MV7	LP1	0,45	2,9		1,14		2423	
MV8	LP2	0,38	11,0	13,0			2230	
MV9	LP2	0,38	5,4	5,4	1,30			
MV10	LP2	0,38	3,0	3,6				
MV11	LP2	0,45	2,1		1,10		2427	
MV12	LP 3	0,38	5,1	3,7	1,27	1,22	2382	2441

3.3.2 Festbetonprüfung Luftporenkennwerte

An den Mischungsverhältnissen der Vorversuche wurden die Luftporenkennwerte am Festbeton ermittelt. Die Bestimmungen wurden gemäß ONR 23303 [25] durchgeführt. Die Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Bei den Mischungsverhältnissen MV1 und MV8 wurden die Luftporenkennwerte am Festbeton nicht ermittelt, da bereits die Frischbetonprüfung extrem hohe Luftporenkennwerte ergab.

Tabelle 7: Ergebnisse der Festbetonprüfung Vorversuche

Mischungsverhältnis		L ₁₀	L ₆₀	L300	AF
		[%]	[%]	[%]	[mm]
MV1	LP1	13,5	10,0		
MV2	LP1	6,8	4,0	2,2	0,19
MV3	LP1	5,4		2,8	0,19
MV4	LP1	2,7	2,8	1,4	0,22
MV5	LP1	2,8	2,7	1,4	0,22
MV6	LP1	3,3	3,5	1,4	0,29
MV7	LP1	2,9		1,3	0,25
MV8	LP2	11,0	13,0		
MV9	LP2	5,4	5,4	3,9	0,11
MV10	LP2	3,0	3,6	1,6	0,23
MV11	LP2	2,1		1,5	0,22
MV12	LP 3	5,1	3,7	2,4	0,18

Im Rahmen dieser Vorversuche wurde auch untersucht, inwieweit ein automatisches System der Ermittlung der Luftporenkennwerte vergleichbare Ergebnisse zur derzeit üblichen und genormten händischen Auswertung liefert.

MV12 wurden sowohl herkömmlich mit dem manuellen Auszählverfahren gemäß ONR 23303 [25] als auch mit dem automatischen Auszählverfahren untersucht. Bei diesem automatischen Messverfahren entsteht durch eine Mehrfachbelichtung und Überlagerung von drei aufgenommen Bildern ein Effekt, der es erlaubt, kugelige Luftporen von Verdichtungsporen zu unterscheiden. Von einer Kamera wird, analog zum manuellen Messverfahren, die Probe entlang von Messlinien abgefahren und die Anzahl der Sehnenlängen ermittelt. Tabelle 8 stellt die Messwerte der automatischen Auswertung mit den Ergebnissen der derzeit üblichen und genormten manuellen Auswertung für die einzelnen Porenklassen dar.

Tabelle 8: Gegenüberstellung automatische und manuelle Auswertung gemäß ONR 23303 [25]

Mischungsverhältnis	Auszählung	L ₁₀	L ₆₀	L300	AF
		[%]	[%]	[%]	[mm]
MV12	automatisch ¹⁾	5,1	3,7	2,05	0,13
	automatisch ²⁾			1,62	0,18
	ONR 23303			2,35	0,18

1) Automatische Auszählung vor Verbesserung

2) Automatische Auszählung nach Verbesserung

Die Anforderungen gemäß RVS 08.17.02 [9] betragen für $L_{300} \geq 1,8$ bzw. $\geq 1,5$ und für $AF \leq 0,18$ bzw. $\leq 0,21$ für Erst- bzw. Kontrollprüfungen. Obige Tabelle zeigt, dass zwar auch mit der automatischen Auszählung im gegenständlichen Fall die Anforderungen für Beton gemäß RVS 08.17.02 eingehalten werden aber die Luftporenkennwerte L_{300} bzw. AF teilweise doch merklich unterschiedlich sind. Durch weitere durchgeführte Tast- bzw. Vergleichsversuche mit der automatischen Bestimmung der Luftporenkennwerte, die nicht Gegenstand diese Projektes waren, kann aufgrund der existierenden Abweichungen keine verlässliche Aussage mit diesem Verfahren getroffen werden. Bevor ein solches Verfahren flächendeckend angewendet werden kann, sind jedenfalls weitere Geräteoptimierungsschritte zur Erhöhung der Genauigkeit und mit einer verbesserten Auflösung der Messoptiken erforderlich.

3.3.3 Zusammenhänge

Auf Basis der Ergebnisse der Fisch- und Festbetonprüfungen der Vorversuche könnten Zusammenhänge zwischen Luftporenbildnerdosierung und zu resultierender Luftporenkennwerte gewonnen werden. Auf Basis dieser Informationen konnten die Zusatzmitteldosierungen für die Hauptversuche festgelegt werden. Die ermittelten Zusammenhänge der Vorversuche sind den folgenden Unterpunkten zu entnehmen.

Zusammenhänge zwischen Dosierung Luftporenbildner und Luftporenkennwert

Folgende Diagramme zeigen die im Rahmen der Vorversuche ermittelten Zusammenhänge zwischen Dosierung der Luftporenbildner und resultierende Luftporenkennwerte im Frisch- bzw. Festbeton in Abhängigkeit von unterschiedlichen W/B-Werten. Abbildung 22 zeigt Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und Luftgehalt im Frischbeton, Abbildung 23 Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und L_{300} sowie Abbildung 24 Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und AF .

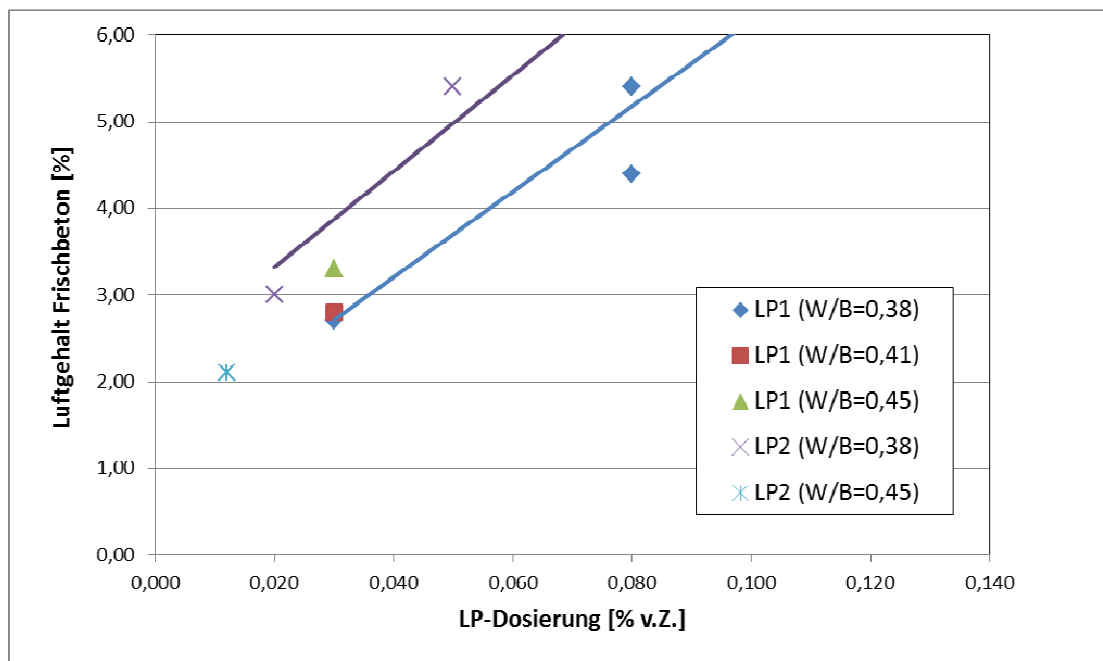


Abbildung 22: Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und Luftgehalt im Frischbeton

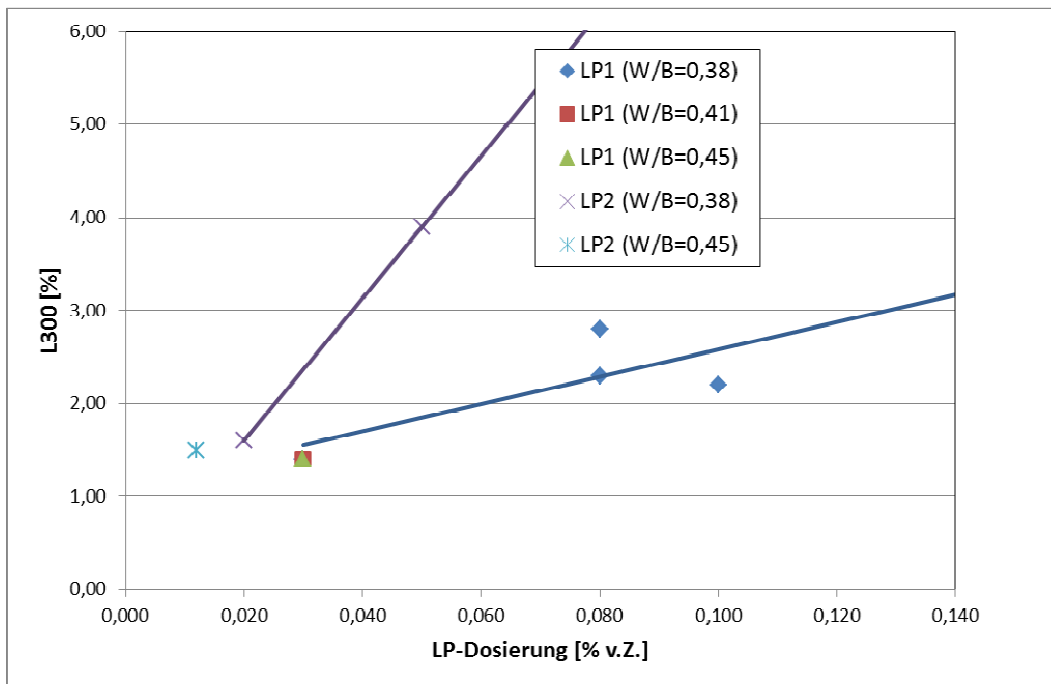


Abbildung 23: Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und L300

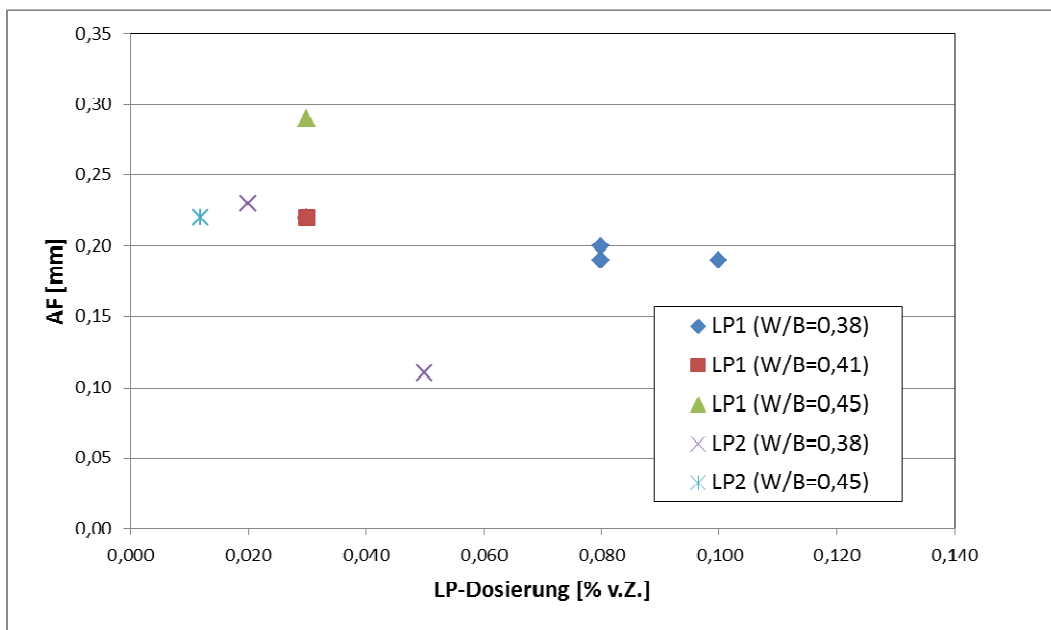


Abbildung 24: Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und AF

Abbildung 22 zeigt, dass grundsätzlich bei einer höheren Dosierung von Luftporenmittel auch ein höherer Luftgehalt im Frischbeton erreicht werden kann. Diese Zusammenhänge sind aber jeweils in Abhängigkeit von Luftporenbildner LP und W/B-Wert zu sehen. Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen, dass Zusammenhänge zwischen Dosierung Luftporenbildner, W/B-Wert und Luftporenkennwerte L300 und AF nur noch schwer zu finden sind, sondern je nach Luftporenbildner und W/B-Wert gewisse Tendenzen abzulesen sind. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgte die Dosierung der Luftporenbildner in Abhängigkeit von W/B-Wert und gewünschten Luftporensystem für die Hauptversuche.

Gegenüberstellung Luftporenauszählverfahren

Folgende Abbildungen zeigen eine Gegenüberstellung der Messergebnisse des automatischen Luftporenauszählverfahrens mit der derzeit genormten manuellen Bestimmung. In Abbildung 25 ist die Gesamtanzahl der Poren bezogen auf eine Messlänge von 1000 mm je nach Porenklasse aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass durch die automatische Auszählung deutlich mehr Poren im Bereich bis etwa 80 µm festgestellt wurden. Dies spiegelt sich auch in der Summenlinie der Gesamtanzahl der Poren gemäß Abbildung 26 wider. Durch wiederholte Vergleichsmessungen auch mit anderen Betonsorten außerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde festgestellt, dass die von der automatischen Auszählmethode festgestellte hohe Anzahl an feinen Poren tatsächlich nicht zu finden ist, auch wenn sehr sorgsam mit einer hochauflösenden Optik ausgezählt wird. Dies führt dazu, dass durch das automatische Verfahren ein generell höherer Gesamtluftgehalt und ein generell niedrigerer Abstandsfaktor als mit den manuellen Auszählungen ermittelt werden.

Eine Analyse möglicher Ursachen zeigte, dass die Auflösung der Optik des automatischen Auszählverfahrens bei weitem nicht so hoch ist wie jene der manuellen Auszählung gemäß ONR 23303 [22]. Ein systematischer Fehler, wo feine Gesteinskörnungen oder Unebenheiten in der Probe als Poren erkannt werden, kann nach derzeitigem Wissenstand nicht ausgeschlossen werden und weitere Optimierungsschritte seitens des Geräteherstellers sind jedenfalls erforderlich, bevor eine normative Anwendung in Betracht gezogen werden kann.

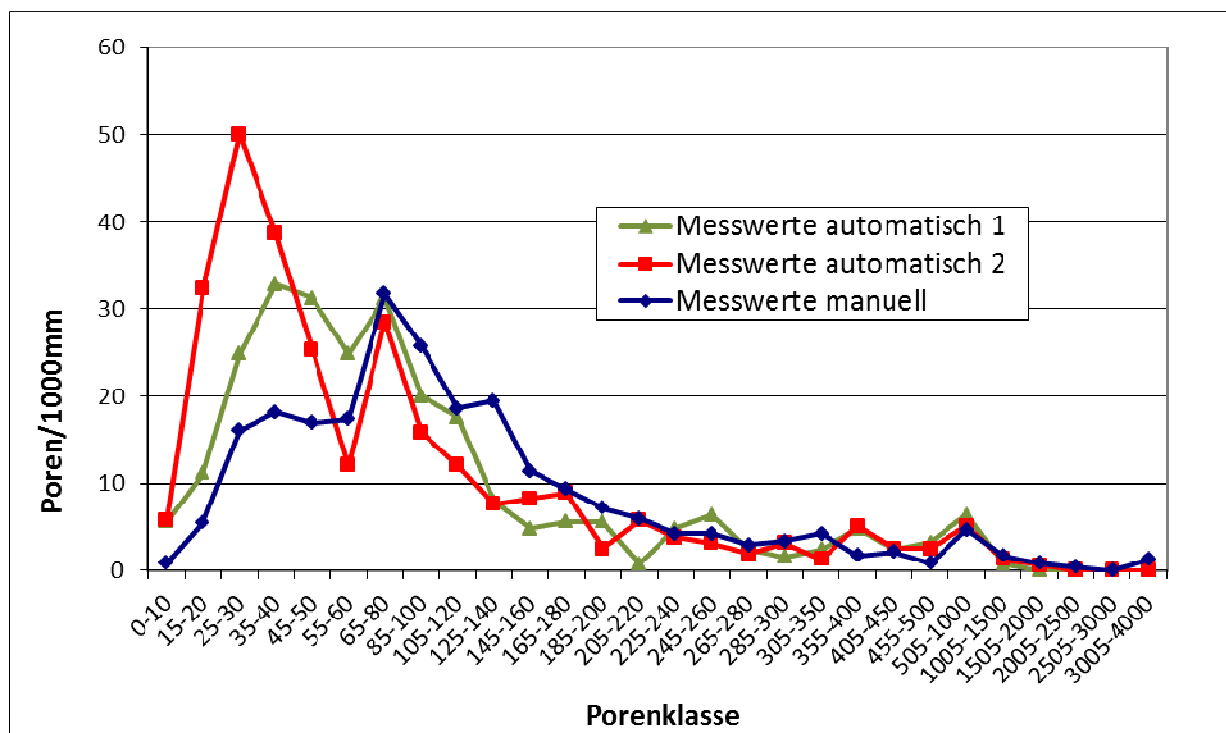


Abbildung 25: Vergleich automatische und manuelle Bestimmung der Luftporenkennwerte nach Poren je 1000 mm Messlänge

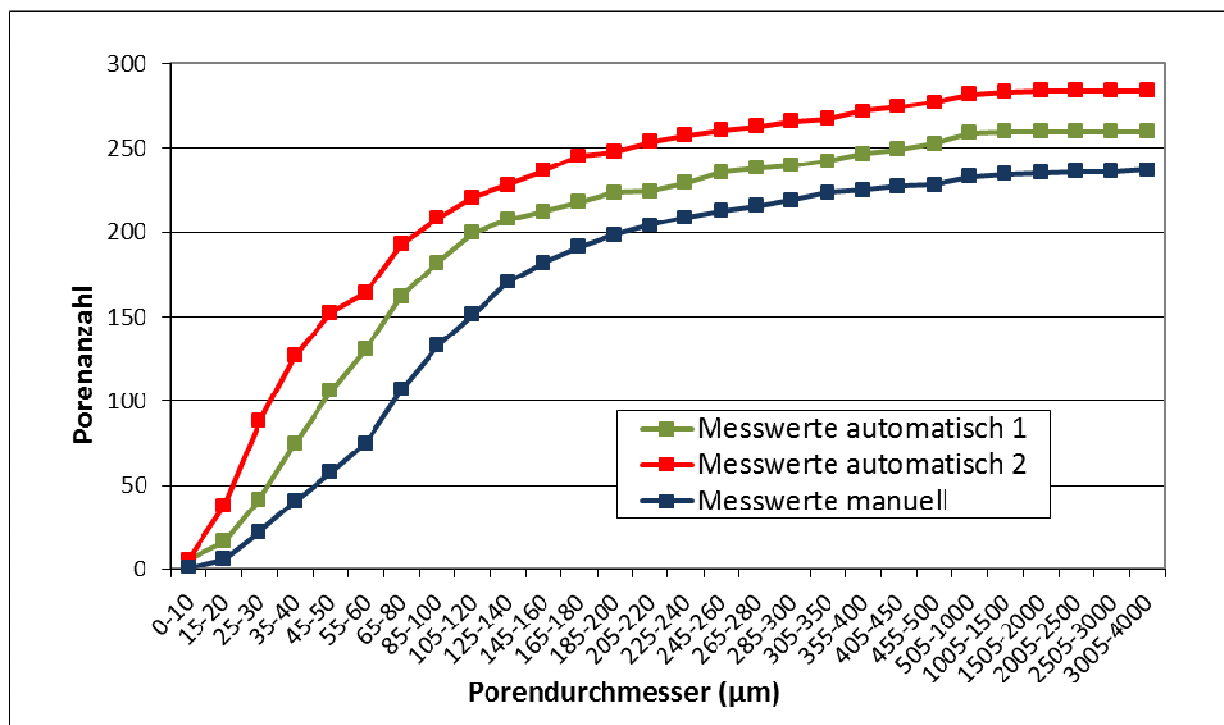


Abbildung 26: Vergleich automatische und manuelle Bestimmung der Luftporenkennwerte nach Gesamtporenanzahl

3.4 Hauptversuche

Bei den Hauptversuchen wurde untersucht, inwieweit sich Veränderungen im Luftporensystem und dem W/B-Wert auf die Beständigkeit von Waschbetonoberflächen auswirken. Hierfür wurden in Summe 18 verschiedenen Betonrezepturen hergestellt und jeweils unterschiedlich gut nachbehandelt. Darüber hinaus wurden Windkanalversuche zur besseren Simulation der Baustellenbedingungen durchgeführt.

Als erster Schritt erfolgte die Ermittlung der Frischbetonkennwerte im Rahmen der Herstellung der Probekörper mit jeweils guter, mittlerer und schlechter Nachbehandlung. Im Probestalter von 28 Tagen erfolgte die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit und der Abreißfestigkeit der Oberfläche. Weiters wurden die Luftporenkennwerte am Festbeton, die Porosität der oberflächennahen Zone sowie der Anmachwassergehalt als Kriterien für die Güte und Beständigkeit der Probekörper ermittelt. Essentiell für die Beurteilung war die an jedem Probekörper durchgeführte Beurteilung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4 gemäß ONR 23303 [25].

Die zur Untersuchung herangezogenen 18 Basisrezepturen sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Dabei bezeichnet MV1...den verwendeten Luftporenbildner 1, MV11... den W/B-Wert 0,38, MV12... den W/B-Wert 0,42, MV13... den W/B-Wert 0,47. Dabei definiert der W/B-Wert 0,38 jenen der Erstprüfung, der W/B-Wert 0,42 jenen der Bauausführung und der W/B-Wert 0,47 eine unzulässig hohe Überschreitung des Wassergehaltes. Die letzten Buchstaben A, B und C der Bezeichnung (z. B. MV11A) geben über die Güte des angestrebten Luftporensystems (A Luftgehalt „hoch“, B Luftgehalt „normal“ und C Luftgehalt „zu nieder“) Auskunft. Luftgehalt „zu nieder“ sollte in jedem Fall auch negative Luftporenkennwerte L300 und AF implizieren.

Tabelle 9: Mischungsverhältnisse Hauptversuche

Mischungsverhältnis	LP	W/B	LP-Dos. [% v. Z.]	W [kg/m ³]
MV11A	LP1	0,38	0,400	170
MV11B	LP1	0,38	0,180	170
MV11C	LP1	0,38	0,080	170
MV12A	LP1	0,42	0,550	190
MV12B	LP1	0,42	0,450	190
MV12C	LP1	0,42	0,080	190
MV13A	LP1	0,47	0,610	210
MV13B	LP1	0,47	0,300	210
MV13C	LP1	0,47	0,180	210
MV21A	LP2	0,38	0,050	170
MV21B	LP2	0,38	0,025	170
MV21C	LP2	0,38	0,008	170
MV22A	LP2	0,42	0,085	190
MV22B	LP2	0,42	0,050	190
MV22C	LP2	0,42	0,025	190
MV23A	LP2	0,47	0,080	210
MV23B	LP2	0,47	0,050	210
MV23C	LP2	0,47	0,025	210

Neben den in Tabelle 9 zusammengestellten Mischungsverhältnissen wurden Probekörper jeder Mische unterschiedlich nachbehandelt. Es wurde auf je einer Probekörperserie 100 %, 50 % und 0 % der angegebenen Nachbehandlungsmittelmenge appliziert. Diese Variationen sollten zeigen, wie sich Baustelleneinflüsse (z.B. Wind und dadurch ungenügende Nachbehandlungsmittelmenge auf der Oberfläche) auf die Güte und Beständigkeit von Waschbetonoberflächen auswirken. In einem weiteren Schritt wurde an ausgewählten Mischungsverhältnissen auch die Lagerungstemperatur von 20 °C auf 38 °C erhöht sowie Proben im Windkanal bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s gelagert. Diese Untersuchungen sollten zeigen, wie sich beispielsweise die Herstellung von Betondecken bei hoher Temperatur bzw. verstärktes Austrocknen durch Wind auf die Güte und Beständigkeit der Oberflächen auswirken kann. In Tabelle 10 sind die unterschiedlichen Nachbehandlungsarten der Hauptversuche zusammengestellt. Auf Basis dieser Tabelle ergeben sich in Summe 63 Probekörperserien.

Tabelle 10: Nachbehandlungsarten Hauptversuche

Mischungsverhältnis	Bez.	Nachbehandlung
alle MV's	I	100 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge
	II	50 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge
	III	0 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge
MV21B und MV22B	I 20	100 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 20 °C Lagerung
	I W20	100 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 20 °C Windkanallagerung
	I 38	100 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 38 °C Lagerung
	II 20	50 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 20 °C Lagerung
	II W20	50 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 20 °C Windkanallagerung
	II 38	50 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 38 °C Lagerung
	III 20	0 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 20 °C Lagerung
	III W20	0 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 20 °C Windkanallagerung
	III 38	0 % der erf. Nachbehandlungsmittelmenge, 38 °C Lagerung

3.4.1 Frischbetonprüfung

Im Rahmen der Frischbetonprüfung erfolgten die Ermittlung der Temperatur (nach 10 und 60 Minuten), des Luftgehaltes im Frischbeton (nach 10 und 60 Minuten), des Verdichtungsmaßes (nach 10 und 60 Minuten) sowie der Rohdichte (nach 10 und 60 Minuten). Alle Prüfungen wurden gemäß ONR 23303 [25] durchgeführt. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Frischbetonprüfung zusammengestellt. T_{10} und T_{60} , L_{10} und L_{60} sowie V_{10} und V_{60} definieren die Temperatur-, Luftgehalts- bzw. Verdichtungsmaßbestimmungen im Frischbeton nach 10 und 60 Minuten. Die Parameter ρ_{10} und ρ_{60} beschreiben die Rohdichte des Frischbetons nach 10 und 60 Minuten.

Tabelle 11: Ergebnisse der Frischbetonprüfung Hauptversuche

Mischungsverhältnis	LP	W/B	T ₁₀	T ₆₀	ρ ₁₀	ρ ₆₀	V ₁₀	V ₆₀	L ₁₀	L ₆₀
			[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[%]	[%]
MV11A	LP1	0,38	24,0	23,8	2240	2309	1,43	1,54	10,5	8,0
MV11B	LP1	0,38	22,0	22,5	2298	2403	1,27	1,45	8,5	5,3
MV11C	LP1	0,38	22,0	22,1	2438	2460	1,32	1,53	3,7	3,2
MV12A	LP1	0,42	23,1	23,2	2304	2322	1,20	1,27	7,6	7,2
MV12B	LP1	0,42	24,3	24,8	2338	2347	1,24	1,32	5,9	5,7
MV12C	LP1	0,42	22,9	23,2	2428	2433	1,23	1,32	2,5	2,4
MV13A	LP1	0,47	24,2	24,1	2269	2285	1,07	1,14	8,9	7,3
MV13B	LP1	0,47	23,0	23,5	2342	2369	1,08	1,19	5,2	4,2
MV13C	LP1	0,47	23,1	23,4	2364	2379	1,07	1,16	4,0	3,1
MV21A	LP2	0,38	21,9	22,4	2391	2407	1,41	1,42	5,2	5,1
MV21B	LP2	0,38	24,5	24,6	2453	2449	1,45	1,45	3,8	4,0
MV21C	LP2	0,38	25,3	25,8	2458	2450	1,43	1,44	3,2	3,4
MV22A	LP2	0,42	22,7	23,1	2294	2300	1,27	1,35	8,1	7,6
MV22B	LP2	0,42	24,8	24,9	2363	2353	1,27	1,34	5,3	5,0
MV22C	LP2	0,42	22,5	23,1	2421	2422	1,28	1,43	3,3	3,1
MV23A	LP2	0,47	20,3	20,8	2290	2279	1,05	1,09	7,2	7,4
MV23B	LP2	0,47	23,9	24,3	2356	2351	1,09	1,12	5,4	5,5
MV23C	LP2	0,47	23,4	24,0	2402	2392	1,10	1,12	3,0	3,3

3.4.2 Festbetonprüfung Betonkennwerte

An den einzelnen Mischungsverhältnissen wurden vorerst die nachbehandlungsunabhängigen Parameter an den 28 Tage alten (Spaltzugfestigkeiten) oder älteren Betonprobekörpern (restliche Prüfungen) ermittelt. Die Bestimmungen wurden gemäß ONR 23303 [25] bzw. die Anmachwassermenge gemäß VÖZFI Verfahren B03 [33] durchgeführt. Die Ergebnisse der Bestimmung der nachbehandlungsunabhängigen Betonkennwerte sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Dabei bezeichnen L_{ges} den Gesamtluftgehalt des Festbetons, L_{300} den Gehalt an Mikroluftporen bis zu einem Durchmesser von 300 µm, AF den Abstandsfaktor als rechnerischen Kennwert für die Porenverteilung und f_t die Spaltzugfestigkeit.

Tabelle 12: Ergebnisse der Festbetonprüfung – Betonkennwerte

Mischungsverhältnis	LP	W/B	L _{ges}	L300	AF	f _t
			[%]	[%]	[mm]	[N/mm ²]
MV11A	LP1	0,38	7,9	5,8	0,12	4,69
MV11B	LP1	0,38	4,7	2,9	0,17	5,23
MV11C	LP1	0,38	3,1	1,1	0,32	5,33
MV12A	LP1	0,42	8,1	5,6	0,13	4,75
MV12B	LP1	0,42	5,9	3,9	0,15	4,88
MV12C	LP1	0,42	2,8	1,0	0,39	5,49
MV13A	LP1	0,47	9,2	7,4	0,12	3,65
MV13B	LP1	0,47	5,8	4,3	0,16	3,01
MV13C	LP1	0,47	3,7	2,2	0,19	4,45
MV21A	LP2	0,38	4,4	2,4	0,16	4,75
MV21B	LP2	0,38	4,4	1,8	0,28	4,78
MV21C	LP2	0,38	3,3	1,2	0,33	5,05
MV22A	LP2	0,42	8,4	5,7	0,10	4,45
MV22B	LP2	0,42	5,9	4,0	0,14	4,62
MV22C	LP2	0,42	4,3	2,4	0,22	4,34
MV23A	LP2	0,47	9,2	7,5	0,10	3,74
MV23B	LP2	0,47	6,6	4,6	0,15	3,63
MV23C	LP2	0,47	3,3	2,0	0,18	4,23

3.4.3 Festbetonkennwerte Betongüte

Neben der Ermittlung der Betonkennwerte gemäß Tabelle 8 erfolgte die Bestimmung von Kennwerten, die sowohl von der Betonzusammensetzung selbst als auch von der Nachbehandlungsqualität abhängig sind. Zu diesen Parametern gehört die Ermittlung der Abwitterung analog Prüfung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4 gemäß ONR 23303 [25], die Ermittlung der Porenvolumenverteilung durch Quecksilberintrusion der Oberfläche analog DIN 66133 [10], die Prüfung der Abreißfestigkeit f_A sowie der des Anmachwassergehaltes $W_{\text{anm.}}$ der oberflächennahe Zone der Waschbetonoberflächen. Diese Kennwerte sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Ergebnisse der Festbetonprüfung – Betongüte

Mischungsverhältnis	LP	W/B	XF4 ¹⁾	W _{anm.}	Porosität [Vol-%] bei Spaltbreite [µm]				f _A [N/mm ²]	
					10	1	0,1	0,01	O ²⁾	T ³⁾
			[g/m ²]	[kg/m ³]						
MV11A	LP1	0,38	109	177	11,4	10,2	6,8	1,4	2,4	2,7
MV11B	LP1	0,38	224	177	9,4	8,4	5,9	1,3	2,3	2,7
MV11C	LP1	0,38	215	182	12,7	11,3	8,9	1,7	2,8	3,1
MV12A	LP1	0,42	90	194	15,5	13,8	7,6	2,3	2,4	2,5
MV12B	LP1	0,42	50	195	13,3	12,5	8,3	2,3	2,3	2,8
MV12C	LP1	0,42	560	201	11,9	10,8	8,3	2,6	2,7	3,1
MV13A	LP1	0,47	193	217	20,1	18,9	8,8	1,4	2,0	2,5
MV13B	LP1	0,47	100	222	19,0	18,2	9,7	1,7	2,1	2,6
MV13C	LP1	0,47	244	218	19,7	17,1	9,7	1,6	2,3	2,3
MV21A	LP2	0,38	113	178	11,8	9,8	7,0	1,8	2,6	3,0
MV21B	LP2	0,38	304	177	11,0	10,3	8,2	1,5	2,8	3,1
MV21C	LP2	0,38	756	177	13,4	12,7	9,7	2,7	2,4	2,6
MV22A	LP2	0,42	73	192	17,4	16,5	9,8	3,3	2,1	2,6
MV22B	LP2	0,42	78	201	14,2	13,7	10,0	3,5	2,6	2,7
MV22C	LP2	0,42	144	198	12,3	12,2	9,4	3,9	2,8	2,9
MV23A	LP2	0,47	82	215	18,8	17,5	7,9	2,5	1,8	2,4
MV23B	LP2	0,47	78	215	16,5	15,2	8,0	1,7	2,2	2,5
MV23C	LP2	0,47	259	221	19,3	18,8	10,8	2,0	2,2	2,3

1) Abwitterung in g/m² nach 56 Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen

2) Oberfläche

3) 2 cm Tiefe

Die in Tabelle 13 zusammengestellten Prüfwerte für XF4, Anmachwassergehalt und teilweise Porosität geben jeweils Mittelwerte aller drei angewandten Nachbehandlungsarten wieder. Generell wurde jedoch Abwitterung, Anmachwassergehalt und Abreißfestigkeit mit den drei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden ermittelt. Diese Prüfwerte sind Tabelle 14 für LP1 und Tabelle 15 für LP2 zu entnehmen.

Tabelle 14: Ergebnisse der Festbetonprüfung – Gesamtdaten LP1

Mischungsverhältnis	Nachbeh.	XF4 [g/m ²] nach Tagen					W _{anm.} [kg/m ³]		f _A [N/mm ²]	
		7	14	28	42	56	EW1	EW2	O ¹⁾	T ²⁾
MV11A	I	4	8	30	48	74	176	171	2,7	2,2
	II	3	12	39	51	76	181	178	2,5	3,1
	III	17	68	129	145	178	179	178	2,0	2,9
	MW	8	29	66	81	109			2,40	2,73
MV11B	I	7	27	62	138	168	178	177	2,2	2,8
	II	13	27	48	185	200	174	175	2,6	2,9
	III	14	66	126	270	304	179	177	2,2	2,4
	MW	11	40	78	197	224			2,33	2,70
MV11C	I	29	51	102	114	145	183	180	2,9	3,2
	II	7	46	97	114	146	182	189	2,9	3,0
	III	34	97	236	305	354	178	178	2,5	3,2
	MW	23	65	145	177	215			2,77	3,13
MV12A	I	4	11	19	38	54	190	187	2,2	2,3
	II	8	19	46	80	117	197	188	2,4	2,8
	III	5	22	45	66	100	200	201	2,5	2,4
	MW	5	17	37	61	90			2,37	2,50
MV12B	I	3	14	22	28	41	198	196	2,2	2,8
	II	6	13	21	29	37	203	191	2,3	3,3
	III	9	20	33	49	71	189	191	2,5	2,3
	MW	6	16	25	35	50			2,33	2,80
MV12C	I	3	16	56	104	178	197	202	2,9	3,0
	II	21	61	295	490	697	206	199	2,9	3,0
	III	15	74	346	531	805	198	202	2,3	3,4
	MW	13	50	232	375	560			2,70	3,13
MVT3A	I	11	41	84	118	144	218	214	2,1	2,5
	II	6	29	94	168	222	213	226	2,1	2,8
	III	7	25	74	149	213	211	219	1,9	2,2
	MW	8	32	84	145	193			2,03	2,50
MV13B	I	25	51	67	76	80	218	223	1,8	2,8
	II	5	8	17	27	34	214	222	2,4	2,7
	III	15	35	87	136	187	210	244	2,1	2,4
	MW	15	31	57	80	100			2,10	2,63
MV13C	I	22	78	108	240	257	208	221	2,4	2,7
	II	22	74	123	205	249	221	220	2,4	2,2
	III	0	43	56	188	225	221	215	2,1	2,1
	MW	15	65	95	211	244			2,30	2,33

1) Oberfläche

2) 2 cm Tiefe

Tabelle 15: Ergebnisse der Festbetonprüfung – Gesamtdaten LP2

Mischungsverhältnis	Nachbeh.	XF4 [g/m ²] nach Tagen					W _{anm.} [kg/m ³]		f _A [N/mm ²]	
		7	14	28	42	56	7	14	28	
MV21A	I	10	17	34	46	51	183	182	2,7	2,9
	II	13	35	77	92	116	174	177	2,7	3,3
	III	18	100	143	151	172	176	176	2,5	2,9
	MW	14	51	85	96	113			2,63	3,03
MV21B	I	35	118	224	284	311	180	172	2,5	3,1
	II	56	94	167	213	240	176	179	3,0	2,6
	III	55	153	277	323	361	176	178	3,0	3,5
	MW	48	121	223	273	304			2,83	3,07
MV21C	I	196	353	534	680	737	179	183	2,1	2,6
	II	106	255	561	767	804	175	172	2,8	2,4
	III	28	114	439	596	726	177	176	2,4	2,9
	MW	110	240	511	681	756			2,43	2,63
MV22A	I	3	10	25	32	38	192	191	2,1	2,3
	II	3	9	31	45	72	197	195	2,8	2,5
	III	13	31	53	71	108	189	190	1,5	2,9
	MW	6	16	36	49	73			2,13	2,57
MV22B	I	8	22	47	60	72	203	198	2,2	2,5
	II	4	14	38	56	79	201	195	2,8	2,8
	III	6	17	28	49	84	203	205	2,7	2,9
	MW	6	18	37	55	78			2,57	2,73
MV22C	I	17	47	85	97	119	199	193	2,4	3,1
	II	7	28	88	110	135	198	205	3,0	3,0
	III	11	32	93	120	178	195	195	2,9	2,6
	MW	11	36	88	109	144			2,77	2,90
MV23A	I	8	20	30	38	43	220	227	1,8	2,2
	II	27	53	69	73	78	212	210	2,2	2,4
	III	32	63	87	110	124	210	212	1,4	2,6
	MW	22	45	62	74	82			1,80	2,40
MV23B	I	11	18	23	30	34	217	219	1,6	2,8
	II	8	24	47	59	71	211	211	2,6	2,0
	III	18	37	84	111	130	212	222	2,5	2,6
	MW	12	26	51	67	78			2,23	2,47
MV23C	I	15	23	45	60	75	218	217	2,1	2,0
	II	62	131	179	211	228	217	219	1,8	2,2
	III	43	164	288	421	473	222	230	2,6	2,6
	MW	40	106	170	231	259			2,17	2,27

- 1) Oberfläche
- 2) 2 cm Tiefe

Tabelle 14 und Tabelle 15 zeigen, dass die Abwitterungen mit fallender Nachbehandlungsqualität grundsätzlich zunehmen. Die untersuchten Proben wurden nach dem Ausbürsten bei Normklima (20 ± 2 °C und Luftfeuchtigkeit > 95 %) gemäß ONR 23303 [25] gelagert. Da diese Lagerung im Vergleich zu den auf Baustellen herrschenden Bedingungen als moderat anzusehen ist, sind die Unterschiede im Abwitterungsverhalten zwischen guter und schlechter Nachbehandlung nicht in jedem Fall deutlich sichtbar.

3.4.4 Simulation Baustellenbedingungen

Zur besseren Abbildung der Baustellenbedingungen im Labor erfolgte die Simulation von drei unterschiedlichen Klimabedingungen im Labor. Hierfür wurden Proben nach dem Ausbürstvorgang mit 100 %, 50 % und 0 % der erforderlichen Nachbehandlungsmittelmenge bei 20 ± 2 °C, bei 20 ± 2 °C und Windgeschwindigkeit von 1 m/s und bei 38 ± 2 °C für jeweils 7 Tage gelagert. Im Alter von 28 Tagen wurde an den Proben die Abwitterung analog Prüfung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4 gemäß ONR 23303 [25] und die Porenvolumenverteilung durch Quecksilberintrusion der Oberfläche analog DIN 66133 [10] (nur an MV21Ba) ermittelt. Die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen wurden bereits in Tabelle 10 zusammengestellt. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind Tabelle 16 zu entnehmen. Dabei bedeutet I, II und III jeweils 100 %, 50 % und 0 % der erforderlichen Nachbehandlungsmittelmenge.

Tabelle 16: Ergebnisse Simulation Baustellenbedingungen – Betongüte

Mischungsverhältnis	Lagerung	XF4 [g/m ²] nach Tagen					Porosität [Vol-%] bei Spaltbreite [µm]			
		7	14	28	42	56	10	1	0,1	0,01
MV21Ba	I 20	2	6	11	13	22	7,50	7,10	5,20	1,40
	I 38	6	15	18	22	24	7,70	7,40	5,00	1,40
	I W 20	10	16	27	38	43	8,80	8,50	6,50	1,50
	II 20	9	18	56	78	82	10,90	10,20	7,50	2,00
	II 38	45	83	110	153	163	11,20	10,60	8,40	3,20
	II W20	13	28	137	143	146	11,10	10,20	7,20	2,60
	III 20	7	17	40	67	94	11,20	10,70	7,80	2,00
	III 38	64	96	141	173	184	11,20	10,50	7,10	1,40
	III W20	77	270	404	533	639	14,70	14,00	8,60	1,30
MV22Ba	I 20	4	14	47	62	82	-	-	-	-
	I 38	9	19	43	61	87	-	-	-	-
	I W 20	4	13	41	61	66	-	-	-	-
	II 20	19	30	120	161	245	-	-	-	-
	II 38	39	63	196	269	299	-	-	-	-
	II W20	27	74	255	321	398	-	-	-	-
	III 20	60	73	119	147	202	-	-	-	-
	III 38	33	65	122	151	179	-	-	-	-
	III W20	125	367	471	566	608	-	-	-	-

3.4.5 Zusammenhänge

Im Folgenden sind die Zusammenhänge zwischen den einzelnen geprüften Parametern zusammengestellt.

Festbetonkennwerte

Als erster Schritt wurden in Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 die Relation zwischen Dosierung Luftporenmittel und Gesamtluftgehalt bzw. Luftporenkennwerte dargestellt.

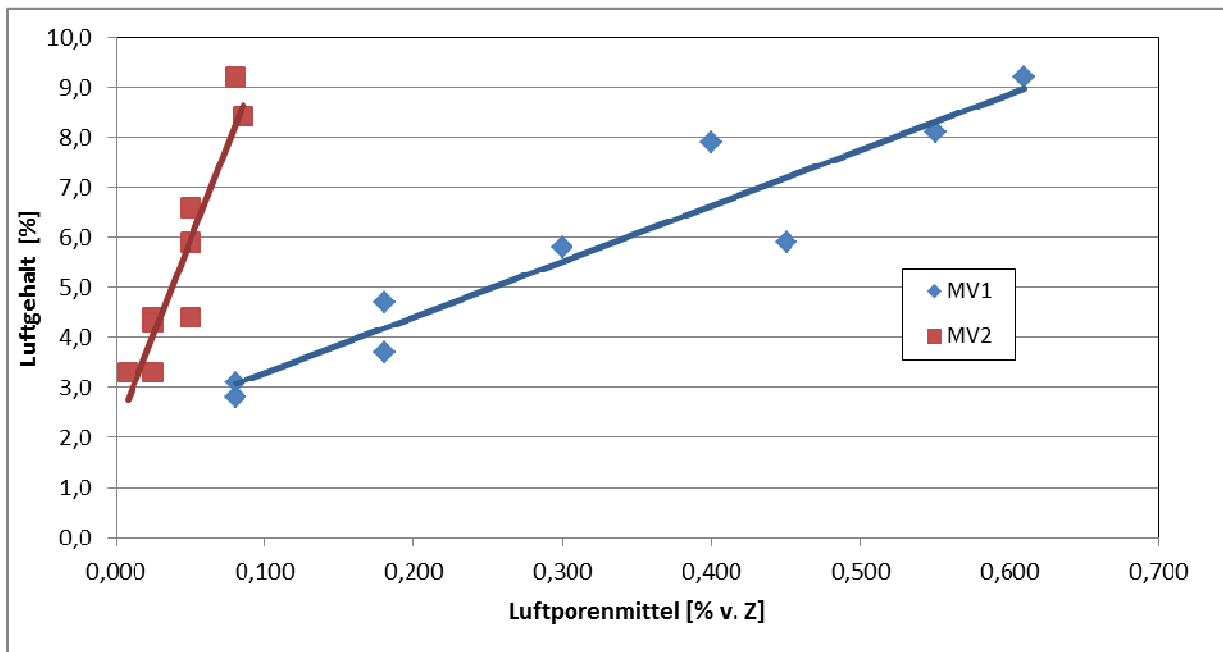


Abbildung 27: Zusammenhänge Dosierung Luftporenmittel mit Gesamtluftgehalt

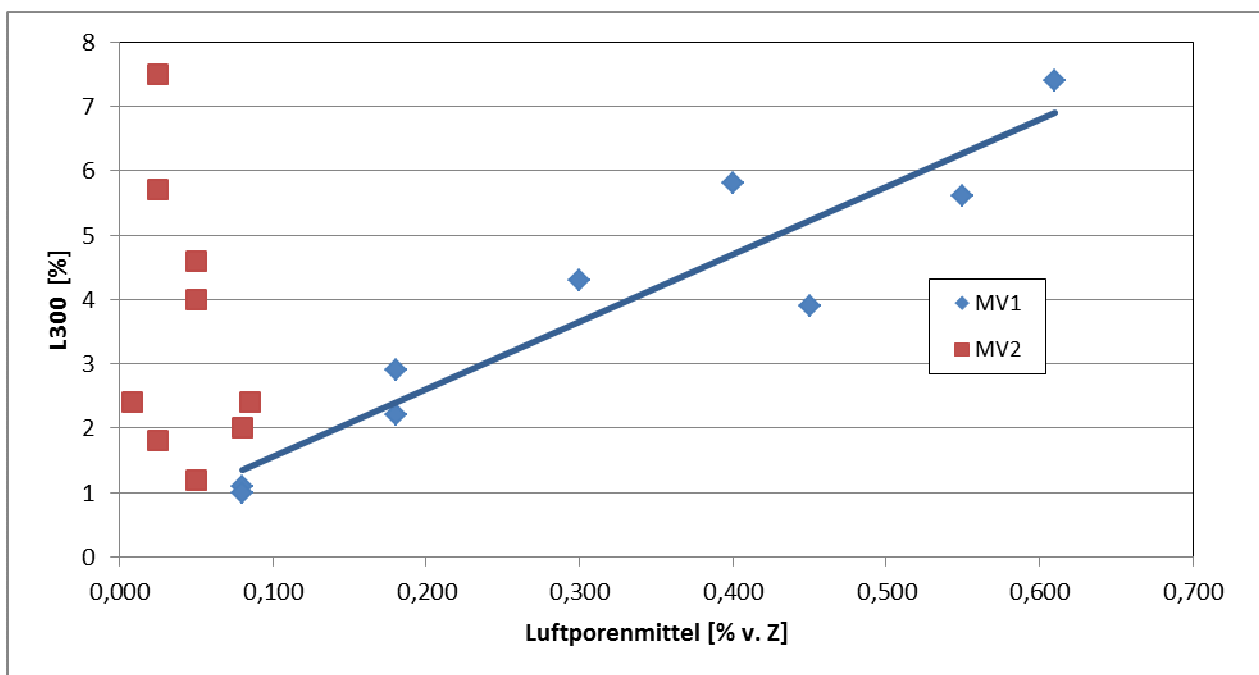


Abbildung 28: Zusammenhänge Dosierung Luftporenmittel mit L300

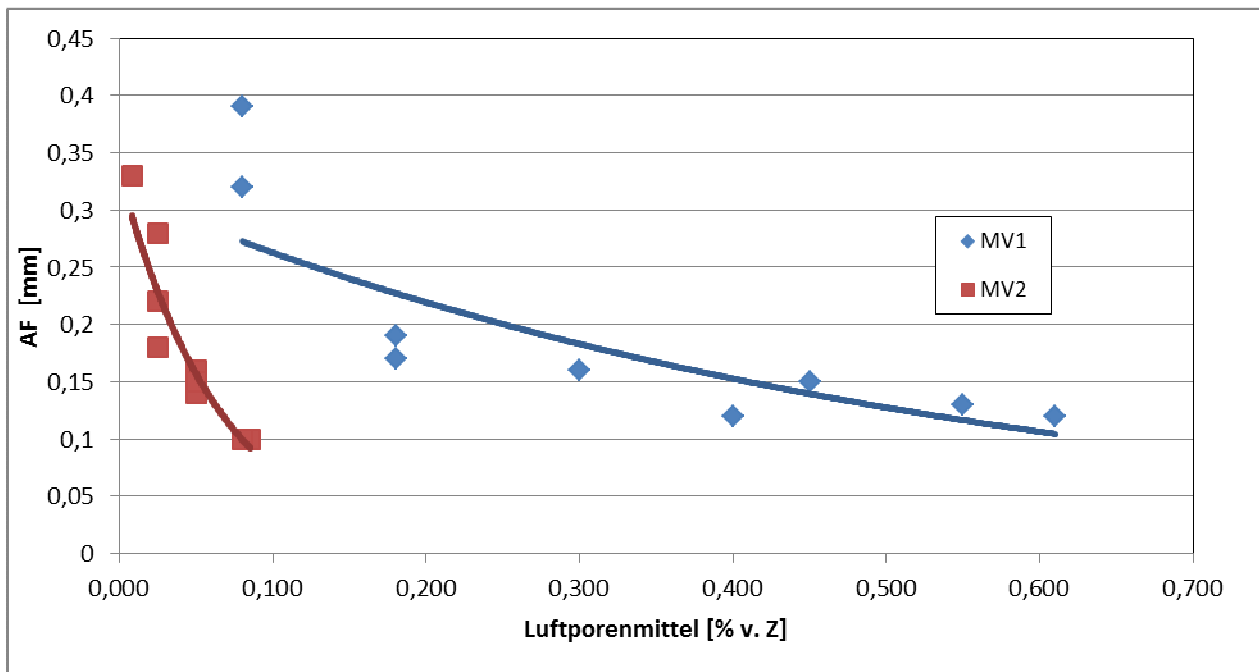


Abbildung 29: Zusammenhänge Dosierung Luftporenmittel mit AF

Abbildung 27 zeigt, dass zwischen Dosierung Luftporenmittel und Gesamtluftgehalt weitgehend lineare Zusammenhänge gefunden werden konnten. Bezüglich erforderlicher Dosierung sind zwischen den beiden verwendeten Luftporenmittel LP1 und LP2 jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Während bei LP2 bereits bei einer Zugabemenge von 0,1 % vom Zement ein Luftgehalt von etwa 9 % erreicht wird, ist bei LP1 eine Dosierung von 0,6 % vom Zement erforderlich. Zusammenhänge zwischen Dosierung Luftporenmittel und L300 sind gemäß Abbildung 28 nur bei LP1 ausgeprägt. Gute Korrelationen zwischen erreichbarem Abstandsfaktor und Dosierung Luftporenmittel sind aus Abbildung 29 zu entnehmen. Diese Relationen sind nicht linear, da eine höhere Dosierung Luftporenmittel nur eine geringe Verbesserung (Reduktion) des Abstandsfaktors bewirkt.

Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die Zusammenhänge zwischen Gesamtluftgehalt, L300 und AF und der Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Bbeanspruchungszyklen.

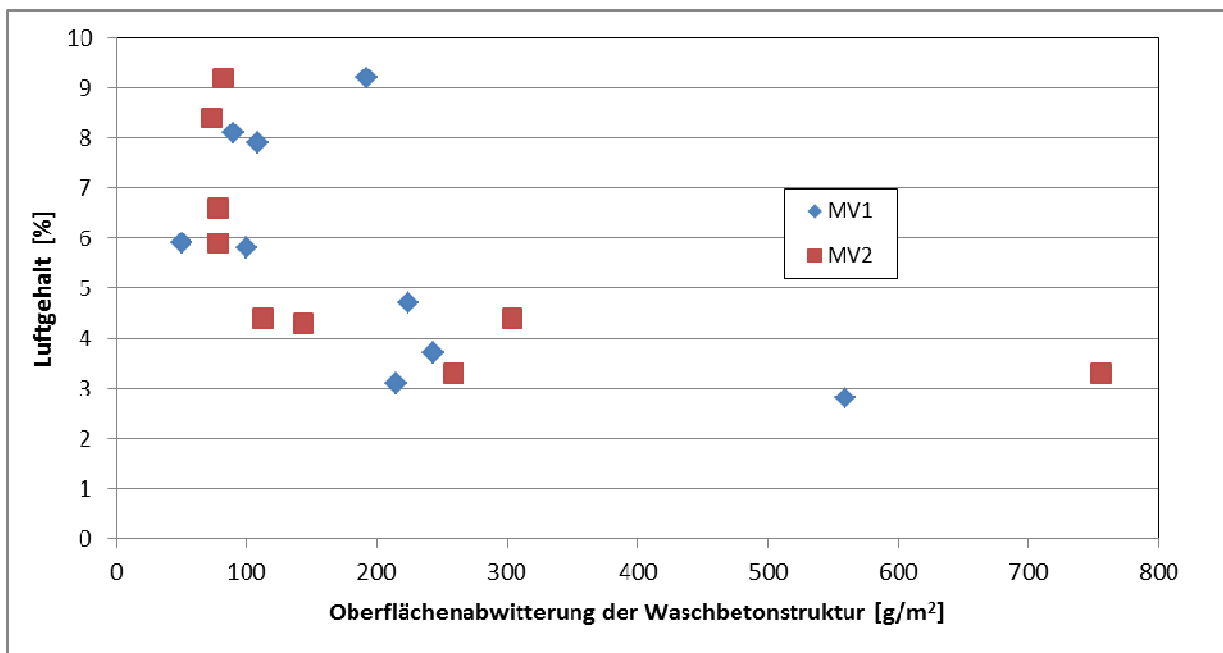


Abbildung 30: Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Bbeanspruchungszyklen

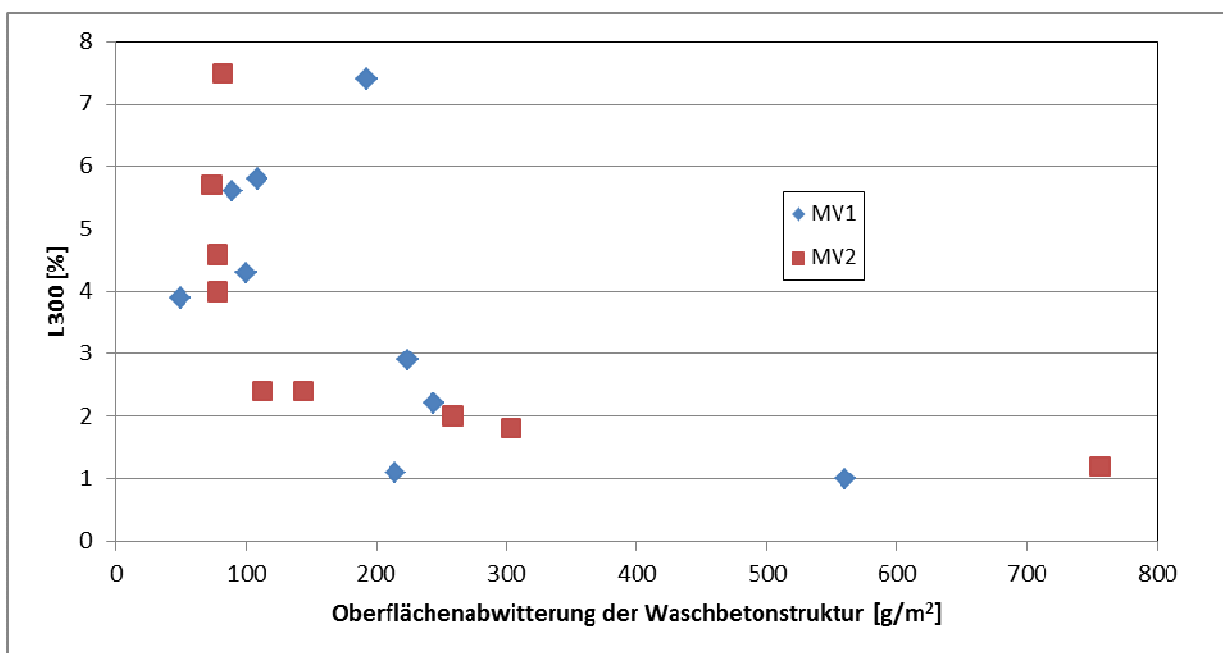


Abbildung 31: Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Bbeanspruchungszyklen

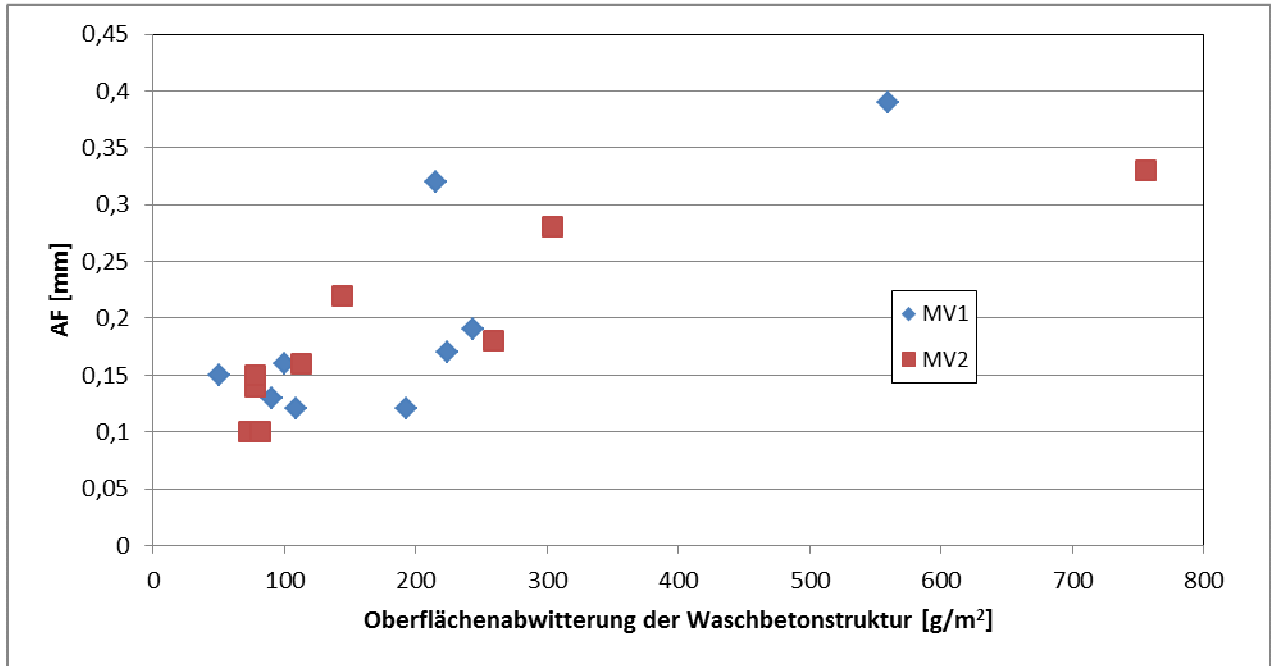


Abbildung 32: Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen

Obige Abbildungen zeigen grundsätzlich, dass höhere Gesamtluftgehalte und L300 Werte bzw. niedrigere Abstandsfaktoren zu einer geringeren Oberflächenabwitterung führen. Zur klaren Darlegung erfolgte eine detaillierte Betrachtung in folgenden Abbildungen. Als erster Schritt wurden für jedes untersuchte Luftporenmittel Zusammenhänge zwischen Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung aufgezeigt. Abbildung 33 zeigt diese Relationen für MV1, Abbildung 34 für MV2. Zusätzlich ist in diesen Abbildungen die Mindestanforderung an den Luftgehalt gemäß RVS 08.17.02 von 4,0 % eingetragen.

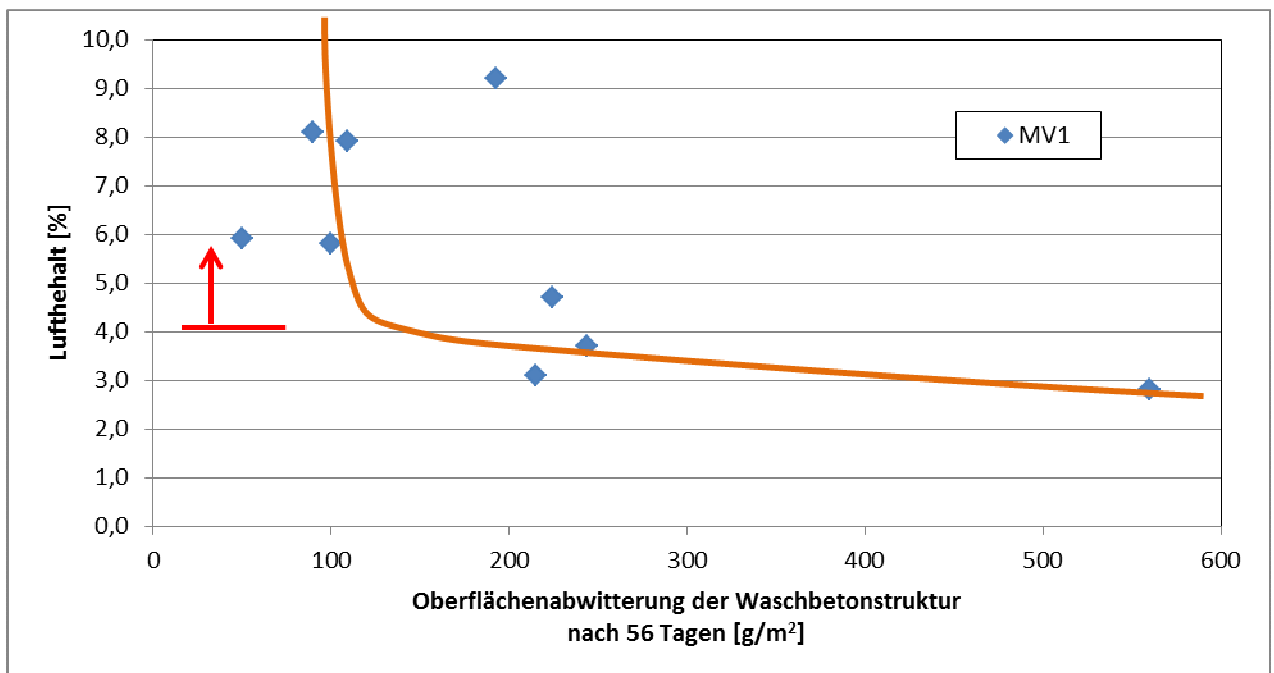


Abbildung 33: Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV1

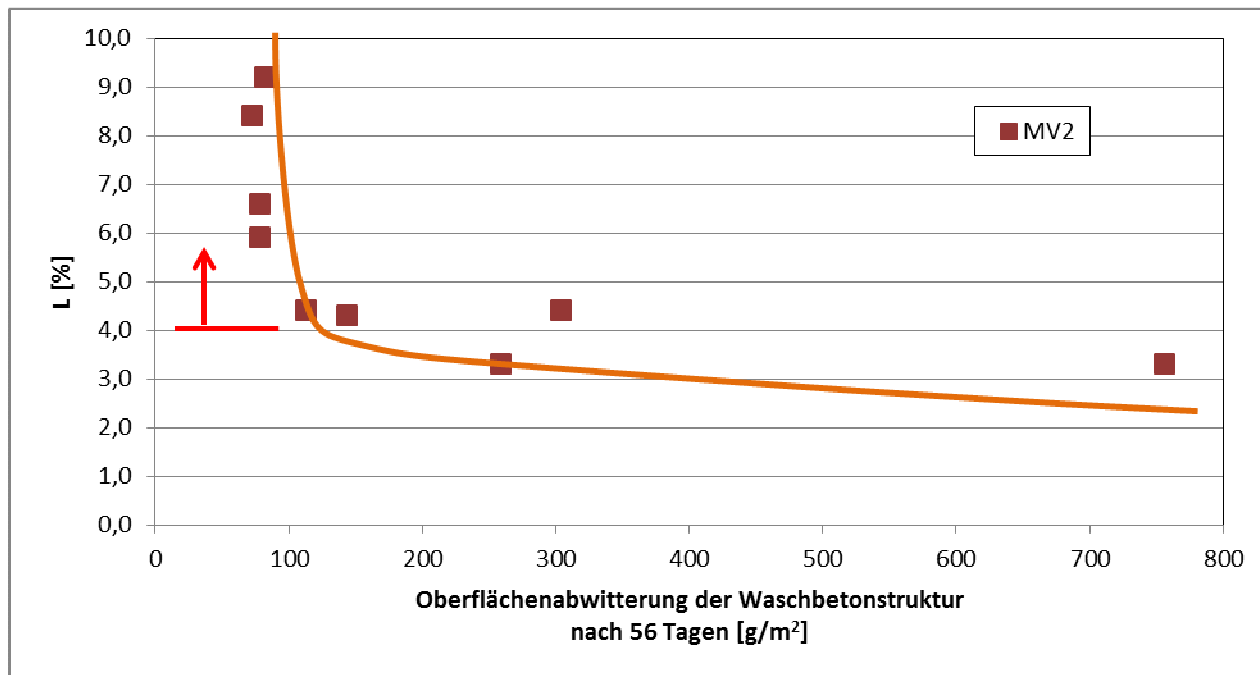


Abbildung 34: Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV2

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen deutlich, dass bei Gesamtluftgehalten unter 4 % ein deutlich merkbarer Anstieg der Oberflächenabwitterung beobachtet werden konnte. Abbildung 33 zeigt auch einen deutlichen Ausreißer in den Messwerten mit einem Gesamtluftgehalt von 9,2 Prozent und einer Abwitterung von 193 g/m². Solche Ausreißer können darauf zurückgeführt werden, dass sich beispielsweise geringfügige Abweichungen in der Waschbetonherstellung und damit eine im Vergleich zu anderen Versuchen größere Menge an schlecht eingebetteten Körnern im Laufe der Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen aus der Oberfläche herauslösen und so zu verhältnismäßig höheren Oberflächenabwitterungen führen. In Abbildung 35 sind die Zusammenhänge zwischen Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen in Abhängigkeit vom W/B-Wert dargestellt.

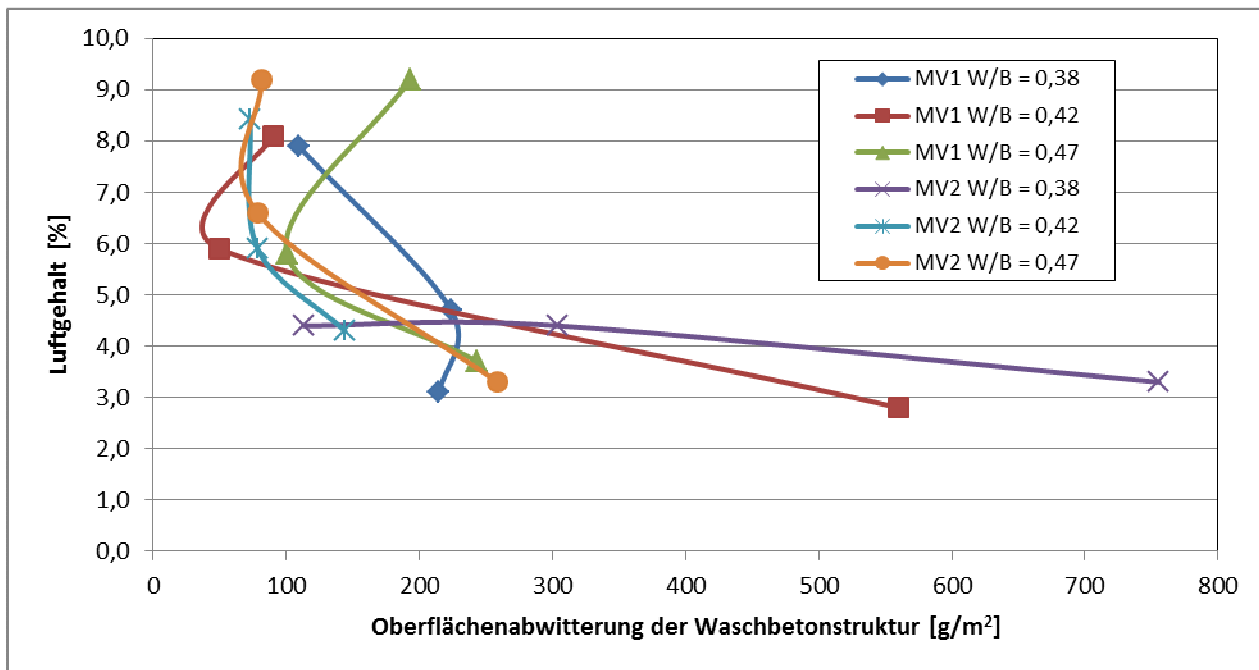


Abbildung 35: Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung in Relation zum W/B-Wert

Abbildung 35 zeigt, dass die dargelegten Zusammenhänge grundsätzlich unabhängig vom W/B-Wert zu sehen sind. Es ist jedoch der Trend zu erkennen, dass hohe Luftgehalte und damit ein adäquates Luftporensystem tendenziell leichter mit entsprechend höherem Bindemittelmehrvolumen sichergestellt werden kann.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Zusammenhänge zwischen den Luftporenkennwerten L300 und AF mit der Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechselbeanspruchungszyklen. Die Anforderungen für $L300 \geq 1,8 \%$ (Anforderung Erstprüfung) und $AF \leq 0,18 \text{ mm}$ (Anforderung Ersprüfung) gemäß RVS 08.17.02. sind ebenfalls in die jeweiligen Abbildungen eingetragen.

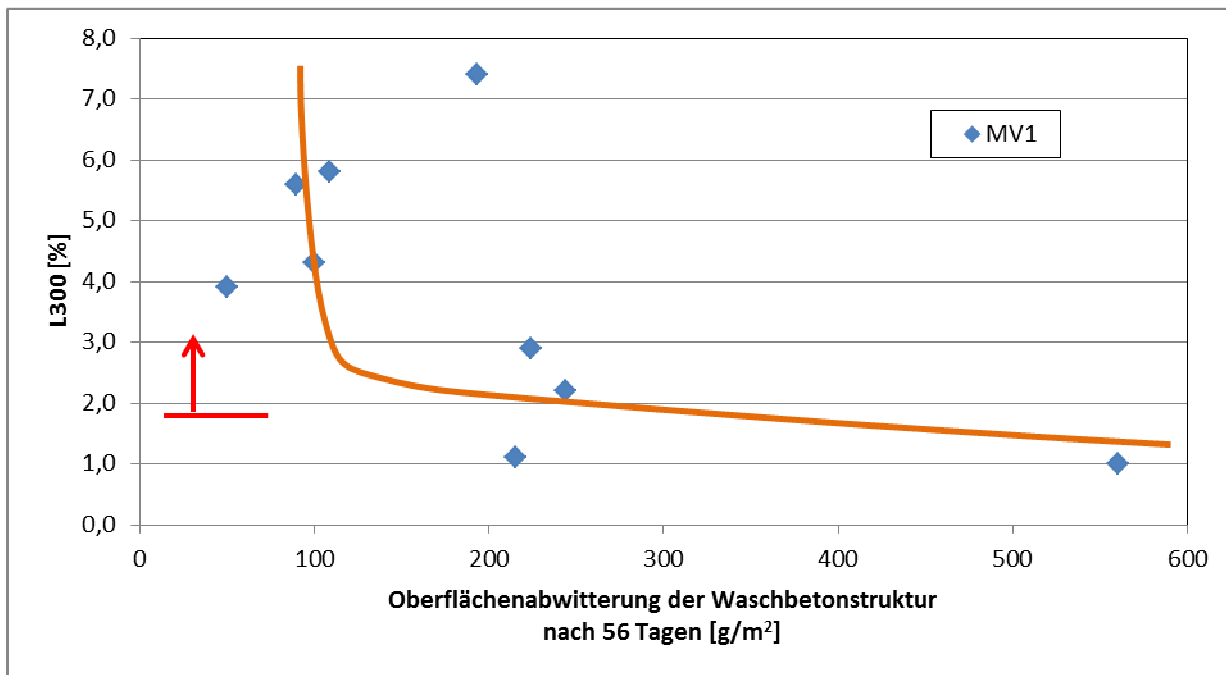


Abbildung 36: Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV1

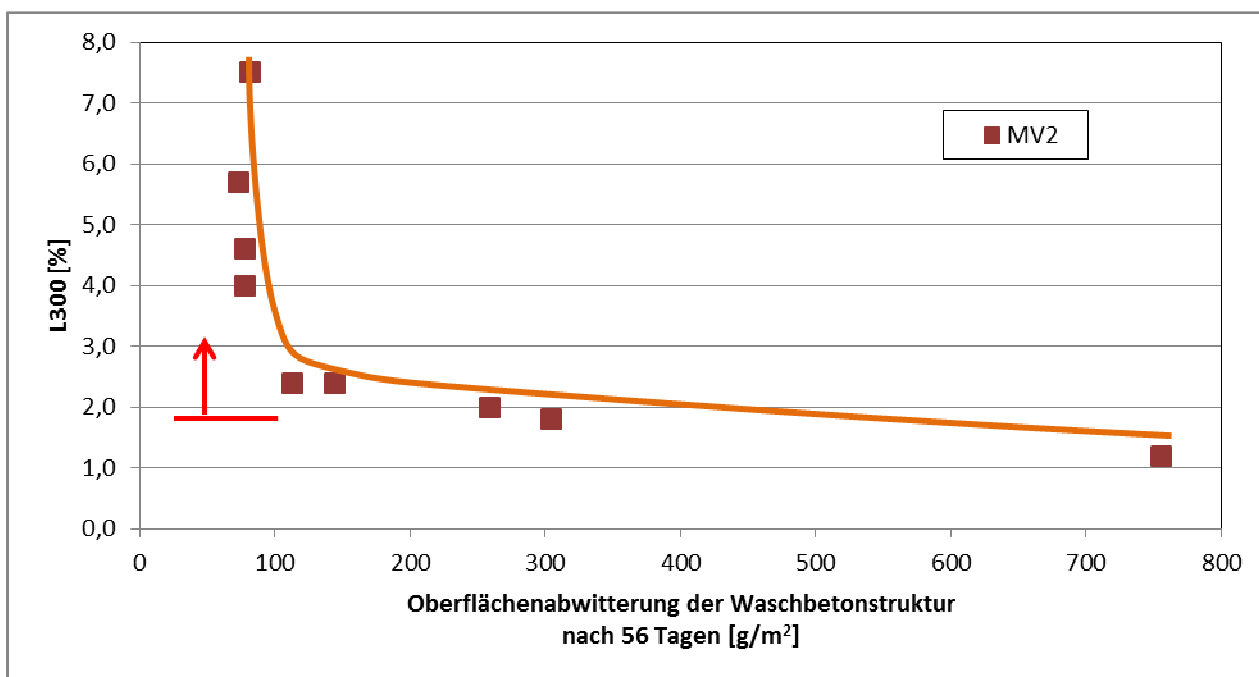


Abbildung 37: Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV2

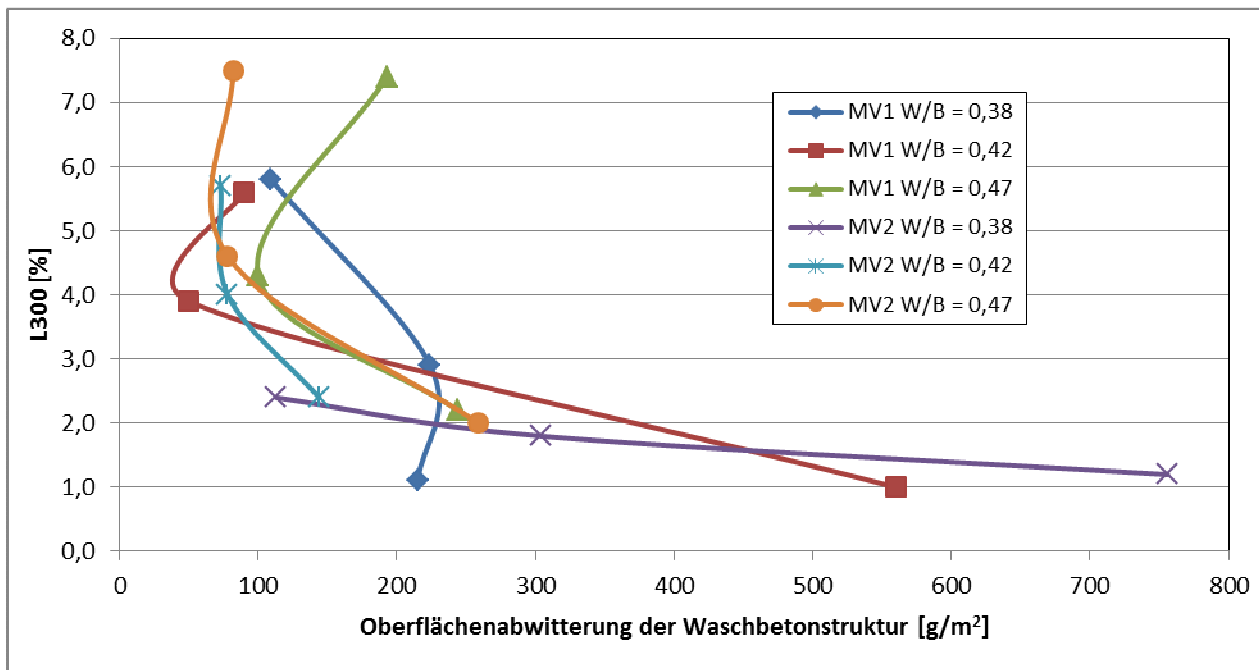


Abbildung 38: Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung in Relation zum W/B-Wert MV1

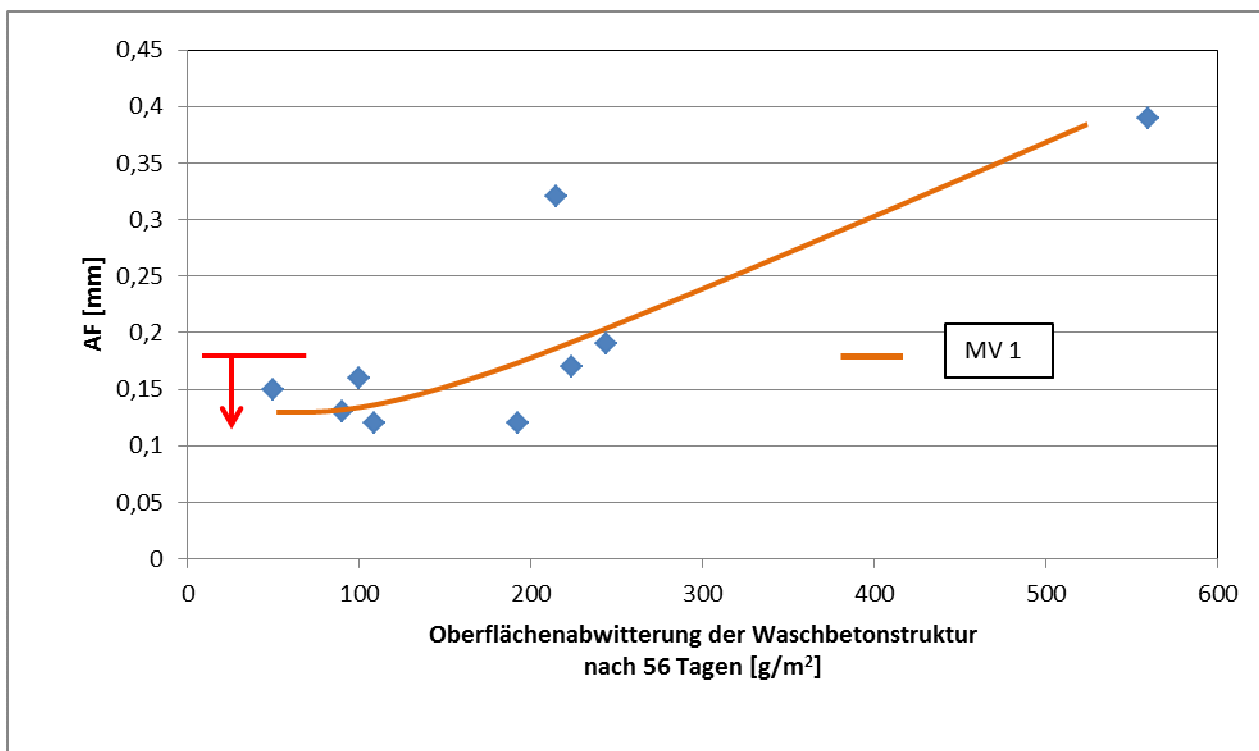


Abbildung 39: Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV1

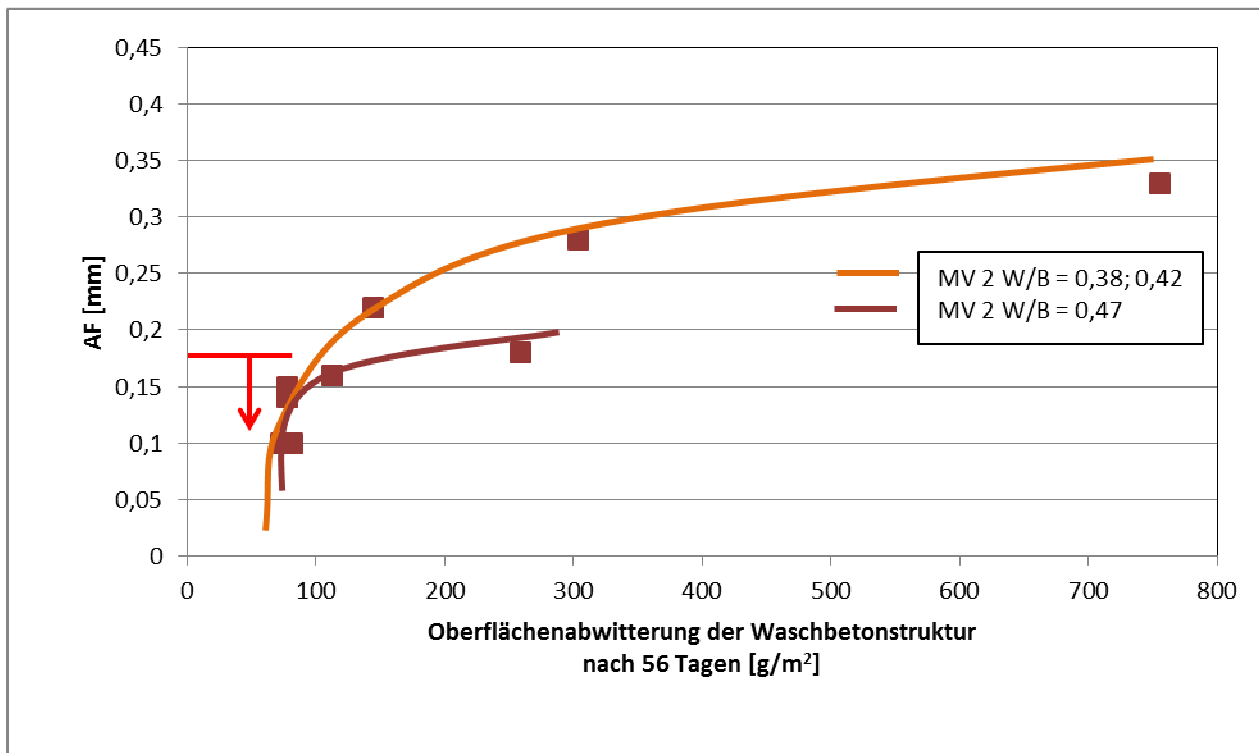


Abbildung 40: Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechselbeanspruchungszyklen MV2

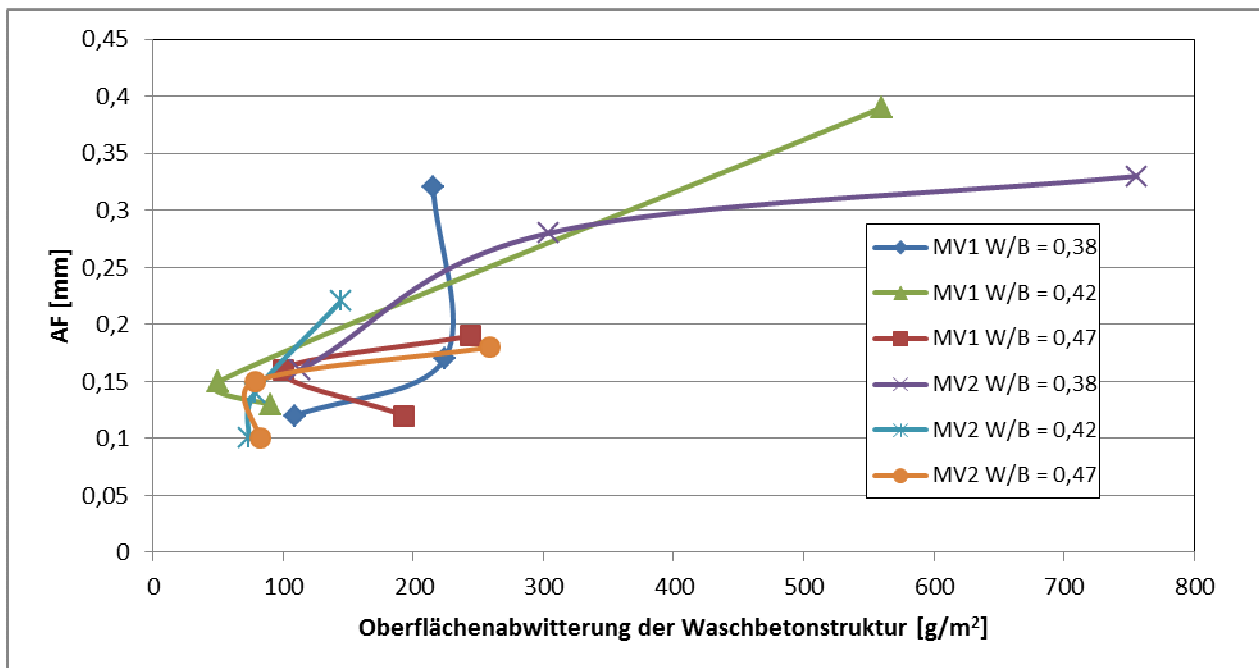


Abbildung 41: Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung in Relation zum W/B-Wert MV2

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen die Zusammenhänge zwischen L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen. Es ist zu erkennen, dass bei einem L300 Wert $< 2,0$ die Abwitterungen stark zunehmen. Die in RVS 08.17.02 [20] definierten Grenzwerte von $\geq 1,8$ für Erstprüfung bzw. $\geq 1,5$ für die Bauausführung decken grundsätzlich diesen Bereich ab. Abbildung 38 zeigt darüber hinaus, dass sehr hohe L300 Werte durchwegs leichter mit hohen W/B-Werten erreicht werden.

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die Zusammenhänge zwischen AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Überschreitung der in RVS 08.17.02 [20] definierten Grenzwerte von $AF \leq 0,18$ für Erstprüfung bzw. $\leq 0,21$ für die Bauausführung die Abwitterung stark zunimmt. Bei LP2 konnte auch, wie Abbildung 40 zeigt, ein guter Zusammenhang zwischen W/B-Wert und Abwitterung gefunden werden. Bei sehr hohen W/B-Werten von 0,47 ist schon bei einem AF von 0,15 mit einer vermehrten Abwitterung der Oberfläche zu rechnen.

Abbildung 41 zeigt die Zusammenhänge zwischen AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen in Abhängigkeit des W/B-Wertes. Eindeutige Zusammenhänge sind hier nicht ablesbar. Jedenfalls kann aus Abbildung 35, Abbildung 38 und Abbildung 41 geschlossen werden, dass im untersuchten Bereich der W/B-Werte zwischen 0,38 und 0,47 ein adäquates Luftporensystem einen viel größeren Einfluss auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit hat als der jeweilige W/B-Wert.

Neben Luftporenkennwerten und Abwitterungen wurden an allen untersuchten Mischungsverhältnissen die Spaltzugfestigkeiten zur Charakterisierung der mechanischen Werkstoffeigenschaften ermittelt. Abbildung 42 zeigt die ermittelten Spaltzugfestigkeiten nach 28 Tagen sowie Abbildung 43 die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit zum W/B-Wert.

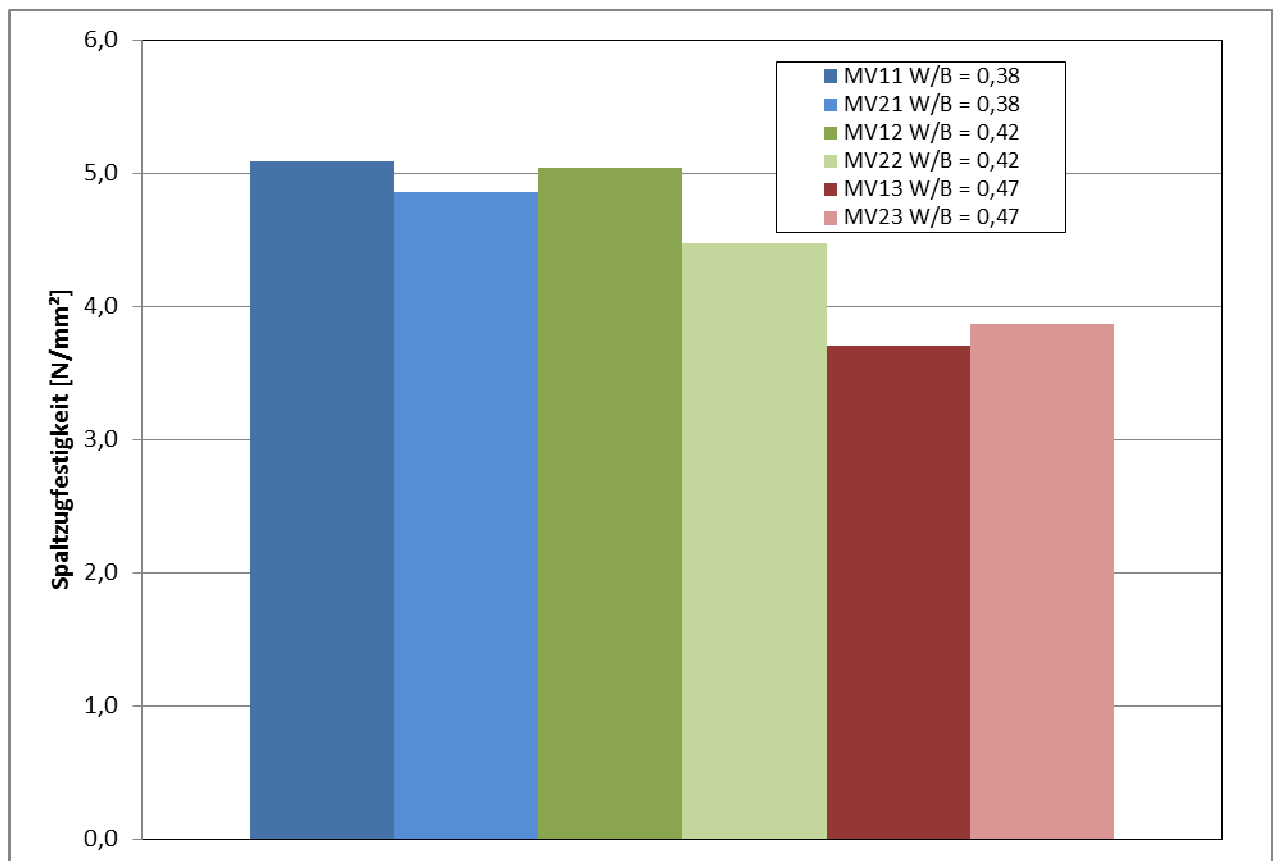


Abbildung 42: Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen der untersuchten Basismischen

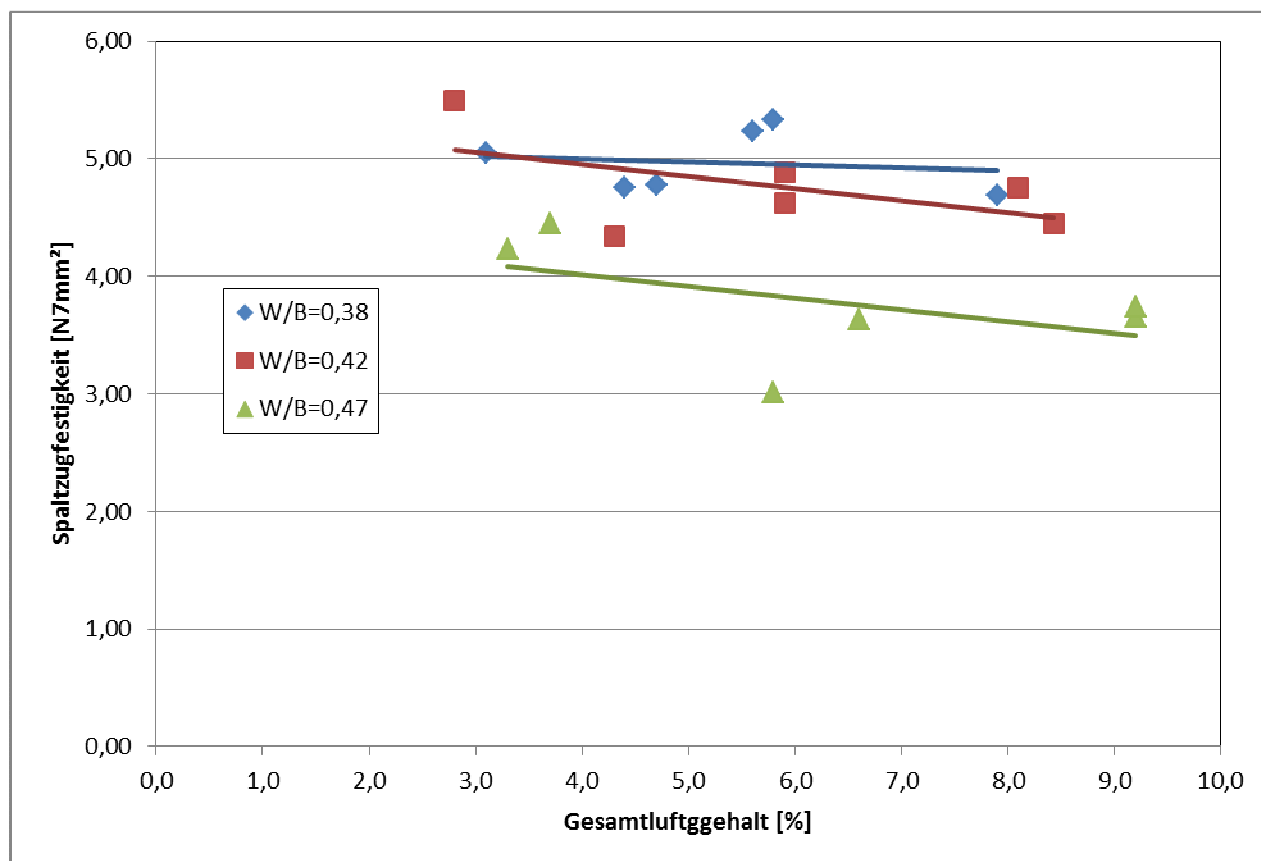


Abbildung 43: Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von W/B-Wert und Gesamtluftgehalt

Aus Abbildung 42 wird deutlich, dass die gemäß RVS 08.17.02 [20] geforderten Spaltzugfestigkeiten von 4,4 N/mm² (Einzelwert) für Erstprüfung und 3,2 N/mm² (Einzelwert) bzw. 4,2 N/mm² (Mittelwert) für Konformitätsprüfung grundsätzlich nur mit W/B = 0,38 und W/B = 0,42 erreicht werden können. Abbildung 43 zeigt, dass bei höheren Luftgehalten auch ein Abfall der Spaltzugfestigkeiten, besonders deutlich bei höheren W/B-Werten, beobachtet werden konnte. Ein Ziel-W/B-Wert von etwa 0,38 ist für die Einhaltung der Festigkeitseigenschaften auch bei höheren Luftgehalten an der Obergrenze gemäß RVS 08.17.02 [20] von 6,0 % (bzw. 7,0 % für Straßenfließbeton) jedenfalls erforderlich.

Wesentlich für die Beständigkeit von Betonoberflächen ist auch deren Porosität. Zur Herstellung von Korrelationen erfolgte die Untersuchung der Porengröße (hydraulische Spaltbreite) und der Porosität des Zementsteins. Die Prüfwerte sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 zusammengefasst. Aufgrund der jeweils dargestellten Einzel- und Mittelwerte kann klar erkannt werden, dass die Porosität des Zementsteins unabhängig von Luftgehalt im Wesentlichen vom W/B-Wert abhängig ist. Niedrige W/B-Werte weisen durchwegs eine geringere Gesamtporosität als auch eine geringere Porosität bei den einzelnen Spaltbreiten auf. Durch zusätzliche Darstellung der Einfriertemperaturen in den Abbildungen wird deutlich, dass die Gefahr von Frostschädigung bei kleiner Gesamtporosität abnimmt, da in den einzelnen Spaltbreitenklassen weniger Poren vorhanden sind, in denen Wasser bei zugehörigen Temperaturen von -10 °C, -20 °C und -40 °C einfrieren kann.

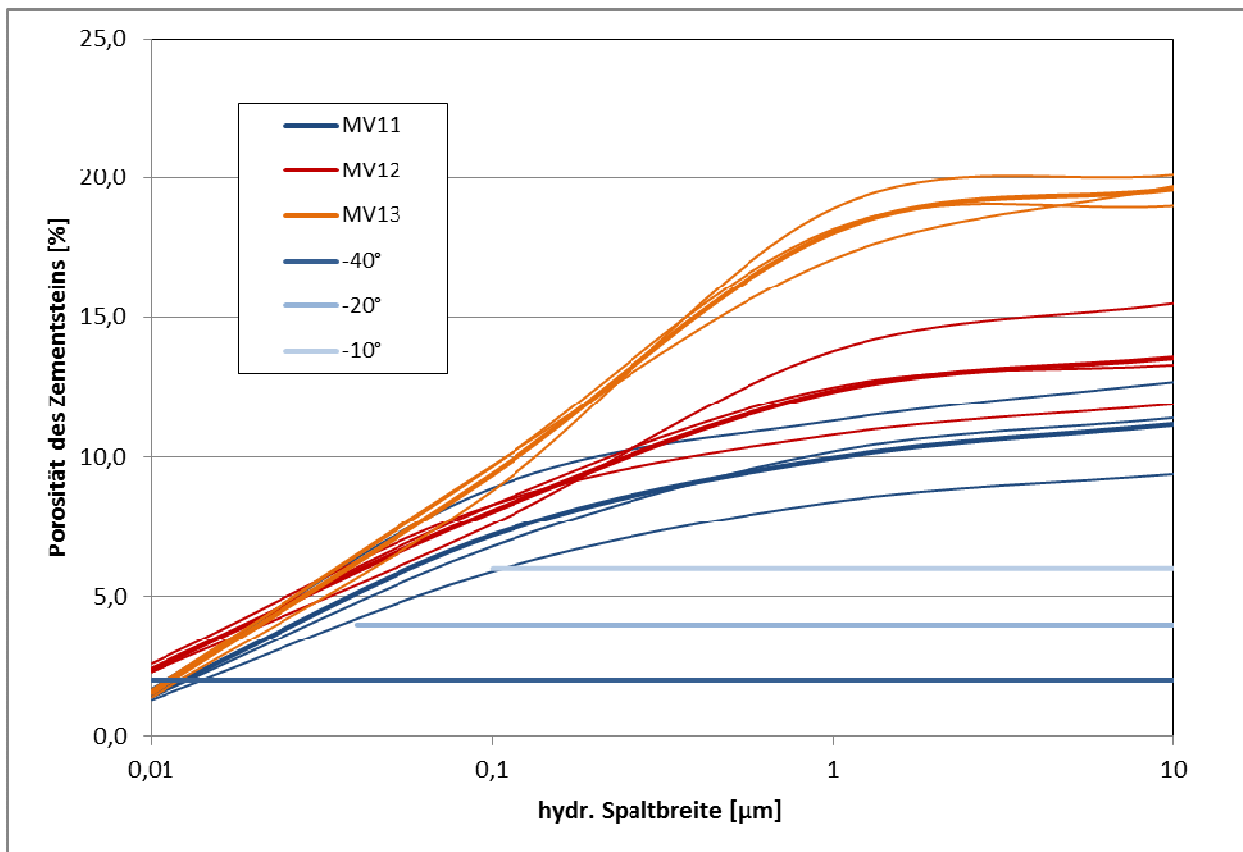


Abbildung 44: Porosität des Zementsteins in Abhängigkeit von hydraulischer Spaltbreite und W/B-Wert MV1

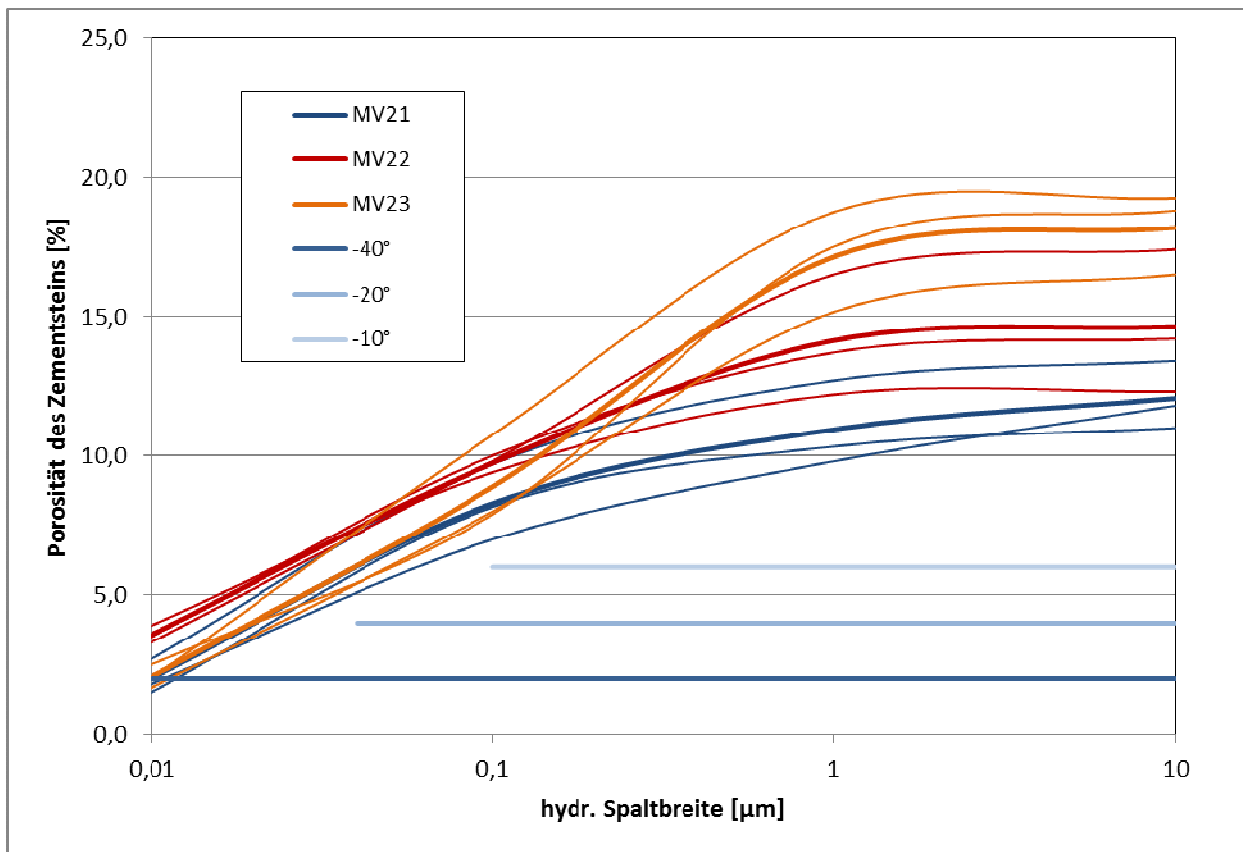


Abbildung 45: Porosität des Zementsteins in Abhängigkeit von hydraulischer Spaltbreite und W/B-Wert MV2

Abbildung 46 zeigt deutlich die Zusammenhänge zwischen Gesamtporosität und W/B-Wert.

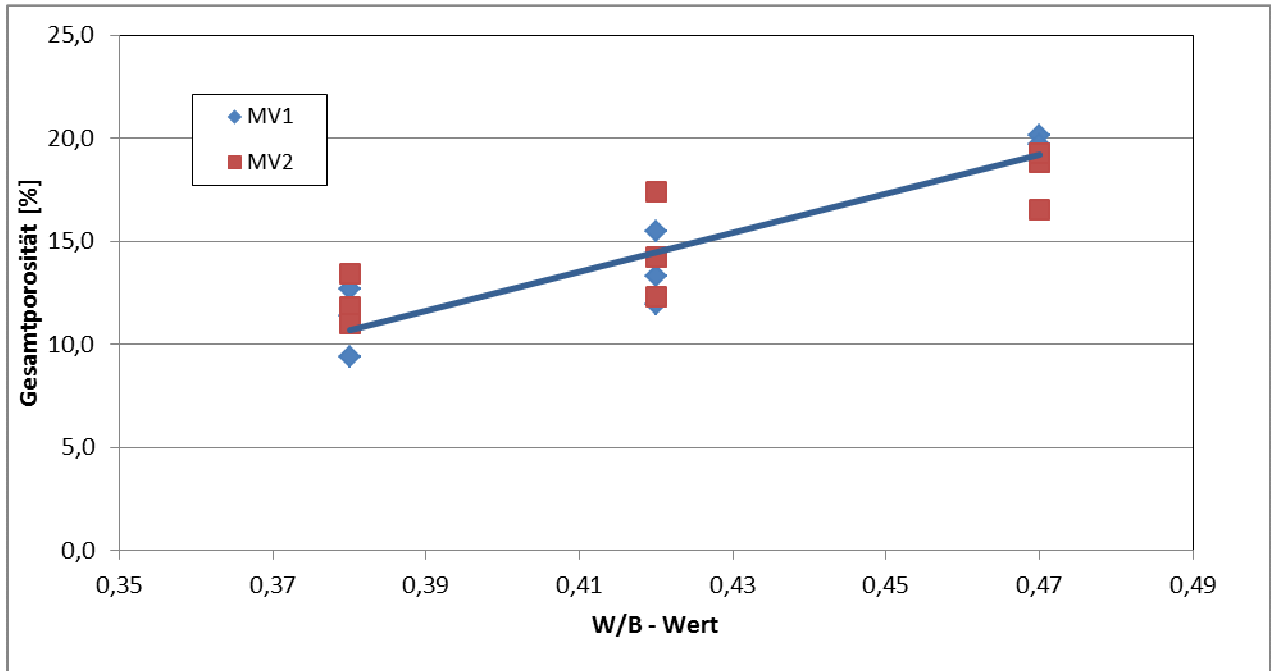


Abbildung 46: Gesamtporosität in Abhängigkeit von W/B-Wert

Aus den bisherigen Ergebnissen ist klar hervorgegangen, dass klare Zusammenhänge zwischen Luftporenkennwerten und Abwitterungsverhalten der Waschbetonoberflächen vorliegen. Abbildung 47 zeigt die Gesamtporosität in Abhängigkeit der Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen. Entsprechende Zusammenhänge können nicht abgeleitet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Luftporenkennwerte einen viel größeren Einfluss auf die Oberflächenabwitterung aufweisen als die Porosität bzw. der W/B-Wert.

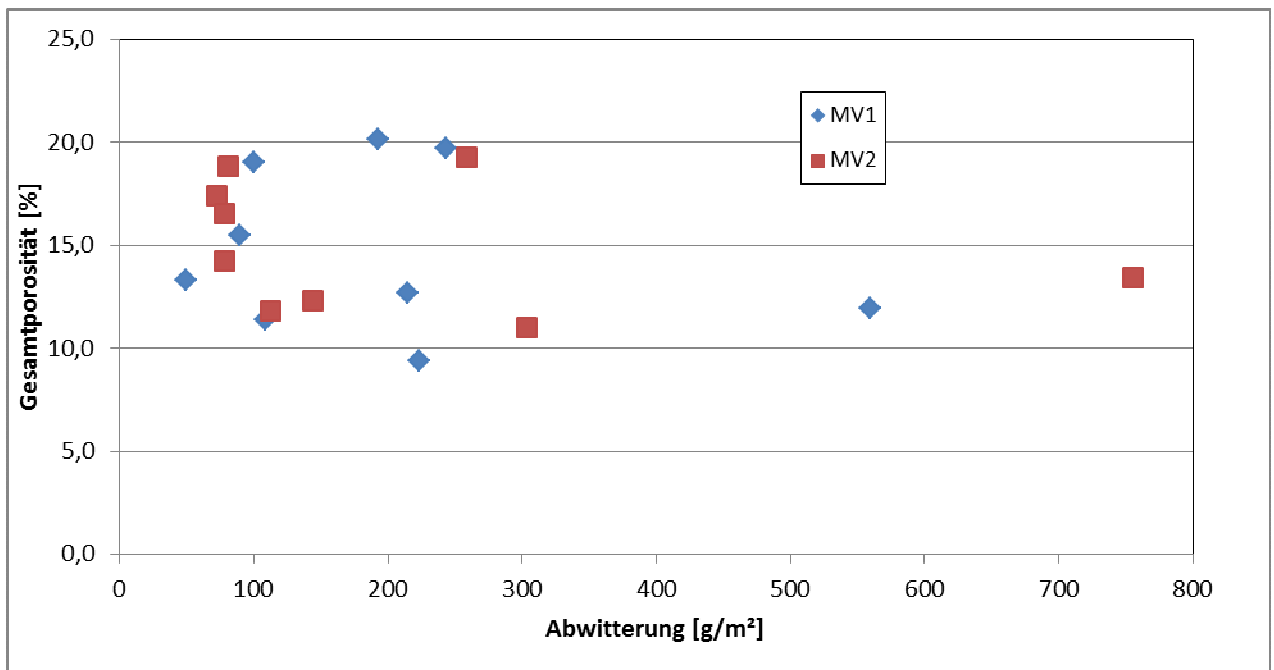


Abbildung 47: Gesamtporosität in Abhängigkeit der Oberflächenabwitterung

Um die Oberflächeneigenschaften weiter zu charakterisieren, erfolgte die Ermittlung des Anmachwassergehaltes an jeder Probenoberfläche. Die Ergebnisse sind in Abbildung 48 zusammengestellt.

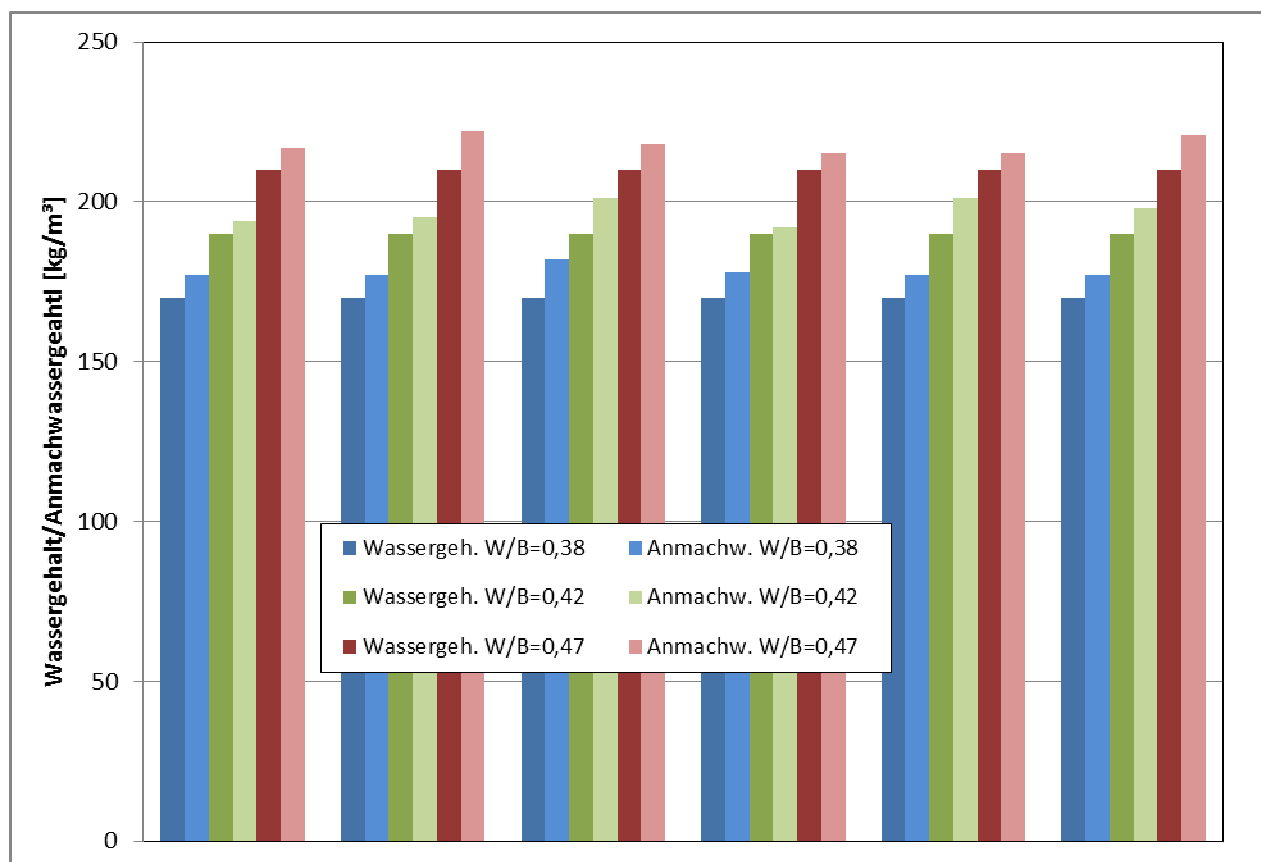


Abbildung 48: Wassergehalt laut Rezeptur im Vergleich zum ermittelten Anmachwassergehalt

Abbildung 48 zeigt, dass die ermittelten Anmachwassergehalte mit den in den Rezepturen verwendeten Wassergehalten übereinstimmen. Diese Werte liegen tendenziell etwas höher als die zugegebene Wassermenge im Labor. Diese Steigerung beträgt im Mittel 4 % bezogen auf Wassergehalt (Zugabewasser) des Mischungsverhältnisses. Ursachen hierfür können sein, dass in den zur Anmachwassergehaltbestimmung herangezogenen oberen 2 cm der Proben leichte Anreicherungen von Wasser auftraten. Jedenfalls eignet sich die Ermittlung des Anmachwassergehaltes sehr gut, um den Wassergehalt von Rezepturen zu Kontrollzwecken auch nachträglich am Festbeton zu ermitteln.

Nachbehandlungsqualität

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen war, Zusammenhänge zwischen Nachbehandlungsqualität und Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechsel-Beanspruchung zu finden. Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen detailliert die Ergebnisse der Oberflächenabwitterung getrennt nach den Nachbehandlungsarten I (100 % 2. Nachbehandlungsmittel), II (50 % 2. Nachbehandlungsmittel) und III (0 % 2. Nachbehandlungsmittel).

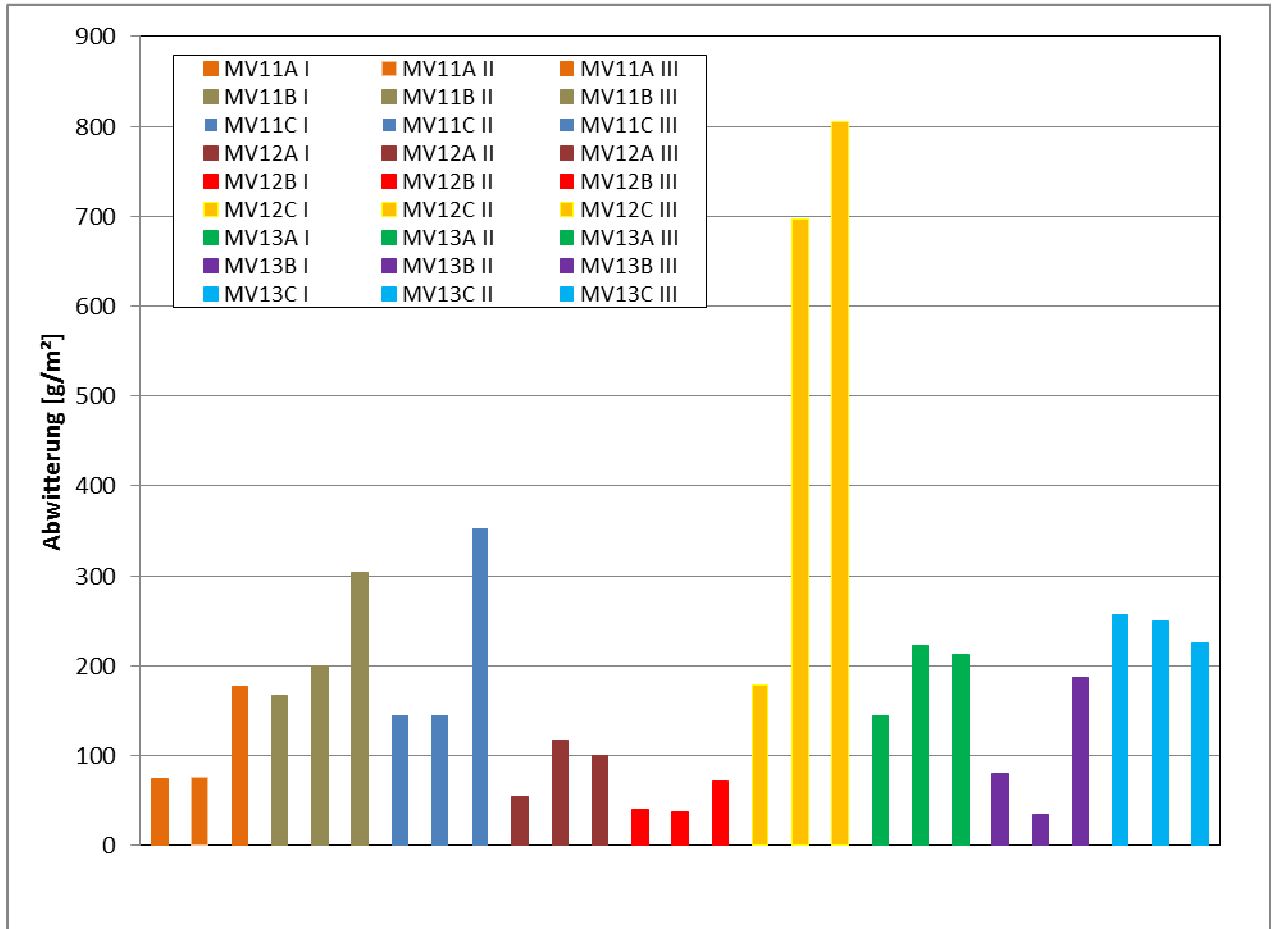


Abbildung 49: Oberflächenabwitterung MV1 mit Einfluss der Nachbehandlungsarten I, II und III

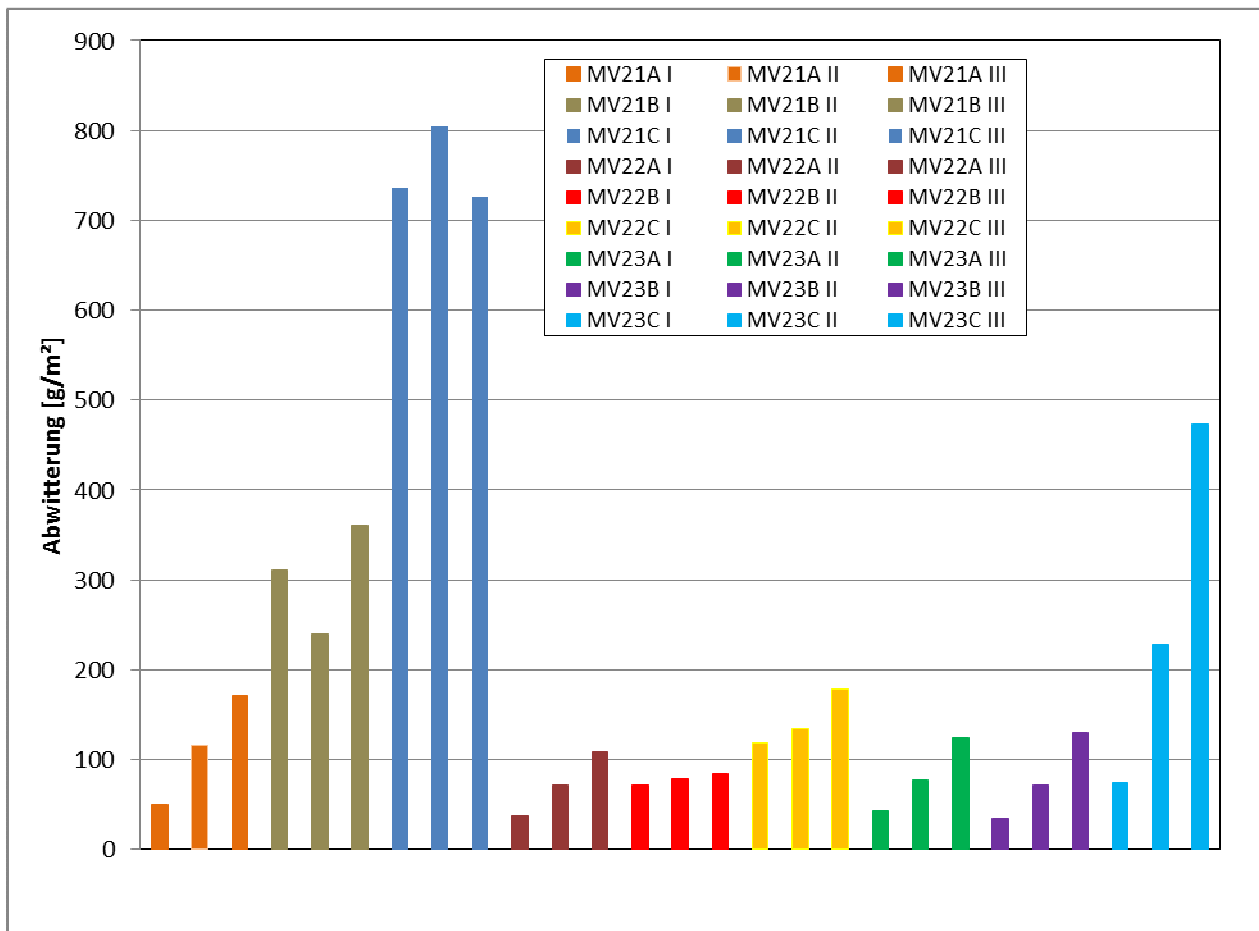


Abbildung 50: Oberflächenabwitterung MV2 mit Einfluss der Nachbehandlungsarten I, II und III

Obige Abbildungen lassen erkennen, dass die Abwitterung grundsätzlich sowohl mit schlechterem Luftporensystem (A, B und C) als auch mit abnehmender Nachbehandlungsqualität (I, II und III) zunimmt. Um diese Effekte darzustellen, wurden die Mittelwerte der Zunahme der Abwitterung (100 % Nachbehandlungsmittel ist jeweils der Bezugswert 1) errechnet und in Tabelle 17 bzw. Abbildung 51 zusammengestellt.

Tabelle 17: Prozentuelle Zunahme der Oberflächenabwitterung (Bezugswert 100 % Nachbehandlungsmittel)

Zunahme der Oberflächenabwitterung		MV1	MV2
MV1..I	MV2..I	1	1
MV1..II	MV2..II	3,1	3,4
MV1..III	MV2..III	4,3	4,1

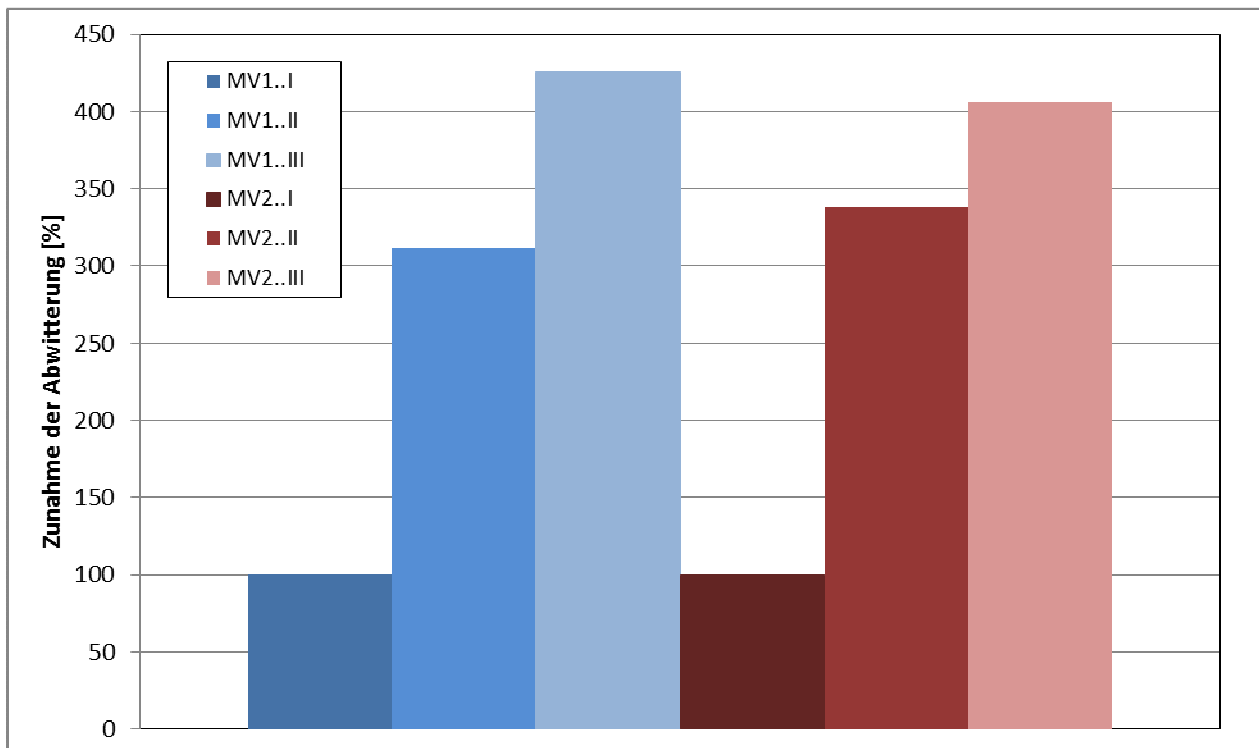


Abbildung 51: Prozentuelle Zunahme der Oberflächenabwitterung infolge schlechter Nachbehandlungsqualität

Abbildung 51 zeigt deutlich, dass eine ungenügende Nachbehandlung bzw. im Extremfall keine zweite Nachbehandlung eine 3- bis 4-fache Zunahme der Abwitterung an den Oberflächen bewirken kann. Das rechtzeitige und ausreichende Auftragen eines zweiten Nachbehandlungsmittels ist daher wesentlich für die Dauerhaftigkeit von Waschbetonoberflächen.

Im Rahmen des Projektes wurde weiter versucht, Zusammenhänge zwischen Abreißfestigkeit (Oberfläche und 2 cm Tiefe, geprüft jeweils in einem Alter von 28 Tagen) und der Oberflächenabwitterung zu finden. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 52 bis Abbildung 55 dargestellt.

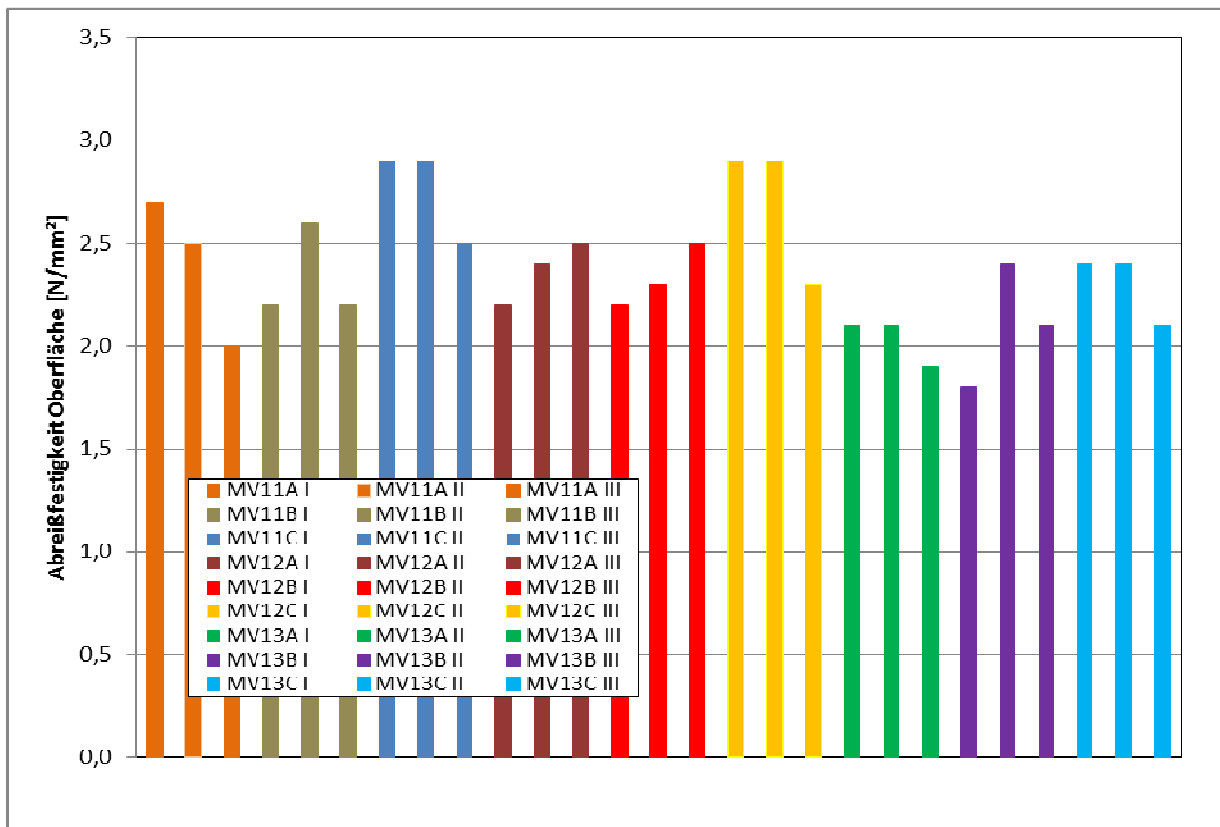


Abbildung 52: Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV1 (geprüft an der Oberfläche)

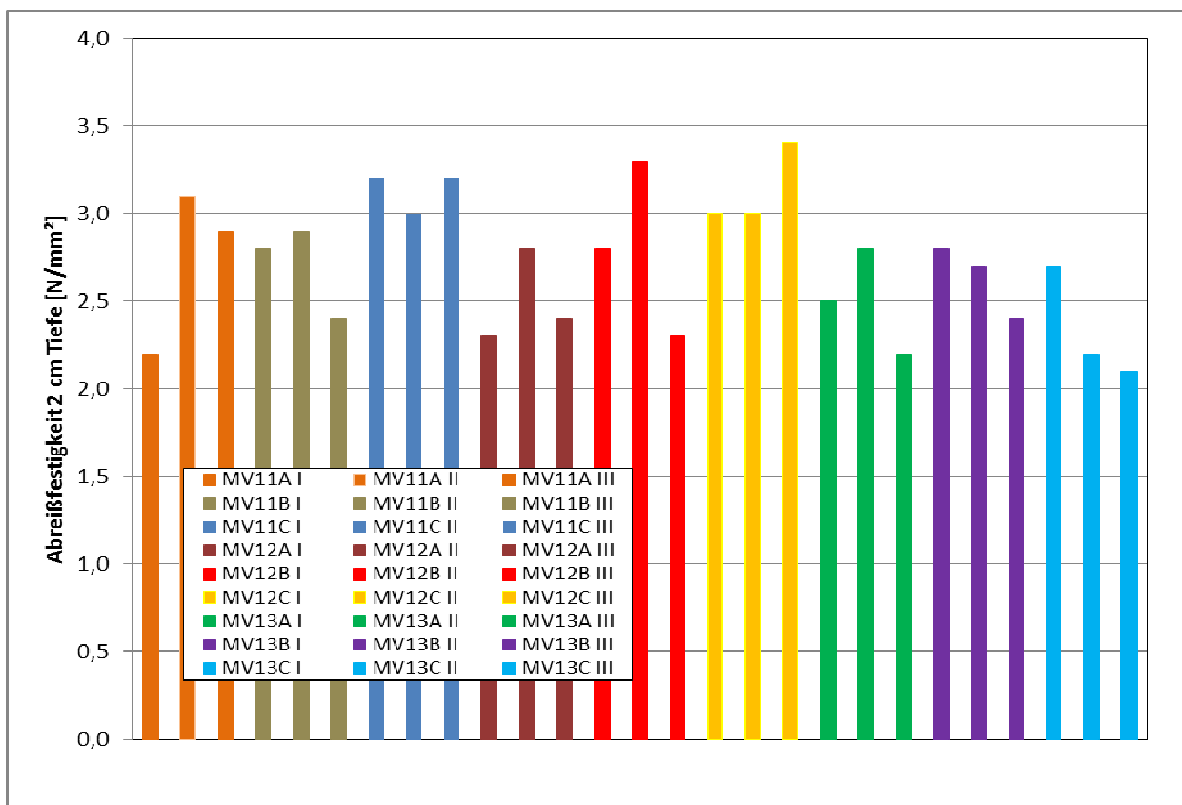


Abbildung 53: Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV1 (geprüft in 2 cm Tiefe)

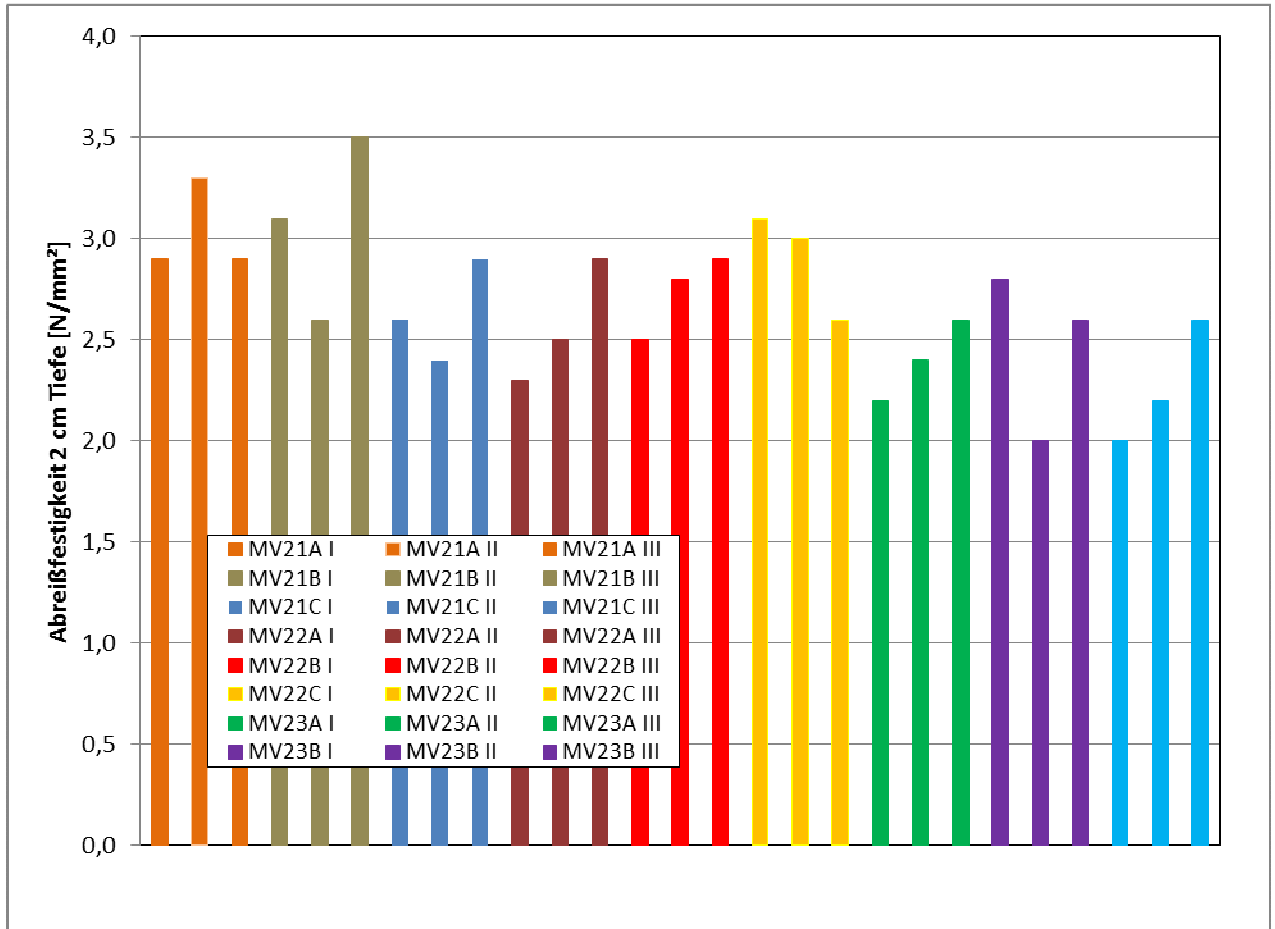


Abbildung 54: Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV2 (geprüft an der Oberfläche)

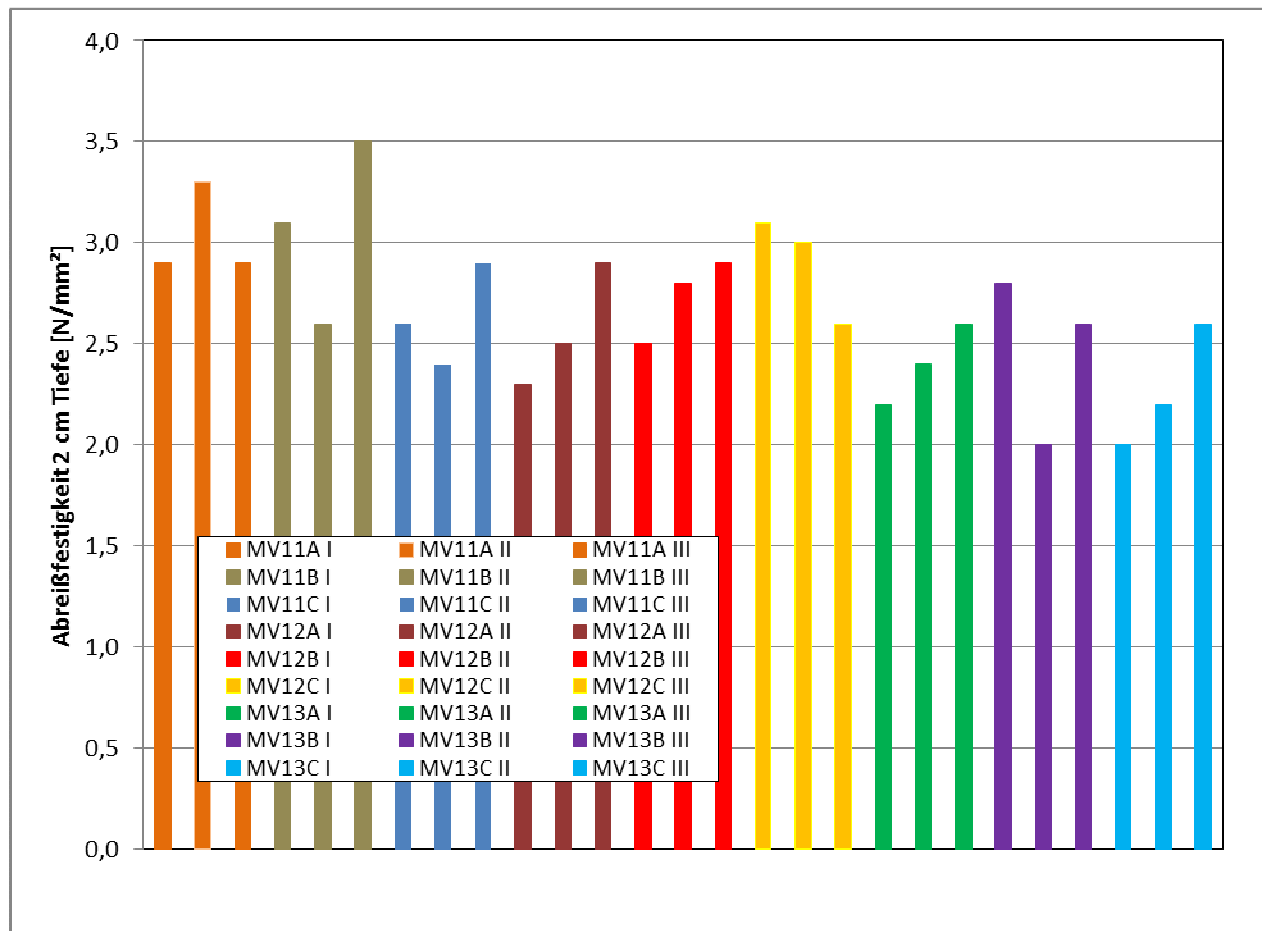


Abbildung 55: Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV2 (geprüft in 2 cm Tiefe)

Aufgrund der Ergebnisse gemäß Abbildung 52 bis Abbildung 55 sind keine eindeutigen Korrelationen zwischen Abreißfestigkeit und Oberflächenabwitterung zu sehen. Die Abreißfestigkeiten bewegen sich weitgehend unabhängig vom W/B-Wert bzw. vom Luftporensystem in einem Bereich von etwa 2,0 bis 3,5 N/mm². Tendenziell ist zu erkennen, dass bei den Mischungsverhältnissen mit höherem W/B-Wert (MV..3) geringere Abreißfestigkeiten beobachtet wurden. Ein Einfluss der Nachbehandlung (MV...I, II und III) auf die Abreißfestigkeit ist nicht zu erkennen. Es zeigt sich, dass die Prüfung der Abreißfestigkeit nicht zur Charakterisierung von potentieller Frost-Taumittel-Empfindlichkeit der Oberfläche (z.B. aufgrund ungenügender Nachbehandlung) geeignet ist.

Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Nachbehandlungen auf die Porosität wurde die Porosität an der Oberfläche an zwei ausgewählten Rezepturen je nach unterschiedlicher Nachbehandlungsqualität ermittelt. Diese Ergebnisse sind Abbildung 56 zu entnehmen.

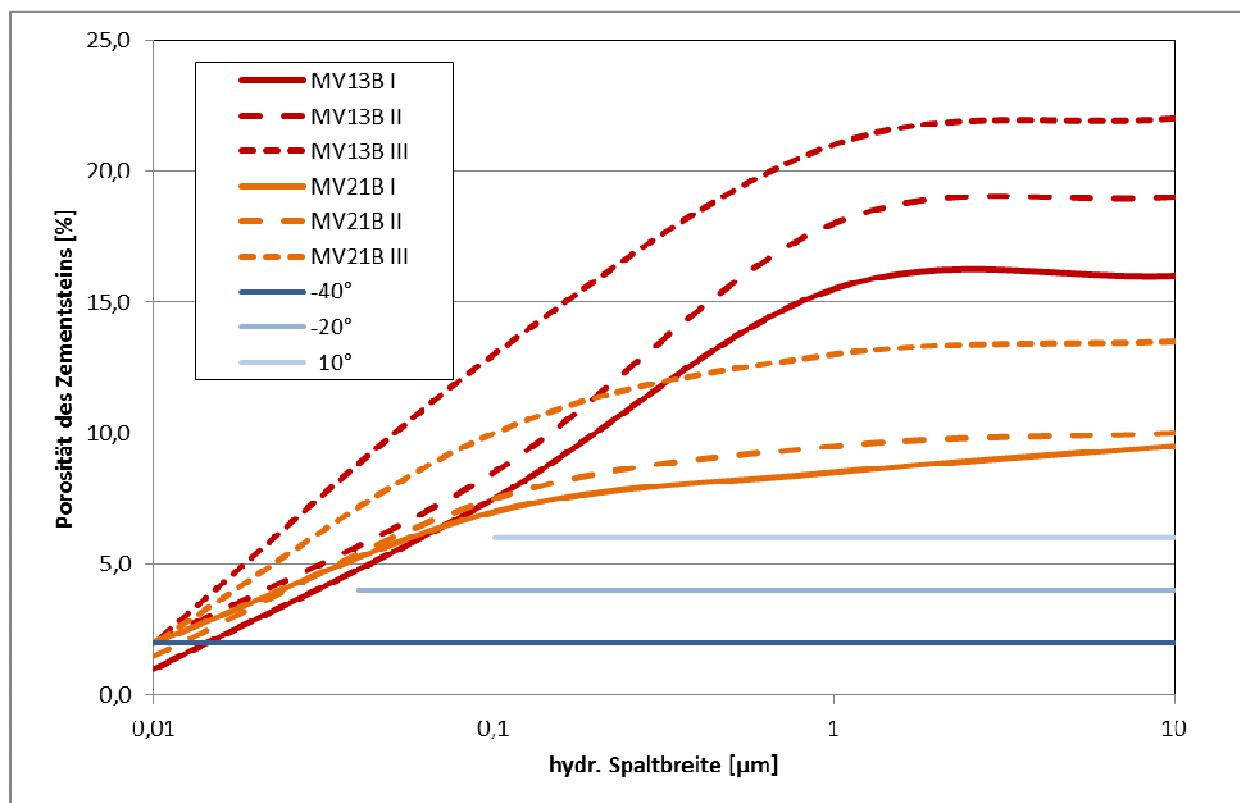


Abbildung 56: Porosität in Abhängigkeit der Nachbehandlungsqualität

Abbildung 56 zeigt, dass die Porosität grundsätzlich mit fallender Nachbehandlungsqualität zunimmt. Darüber hinaus sind die Unterschiede zwischen den beiden W/B-Werten von MV13 ($W/B=0,47$) und MV21 ($W/B=0,38$) klar zu erkennen. Die Nachbehandlungsqualität wirkt sich auf die Porosität im Relativvergleich aus.

Um weitere Informationen über Zusammenhänge Nachbehandlung, Bewitterung auf der Baustelle und Oberflächengüte zu bekommen, wurden an ausgewählten Mischungsverhältnissen Windkanalversuche durchgeführt. Diese Versuche dienten dazu, Auswirkungen von Baustellenbedingungen, wie erhöhte Temperatur (Versuchsserie 38 °C) und den Einfluss von Wind (Versuchsserie Windgeschwindigkeit 1 m/s bei 20 °C) in Relation zu normalen Lagerungsbedingungen (Versuchsserie 20°C) auf die Eigenschaften des Betons zu untersuchen. Die Versuche wurden an zwei Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten von 0,38 (MV21Ba) und $W/B=0,42$ (MV22Ba) durchgeführt. Abbildung 57 zeigt die nach der jeweiligen Lagerung ermittelte Oberflächenabwitterung.

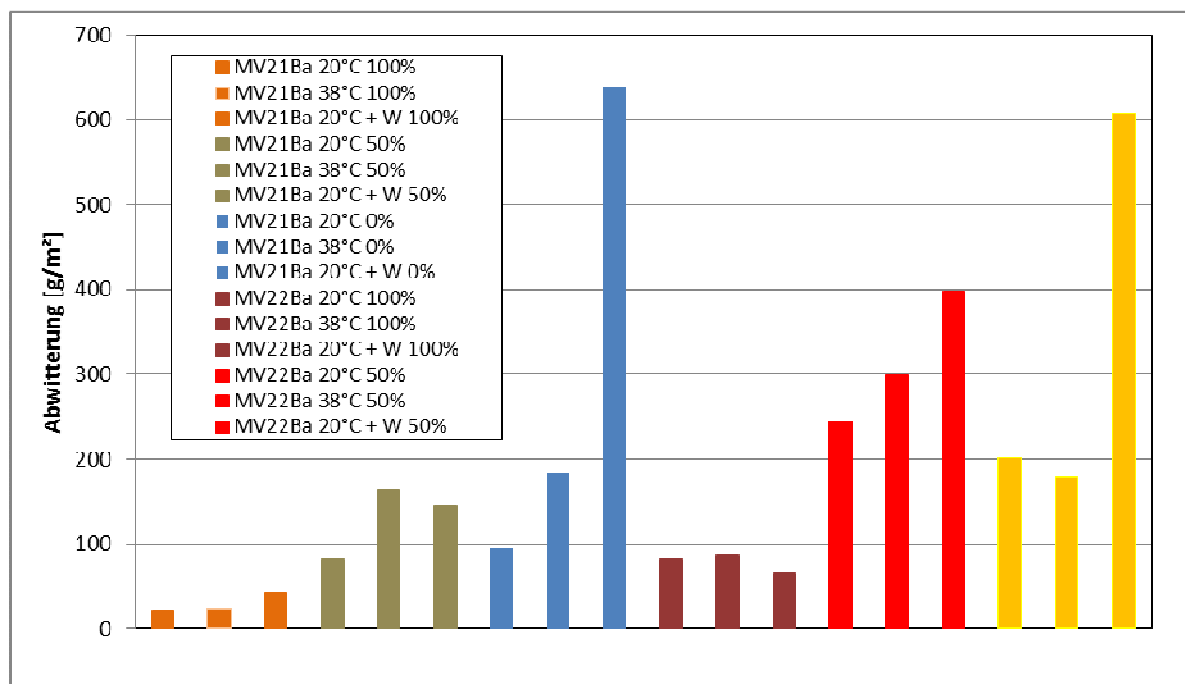


Abbildung 57: Oberflächenabwitterung mit Einfluss der Nachbehandlungsqualität

Abbildung 57 zeigt, dass bei guter Nachbehandlungsqualität die Abwitterungen generell niedrig, weitgehend unabhängig von der Lagerungsart, sind. Wird die Nachbehandlungsqualität entsprechend verschlechtert (z.B. 50 % 2. Nachbehandlungsmittel), ist bereits mit einer deutlichen Steigerung der Abwitterung zu rechnen. Wird kein 2. Nachbehandlungsmittel aufgebracht, wirkt sich vor allem die Lagerung im Windkanal extrem auf das Oberflächenabwitterungsverhalten aus. Entsprechende Nachbehandlung ist bei hohen Windgeschwindigkeiten zur Sicherstellung einer ausreichenden Oberflächenqualität daher extrem wichtig.

An den jeweils bei unterschiedlichen Baustellenbedingungen (Versuchsserie 38 °C, Versuchsserie Windgeschwindigkeit 1 m/s bei 20 °C und Versuchsserie 20°C) gelagerten Probekörpern wurden auch Porositätsuntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 58 zusammengestellt.

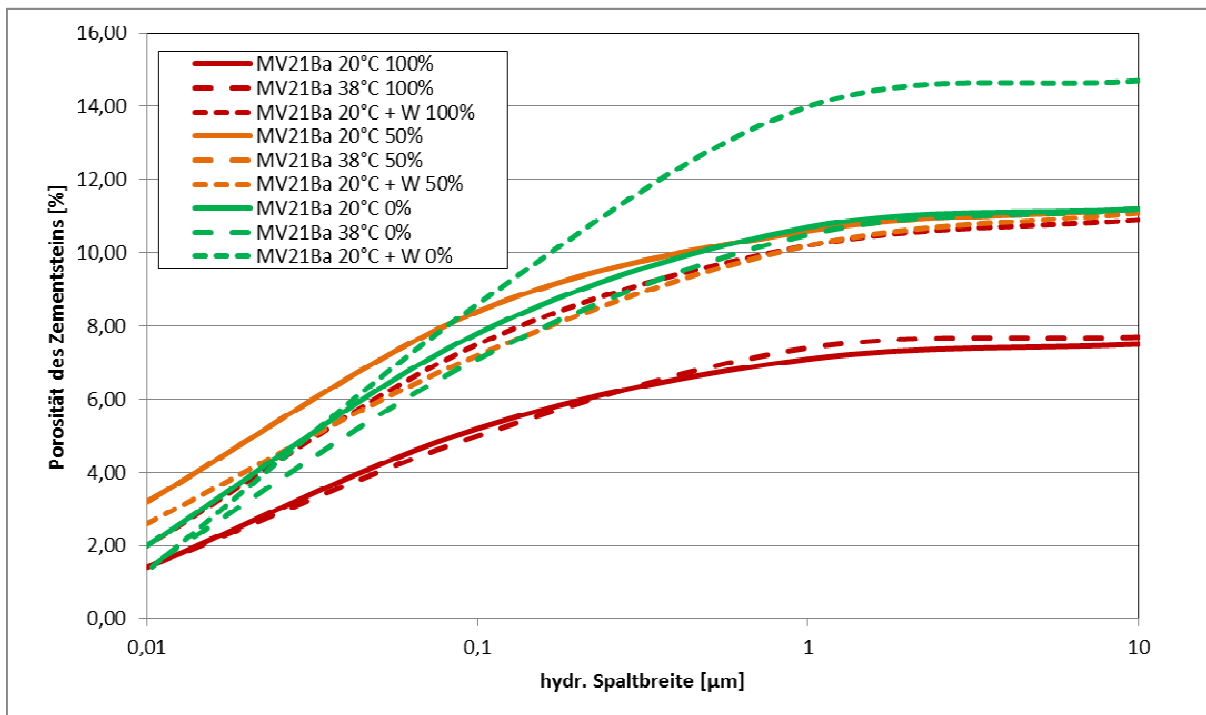


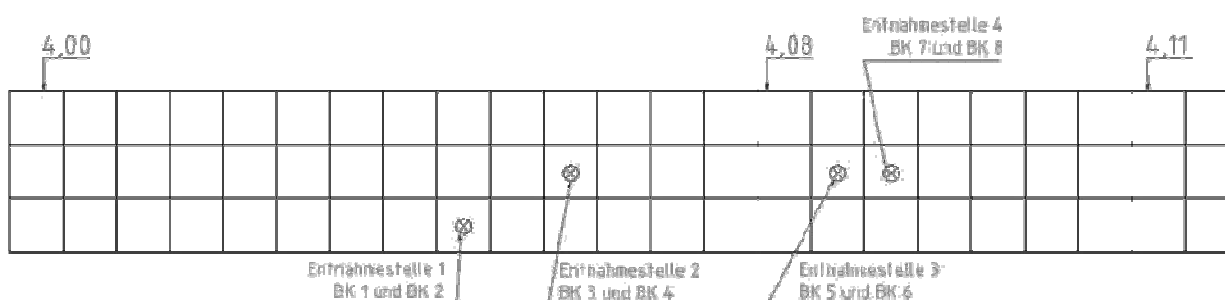
Abbildung 58: Porosität des Zementsteins bei simulierten Baustellenbedingungen

Die Porositätsbestimmungen gemäß Abbildung 58 zeigen, dass bei Auftragen von 100 % des Nachbehandlungsmittels grundsätzlich die geringsten Porositäten festgestellt wurden. Wird das Nachbehandlungsmittel entsprechend auf 50 % bzw. 0 % reduziert, steigt die Porosität der oberflächennahen Zone merklich an. Aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen mit teilweise sehr lokalem Einfluss auf die Bindemittelsteinqualität können auf Basis dieser Ergebnisse keine genaueren Aussagen getätigt werden. Generell wirkt sich eine ungenügende Nachbehandlung bei zusätzlich simulierten Baustellenbedingungen auch hier verstärkt auf die Porosität des Bindemittelsteins aus.

3.5 Feldversuche

Die Feldversuche wurden an der Betondecke der S1, Richtungsfahrbahn Schwechat bei km 4,0 durchgeführt. Die Auswahl der Messstellen erfolgte gemeinsam mit Vertretern der ASFINAG, da in diesem Abschnitt im Rahmen einer Abnahmeprüfung ein unzureichendes Luftporensystem festgestellt wurde. Abbildung 59 zeigt schematisch eine Übersicht der Entnahmestellen. Entnahmestellen 1 und 4 sind laut Informationen ASFINAG aus den den Anforderungen entsprechenden Betonoberflächen entnommen worden, Entnahmestellen 2 und 3 wurden im Bereich mit ungenügenden Festbetonkennwerten entnommen.

Abbildung 59: Übersicht der Entnahmestellen



Als erster Schritt erfolgte die optische Beurteilung der zu untersuchenden Messstellen. Es zeigte sich, dass bei den Entnahmestellen 1 und 4 die Gesteinskörnung grundsätzlich besser in die Bindemittelmatrix eingebettet ist als bei den Entnahmestellen 2 und 3. Dies ist auch optisch in Abbildung 60 zu erkennen. Zu bemerken ist, dass im Abschnitt der Entnahmestellen 3 und 4 eine andere grobe Gesteinskörnung verwendet wurde. Auf Basis der optischen Beurteilung kann im Bereich der ungenügenden Festbetonkennwerte (Entnahmestellen 2 und 3) zwar eine ungenügende Oberflächentextur festgestellt werden, aber direkte Frostschäden sind noch nicht sichtbar. Dies ist dadurch zu begründen, dass Frostschäden erst nach einer gewissen Anzahl von Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen auftreten und der betreffende Abschnitt 2010/2011 eingebaut wurde.

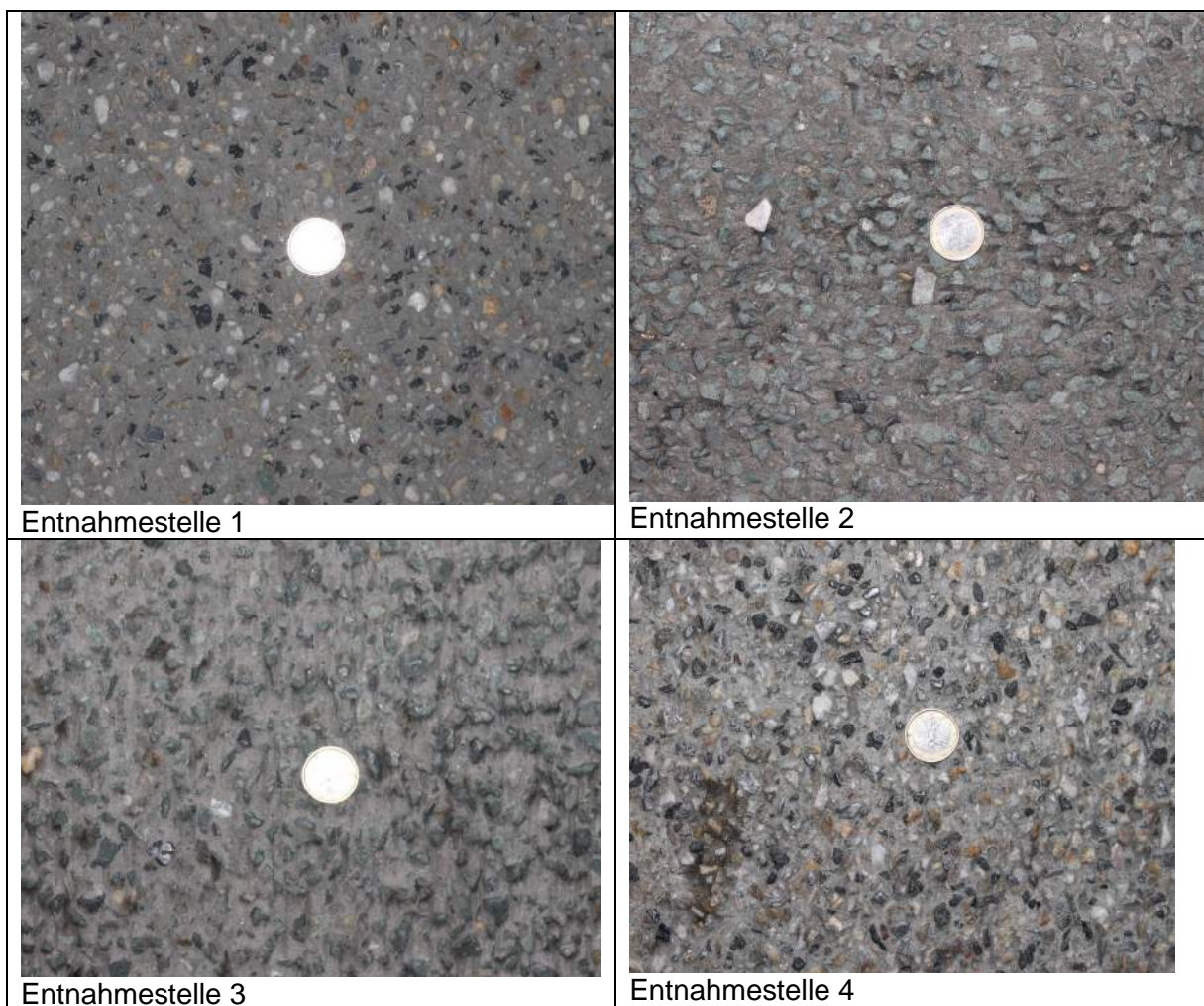


Abbildung 60: Oberflächenstruktur der Entnahmestellen

Zur Darlegung der tatsächlichen Betoneigenschaften erfolgte an den Entnahmestellen die Ermittlung der Luftporenkennwerte, des Anmachwassergehalts sowie der Porosität der Oberfläche. Die Ergebnisse dieser Bestimmungen sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 18: Ergebnisse der Festbetonkennwerte S1 (Gesamtluftgehalt, Anmachwasser)

Entnahme- stelle	Kurzbe- zeichnung	L _{ges}	L300	AF	W _{anm.} [kg/m ³]	
		[%]	[%]	[mm]	EW1	EW1
1	S1-1	6,30	3,47	0,17	174	177
2	S1-2	1,67	0,90	0,39	185	190
3	S1-3	4,25	0,92	0,42	206	205
4	S1-4	5,90	3,19	0,18	176	178

Tabelle 19: Ergebnisse der Festbetonkennwerte S1 (Abwitterung, Porosität)

Entnahmestelle	Kurzbezeichnung	XF4 [g/m ²] nach Tagen					Porosität [Vol-%] bei Spaltbreite [µm]			
		7	14	28	42	56	10	1	0,10	0,01
1	S1-1						8,58	8,22	5,06	1,17
2	S1-2	8	30	289	882	2242	7,99	7,02	5,78	2,03
3	S1-3	3	16	342	1012	2629	8,29	7,35	6,00	2,16
4	S1-4						5,82	4,63	5,67	1,14

Tabelle 20: Ergebnisse der Festbetonkennwerte S1 (Abwitterung, Porosität)

Entnahmestelle	Kurzbezeichnung	XF4 [g/m ²] nach Tagen					Porosität [Vol-%] bei Spaltbreite [µm]			
		7	14	28	42	56	10	1	0,1	0,01
1	S1-1						8,58	8,22	5,06	1,17
2	S1-2	8	30	289	882	2242	7,99	7,02	5,78	2,03
3	S1-3	3	16	342	1012	2629	8,29	7,35	6	2,16
4	S1-4						5,82	4,63	5,67	1,14

Abbildung 61 zeigt die zeitliche Entwicklung der Abwitterung der Proben aus dem Feldversuch (S1-2 und S1-3) im Vergleich zu Proben mit ähnlichen Luftporenkennwerten aus den Laborversuchen. Es ist zu erkennen, dass die Abwitterung der Proben aus dem Feldversuch ab 28 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen sehr stark zunehmen und nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen etwa 4 Mal so hoch sind wie die vergleichbaren Laborproben. Dieser Umstand dürfte darauf zurückzuführen sein, dass durch die entsprechende Liegedauer der aus den Autobahnabschnitten entnommen Proben bereits eine gewisse Vorschädigung vorlag, die zu einem vermehrten Ausbrechen der groben Gesteinskörnung aus der Bindemittelleimatrix führte. Dies ist auch deutlich an den Aufnahmen vor und nach der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung gemäß Abbildung 62 zu erkennen.

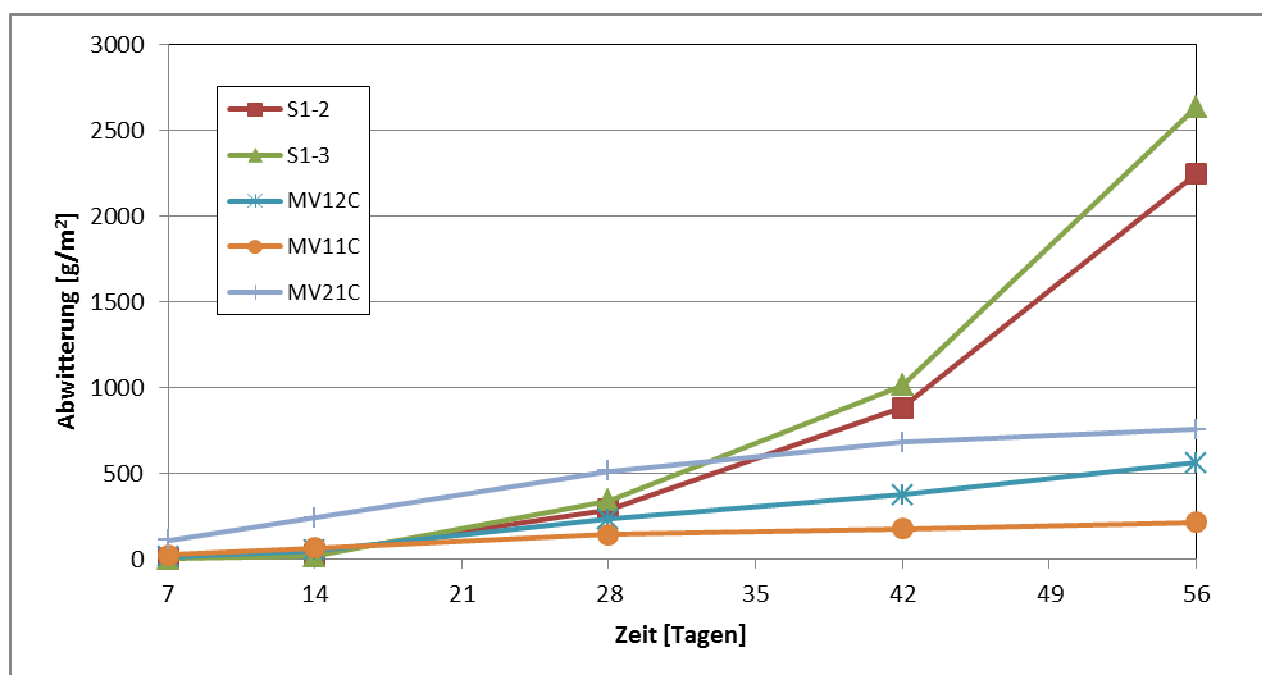


Abbildung 61: Zeitliche Entwicklung der Abwitterung Proben S1 im Vergleich zu Laborversuchen



Abbildung 62: Exemplarische Darstellung der Oberflächenstruktur eines untersuchten Bohrkerns vor (links) und nach der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (rechts)

Abbildung 63 zeigt die Porosität des Zementsteins der Proben aus dem Feldversuch (S1-1, S1-2, S1-3 und S1-4) im Vergleich zu Proben mit ähnlichen Luftporenkennwerten aus den Laborversuchen. Es zeigt sich, dass die Porosität des Zementsteins der Proben aus dem Feldversuch generell viel geringer ist als jene der Laborproben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Porosität grundsätzlich mit zunehmendem Betonalter abnimmt (vgl. Abbildung 64). Darüber hinaus ist die Porosität auch vom verwendeten Zement abhängig. Eine exakte Charakterisierung der Betongüte ist daher in diesem Fall durch Ermittlung der Porosität nicht möglich.

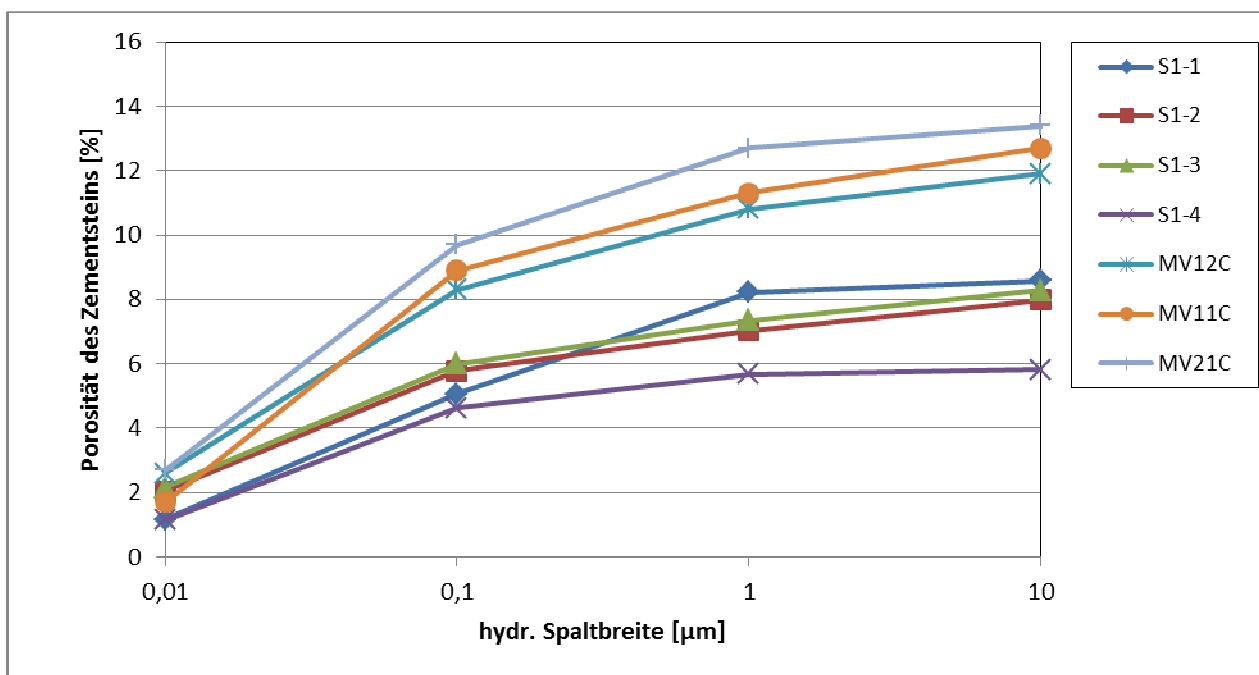


Abbildung 63: Porosität des Zementsteins der Proben S1 im Vergleich zu Laborversuchen

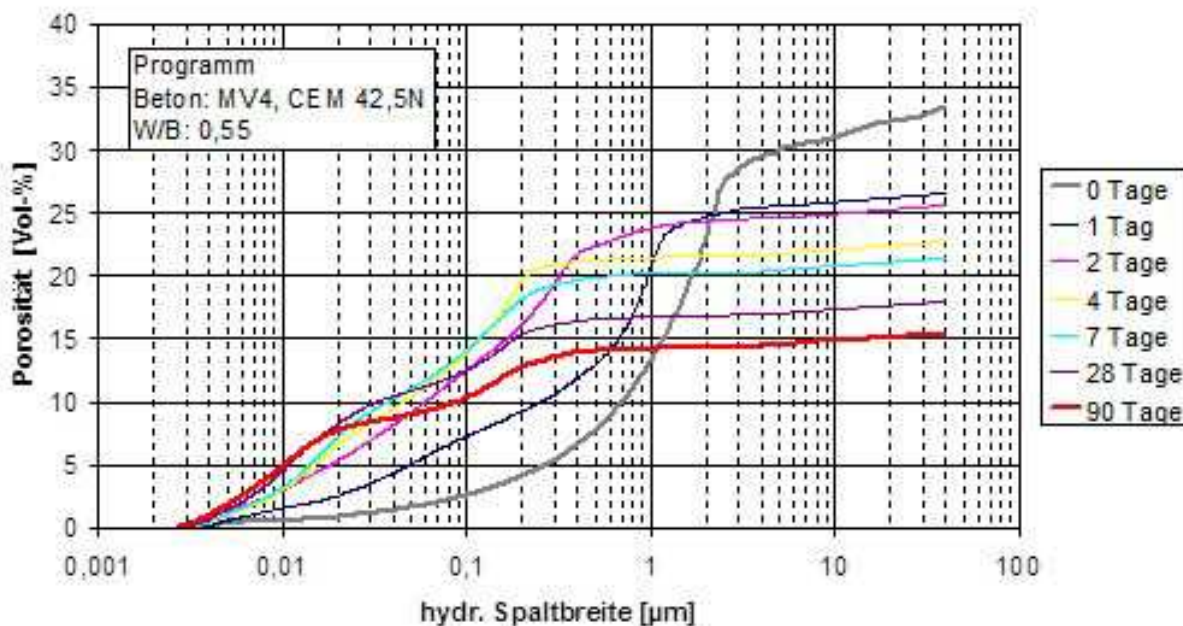


Abbildung 64: Porosität in Abhängigkeit des Betonalters [34]

Aufgrund der Ergebnisse aus den Feldversuchen kann zusammengefasst werden, dass zur Charakterisierung einer ausreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit von Betonfahrbahndecken jedenfalls die Bestimmung der Luftporenkennwerte das sinnvollste Instrument darstellen. Eine Bestimmung der Porosität ist nicht sinnvoll, da diese in großem Maß auch vom Betonalter sowie von den verwendeten Betonausgangsstoffen abhängig ist.

4 Zusammenfassung

Die Herstellung von Betondecken ist eine anspruchsvolle Bauweise, deren Wirtschaftlichkeit nur dann gegeben ist, wenn diese eine entsprechend hohe Lebensdauer bei geringen Unterhaltungskosten aufweist. Ziel des Forschungsvorhabens war, unterschiedliche Schwankungen im gesamten Herstellungsprozess zu erfassen und deren Auswirkungen auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit klar darzulegen. Hierbei wurden sowohl Einflussfaktoren der Betonqualität als auch der baupraktischen Ausführung (Einbau und Nachbehandlung) untersucht. Durch Kenntnis dieser für eine hohe Qualität entscheidenden Parameter soll eine zielsichere und überprüfbare Herstellung der Betondecke möglich sein und so eine hohe Qualität der Fahrbahn über die gesamte Lebensdauer sichergestellt werden.

Betonstraßen werden seit Beginn des 20. Jahrhunderts hergestellt. Stetige Weiterentwicklungen führten dazu, dass Betondecken eine entsprechend hohe Lebensdauer aufweisen. Die Grundlagen dieser Bauweise, wie Anforderungen an Zusammensetzung, Festigkeiten und Luftporensystem zur Sicherstellung der Frost-Taumittel-Beständigkeit sind in RVS 08.17.02 zusammengefasst. Grundsätzlich ist die Frost-Taumittel-Beständigkeit von Betonoberflächen im Wesentlichen von der Betonzusammensetzung (insbesondere W/B-Wert), der im Beton vorhandenen Mikroluftporen sowie der Nachbehandlung abhängig. Der Nachweis einer ausreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit erfolgt in Österreich in der Regel durch Sicherstellung eines Mindestbindemittelgehaltes, eines höchstzulässigen W/B-Wertes sowie durch Nachweise eines geeigneten Luftporensystems am Festbeton. Alternativ besteht die Möglichkeit, den Frostwiderstand am Festbeton zu prüfen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Einflüsse der Schwankungen unterschiedlicher Parameter des Herstellungsprozesses auf die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken durchleuchtet. Es erfolgten labortechnische Versuche zur Abschätzung des Risikos von Frostschäden durch gezielte Variation von Herstellungsparametern. Grundsätzlich wurden 18 Serien Probekörper aus Straßenoberbeton mit unterschiedlichem Luftporensystem (Luftgehalt hoch, den Anforderungen entsprechend und zu nieder) und unterschiedlichen W/B-Werten (Erstprüfung, Bauausführung und zu hoch) hergestellt. Darüber hinaus erfolgte bei jeder Prüfkörperserie die Variation des Nachbehandlungsmittels (gute, schlechte bzw. keine Nachbehandlung). Weiters erfolgten Windkanalversuche zur besseren Simulation der Baustellenbedingungen an ausgewählten Mischungsverhältnissen.

Im Rahmen von Vorversuchen wurde einerseits festgelegt, welche Betonzusammensetzungen zur Durchführung der Hauptversuche sinnvoll verwendet werden können. Andererseits wurde ein automatisches Auszählverfahren zur Bestimmung der Luftporenkennwerte angewandt. Durch wiederholte Vergleichsmessungen wurde festgestellt, dass die von der automatischen Auszählmethode festgestellte hohe Anzahl an feinen Poren tatsächlich nicht gefunden werden kann. Dies führt dazu, dass durch das automatische Verfahren ein generell höherer Gesamtluftgehalt und ein generell niedrigerer Abstandsfaktor als mit den manuellen Auszählungen ermittelt werden. Das bedeutet, dass tendenziell Betone als geeigneter angesehen werden als sie tatsächlich zu beurteilen wären. Es sind daher weitere Optimierungsschritte seitens des Geräteherstellers erforderlich, bevor eine normative Anwendung überhaupt in Betracht gezogen werden kann.

Die Hauptversuche zeigten, dass zwischen Dosierung des Luftporenmittels und der Luftporenkennwerte am Festbeton relevante Zusammenhänge gefunden werden können. Je nach verwendetem Luftporenbildner sind jedoch unterschiedliche Dosierungen zur Sicherstellung der geforderten Werte erforderlich. Werden die am Festbeton ermittelten Luftporenkennwerte mit den Oberflächenabwitterungen analog der Prüfung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4 verglichen, zeigt sich, dass die grundsätzlich in RVS 08.17.04 definierten Grenzwerte für Gesamtluftgehalt, Mikroluftgehalt bei 300 µm und Abstandsfaktor sinnvoll gewählt sind. Werden diese Grenzwerte überschritten, ist ein signifikanter Anstieg der Oberflächenabwitterungen zu beobachten. Dies ist grundsätzlich weitgehend unabhängig vom W/B-Wert, sofern dieser niedrig ist. Es kann zusammengefasst werden, dass im untersuchten Bereich der W/B-Werte zwischen 0,38 und 0,47 ein adäquates Luftporensystem einen viel größeren Einfluss auf die Frost-Taumittel-Beständigkeit hat als der jeweilige W/B-Wert.

Neben Luftporenkennwerten und Abwitterungen wurden an allen Mischungsverhältnissen die Spaltzugfestigkeiten zur Charakterisierung der mechanischen Werkstoffeigenschaften ermittelt. Es zeigte sich, dass die gemäß RVS 08.17.02 geforderten Spaltzugfestigkeiten nur mit $W/B = 0,38$ und $W/B = 0,42$ erreicht werden können. Bei höheren Luftgehalten ist mit einem Abfall der Spaltzugfestigkeiten zu rechnen. Ein Ziel-W/B-Wert von etwa 0,38 ist für die Einhaltung der Festigkeitseigenschaften insbesondere auch bei höheren Luftgehalten jedenfalls erforderlich. Wesentlich für die Beständigkeit von Betonoberflächen ist auch deren Porosität. Die Ergebnisse zeigten, dass die Porosität des Zementsteins, unabhängig von Luftgehalt, im Wesentlichen vom W/B-Wert abhängig ist. Niedrige W/B-Werte weisen durchwegs eine geringere Gesamtporosität auf als höhere W/B-Werte.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen war, Zusammenhänge zwischen Nachbehandlungsqualität und Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechsel-Beanspruchung zu finden. Auf Basis der Versuchsergebnisse konnte dargelegt werden, dass die Abwitterung grundsätzlich sowohl mit schlechterem Luftporensystem als auch mit abnehmender Nachbehandlungsqualität zunimmt. Ungenügende Nachbehandlung bzw. im Extremfall keine zweite Nachbehandlung kann eine 3- bis 4-fache Zunahme der Abwitterung an Oberflächen bewirken. Das rechtzeitige und ausreichende Auftragen eines zweiten Nachbehandlungsmittels ist daher essentiell für die Dauerhaftigkeit von Waschbetonoberflächen.

Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Nachbehandlungen auf die Betonqualität wurde die Porosität nahe der Oberfläche an ausgewählten Rezepturen mit unterschiedlicher Nachbehandlungsqualität ermittelt. Es zeigte sich, dass die Porosität grundsätzlich mit fallender Nachbehandlungsqualität zunimmt. Um weitere Informationen über Zusammenhänge Nachbehandlung, Bewitterung auf der Baustelle und Oberflächengüte zu bekommen, wurden Windkanalversuche durchgeführt. Diese Versuche dienen dazu, Auswirkungen von Baustellenbedingungen, wie erhöhte Temperatur und den Einfluss von Wind auf die Eigenschaften des Betons zu untersuchen. Gemäß den Ergebnissen sind bei guter Nachbehandlungsqualität die Abwitterungen, weitgehend unabhängig von der Lagerungsart, niedrig. Treten höhere Temperaturen oder Windbelastung in Kombination mit schlechter Nachbehandlung auf, ist mit einer deutlichen Steigerung der Abwitterung zu rechnen.

Zur Bestätigung der Laborergebnisse wurden Feldversuche an einer bestehenden Betondecke durchgeführt. Nach Auswahl der Messstellen gemeinsam mit Vertretern der ASFINAG erfolgte die Entnahme von Bohrkernen an den entsprechend guten und schlechten Stellen. Zur Darlegung der tatsächlichen Betoneigenschaften erfolgte die Ermittlung der Luftporenkennwerte, des Anmachwassergehalts, der Abwitterung sowie der Porosität der Oberfläche. Die Ergebnisse zeigten, dass die Abwitterung der Proben aus dem Feldversuch ab 28 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen sehr stark zunehmen und nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen etwa 4 Mal so hoch sind wie die vergleichbaren Laborproben. Dieser Umstand dürfte darauf zurückzuführen sein, dass durch die entsprechende Liegedauer der aus den Autobahnabschnitten entnommen Proben bereits eine gewisse Vorschädigung vorlag.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Labor- und Feldversuchen kann zusammengefasst werden, dass zur Charakterisierung einer ausreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit von Betonfahrbahndecken jedenfalls die Bestimmung der Luftporenkennwerte und deren regelmäßige Kontrolle das sinnvollste Instrument darstellen. Weiters zeigte sich, dass ebenso die nachträgliche Überprüfung des Anmachwassergehaltes am Festbeton ein wirksames Mittel zur Sicherstellung einer ausreichenden Betondeckenqualität darstellt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Blab, R. et. al.: Betonstraßen – Das Handbuch, Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. 2012
- [2] Ehrlich, N.; Hersel, O.: Straßenbau heute – Betondecken, Betonmarketing Deutschland GmbH, Erkrath 2010
- [3] Breyer, G.; Litzka, J.; Steigenberger, J.: Die Entwicklung der österreichischen Bautechnik, ÖVBB Wien 2007
- [4] Richtlinien für die Herstellung von Betonfahrbahndecken, Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen im ÖIAV, Wien 1957
- [5] Allgemeine technische Bedingungen für die Herstellung von Betonfahrbahndecken der Autobahnen, FGS Wien 1967
- [6] Richtlinien für die Prüfung, Zulassung und Lieferung von luftporenbildenden Betonzusatzmitteln für Fahrbahndecken, FGS Wien 1967
- [7] Richtlinie zur Herstellung von Betonfahrbahndecken. Österr. Betonverein Wien 1986
- [8] RVS 8S.06.32: Betondecken, Deckenherstellung, FSV Wien 1990
- [9] RVS 08.17.02: Technische Vertragsbedingungen- Betondecken – Deckenherstellung FSV Wien 2011
- [10] Grübl, P.; Weigler, H. Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, Verlag Ernst und Sohn, Berlin 2001
- [11] Haist, M.; Djuric, Z.; Müller, H.: Betontechnologische Grundlagen zur Herstellung frostbeständiger Betone, in Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost-Taumittel-Beanspruchung, 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruhe 2009
- [12] Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis, Bauwerk Verlag, Berlin 2007
- [13] Setzer, M. J.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 280, 1977.

- [14] Setzer, M. J.: Pore Solution in Hardened Cement Paste. Proceedings of the Third International Bolomey Workshop, Essen 1998.
- [15] ÖNORM B 4710-1: Beton, Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Österreichisches Normungsinstitut 2007
- [16] Eickschen, E.: Einflüsse auf die Luftporenbildung in Straßenbeton, VDZ Betontechnologische Berichte 2001 – 2003
- [17] Eickschen, E.: Nachaktivierungspotential Luftporenbildender Betonzusatzmittel, Beton 10 und 11/2010
- [18] Einflüsse auf die Luftporenbildung in Straßenbeton, E. Eickschen, E. Siebel, Straße und Autobahn 2/2001
- [19] Wirkungsmechanismen Luftporenbildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotential, E. Eickschen, Schriftenreihe VDZ 73/2009
- [20] RVS 08.17.02: Technische Vertragsbedingungen – Deckenherstellung. FSV, 2011
- [21] Sommer, H.; Sinnhuber N.: Wie erreicht man ein befriedigendes Luftporensystem bei Straßenbeton mit Fließmitteln?, Straße und Autobahn 38, 1987
- [22] Krispel, St.: Einfluss des Luftgehaltes im Frischbeton auf L300 und L1000 für Straßenbeton und Straßenfließbeton, Straßenforschung BMVIT Heft 591 2010
- [23] Walz, K.; Springenschmid, R.: Beton – Herstellung und Verwendung 12. 1962.
- [24] Sommer, H.: Zur mikroskopischen Ermittlung der Luftporenkennwerte am erhärteten Straßenbeton. Dissertation, Technische Hochschule Wien, 1975.
- [25] ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, Österreichisches Normungsinstitut, 01.09.2010
- [26] Peyerl, M.: Bruchmechanische und stereoskopische Charakterisierung von Interfaces zementgebundener Werkstoffe, Dissertation an der TU Wien 2012
- [27] RVS 11.06.42: Nachbehandlungsmittel für Beton, FSV – Österr. Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Wien 1985
- [28] Nischer, P.: Erhöhung der Beständigkeit von Betonbauwerken – Betontechnologische Einflussfaktoren, BFT Heft 5, 1987
- [29] EN 206-1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Schlusssentwurf FprEN 206, Juni 2013
- [30] TL Beton-StB: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, 2007
- [31] Skarabis, J.: Nachbehandlung von Fahrbahndecken aus Waschbeton, Straße und Autobahn 5/2012
- [32] DIN 66133, Ausgabe 1993: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion. Deutsches Institut für Normung e. V., 1993.
- [33] VÖZFI-Verfahren B01: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme des Festbetons und Bestimmung des chemisch gebundenen Wassers des Festbetons durch Ofentrocknung bei 500 °C

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Eis in einer künstlich eingeführten Luftpore [10]	6
Abbildung 2:	Eis in einer künstlich eingeführten Luftpore [11]	6
Abbildung 3:	Zunehmende Frostdehnung durch das Entstehen von Mikrorissen bei Beton mit und ohne künstliche Luftporen [12]	7
Abbildung 4:	Frostschäden an einer ohne künstliche Luftporen hergestellten Betondecke [Foto VÖZFI]	8
Abbildung 5:	Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von Kapillarporenraum und W/B-Wert [10]	9
Abbildung 6:	Modell von künstlichen Luftporen und Abwanderung von Wasser aus Porenraum in künstliche Luftporen mit Eisbildung (links) [10]	10
Abbildung 7:	Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von Kapillarporenraum und W/B-Wert [10 S 465]	11
Abbildung 8:	Fotographische Aufnahme einer künstlichen Luftpore	12
Abbildung 9:	Einfluss der Nachbehandlung auf die Betongüte [26]	12
Abbildung 10:	Porosität von Zementstein mit unterschiedlichen W/Z Werten [28]	14
Abbildung 11:	Porosität von Zementstein in Abhängigkeit der Nachbehandlung [28]	14
Abbildung 12:	Bestimmung der Frischbetontemperatur	20
Abbildung 13:	Bestimmung der Rohdichte am Frischbeton	20
Abbildung 14:	Bestimmung des Luftgehaltes am Frischbeton	21
Abbildung 15:	Bestimmung des Verdichtungsmaßes	22
Abbildung 16:	Aufbringen des Kombinationsmittels direkt nach der Herstellung	23
Abbildung 17:	Fertige Waschbetonoberfläche	23
Abbildung 18:	Geschliffener Straßenoberbeton unter dem Mikroskop	24
Abbildung 19:	Prüfung der Spaltzugfestigkeit an prismatischen Probekörpern [113]	25
Abbildung 20:	Waschbetonoberfläche nach Bestimmung der Abreißfestigkeit	25
Abbildung 21:	Prüfkörper während der Prüfung der gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF4	27
Abbildung 22:	Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und Luftgehalt im Frischbeton	32
Abbildung 23:	Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und L300	33
Abbildung 24:	Zusammenhänge zwischen LP-Dosierung und AF	33
Abbildung 25:	Vergleich automatische und manuelle Bestimmung der Luftporenkennwerte nach Poren je 1000 mm Messlänge	34
Abbildung 26:	Vergleich automatische und manuelle Bestimmung der Luftporenkennwerte nach Gesamtporenanzahl	35
Abbildung 27:	Zusammenhänge Dosierung Luftporenmittel mit Gesamtluftgehalt	45
Abbildung 28:	Zusammenhänge Dosierung Luftporenmittel mit L300	45
Abbildung 29:	Zusammenhänge Dosierung Luftporenmittel mit AF	46
Abbildung 30:	Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen	47
Abbildung 31:	Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen	47
Abbildung 32:	Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen	48
Abbildung 33:	Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV1	48
Abbildung 34:	Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV2	49
Abbildung 35:	Zusammenhänge Gesamtluftgehalt und Oberflächenabwitterung in Relation zum W/B-Wert	50
Abbildung 36:	Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV1	51
Abbildung 37:	Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV2	51
Abbildung 38:	Zusammenhänge L300 und Oberflächenabwitterung in Relation zum W/B-Wert MV1	52
Abbildung 39:	Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV1	52

Abbildung 40:	Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung nach 56 Frost-Tauwechsel-Beanspruchungszyklen MV2.....	53
Abbildung 41:	Zusammenhänge AF und Oberflächenabwitterung in Relation zum W/B-Wert MV2	53
Abbildung 42:	Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen der untersuchten Basismischen	54
Abbildung 43:	Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von W/B-Wert und Gesamtluftgehalt	55
Abbildung 44:	Porosität des Zementsteins in Abhängigkeit von hydraulischer Spaltbreite und W/B-Wert MV1	56
Abbildung 45:	Porosität des Zementsteins in Abhängigkeit von hydraulischer Spaltbreite und W/B-Wert MV2	56
Abbildung 46:	Gesamtporosität in Abhängigkeit von W/B-Wert.....	57
Abbildung 47:	Gesamtporosität in Abhängigkeit der Oberflächenabwitterung	57
Abbildung 48:	Wassergehalt laut Rezeptur im Vergleich zum ermittelten Anmachwassergehalt	58
Abbildung 49:	Oberflächenabwitterung MV1 mit Einfluss der Nachbehandlungsarten I, II und III	59
Abbildung 50:	Oberflächenabwitterung MV2 mit Einfluss der Nachbehandlungsarten I, II und III	60
Abbildung 51:	Prozentuelle Zunahme der Oberflächenabwitterung infolge schlechter Nachbehandlungsqualität.....	61
Abbildung 52:	Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV1 (geprüft an der Oberfläche).....	62
Abbildung 53:	Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV1 (geprüft in 2 cm Tiefe)	62
Abbildung 54:	Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV2 (geprüft an der Oberfläche).....	63
Abbildung 55:	Abreißfestigkeit in Abhängigkeit zur Oberflächenabwitterung MV2 (geprüft in 2 cm Tiefe)	64
Abbildung 56:	Porosität in Abhängigkeit der Nachbehandlungsqualität	65
Abbildung 57:	Oberflächenabwitterung mit Einfluss der Nachbehandlungsqualität	66
Abbildung 58:	Porosität des Zementsteins bei simulierten Baustellenbedingungen	67
Abbildung 59:	Übersicht der Entnahmestellen	68
Abbildung 60:	Oberflächenstruktur der Entnahmestellen	69
Abbildung 61:	Zeitliche Entwicklung der Abwitterung Proben S1 im Vergleich zu Laborversuchen	70
Abbildung 62:	Exemplarische Darstellung der Oberflächenstruktur eines untersuchten Bohrkerns vor (links) und nach der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (rechts)	71
Abbildung 63:	Porosität des Zementsteins der Proben S1 im Vergleich zu Laborversuchen.....	71
Abbildung 64:	Porosität in Abhängigkeit des Betonalters [34]	72

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anforderungen an Luftporenkennwerte.....	15
Tabelle 2:	Zielwerte Luftgehalt für die Betonherstellung.....	28
Tabelle 3:	Zielwerte W/B-Werte für die Betonherstellung.....	28
Tabelle 4:	Betonzusammensetzung Oberbeton mit Waschbetonstruktur.....	29
Tabelle 5:	Mischungsverhältnisse Vorversuche.....	30
Tabelle 6:	Ergebnisse der Frischbetonprüfung Vorversuche.....	30
Tabelle 7:	Ergebnisse der Festbetonprüfung Vorversuche	31
Tabelle 8:	Gegenüberstellung automatische und manuelle Auswertung gemäß ONR 23303 [25]	31
Tabelle 9:	Mischungsverhältnisse Hauptversuche.....	36
Tabelle 10:	Nachbehandlungsarten Hauptversuche.....	37
Tabelle 11:	Ergebnisse der Frischbetonprüfung Hauptversuche.....	38
Tabelle 12:	Ergebnisse der Festbetonprüfung – Betonkennwerte.....	39
Tabelle 13:	Ergebnisse der Festbetonprüfung – Betongüte	40
Tabelle 14:	Ergebnisse der Festbetonprüfung – Gesamtdaten LP1.....	41
Tabelle 15:	Ergebnisse der Festbetonprüfung – Gesamtdaten LP2.....	42
Tabelle 16:	Ergebnisse Simulation Baustellenbedingungen – Betongüte	44
Tabelle 17:	Prozentuelle Zunahme der Oberflächenabwitterung (Bezugswert 100 % Nachbehandlungsmittel.....	60
Tabelle 18:	Ergebnisse der Festbetonkennwerte S1 (Gesamtluftgehalt, Anmachwasser)	69
Tabelle 19:	Ergebnisse der Festbetonkennwerte S1 (Abwitterung, Porosität)	70
Tabelle 20:	Ergebnisse der Festbetonkennwerte S1 (Abwitterung, Porosität)	70

8 Anhang

Tabelle MV11A

Luftporenkennwerte		Messwerte	
Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1169	Vergrößerung: 50-fach
Anzahl der Poren	[-]	792	
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	92,1	
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,17	
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450	
Wassergehalt	[kg/m ³]	170	
Leimgehalt P	[Vol-%]	32	
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	34	
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	4,1	
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	7,88	
L300	[%]	5,79	
Abstandsfaktor	[mm]	0,12	
Rohdichte UW	[kg/m ³]	2326	

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0 bis 10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung:	50-fach
Messlänge:	1,2 m
Größtkorn:	GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,02	0,48	3,33	5,79	6,37	6,38	7,00	7,00
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	8	52	91	100	100		

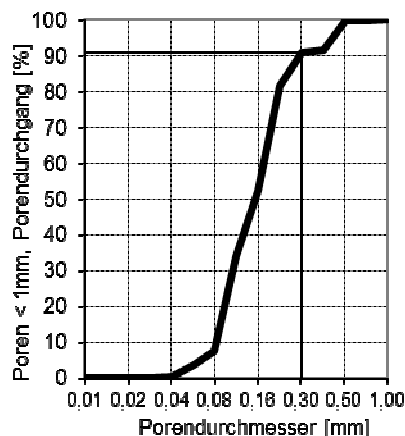
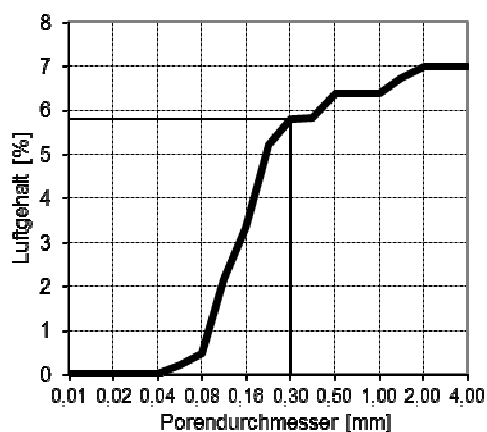


Tabelle MV11B

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	715
Anzahl der Poren	[-]	262
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	33,9
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,19
Zement + Zusatzstoff	[kg/m³]	450
Wassergehalt	[kg/m³]	170
Leimgehalt P	[Vol-%]	32
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	31
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	6,7
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	4,74
L300	[%]	2,94
Abstandsfaktor	[mm]	0,17

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2390

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	1,9		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 11

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,04	0,42	1,93	2,94	3,11	3,31	4,31	4,70
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	13	58	89	94	100		

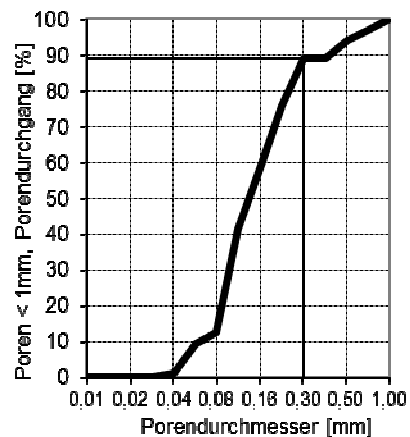
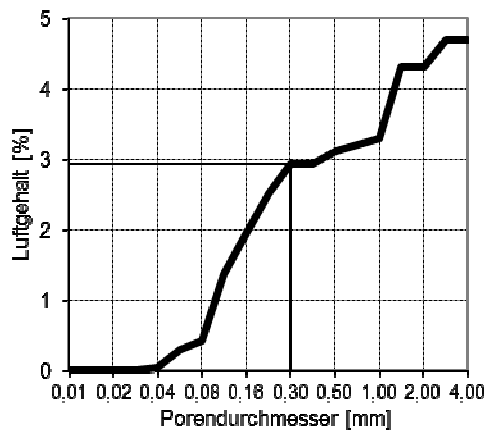


Tabelle MV11C

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1190
Anzahl der Poren	[-]	187
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	37,2
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,30
Zement + Zusatzstoff	[kg/m³]	450
Wassergehalt	[kg/m³]	170
Leimgehalt P	[Vol-%]	32
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	20
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	10,2
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	3,12
L300	[%]	1,09
Abstandsfaktor	[mm]	0,32

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2437

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	1,9		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 11

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,03	0,15	0,61	1,09	1,52	1,95	2,50	3,12
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	8	31	56	78	100		

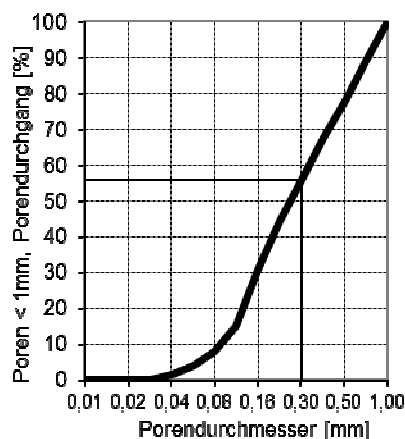
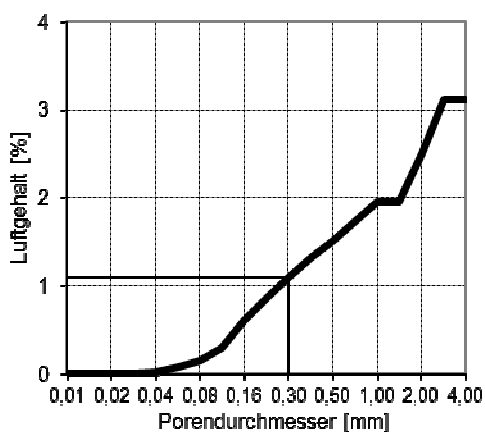


Tabelle MV12A

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1194
Anzahl der Poren	[-]	789
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	96,2
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,18
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	190
Leimgehalt P	[Vol-%]	34
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	33
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	4,2
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	8,06
L300	[%]	5,63
Abstandsfaktor	[mm]	0,13

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2320

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	4,0	bis	8,0
L300 [Vol-%] ≥	1,8		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,18		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 22

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,03	0,65	2,90	5,63	6,14	6,50	6,90	7,30
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	10	45	87	95	100		

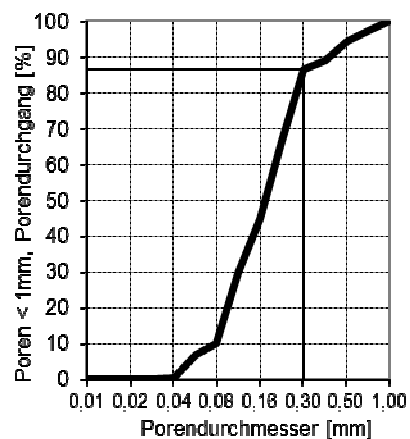
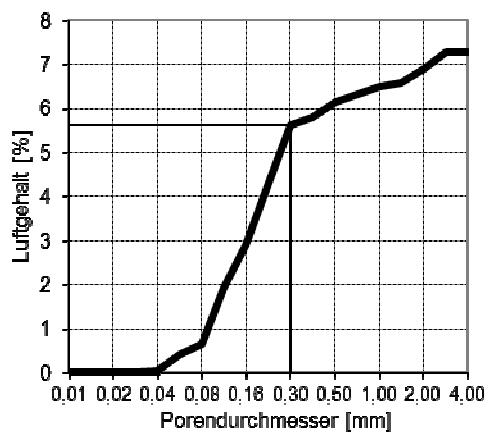


Tabelle: MV12B

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1168
Anzahl der Poren	[-]	554
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	69,1
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,19
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	190
Leimgehalt P	[Vol-%]	34
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	32
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	5,7
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	5,92
L300	[%]	3,92
Abstandsfaktor	[mm]	0,15

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2368

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,00	0,30	2,51	3,92	4,52	4,93	5,38	5,38
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	6	51	80	92	100		

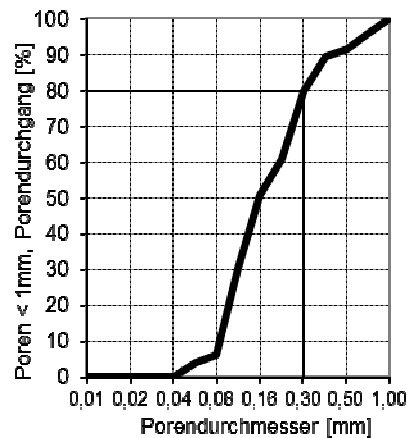
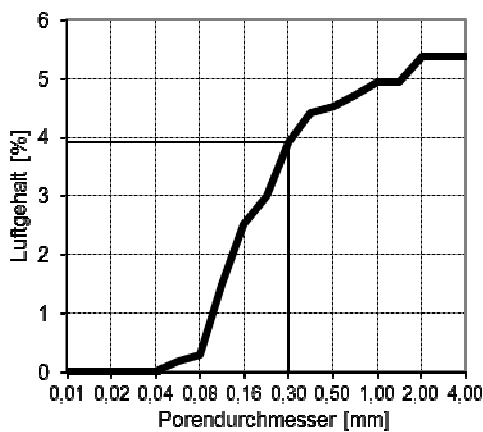


Tabelle: MV12C

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1190
Anzahl der Poren	[-]	146
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	33,1
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,34
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	190
Leimgehalt P	[Vol-%]	34
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	18
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	12,2
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	2,78
L300	[%]	1,00
Abstandsfaktor	[mm]	0,39

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2602

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,01	0,01	0,07	0,45	1,00	1,16	1,68	2,28	2,29
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	4	27	60	69	100		

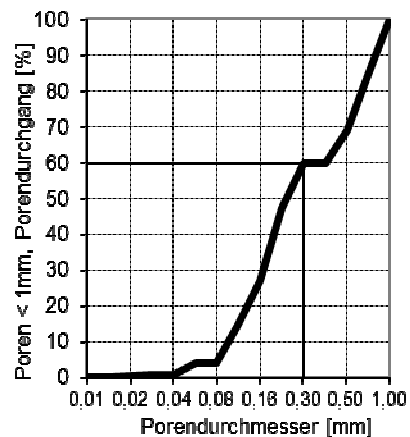
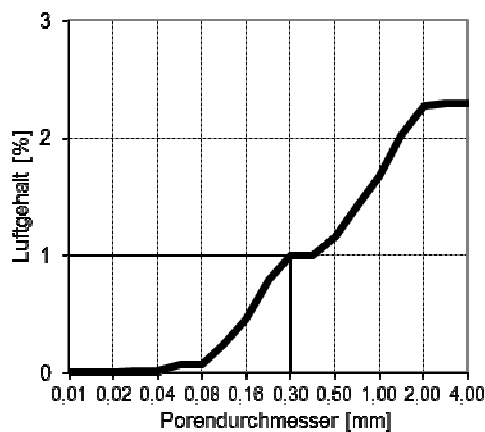


Tabelle MV13A

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1182
Anzahl der Poren	[-]	858
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	109,1
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,19
Zement + Zusatzstoff	[kg/m³]	450
Wassergehalt	[kg/m³]	210
Leimgehalt P	[Vol-%]	36
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	31
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	3,9
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	9,23
L300	[%]	7,38
Abstandsfaktor	[mm]	0,12

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2248

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,01	0,41	2,67	7,38	7,94	8,27	8,57	9,03
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	5	32	89	96	100		

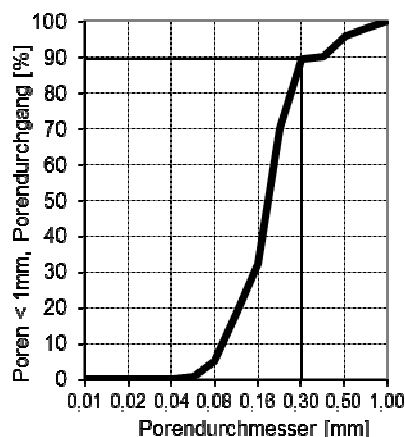
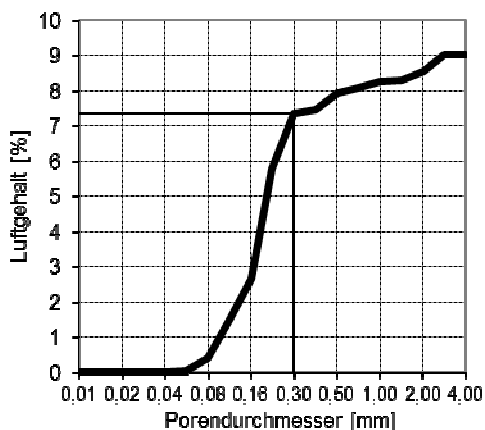


Tabelle MV13B

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1185
Anzahl der Poren	[-]	556
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	68,5
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,18
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	210
Leimgehalt P	[Vol-%]	36
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	33
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	6,2
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	5,78
L300	[%]	4,27
Abstandsfaktor	[mm]	0,16

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2309

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,00	0,56	1,89	4,27	4,65	4,90	4,95	5,58
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	11	39	87	95	100		

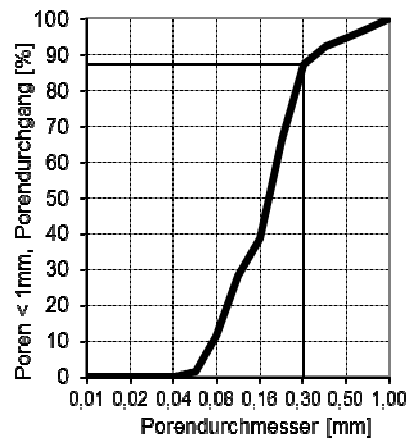
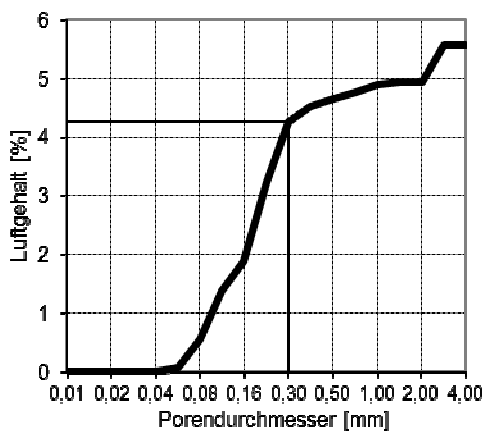


Tabelle MV13C

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1190
Anzahl der Poren	[-]	372
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	43,8
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,18
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	210
Leimgehalt P	[Vol-%]	36
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	34
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	9,8
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	3,68
L300	[%]	2,22
Abstandsfaktor	[mm]	0,18

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2360

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,07	0,47	1,40	2,22	2,56	3,02	3,62	3,62
Verteilung < 1mm [%]	0	0	2	16	46	73	85	100		

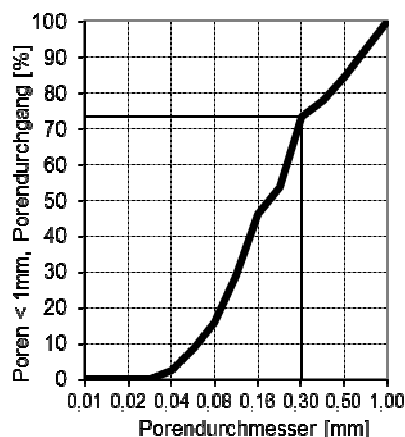
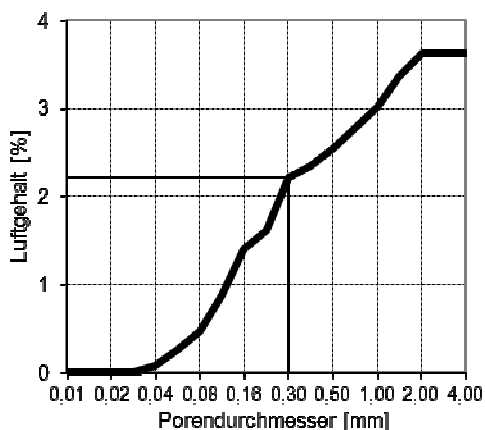


Tabelle MV21A

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1307
Anzahl der Poren	[-]	480
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	57,1
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,18
Zement + Zusatzstoff	[kg/m³]	450
Wassergehalt	[kg/m³]	170
Leimgehalt P	[Vol-%]	32
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	34
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	7,3
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	4,37
L300	[%]	2,40
Abstandsfaktor	[mm]	0,16

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW [kg/m³] 2420

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,03	0,53	1,49	2,40	3,00	3,91	4,00	4,35
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	14	38	61	77	100		

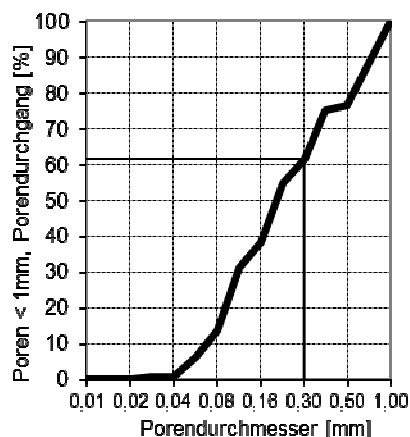
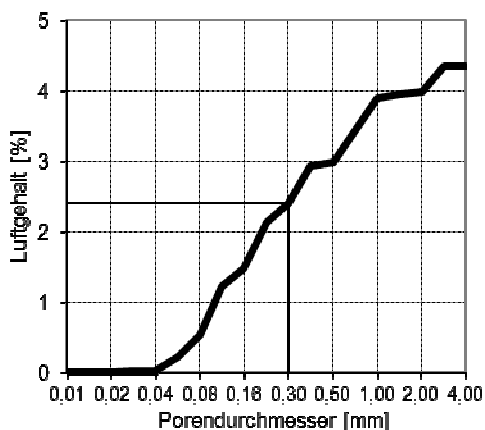


Tabelle MV21B

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1315
Anzahl der Poren	[-]	288
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	58,3
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,30
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	170
Leimgehalt P	[Vol-%]	32
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	20
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	7,2
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	4,43
L300	[%]	1,76
Abstandsfaktor	[mm]	0,28

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2426

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,04	0,15	0,83	1,76	2,24	2,86	3,13	4,19
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	5	29	61	78	100		

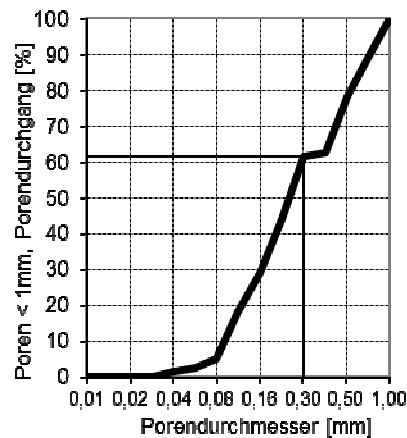
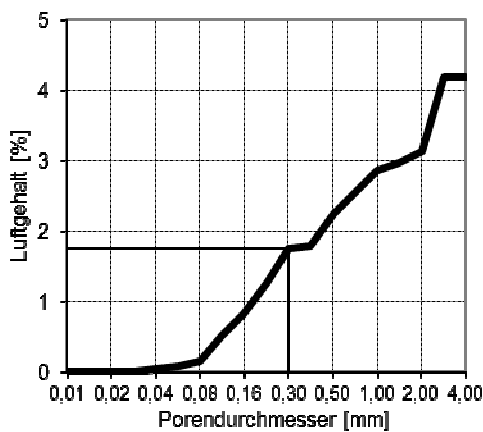


Tabelle MV21C

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1312
Anzahl der Poren	[-]	205
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	43,0
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,31
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	170
Leimgehalt P	[Vol-%]	32
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	19
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	9,8
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	3,28
L300	[%]	1,24
Abstandsfaktor	[mm]	0,33

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2454

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,01	0,01	0,18	0,54	1,24	1,62	2,04	2,58	2,80
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	9	27	61	79	100		

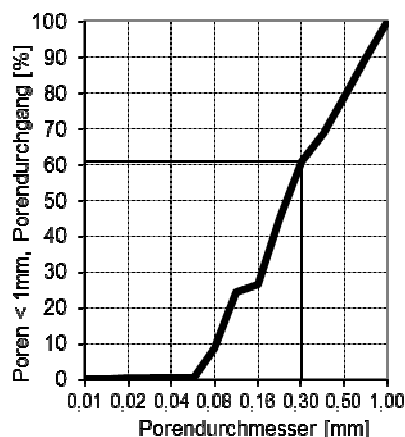
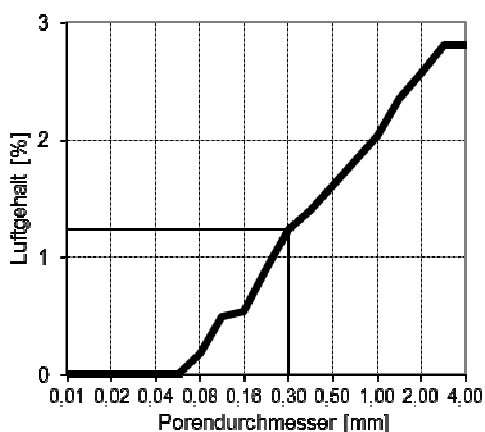


Tabelle MV22A

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1182
Anzahl der Poren	[-]	1032
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	99,7
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,14
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	190
Leimgehalt P	[Vol-%]	34
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	41
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	4,0
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	8,43
L300	[%]	5,70
Abstandsfaktor	[mm]	0,10

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2331

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,01	0,27	1,53	4,53	5,70	6,04	6,13	6,68	7,07
Verteilung < 1mm [%]	0	0	4	25	74	93	99	100		

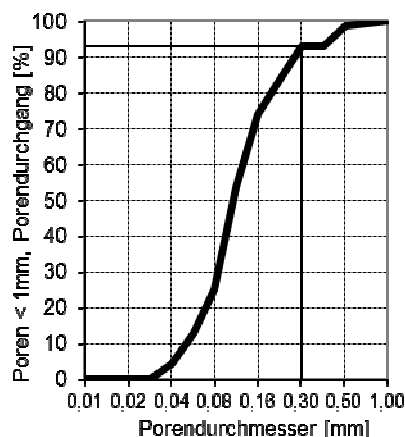
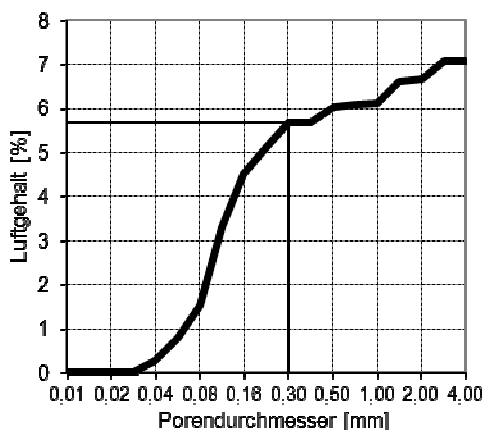


Tabelle MV22B

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1188
Anzahl der Poren	[-]	614
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	70,4
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,17
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	190
Leimgehalt P	[Vol-%]	34
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	35
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	5,7
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	5,93
L300	[%]	4,02
Abstandsfaktor	[mm]	0,14

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2375

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,07	0,61	2,51	4,02	4,35	4,56	4,75	5,39
Verteilung < 1mm [%]	0	0	2	13	55	88	95	100		

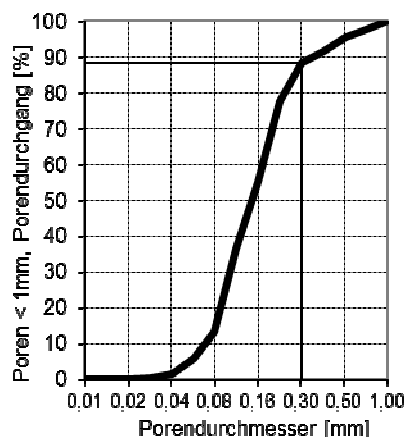
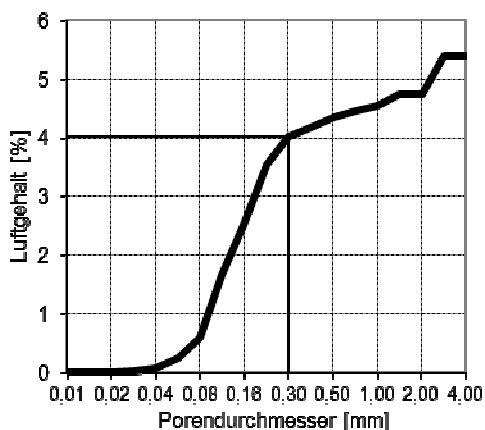


Tabelle MV22C

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1202
Anzahl der Poren	[-]	335
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	52,8
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,24
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	190
Leimgehalt P	[Vol-%]	34
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	25
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	7,7
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	4,40
L300	[%]	2,35
Abstandsfaktor	[mm]	0,22

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2405

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]: 6,0 bis 10,0
 L300 [Vol-%] ≥ 2,0
 Abstandsfaktor [mm] ≤ 0,19

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
 Messlänge: 1,2 m
 Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,03	0,31	1,39	2,35	2,62	2,62	3,05	3,83
Verteilung < 1mm [%]	0	0	1	12	53	89	100	100		

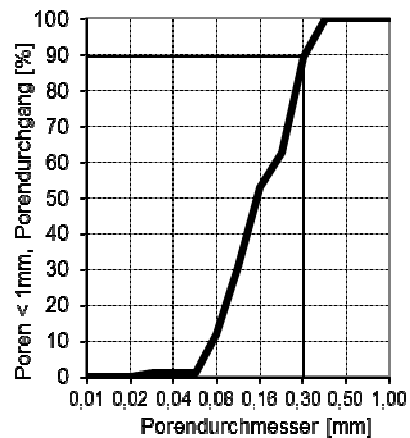
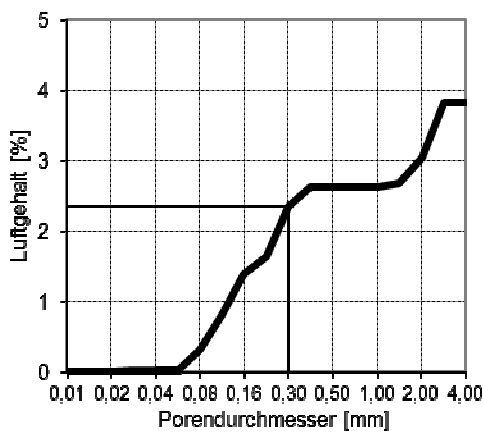


Tabelle MV23A

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1092
Anzahl der Poren	[-]	1006
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	100,3
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,15
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	210
Leimgehalt P	[Vol-%]	36
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	40
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	3,9
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	9,19
L300	[%]	7,49
Abstandsfaktor	[mm]	0,10

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2267

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,02	0,90	4,69	7,49	8,18	8,41	8,58	8,83
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	11	56	89	97	100		

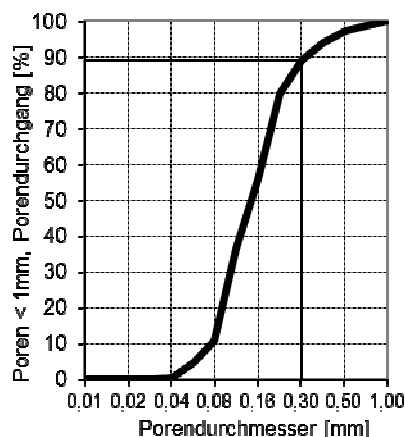
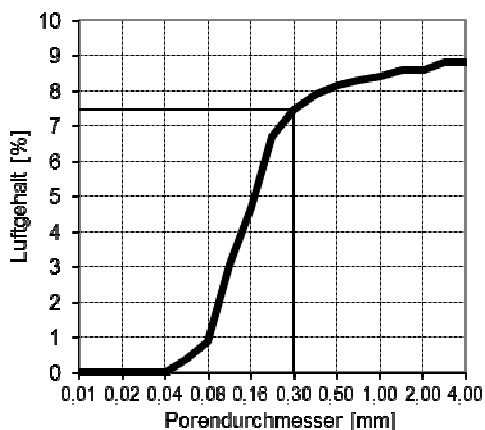


Tabelle MV23B

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1187
Anzahl der Poren	[-]	620
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	77,9
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,19
Zement + Zusatzstoff	[kg/m³]	450
Wassergehalt	[kg/m³]	210
Leimgehalt P	[Vol-%]	36
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	32
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	5,5
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	6,57
L300	[%]	4,72
Abstandsfaktor	[mm]	0,15

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2308

Sollwerte für Identitätsprüfung

Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,00	0,38	2,44	4,72	5,57	5,82	5,97	6,39
Verteilung < 1mm [%]	0	0	0	7	42	81	96	100		

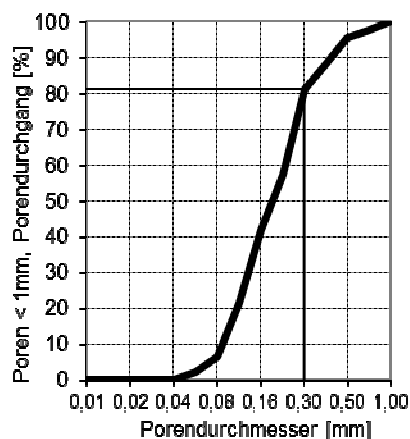
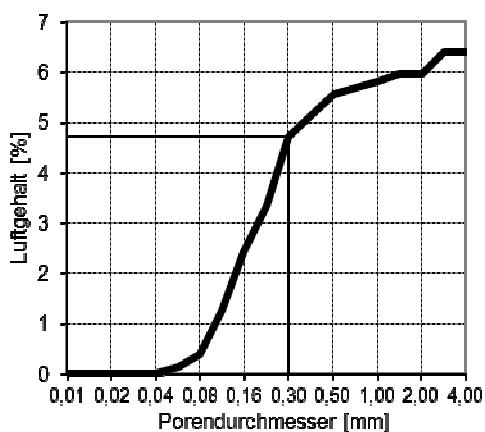


Tabelle MV23C

Luftporenkennwerte

Gesamtlänge der Messstrecken	[mm]	1306
Anzahl der Poren	[-]	392
Gesamtlänge gemessener Sehnen	[mm]	43,2
Durchschnittlicher Durchmesser	[mm]	0,17
Zement + Zusatzstoff	[kg/m ³]	450
Wassergehalt	[kg/m ³]	210
Leimgehalt P	[Vol-%]	36
Spezifische Oberfläche der Luftporen	[1/mm]	36
Zementstein : Luftgehalt R	[-]	10,9
Gesamtluftgehalt	[Vol-%]	3,31
L300	[%]	1,99
Abstandsfaktor	[mm]	0,18

Messwerte

Vergrößerung:
50-fach

Rohdichte UW

[kg/m³] 2363

Sollwerte für Identitätsprüfung

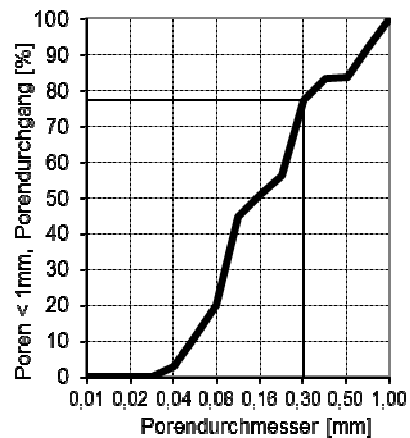
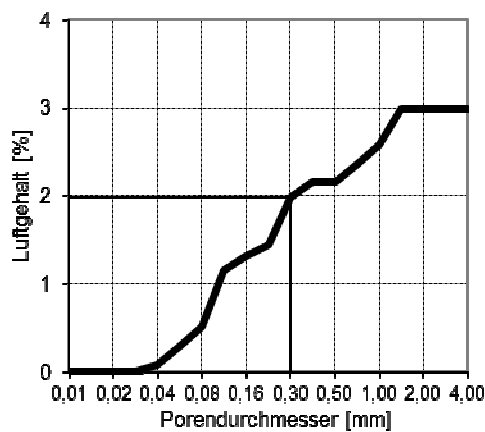
Ges. Luftgehalt [Vol-%]:	6,0	bis	10,0
L300 [Vol-%] ≥	2,0		
Abstandsfaktor [mm] ≤	0,19		

Expositionsklasse: XF4

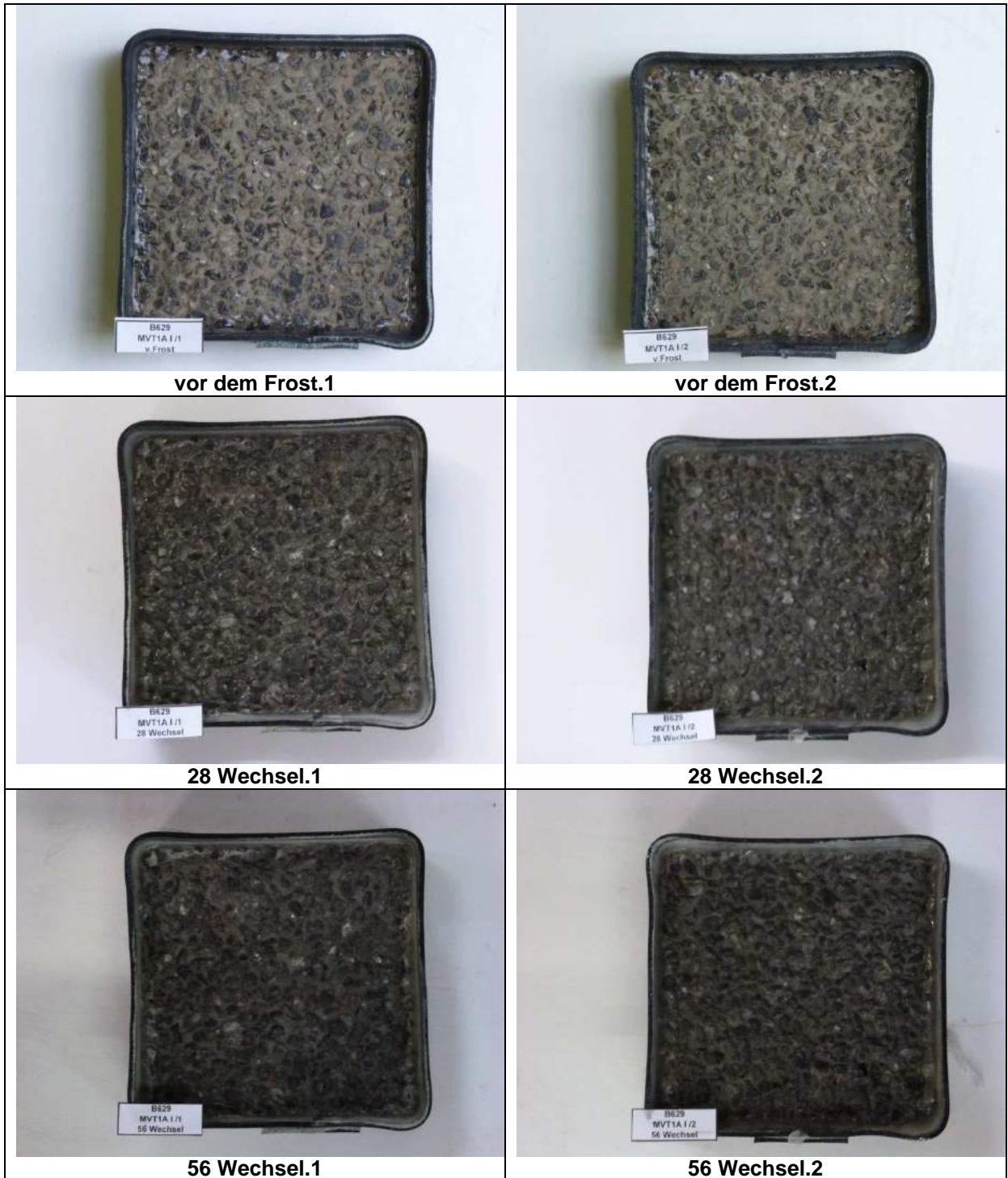
Vergrößerung: 50-fach
Messlänge: 1,2 m
Größtkorn: GK 8

Porenverteilung

Durchmesser [µm]	10	20	40	80	160	300	500	1000	2000	4000
Luftporengehalt [%]	0,00	0,00	0,07	0,51	1,31	1,99	2,16	2,58	2,99	2,99
Verteilung < 1mm [%]	0	0	3	20	51	77	84	100		



Abbildungen MV11A-I



Abbildungen MV11A-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11A-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11B-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11B-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11B-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11C-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11C-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

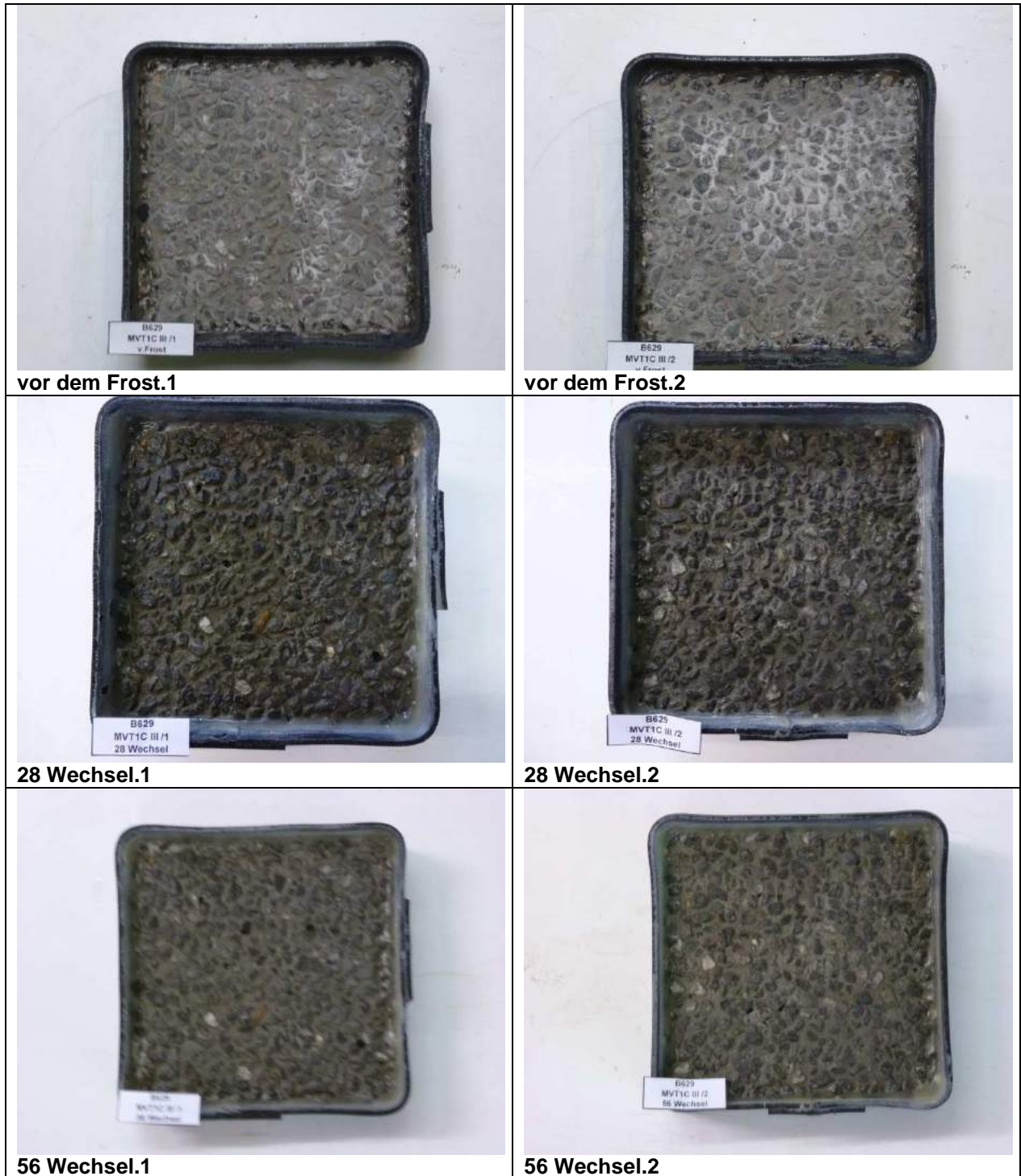


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV11C-III



Abbildungen MV12A-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12A-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12A-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12B-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



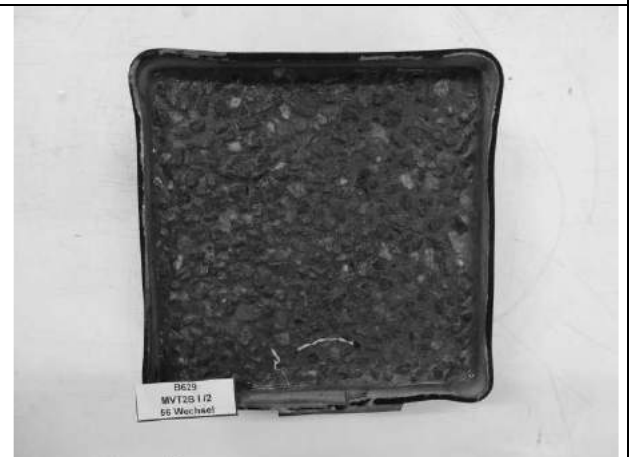
28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12B-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12B-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12C-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

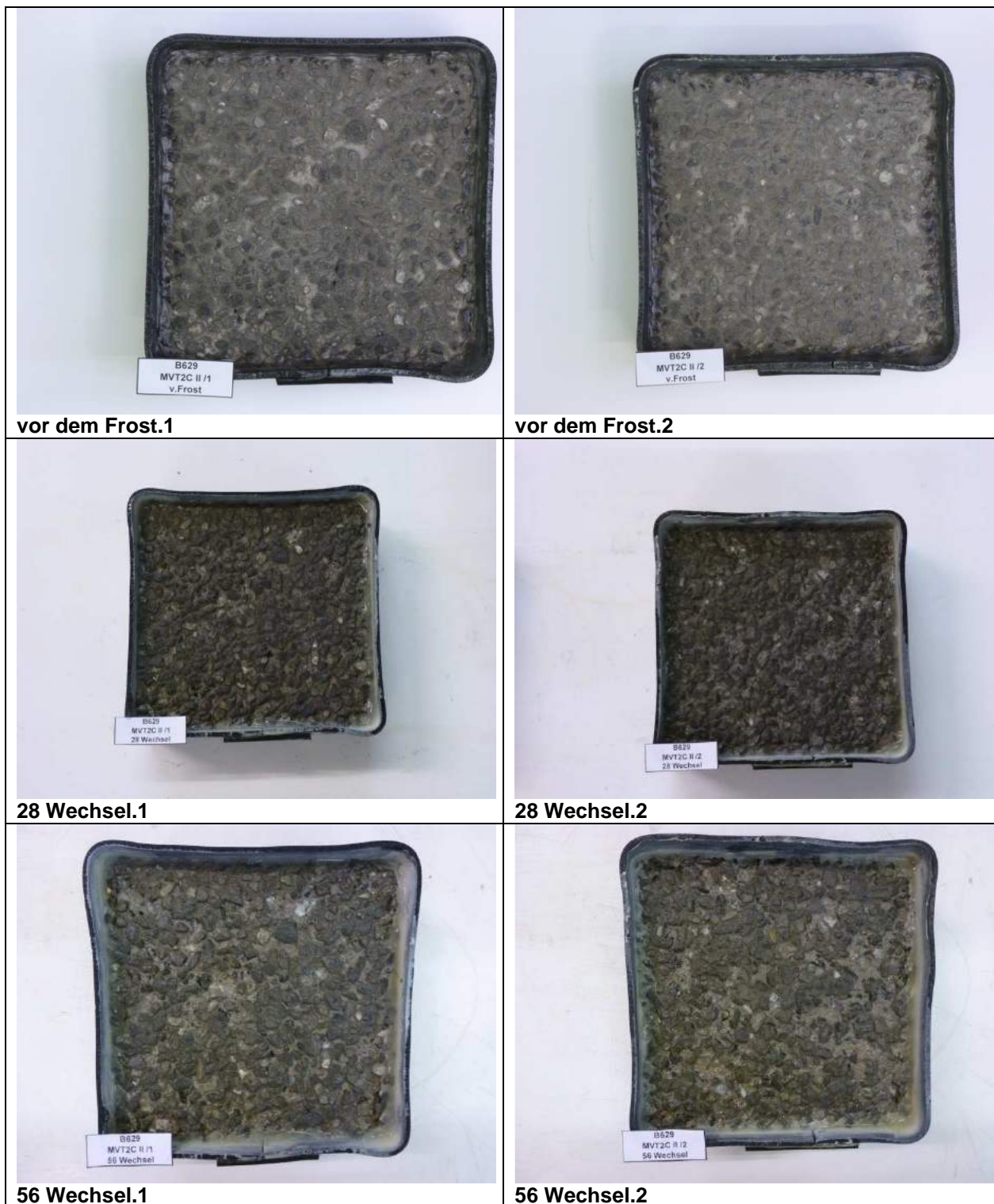


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV12C-II



Abbildungen MV12C-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13A-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13A-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13A-III



Abbildungen MV13B-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13B-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

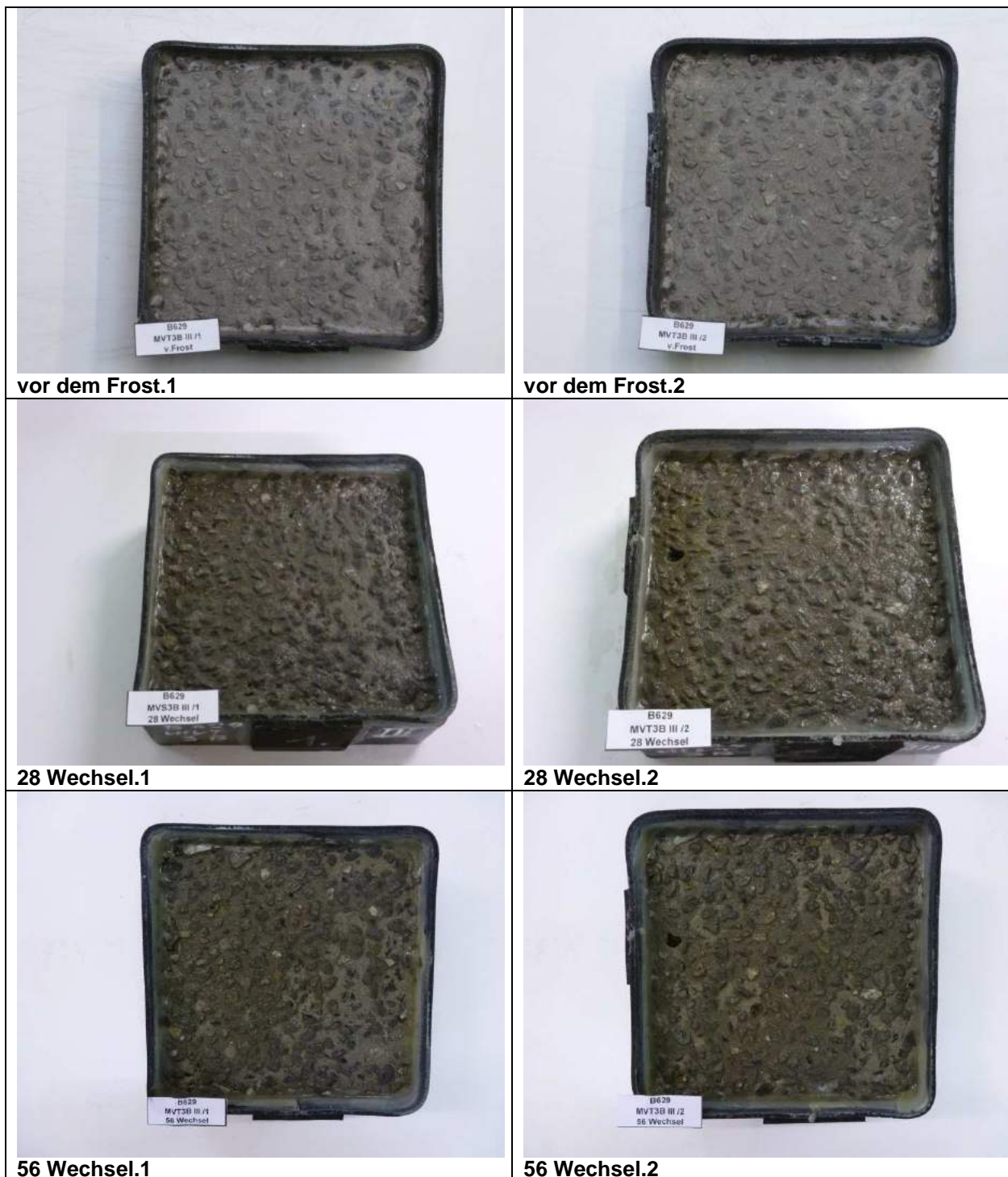


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13B-III



Abbildungen MV13C-I



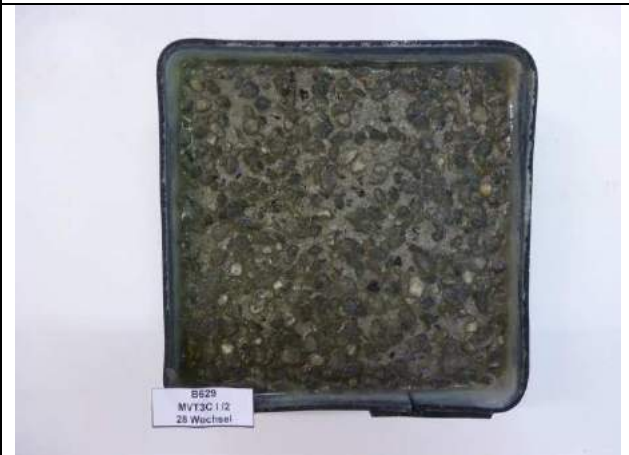
vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13C-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV13C-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21A-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21A-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21A-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21B-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

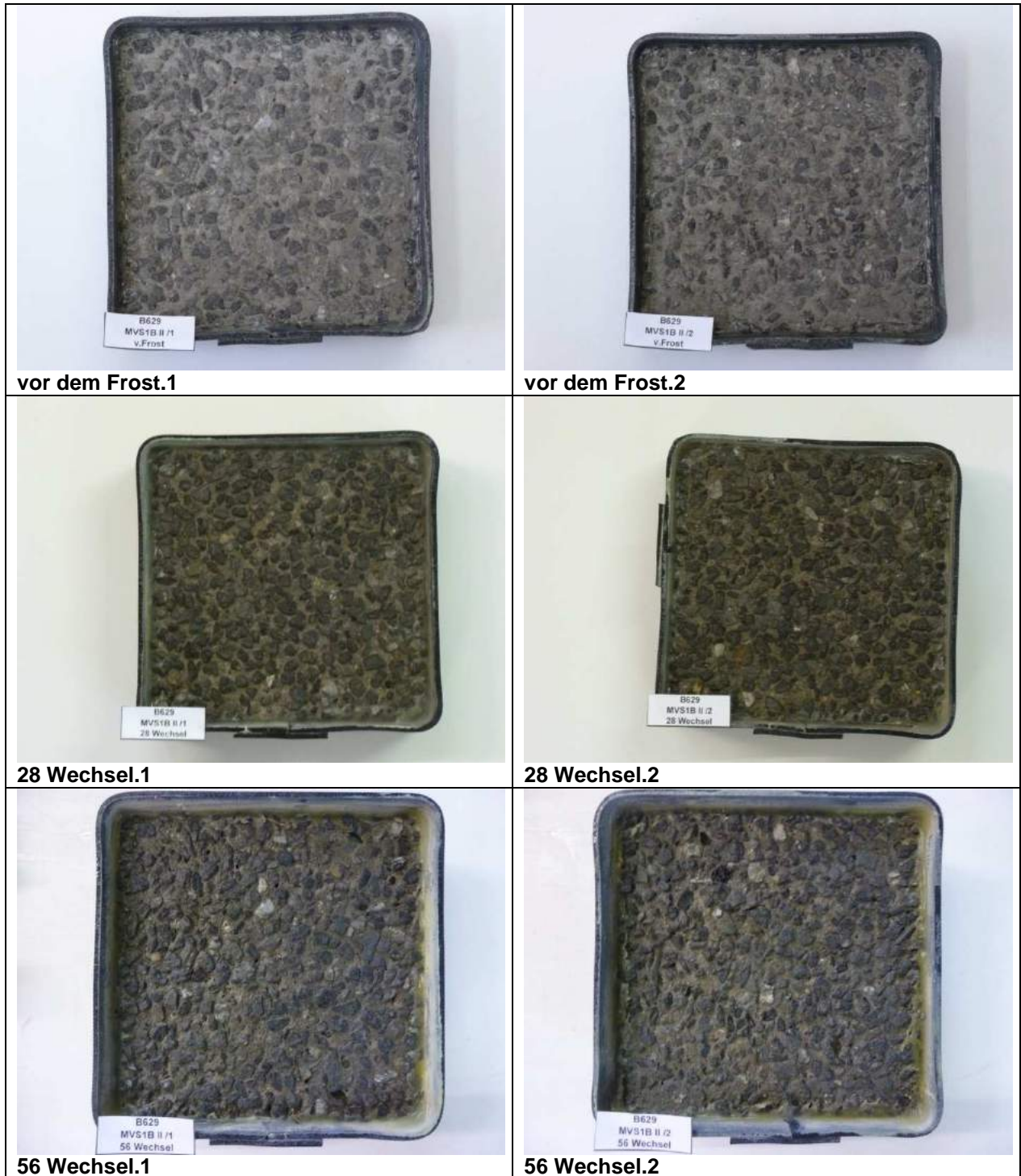


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21B-II



Abbildungen MV21B-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

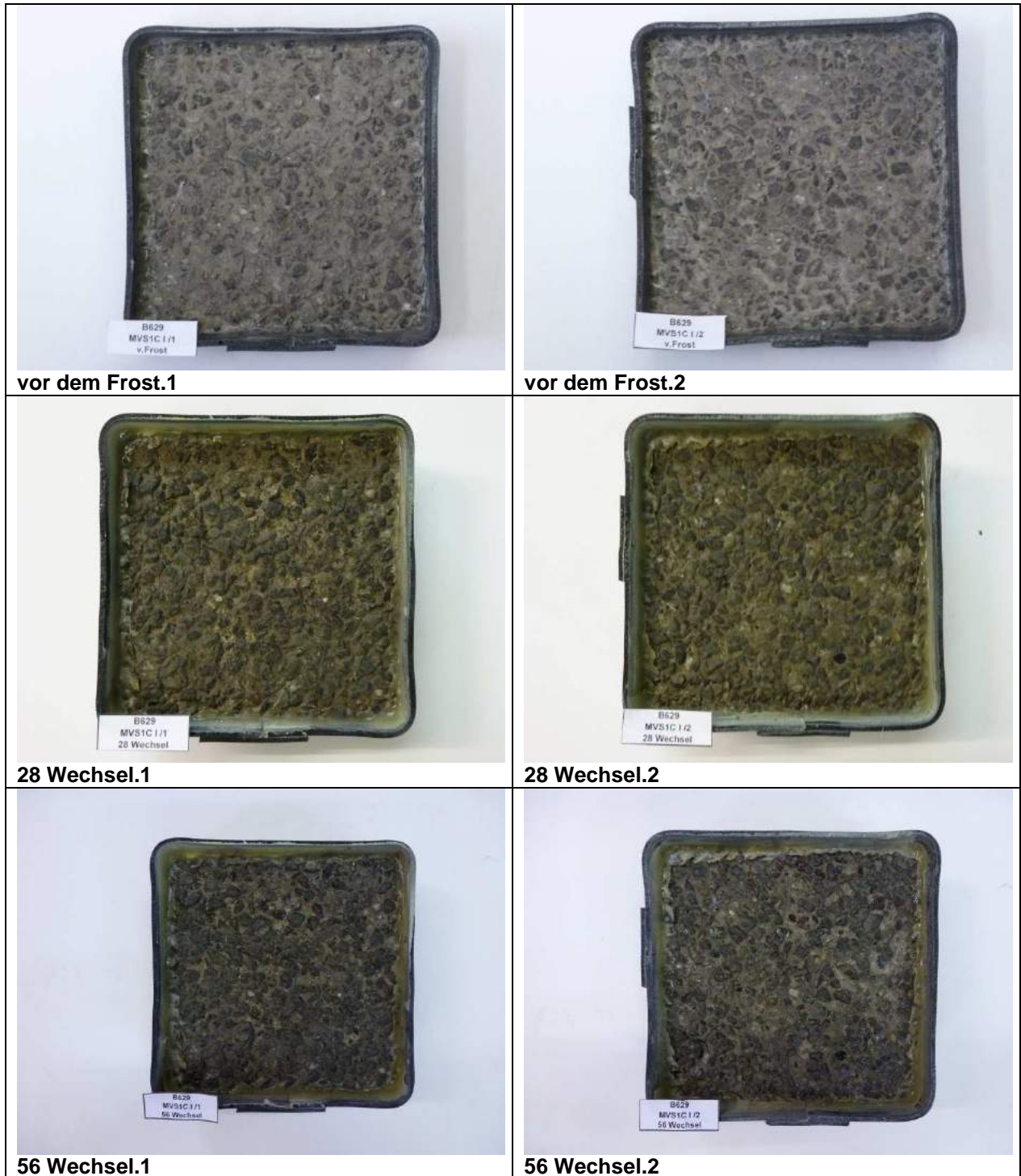


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21C-I



Abbildungen MV21C-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV21C-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22A-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22A-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22A-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22B-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22B-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22B-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22C-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22C-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

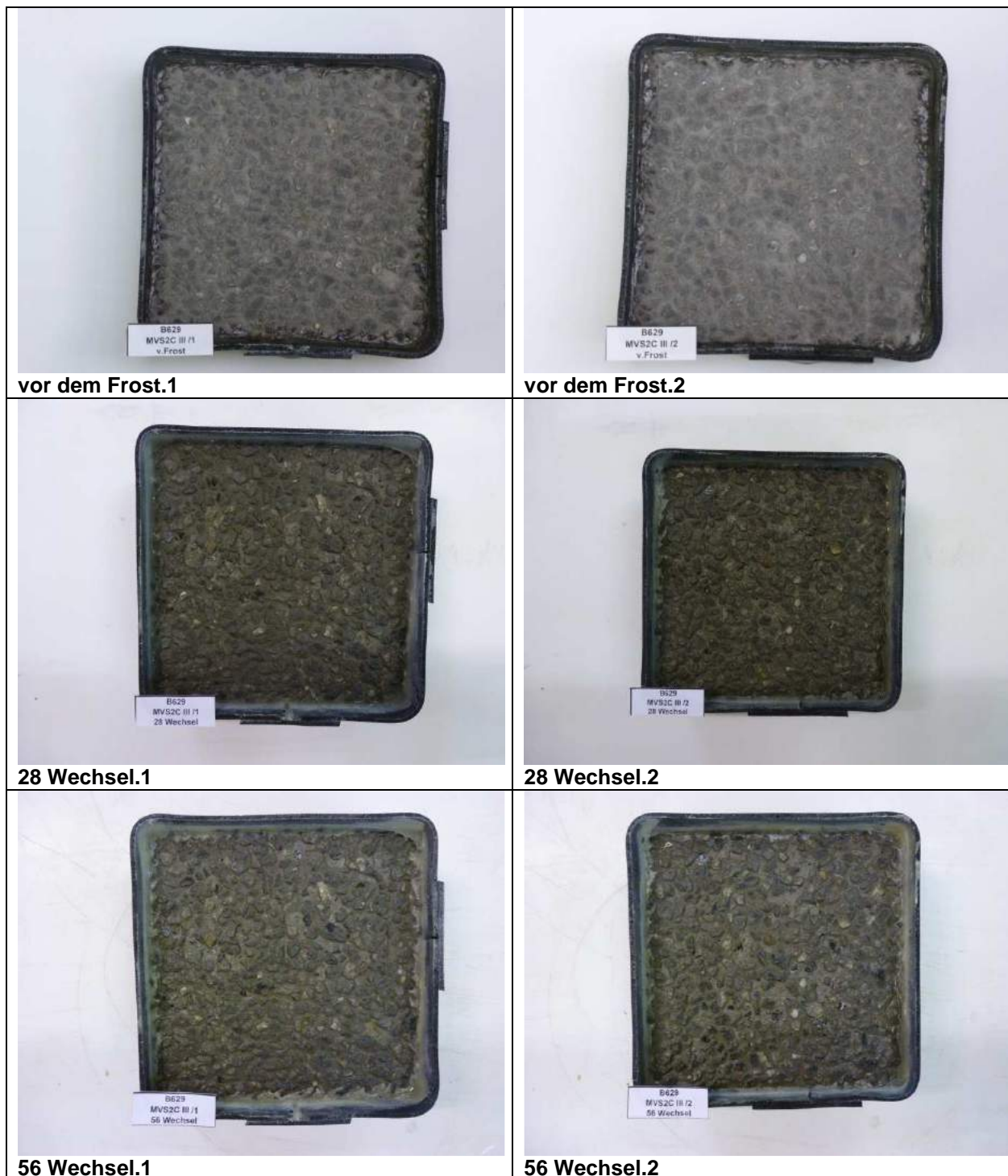


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV22C-III



Abbildungen MV23A-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

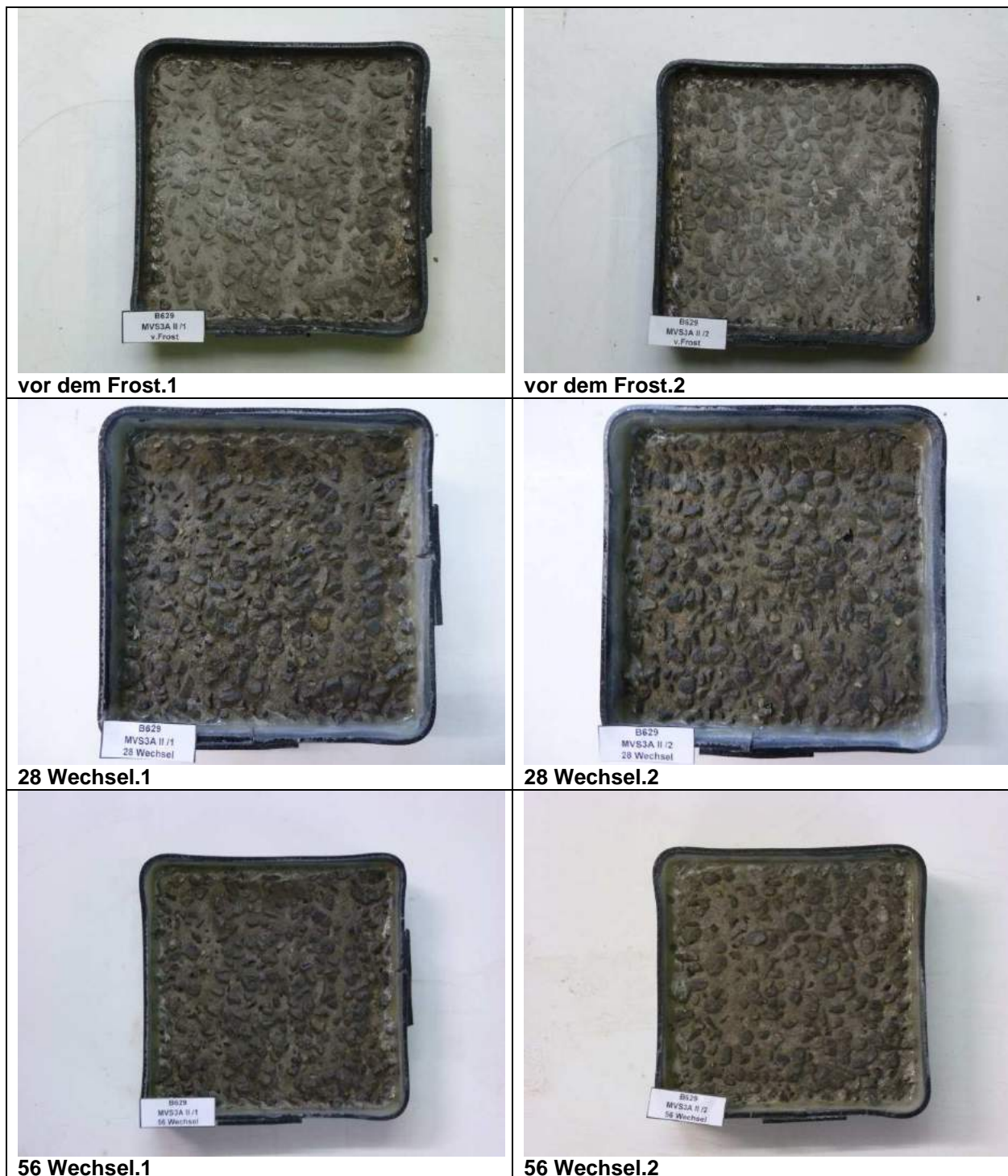


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV23A-II



Abbildungen MV23A-III



Abbildungen MV23B-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV23B-II



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV23B-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV23C-I



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2

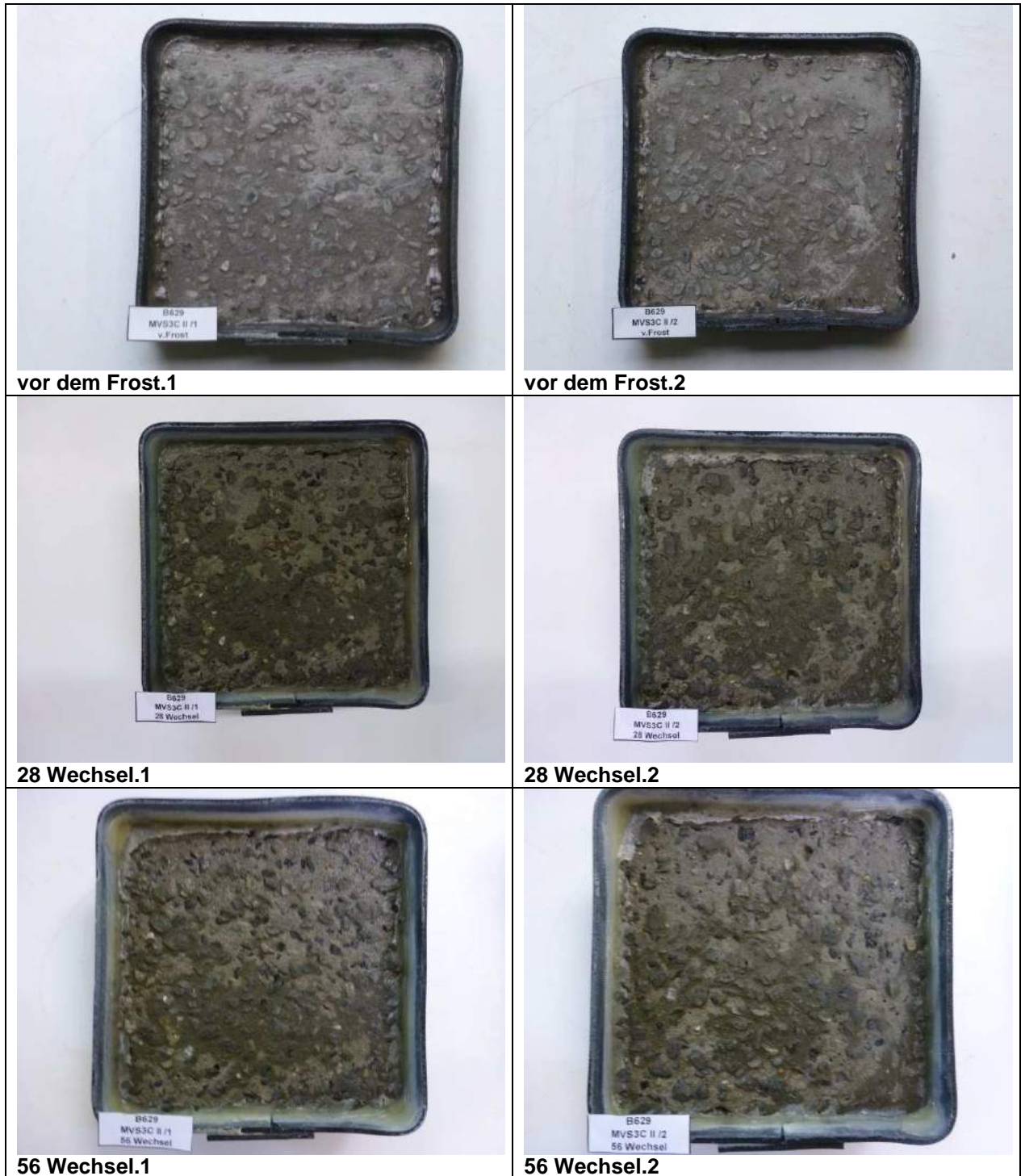


56 Wechsel.1



56 Wechsel.2

Abbildungen MV23C-II



Abbildungen MV23C-III



vor dem Frost.1



vor dem Frost.2



28 Wechsel.1



28 Wechsel.2



56 Wechsel.1



56 Wechsel.2