

PRÜFVERFAHREN ZUR QUALITÄTSSICHERUNG DER NACHBEHANDLUNG VON BETON

Die Nachbehandlung von Beton beeinflusst in hohem Maße die Qualität und die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen. Aufgrund von komplexen Bauabläufen sowie fehlender Kontrollmöglichkeiten wird der Nachbehandlung meist nicht die entsprechende Beachtung geschenkt. Ziel des gegenständlichen Projektes OptiNB war es daher, ein praxisorientiertes, zuverlässiges und einfach umzusetzendes Verfahren zur Prüfung der Nachbehandlungsgüte zu charakterisieren.

Die Nachbehandlung stellt einen wichtigen Arbeitsschritt beim Bau von Stahlbetonbauwerken dar. Nur mit einer fachgerechten Nachbehandlung kann eine vollständige Hydratation der oberflächennahen Bereiche der Bauteile – der Betonrandzone – gewährleistet werden. Diese Randzone ist für die Dauerhaftigkeit und daher die technische Lebensdauer des Bauwerks verantwortlich. Eine unzureichende Nachbehandlung führt primär zu einem vorzeitigen Austrocknen dieser Betonrandzone, die Hydratation kommt somit zum Erliegen und die Porosität des Zementsteins steigt.

Das Ziel dieses Projektes war es, die Auswirkungen einer nicht fachgerecht durchgeführten Nachbehandlung zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden zunächst passende Methoden zur Untersuchung der Betonoberflächenqualität ausgewählt und diese an unterschiedlich nachbehandelten Betonprobewürfeln unter Laborverhältnissen getestet. Diese Laboruntersuchungen zeigten für die gewählten Methoden zufriedenstellende Ergebnisse und erlaubten die Unterschiede zwischen den verschiedenen Nachbehandlungen aufzuzeigen. Im weiteren Verlauf dieses Projektes wurden die am aussichtsreichsten eingestuften Messmethoden an Bauteilen von im Bau befindlichen Stahlbetonstrukturen getestet. Die zu untersuchenden Bauteile wurden dabei in Bereiche unterteilt, die sich in Nachbehandlungsdauer und Lage unterschieden. Auch hier lieferten die Messungen deutliche Unterschiede zwischen den Nachbehandlungsarten.

Im Rahmen der abschließenden Auswertung konnten baustellentaugliche Methoden zur Beurteilung charakterisiert werden. Die Messergebnisse der vorgeschlagenen Methoden dienen als erste Referenzwerte zur Überprüfung der Nachbehandlungsgüte.

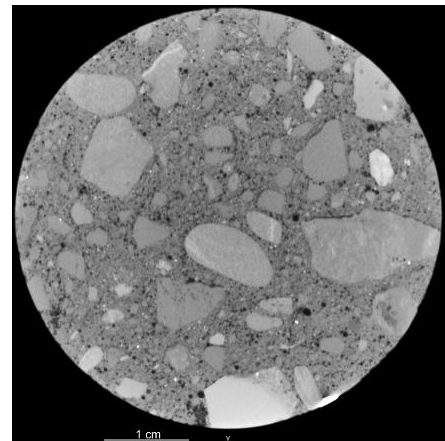


ABB 1. Oberflächennahe Porenverteilung eines Bohrkerns bei guter Nachbehandlung

Facts:

- Laufzeit: 11/2018-12/2020
- Forschungskonsortium: Smart Minerals GmbH (M. Peyerl, C. Bos, P. Boisits), BOKU (A. Strauss, L. Ptacek)
- 6 Arbeitspakete
- 5 Meilensteine
- Gesamtkosten ca. € 220 000,-
- Projektziel: Zurverfügungstellung von Vorgehensweisen und Nachweisverfahren zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte von Stahlbetonbauteilen

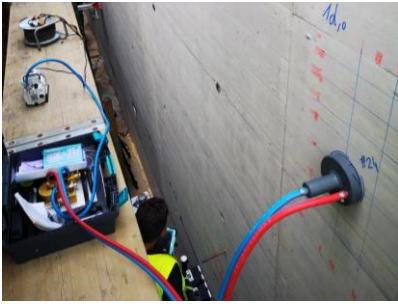


ABB 2. Ermittlung der Gaspermeabilität zur Bestimmung der Nachbehandlungsgüte

Kurzzusammenfassung

Problem

Die Nachbehandlung von Beton ist in hohem Maße für die Qualität von Betonbauteilen verantwortlich, da der Zement nur hydratisieren kann solange genügend Feuchtigkeit vorhanden ist. Durch fehlende Nachbehandlung trocknet die Betonrandzone aus und die oberflächennahen Bereiche weisen nur eine geringe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen auf.

Gewählte Methodik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens OptiNB wurden Zusammenhänge zwischen verschiedensten zerstörenden, zerstörungsfreien und sensorbasierten Beurteilungsverfahren und der Nachbehandlungsqualität im Rahmen von Labor- und Feldversuchen hergestellt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigten, dass die meisten untersuchten Methoden zufriedenstellende Ergebnisse liefern und eindeutige Unterschiede zwischen den verschiedenen Nachbehandlungen aufzeigen können. Auf Basis der Ergebnisse können speziell die Messung der Gaspermeabilität, des elektrischen Widerstandes sowie die Hyperspektralanalysen als vielversprechende Methoden zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte empfohlen werden.

Schlussfolgerungen

Das Projekt konnte einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Güte der Nachbehandlung und der messbaren Materialkennwerte aufzeigen, wodurch in Zukunft eine baustellentaugliche Überprüfung der Nachbehandlungsqualität ermöglicht wird.

English Abstract

The curing of concrete has great influence on the quality of concrete building blocks, since the capillary pores of the outer concrete surface dry out due to a lack of curing. Throughout the research project OptiNB correlations between curing quality of concrete and several non-destructive testing methods for surface quality could be drawn. It was determined that some of these methods are very useful to evaluate the quality of concrete curing und could be used to control the curing quality on the building site.

Impressum:

Bundesministerium für Klimaschutz

DI Dr. Johann Horvatits
Abt. IV/ST 2 Technik und
Verkehrssicherheit
johann.horvatits@bmk.gv.at

DI (FH) Andreas Blust
Abt. III/14 Mobilitäts- und
Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmk.gv.at
www.bmk.gv.at/

ÖBB-Infrastruktur AG

Dr. Thomas Petraschek
Stab Unternehmensentwicklung
Forschung & Entwicklung
thomas.petraschek@oebb.at
www.oebb.at

ASFINAG

Ing. DI (FH) Thomas Greiner, MSc MBA
Konzernsteuerung
Strategie Owner Innovation
thomas.greiner@asfinag.at
www.asfinag.at

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at
www.ffg.at

Dezember, 2020

Optimale NachBehandlung für verbesserte Qualität bei der Bauausführung - OptiNB

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017
(VIF 2017)

Dezember 2020



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Smart Minerals GmbH
Franz-Grill-Straße 9
1030 Wien


TU WIEN smartminerals
science to design the future

Institut für konstruktiven Ingenieurbau
Universität für Bodenkultur
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

 **FFG**
Forschung wirkt.

Formale Vorgaben:

Einrichtung der Seite	Abstand in cm
Oben:	3,5
Unten:	3
Links:	3
Rechts:	2,5

Formatvorlage	Schriftart	Schriftgröße
Hauptkapitelüberschriften	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Überschriften	Arial, fett	13pt
Standardtext	Arial, 1,5-zeilig, Blocksatz	11pt
Überschriften von Verzeichnissen	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Inhaltsverzeichnis Abbildungsverzeichnis Tabellenverzeichnis Literaturverzeichnis	Arial	12pt
Fußnotenzeichen	Arial, hochgestellt	10pt
Fußnotentext	Arial	10pt
Untertitel von Tabellen und Abbildungen	Arial, fett	10pt
Quelle von Tabellen und Abbildungen	Arial	8pt
Seitennummerierung	Arial, zentriert, Seitenende	10pt

Optimale NachBehandlung für verbesserte Qualität bei der Bauausführung - OptiNB

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2017)

AutorInnen:

Dr. Clémence BOS (SMG)

DI Lisa MOLD (BOKU)

Philipp BOISITS (SMG)

Dr. Martin PEYERL (SMG)

Prof. Alfred STRAUSS (BOKU)

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Smart Minerals GmbH

Institut für konstruktiven Ingenieurbau (IKI) - Universität für Bodenkultur

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	7
2.	LITERATURSTUDIE	7
1.	Relevanz und Einflussparameter für die Nachbehandlung	7
a.	Vorzeitiges Austrocknen.....	8
b.	Rolle der Temperatur	12
2.	Durchführung der Nachbehandlung.....	13
3.	Dauer der Nachbehandlung	14
4.	Folge einer unzureichenden Nachbehandlung	14
5.	Mögliche Untersuchungen für die Effektivität der Nachbehandlung.....	16
a.	Laboruntersuchungen	17
b.	Baustellentaugliche Untersuchungen	18
c.	Sensorbasierte Analysemethoden des Hydratationsprozesses und der Betonqualität.....	19
3.	LABORUNTERSUCHUNGEN.....	24
1.	Einfluss der Nachbehandlung auf die Betondauerhaftigkeit.....	27
2.	Beurteilung der Nachbehandlungsgüte	31
3.	Beurteilung der Baustellentauglichkeit.....	43
4.	Analyse der Laboruntersuchungen.....	46
4.	ALTERNATIVE SENSORBASIERTE BEURTEILUNGSMÖGLICHKEITEN.....	46
1.	Labortests	47
2.	Analyse der alternativen sensorbasierten Beurteilungsmöglichkeiten.....	58
5.	ÜBERLEITUNG IN DIE PRAXIS – BAUSTELLENVERSUCHE	59
1.	Wahl der Messmethoden	59
2.	ÖBB Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf.....	60
3.	ASFINAG Absatzbecken Göttlesbrunn.....	77
6.	GESAMTBEWERTUNG DER METHODEN	84

1. Gaspermeabilität	84
2. Elektrischer Widerstand	87
3. Rückprallhammer	89
4. Hyperspektralanalysen	90
5. Ultraschall	92
6. Digitalmikroskop	94
7. MODELLTECHNISCHE ERFASSUNG	95
1. Bewertung der Nachbehandlungsqualität	95
2. Bayes'sches Updating	103
3. Prozessplan	105
8. PRÜFEMPFEHLUNG	107
9. CONCLUSIO	109
10. LITERATUR	111
ANHANG 1	114
ANHANG 2	119

1. EINLEITUNG

Aufgrund von fehlendem Wissen, erforderlichen Bauabläufen zur Einhaltung des Bauzeitplanes, sowie fehlenden Kontrollmöglichkeiten, wird der erforderlichen Nachbehandlung meist nicht die entsprechende Beachtung geschenkt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens OptiNB sollen Zusammenhänge zwischen etablierten Beurteilungsverfahren, mit oftmals zerstörenden oder nicht vor Ort durchführbaren Prüfungen, und Alternativen, wenn möglich zerstörungsfrei, sensorbasiert und lokal anwendbar, hergestellt werden. Des Weiteren erfolgt auch die Erprobung indirekter Möglichkeiten zur Bewertung der Nachbehandlung und des fehlerfreien Hydratationsverlaufs. Das Ziel des gegenständlichen Projektes ist die Ermittlung von praxisorientierten, zuverlässigen und einfach umsetzbaren Kennwerten, Vorgehensweisen und Nachweisverfahren für die Nachbehandlungsgüte.

2. LITERATURSTUDIE

1. Relevanz und Einflussparameter für die Nachbehandlung

Die im Normativen Umfang beschriebenen Vorgaben zur Nachbehandlung haben zum Ziel eine ausreichende Hydratation des Zements an der Betonoberfläche zu gewährleisten. Diese wiederum beeinflusst positiv die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Betons. So eine, im Hinblick auf die angestrebten Eigenschaften des Betons, entsprechend vollständige Hydratation, ist maßgeblich durch die Faktoren Feuchtigkeit und Temperatur gesteuert. Generell erhält ein korrekt nachbehandelter Beton ein dichtes Gefüge, eine planmäßige Festigkeit und weist keine Risse an der Oberfläche auf [2]-[3].

Die Nachbehandlung soll folgendes verhindern:

- Eine (vorzeitige) Austrocknung der Betonrandzone.
- Das Auswaschen der oberflächennahen Schicht durch Regen oder strömendes Wasser.
- Ein zu rasches Abkühlen in den ersten Tagen.
- Zu niedrige und zu hohe Temperaturen.
- Ein zu frühes Schwinden, somit die Entstehung von Fröhschwindrissen.

Dies wird erreicht indem man den Wasserverlust des Betons im Anfangsstadium seiner Hydratation infolge von Verdunstung über seine Oberfläche begrenzt oder verhindert und die Betontemperatur nicht zu stark absinken oder steigen lässt.

Eine nicht fachgerecht durchgeführte Nachbehandlung führt dazu, dass im Beton, aufgrund des Austrocknens der oberflächennahen Kapillarporen, die Hydratation ausgehend von der Randzone nach Innen zum Stillstand kommt. Dies resultiert in einer erhöhten Porosität der oberflächennahen Betonschichten, was die Festigkeit des Zementsteins vermindert und das Eindringen von Chlorid-Ionen und Kohlendioxid (Karbonatisierung) erleichtert [2]-[3], [5], [13], [16].

Folgendes lässt sich aufgrund einer unzureichenden Nachbehandlung beobachten:

- Eine Zunahme der Porosität, bei gleichzeitiger Abnahme der Dichte und Festigkeit in der Betonrandschicht.
- Eine Beschleunigung der Karbonatisierung, hervorgerufen durch das poröse Gefüge.
- Eine Reduktion des Frostwiderstands.
- Eine Beschleunigung des Eindringens von Chlorid-Ionen.
- Eine Verringerung des Verschleißwiderstandes.

Im Weiteren werden die wichtigsten Aspekte der Nachbehandlungsverfahren und deren Gründe erläutert und ihre Auswirkungen auf den jungen Beton näher beschreiben.

a. Vorzeitiges Austrocknen

Aufgrund des Umstandes, dass sich Hydratationsprodukte des Zements nur in wassergefüllten Zwischenräumen des Betons bilden, ist es erforderlich ein entsprechendes Feuchteangebot für den jungen Beton über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten. Meist befindet sich - aus Gründen der Verarbeitbarkeit - eine Wassermenge in der Betonmischung, die leicht über der für die Hydratation notwendigen (W/B-Wert von etwa 0,40) liegt. Jedoch kommt es nach dem Ausschalen der Betonteile zu einer Feuchteabgabe an den Oberflächen, die diese Wassermenge dort reduziert. Diese Wasserabgabe ist in erster Linie von den Umwelteinflüssen abhängig, wie in Abbildung 1 ersichtlich ist. Man erkennt, dass die Austrocknung der Randzone im Wesentlichen mit steigender Luft- und

Betontemperatur, mit sinkender relativer Luftfeuchtigkeit der Umgebung und mit der Windgeschwindigkeit zunimmt. Weiters spielen Faktoren wie das Wasserrückhaltevermögen des Frischbetons, sowie Bauteilabmessungen eine wichtige Rolle [2]-[3].

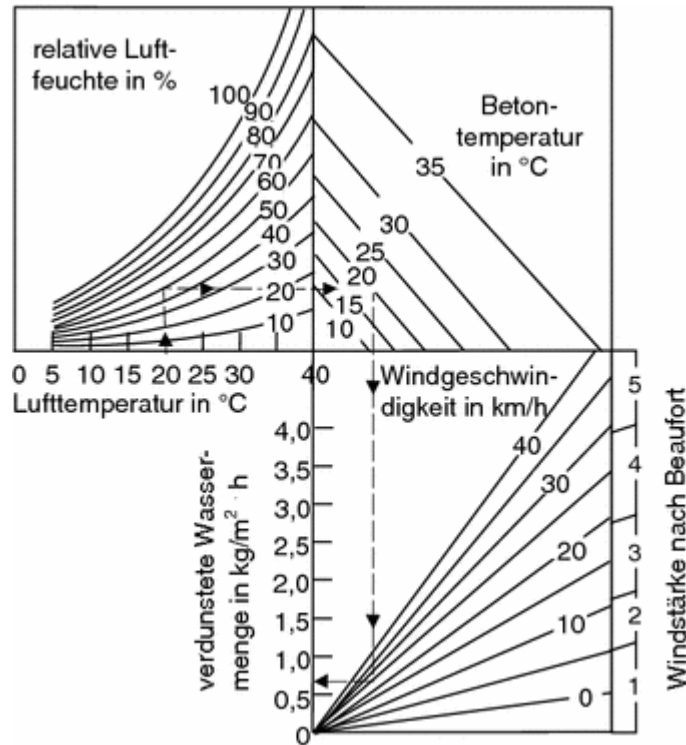


Abbildung 1: Wasserverluste des jungen Betons in Abhängigkeit von verschiedenen Umweltfaktoren [1]

Die Faktoren Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Windgeschwindigkeit bestimmen die Feuchteabgabe der oberflächennahen Bereiche der Bauteile - der Betonrandzone. Die Tiefe und die Qualität dieser Randzone sind maßgebend für die Dauerhaftigkeit des Bauteils, somit beispielsweise den Verschleißwiderstand, die Dichtigkeit, den Frostwiderstand und die Karbonatisierung. Der Grund dafür ist, dass die meisten betonzerstörenden chemischen und physikalischen Einwirkungen mit dem Eindringen von Gasen oder wässrigen Lösungen über die Betonoberfläche verbunden sind. Die weiter innen liegenden Bereiche, sind hingegen vor allem für die Tragfähigkeit verantwortlich. Die Festlegungen für die Anforderungen an die Betonrandzone, die den Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, sind in den Expositionsklassen zu finden [2]-[4].

Abbildung 2 zeigt einen Schnitt durch die oberflächennahen Schichten eines Bauteils aus Stahlbeton. Auf dieser Abbildung ist auch die Verteilung der Kapillarporen ($0,1-100 \mu\text{m}$) ersichtlich [3]. Diese Kapillarporen sind ganz wesentlich für alle Dauerhaftigkeitsaspekte,

da der Transport der Substanzen, die den Beton angreifen, über diese stattfindet, wie im weiteren Verlauf genauer erläutert wird [3], [6].

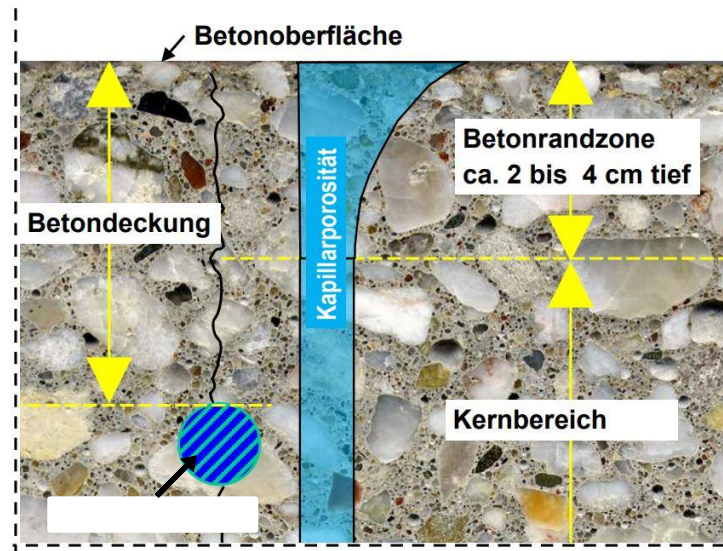


Abbildung 2: Schnitt durch oberflächennahe Schichten von einem Stahlbetonbauteil, angepasst [4]

Der Wassertransport aus dem Kernbereich in die Betonrandzone wird vom W/B-Wert des Betons bestimmt. Es zeigte sich, dass dieser bei steifen Betonen schon während des ersten Tages nach dem Ausschalen zum Stillstand kommt. Hingegen bleibt die kapillare Leitfähigkeit besonders bei höheren W/B-Werten auch noch am folgenden Tag erhalten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei Betonen mit hohen W/B-Werten die Luftfeuchtigkeit im Inneren im Zuge der Hydratation langsamer abnimmt, da genügend große, mit Wasser gefüllte Poren vorhanden sind. Somit reagieren diese Betone weniger empfindlich auf eine Austrocknung.

Wenn jedoch der Wassertransport aus dem Inneren - bei zu starker Austrocknung an der Oberfläche - während der Hydratation unterbrochen wird, kommt die Hydratation in der Betonrandzone zum Stillstand. Mit der Konsequenz, dass dadurch die Kapillarporosität bei gleichzeitiger Herabsetzung der Dichtigkeit hin zur Oberfläche erhöht wird (Entstehung luftgefüllter Kapillarporen). Diese Erhöhung der Porosität hin zur Oberfläche ist in Abbildung 2 dargestellt [4].

Einen Überblick über den Zusammenhang zwischen W/B-Wert, Hydratationsgrad, Kapillarporengehalt und Wasserdurchlässigkeit zeigt Abbildung 3 [2]-[4], [8].

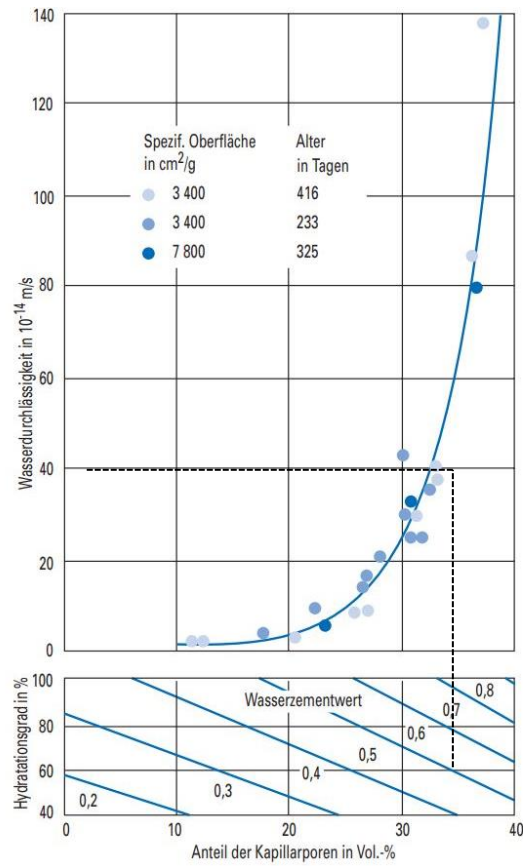


Abbildung 3: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit der Kapillarporosität und vom Wasserzementwert [6]

Die Aufteilung der verschiedenen Porenanteile im hydratisierten Zementstein ist in Abbildung 4 ersichtlich. Weiters ist der steigende Anteil an Kapillarporen mit höher werdendem W/B-Wert zu sehen.

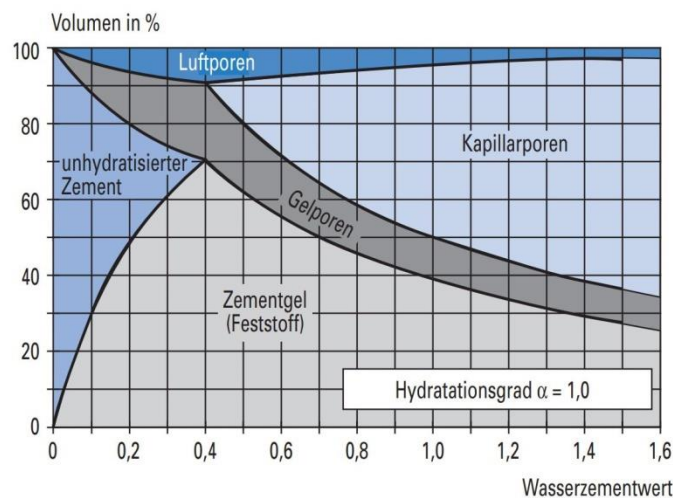


Abbildung 4: Zusammensetzung des Zementsteins [6]

Ein hoher Hydratationsgrad, besonders in der Betonrandzone ist von großer Bedeutung, da dadurch mehr Gelporen und weniger Kapillarporen im Zementstein vorhanden sind, somit wird das Gefüge dichter und weniger durchlässig. Aufgrund ihres kleineren Durchmessers beeinflussen die Gelporen die Durchlässigkeit und somit den Transport der schädigenden Substanzen in einem viel geringeren Ausmaß als die Kapillarporen [4]-[5], [8]-[9].

Die Austrocknung des Betons in dieser Randzone hängt weiters von der chemischen Zusammensetzung des Klinkers ab. Es zeigte sich beispielsweise, dass schnell erhärtende Zemente mit einer höheren spezifischen Oberfläche nachbehandlungs-empfindlicher sind, was dadurch erklärt werden kann, dass durch die höhere Packungsdichte das Wasser aus dem Betoninneren nur schwer an die austrocknende Betonoberfläche gelangen kann [5], [8], [12].

b. Rolle der Temperatur

Frischbetontemperaturen von über 30 °C können dazu führen, dass der Beton schneller ansteift und die in der Betonmischung vorhandenen Zusatzmittel anders reagieren. Deshalb ist laut ÖNORM B 4710-1 eine maximale Frischbetontemperatur von 22 oder 27 °C, je nach Wärmeentwicklungs-kategorie, einzuhalten. Diese darf nur überschritten werden, wenn eigene auf diese Temperatur ausgelegte Eignungsprüfungen vorliegen. Beim Zusammenspiel mehrerer ungünstiger Faktoren, wie starker Sonneneinstrahlung und hoher Lufttemperatur, kann es bei Betontemperaturen von über 65 °C zu einer schädlichen Ettringitbildung kommen. Hohe Temperaturen führen weiters zu einer Herabsetzung der Festigkeit und eine starke Sonneneinstrahlung kann zu Rissen an der Oberfläche führen. Aus diesem Grund sollte vor allem im Sommer die Schalung, wie auch der Beton nach dem Ausschalen, sofort gekühlt werden. Jedoch ist darauf zu achten den Beton nicht zu intensiv zu kühlen, da eine zu starke Abführung der Hydratationswärme auch im Sommer zu Gefügeschäden führen kann. Diese entstehen aufgrund von Eigenspannungen im Inneren des Betons. [2]-[3], [6]. Auch gegen zu niedrige Temperaturen muss der junge Beton geschützt werden, da dabei der Beton langsamer erhärtet. Weiters kommt es zu Gefügeschäden, wenn die Temperatur des Betons unter 0 °C absinkt und dieser noch keine Mindestfestigkeit erreicht hat [2]-[3], [6], [11].

2. Durchführung der Nachbehandlung

Der positive Einfluss einer fachgerechten Nachbehandlung auf die interne relative Luftfeuchtigkeit, die für eine ausreichende Hydratation des Zements der Betonrandzone notwendig ist, ist beispielhaft in Abbildung 5 ersichtlich. Es zeigt sich, dass der Einsatz eines Nachbehandlungsmittels die Tiefe der Randzone, in diesem Beispiel von ca. 4 auf 1 cm, reduziert und hiermit die Dauerhaftigkeit des Betonbauteils deutlich verbessern kann [4], [8]-[9].

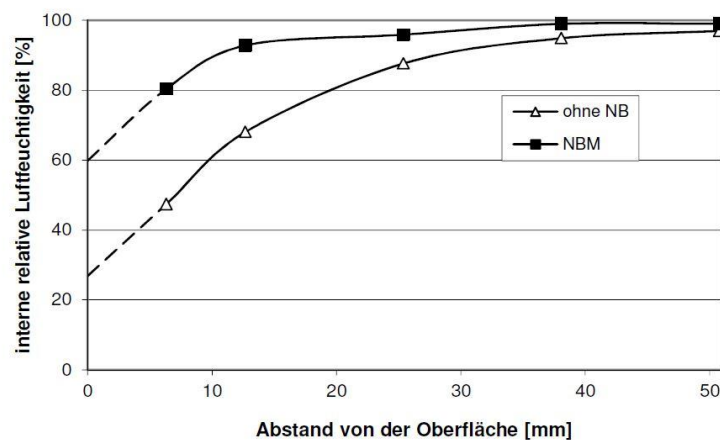


Abbildung 5: Gemessene relative Luftfeuchtigkeit im Alter von 7 Tagen bei unterschiedlichen Nachbehandlungsbedingungen (mit und ohne Nachbehandlung NBM) [7]

Das Aufbringen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln (s. Abbildung 5) zählt, zusammen mit dem Belassen in der Schalung und dem Abdecken mit Folien zu den wasserhaltenden Maßnahmen der Nachbehandlung. Diese Maßnahmen begrenzen einen möglichen Verlust des Zugabewassers durch einen Verdunstungsschutz.

Auch wasserzuführende Maßnahmen schützen den jungen Beton gegen Austrocknen, wie zum Beispiel die Lagerung in Wasser, das kontinuierliche Besprühen mit Wasser und das Auflegen wasserspeichernder Abdeckungen [2]-[3], [6].

Die Maßnahmen für den Schutz gegen zu hohe Temperaturen sind grundsätzlich gleich zu jenen gegen das Austrocknen. Das aufgebrauchte Wasser führt zu einer Kühlung des Betons durch die Verdunstungskälte. Somit ist das Besprühen und Berieseln mit Wasser die zielführende Maßnahme, um zu hohe Temperaturen während der Hydratation des Betons zu vermeiden [2]-[3], [6].

Bei zu niedrigen Temperaturen muss in der Regel die Frischebetontemperatur angehoben werden (siehe Vorgabe dazu in der ÖNORM B 4710-1 [11]) und der Beton ist bis zum Erreichen der Gefrierbeständigkeit (etwa 3 N/mm²) zu schützen. Als Abhilfe werden insbesondere flächenartige Bauteile mit wärmedämmenden Abdeckungen geschützt, um eine zu starke Abkühlung zu vermeiden.

3. Dauer der Nachbehandlung

Die Dauer der Nachbehandlung richtet sich nach der mittleren Tagestemperatur, der Betonsorte und der Festigkeitsentwicklungsklasse. Sie ist so zu wählen, dass es auch in den oberflächennahen Bereichen zu einer ausreichenden Hydratation des Betons kommt. Die in der Tabelle 1 ersichtlichen Mindest-Nachbehandlungszeiten gelten für mittlere Tagestemperaturen von 12 °C. Bei niedrigeren Temperaturen muss die Nachbehandlung entsprechend ÖNORM B 4710-1 verlängert werden. Die in der Tabelle 1 ersichtlichen Festigkeitsentwicklungsklassen ES, EM, EL und E0 geben das Verhältnis der Festigkeit nach zwei Tagen zu der nach 28 Tagen an. Die Festigkeitsentwicklungsklassen reichen von ES – schnell bis hin zu E0 – sehr langsam. Weiters hängt die Nachbehandlung von der Expositionsklasse ab, was in der Spalte Betonsorte in der Tabelle 1 zu sehen ist [11].

Tabelle 1: Mindest-Nachbehandlungszeiten laut ÖNORM B 4710-1 [11]

Zulässige Betonsorte	Mindestdauer der Nachbehandlung bei Festigkeitsentwicklungsklasse ^a			
	ES	EM	EL	E0
X0	12 h	12 h	24 h	2 Tage
Sämtliche Festigkeitsklassen, XC1, XC2, XC3, XW1, XF1, XA1, XM1	2 Tage	3 Tage	4 Tage	7 Tage
Alle anderen Betonsorten	3 Tage	7 Tage	10 Tage ^b	14 Tage

4. Folge einer unzureichenden Nachbehandlung

Die Betonrandzone hat einen wesentlichen Einfluss auf die Karbonatisierungstiefe, also die Absenkung des pH-Wertes des Zementsteins durch die aus der Luft eindringende Kohlensäure. Die Karbonatisierung führt dazu, dass die Bewehrung aus Stahl nicht mehr durch die hohe Alkalität des umgebenden Betons vor Korrosion geschützt ist und zu rosten beginnt. Durch die dabei stattfindende Volumsvergrößerung kommt es zu weitreichenden Schäden, wie dem Absprengen der Betonüberdeckung. Die Karbonatisierungstiefe hängt

von der Betonzusammensetzung, den Umweltbedingungen und der Nachbehandlung ab. Je weniger die Randzone hydratisiert ist - aufgrund fehlender Nachbehandlung und Trockenlagerung - desto permeabler ist der Beton und desto tiefer reicht die Karbonatisierungsfront. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6 ersichtlich [9].

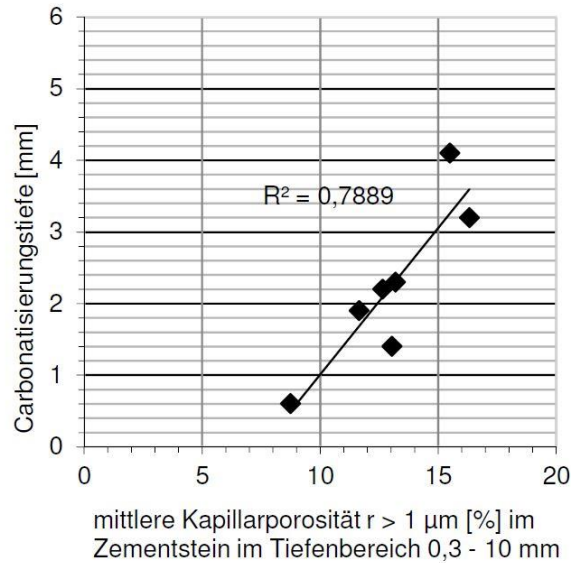


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Kapillarporosität und Karbonatisierungstiefe nach 28d [9]

Ein ähnlicher Zusammenhang gilt für den Chlorideindringwiderstand. Dieser wirkt einer Bewehrungskorrosion und einem Frost-Tausalz-Angriff entgegen. Ein höherer Chloridwiderstand kann auf eine höhere Dichtigkeit des Zementsteins (wie zum Beispiel durch den Einsatz von Hüttensand oder eine Reduzierung des W/B-Werts) zurückgeführt werden, vgl. [10]. In Abbildung 7 lässt sich der Zusammenhang zwischen den Faktoren W/B-Wert und Zementzusammensetzung erkennen [6].

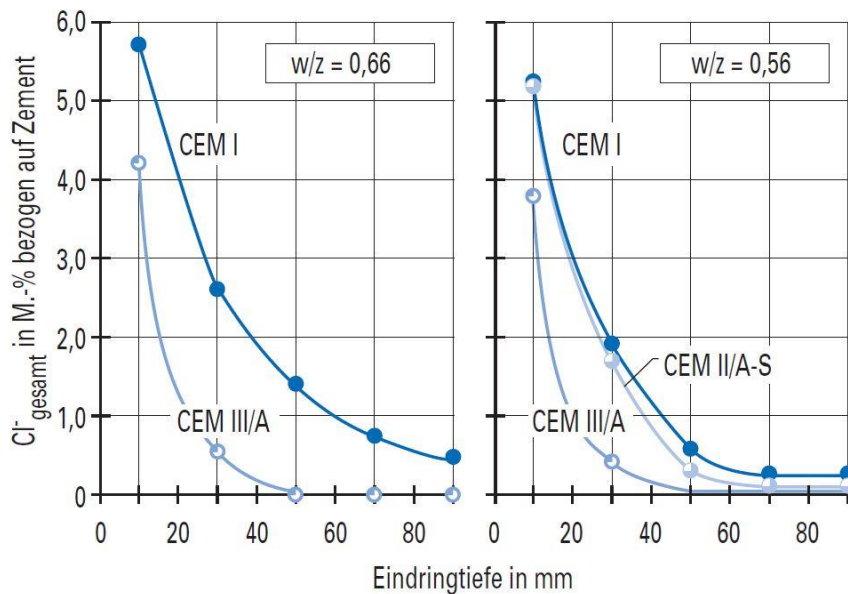


Abbildung 7: Chlorideindringtiefe in Abhängigkeit von Zementart und W/B-Wert [6]

5. Mögliche Untersuchungen für die Effektivität der Nachbehandlung

Die Effektivität von Nachweisverfahren für die Nachbehandlung wurde in [18] untersucht und subjektiv bewertet. Tabelle 2 fasst die Verfahren und die Bewertung zusammen. Dabei bedeuten die Zahlen, dass die jeweilige Methode, gemäß angegebener Anzahl an Literaturstellen, als geeignet (+), bzw. als nicht geeignet (-) einzustufen sind. Die für die Bewertung der Nachbehandlungsgüte am vielversprechendsten Verfahren wurden fett hervorgehoben.

Tabelle 2: Bewertung von Nachweisverfahren der Nachbehandlung [18]. Die vielversprechendsten Verfahren sind fett hervorgehoben

Druckfestigkeit (8+2-)	Hydratationsgrad (4+0-)	Karbonatisierungstiefe (10+0-)
Haftzugfestigkeit (2+2-)	Wasseraufnahme (1+0-)	Gaspermeabilität (10+0-)
Rückprallhammer (2+2-)	Eindringvermögen (2+0-)	Frost-Tausalz-Widerstand (1+0-)
Pendelhammer (1+0-)	Kapillares Saugen (3+0-)	Abwitterung (2+0-)
Nadeleindringversuch (0+1-)	Sättigungsgrad (1+0-)	Betontemperatur (1+0-)
Kratzversuch (0+1-)	Wasserabgabe (8+0-)	Chlorideindringen (1+0-)
Verschleißfestigkeit (0+1-)	Gewichtsverlust (1+0-)	
Elastizitätsmodul (2+0-)	Porosität (MIP) (5+0-)	

a. Laboruntersuchungen

Der Hydratationsgrad des Betons an der Oberfläche wäre ein sehr einfacher Parameter zur Bestimmung der Effektivität der Nachbehandlung (s. Tabelle 2). Allerdings gibt es keine Methode um den Hydratationsgrad absolut messen zu können. Dieser Parameter kann daher leider nicht weiterverfolgt werden.

Vor allem bei großen Proben und nicht so extremen Austrocknungsbedingungen [17] stellte die Nachbehandlung nur einen geringen Einfluss auf die *Druckfestigkeit* dar. Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte bei allen Versuchen zur Ermittlung der Festigkeitsklassen der unterschiedlichen untersuchten Betonarten.

Die *Wasserverdunstung* der Probekörper kann bei Laborproben anhand des Gewichtsverlusts gemessen werden [17]-[18]. Dabei wird beobachtet, dass die höchste Verdunstung innerhalb der ersten 36 Stunden stattfindet und, dass durch den absoluten Wasserverlust nach 24 Stunden die Qualität der Nachbehandlung und die daraus resultierenden Festbetoneigenschaften sehr gut bewertet werden können [17].

Die *Kapillarporosität* in der Randzone nimmt mit besserer Nachbehandlung ab [14]. Dabei bringt eine Nachbehandlung mit Nachbehandlungsmitteln ähnlich gute Ergebnisse wie eine Nachbehandlung durch Lagerung bei 20 °C und 100 % Luftfeuchtigkeit. Durch „Mercury Infiltration Porosity“ (MIP) Messungen wurde gezeigt, dass die Porosität der Proben, die im Wasser nachbehandelt wurden, deutlich kleiner ist als bei den Proben die bei 20 °C ohne Nachbehandlung gelagert wurden [19].

Der *Karbonatisierungswiderstand* bei natürlichen CO₂-Konzentrationen sinkt mit der Zunahme der Größe und der Anzahl der Kapillarporosität an der Oberfläche [14]. Auch Younsi et al. haben gezeigt, dass die Karbonatisierungstiefe bei 50 % CO₂ mit der Wasserverdunstung zunimmt [19]. Sie zeigten auch, dass die Nachbehandlung bei langsamer erhärtenden Betonen mit einer feineren Porenstruktur besonders wichtig für einen hohen Karbonatisierungswiderstand ist. Es wurde gezeigt, dass eine lange Nachbehandlungsdauer (mehr als drei Tage) vor allem für Betone mit hohem W/B-Wert zur Erhöhung des Karbonatisierungswiderstandes wichtig ist [20]-[21].

Der *Chloriddiffusionskoeffizient* hängt vor allem im jungen Alter von der Nachbehandlung ab [15], [22]-[23]. Je trockener, wärmer und/oder kürzer die Nachbehandlung, desto poröser ist die Betonoberfläche und desto höher die Chloriddiffusion.

b. Baustellentaugliche Untersuchungen

Die Ermittlung der *Gaspermeabilität* nach Torrent wurde in die Schweizer Norm SIA 262/1:2019 [24] als ergänzende Spezifikation von Betonen aufgenommen. In Untersuchungen wurde ein direkter Zusammenhang zwischen der Gaspermeabilität der Randzone und dem Wasserverlust des Probekörpers innerhalb des ersten Tages festgestellt [17]. Die Gaspermeabilität kann als Maß für die Porosität und Permeabilität des Betons herangezogen werden [17] und ist daher ein Indikator für seine Dauerhaftigkeit gegenüber Bewitterung, chemischen Angriffen, Abrieb und weiteren Abbauprozessen [25]. Die Prüfung der Gaspermeabilität erfolgt bei trockenen Proben bei einem Anfangsdruck von < 20 mbar. Dabei wird der Druckabfall aufgrund der durch den Beton laminar einströmenden Luft in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Aus der zeitlichen Veränderung des Drucks und weiteren Kenngrößen wird die Luftpermeabilität k_T mit der Einheit 10^{-16} m^2 berechnet [24].

Die Nachbehandlung beeinflusst indirekt, durch die Größe und Anzahl der Kapillarporen, die Wasserdurchlässigkeit der Betonoberfläche. Es wurde zum Beispiel gezeigt, dass ab einem Kapillarporengehalt von ca. 20 bis 25 % im Zementstein die Wasserdurchlässigkeit stark ansteigt [26].

Die *Wasserdurchlässigkeit* kann anhand des in der ONR 23303:2010 beschriebenen Verfahrens oder durch die Wasseraufnahme nach Karsten gemessen werden. Baustellentauglich ist nur die letztere Methode. Der ermittelte Wasseraufnahme-koeffizient¹ beschreibt die aufgenommene Wassermenge (in kg oder l) pro Fläche über eine gewisse Zeit. Die Wassermenge wird dadurch gemessen, dass ein mit Wasser gefülltes Röhrchen mit Dichtungsmasse an dem Material befestigt wird und anhand der Messskala die Wasseraufnahme der Wand pro Zeiteinheit ermittelt wird. Dieses Verfahren kann vor allem für Vergleichsmessungen herangezogen werden².

¹ https://www.uni-due.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/nh_fe_wasserauf1.htm, abgerufen am 16.09.2019

² <https://www.bauemotion.de/baulexikon/karstensches-pruefroehrchen/15375157/>, abgerufen am 17.09.2019

c. Sensorbasierte Analysemethoden des Hydratationsprozesses und der Betonqualität

- **Infrarot**

Die Infrarotkamera dient zur Bildgebung im Spektralbereich der thermalen Strahlung. Wie in [27] beschrieben, wird die Infrarotstrahlung dabei in ein sichtbares Bild umgewandelt. Da zwischen der elektromagnetischen Strahlung und der Temperatur ein Zusammenhang besteht, kann auch die Temperatur berechnet werden.

Bei zu starken Temperaturschwankungen entstehen Spannungen im Beton und somit Risse auf der Betonoberfläche. Um Risse am Beton zu vermeiden, soll sich der frische Beton möglichst wenig erwärmen und nach der Hydratationswärmeentwicklung nur langsam abkühlen. Zu starke Temperaturschwankungen lassen sich durch geeigneten Zement, eine angemessene Nachbehandlung und eine entsprechende Betonzusammensetzung verhindern [28]. In [29] wurde die Festigkeitsentwicklung von Beton mit der Hydratationswärmeentwicklung in Beziehung gesetzt. Es konnte bestätigt werden, dass die Risswahrscheinlichkeit in direktem Zusammenhang mit der erreichten Höchsttemperatur steht.

Die Beobachtung der Oberflächentemperatur mittels Thermokamera ermöglicht es laut [50] auf die Festigkeitsentwicklung von frischem Beton zu schließen. Drastische Änderungen der Oberflächentemperaturen finden allerdings nur in den ersten 24 Stunden nach der Betonierung statt.

Die Intensität und der zeitliche Verlauf der Temperaturverteilung sind mit der Hydratation korreliert und können somit Aufschluss über die Nachbehandlung geben.

- **Hyperspektralanalysen**

Der Mensch kann nur elektromagnetische Wellenlängen im Bereich von 380 bis 740 nm wahrnehmen. Das menschliche Gehirn kann also nur das elektromagnetische Spektrum in diesem Bereich analysieren, um Informationen über chemische oder physikalische Materialeigenschaften zu erhalten. Mit der hyperspektralen Bildgebung kann ein größerer Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufgenommen und analysiert werden. Somit können detaillierte Informationen zu Materialeigenschaften erhalten werden. Diese Technologie wird in vielen Arbeitsbereichen wie der Landwirtschaft, der Lebensmittelverarbeitung, der Medizin, der Astronomie usw. eingesetzt. Zudem wurden bereits diverse Untersuchungen zur Identifikation von Betoneigenschaften mithilfe dieser Technologie durchgeführt.

In [30] wurden die Karbonatisierung von Beton sowie die Karbonatisierungstiefe untersucht. Normaler Beton und degradierter Beton zeigten Unterschiede in ihren spektralen Signaturen. Obwohl die Tiefe der Degradation in den spektralen Signaturen nicht offensichtlich erfasst werden konnte, wurde die Beziehung zwischen der Ableitung erster Ordnung des Reflexionsgrad-Wellenlängen-Graphen und der Tiefe der Degradation aufgezeichnet.

Die Auswirkungen der Betonfestigkeit auf die hyperspektralen Eigenschaften von Beton wurden sowohl im Labor als auch in situ untersucht [31]. Acht Proben mit verschiedenen Druckfestigkeiten zeigten unterschiedliche Aspekte in ihren spektralen Signaturen. Außerdem wurden Versuchsergebnisse an realen Bauwerken wie der Dae-Jongchun-Brücke und der der Yangbuk-Brücke aufgezeichnet. Trotz geringfügiger Differenzen in den Ergebnissen der Labor- und in-situ-Tests konnten unterschiedliche Druckfestigkeiten identifiziert werden.

In [32] wurden Unterschiede zwischen den spektralen Signaturen von Betonproben mit verschiedenen Nachbehandlungsarten und unterschiedlicher Zusammensetzung erkannt. Die Änderung der spektralen Signaturen aufgrund des Wasser- und Chlorgehaltes von Beton wurde ebenfalls untersucht [33]. Die Untersuchung von Zementmörtel mit unterschiedlichen Zementsorten und Chloridgehalt hat gezeigt, dass NIR (nahes Infrarot)-Spektren Informationen über verschiedene Substanzen wie Chloridgehalt, Feuchtigkeitsgehalt usw. enthalten.

In einigen Experimenten wurde untersucht, ob es möglich ist, Betone anhand ihres W/B-Wertes nach ihren spektralen Signaturen zu klassifizieren [34]. Proben mit drei verschiedenen W/B-Werten (0,50; 0,65 und 0,80) wurden präpariert. In diesem Versuch trat eine Fehlklassifizierung nur in der Betonklasse W/B 0,65 auf. Selbst bei dieser Fehlklassifizierung wurden alle Mischungsgruppen mit einer Genauigkeit von 89 % voneinander getrennt, die Proben mit W/B-Werten von 0,50 und 0,80 wurden mit 100 % Erfolg klassifiziert.

Die Nachbehandlungsqualität sowie der Wassergehalt haben einen großen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung von Beton. Im Zuge der Hyperspektraluntersuchungen sollte festgestellt werden, ob anhand der Erhöhung des Reflexionsgrades über einen bestimmten Wellenlängenbereich auf die Nachbehandlungsqualität geschlossen werden kann.

- **Digitalmikroskop**

Mit dem Digitalmikroskop ist es möglich die Oberfläche von Beton mit entsprechender Vergrößerung darzustellen. Durch die vergrößert dargestellte Oberfläche können die Porenanzahl bzw. der Porenanteil und die durchschnittliche Porengröße ausgewertet werden. Die Auswertemethode kann mit der Methode der Quecksilberporosimetrie verglichen werden. Dabei dringt Quecksilber mit hohem Druck in das Material ein. Mithilfe eines Porosimeters wird die Porengröße aufgrund des Instursionsdrucks bestimmt. Durch diese Methode lassen sich das spezifische Porenvolumen, der mittlere Porendurchmesser und weitere Kenngrößen bestimmen. [35] Die Aufnahmen mit dem Digitalmikroskop stellen eine kontaktfreie Alternative zur Bestimmung dieser Kenngrößen dar.

- **Gasanalysen**

Die Gaschromatografie (GC) ist eine Analysemethode zum Auftrennen von Mischungen in einzelne chemische Komponenten, welche anschließend identifiziert und quantifiziert werden können. Es können nur jene Komponenten aus Verbindungen analysiert werden, welche bei unter 400 °C flüchtig sind und sich bei diesen Temperaturen nicht zersetzen.

Die Probe wird im Gerät verdampft. Die einzelnen flüchtigen Komponenten der Verbindung werden mithilfe eines Trägergases in eine Säule transportiert, wo sich die Komponenten aufgrund ihrer Eigenschaften mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. Die Ergebnisse werden anhand eines Chromatogrammes dargestellt. Darin werden die aufgenommenen elektronischen Signale, in Abhängigkeit von der Zeit seit der Injektion, aufgezeigt [36].

Mittels der multiplen Headspace Gaschromatografie wurde in [37] getestet, ob flüchtige organische Verbindungen (VOCs) in Beton nachzuweisen sind. Der Gesamtgehalt von VOCs einer Probe wurde mit wiederholten Headspace-Injektionen bestimmt. Bei einer Probentemperatur von 110 °C konnten beispielsweise Propanol, Butanol und Hexanol gemessen werden.

In [38] wurde Beton auf die Freisetzung flüchtiger organischer Substanzen aus Zusatzmitteln und Zusatzstoffen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass flüchtige Substanzen in Beton nur sehr geringe Emissionen verursachen. Mit der Headspace Gaschromatografie wurde Zement bei einer Probentemperatur von 80 °C untersucht. Die Auswertungen haben gezeigt, dass sich durch diese Methode keine organischen Substanzen nachweisen lassen.

Laut [23] wurde Portlandzement mittels Pyrolyse (Erhitzen auf 800 °C) mit der Gaschromatografie auf chemische Substanzen aus Mahlhilfsmitteln untersucht, vgl. auch [39]. Mit dieser Methode konnten sechs Komponenten (z.B. Phenol, Diethylenglycol, Trietanolamin) aus Mahlhilfsmitteln bestimmt werden.

Im Zuge des Projektes OptiNB soll festgestellt werden, ob mit Hilfe der Gaschromatografie flüchtige Komponenten in frischem Beton ermittelt werden können und diese Aufschluss auf die Nachbehandlungsqualität geben.

- **Elektrischer Widerstand von Beton**

Der elektrische Widerstand von Beton wird durch Faktoren wie die Zementart, den W/B-Wert, den Hydratationsgrad, den Feuchtigkeitsgehalt sowie die Nachbehandlungsdauer beeinflusst [40].

Genauer misst der elektrische Widerstand Änderungen in der Porenlösung, der Konnektivität der Poren, und in der Porosität der Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein. Mit zunehmenden Temperaturen sinkt der Widerstand [41].

Der elektrische Widerstand vom Beton kann mithilfe einer Wenner-Sonde gemessen werden [42]. Die Messung erfolgt durch 4 Elektroden in einer Linie auf der Betonoberfläche. Der Abstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Elektroden ist konstant. Zwischen den zwei äußeren Elektroden fließt Wechselstrom mit einer fixen Frequenz und üblicherweise einer Spannung von max. 38 V [43]. Der elektrische Widerstand wird zwischen den zwei inneren Elektroden gemessen [43]. Die Wenner-Sonde ist nicht besonders fokussiert, und die Lage der Bewehrung und der größeren Gesteinskörnung kann das Messergebnis beeinflussen [44]-[45]. Um unterschiedliche Tiefenbereiche erfassen zu können und eine höhere laterale Auflösung zu bekommen, könnte eine Variation des Elektrodenabstands und der Elektrodenkonfiguration mit einer numerischen Simulation kombiniert werden [44].

Neben der Wenner-Sonde, die ganz zerstörungsfrei ist, kann auch eine Multiring-Elektrode im Beton eingebettet werden. Dieser Sensor besteht aus Ring-Elektroden aus nichtrostendem Stahl, die in unterschiedlichen Tiefen im Beton positioniert sind [44]. Die Metallringe werden durch nicht-leitende Kunststoffringe auf Abstand gehalten. Das Messprinzip beruht auf dem Zwei-Elektroden-Verfahren, indem jeweils zwischen benachbarten Ringen eine Wechselstrommessung durchgeführt wird [44]. Als Ergebnis wird ein Widerstandsprofil ermittelt.

Die Messergebnisse können vor allem qualitativ ausgewertet werden, durch entsprechende Kalibrierung an Vergleichsbetonen aber auch quantitativ, um eine Feuchteverteilung an der Oberfläche und den Hydratationsverlauf zu bestimmen [44], [46]. Diese Methode ist vor allem für die dauerhafte Überwachung unzugänglicher Bereiche geeignet.

- **Gaspermeabilität**

Der Permeabilitätskoeffizient von Festbeton (k_T) wird gemessen, indem in einer Doppelkammerzelle, die an der Oberfläche der zu prüfenden Probe haftet, ein Vakuum erzeugt und unter instationären Bedingungen die Durchflussmenge des eintretenden Gases gemessen wird. Diese als "Torrent-Methode" bekannte Methode ist absolut zerstörungsfrei.

Die Testmethode wurde ursprünglich entwickelt, um k_T in situ an der Baustruktur zu messen, obwohl sie auch im Labor weit verbreitet ist.

Die Leistung von Betonkonstruktionen, die vielen aggressiven Einflüssen ausgesetzt sind, hängt in hohem Maße von der Durchlässigkeit des Betonporensystems ab.

Das gegenwärtige Wissen über geeignete Testmethoden und Korrelationen zwischen den einzelnen Transportparametern rechtfertigt den umfangreichen Einsatz von Gaspermeabilitätsmessungen zur Charakterisierung der Transporteigenschaften von Beton. Obwohl nicht direkt mit dem Leistungsabbau verbunden, bietet dieser Parameter enge Korrelationen mit dem Diffusionskoeffizienten von Gasen, der Diffusion aggressiver Ionen in der flüssigen Phase, der Geschwindigkeit der Wasseraufnahme sowie mit der Permeabilität für Wasser oder verdünnten Lösungen. Daher kann dieser einzelne Parameter die Durchlässigkeit von Beton in einer Vielzahl von verschiedenen Fällen charakterisieren, wodurch verschiedene Korrosions- und Verschlechterungsmechanismen abgedeckt werden.

Der Luftdurchlässigkeitskoeffizient einer Betonoberfläche hängt von vielen Faktoren ab, darunter:

- a) Mischungsverhältnisse von Beton, einschließlich des Vorhandenseins chemischer Beimengungen und zusätzlicher zementgebundener Materialien;
- b) Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften des Zementbestandteils und der Zuschlagstoffe;
- c) Art und Dauer der Aushärtung;
- d) Grad der Flüssigkeitszufuhr oder das Alter;
- e) Vorhandensein von Mikrorissen;
- f) Vorhandensein von Oberflächenbehandlungen.

Die Luftdurchlässigkeit wird auch stark durch den Feuchtigkeitszustand des Betons zum Zeitpunkt der Prüfung beeinflusst.

Der Luftdurchlässigkeitskoeffizient ist daher ein relevanter Haltbarkeitsindikator für den getesteten Beton [46]. Die Vorgehensweise bei der Untersuchung des Permeabilitätskoeffizienten ist in der Schweizer Norm SIA 262/1:2019 festgelegt [24].

- **Ultraschall**

Die Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit ist eine effektive zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualitätskontrolle von Betonwerkstoffen [49] und zur Erkennung von Schäden an Bauteilen. Die Ultraschall-Methoden werden traditionell zur Qualitätskontrolle von, meist homogenen, Werkstoffen eingesetzt (z.B. Metalle und Schweißverbindungen). Die Ultraschallprüfung von Beton ist ein wirksames Mittel zur Bewertung der Homogenität und der Qualität.

Laut [47] ist die Scherwellengeschwindigkeit sehr eng mit der Druckfestigkeit verbunden. Die Ergebnisse zeigten ferner, dass die Abschätzung der Druckfestigkeit von Beton unter Verwendung der Scherwellengeschwindigkeit sehr effektiv und zuverlässig ist.

Die Ultraschallreflexionsmethode ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, die unter Verwendung von hochfrequenten Ultraschallwellen die kontinuierliche Überwachung des Erstarrungs- und Erhärtungsprozesses zementgebundener Werkstoffe ermöglicht. Die sich durch den Hydratationsprozess des Zements verändernden „akustischen“ Eigenschaften des Betons beeinflussen den Wert des von der Methode gemessenen Reflexionskoeffizienten [48].

3. LABORUNTERSUCHUNGEN

Es wurde drei unterschiedlichen Betone, ein B3, ein B5 und ein BS1C Plus untersucht. Die Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften aller untersuchten Betone sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Unterschiede in den Frischbetoneigenschaften und Zusatzmittelmengen entstanden dadurch, dass drei bis vier Betoniertermine pro Betonsorte benötigt wurden.

Tabelle 3: Rezeptur und Frischbetoneigenschaften aller im Rahmen der Laborversuche untersuchten Betone

Betonbezeichnung	B3	B5	BS1C Plus
Erzielte Festigkeitsklasse	C25/30	C30/37	C25/30
Zement (Lafarge Perlmooser) [kg/m³]: CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	290	320	-
Zement 2 (Lafarge Perlmooser) [kg/m³]: CEM I 42,5 N SR0 WT27 C ₃ A-frei	-	-	258
Anrechenbarer Zusatzstoff [kg/m³]: Lafarge Fluamix C (AHWZ, k = 0,8)	40	40	103
Gesamtwasser [kg/m³]	171	170	165
W/B-Wert	0,53	0,48	0,48
Gestein (Rohrdorfer, Bad Fischau) [kg/m³]:			
Kies 16/32 RK	457	451	333
Kies 8/16 RK	292	289	333
Kies 4/8 RK	311	307	298
Sand 0/4 RK	770	761	792
Luftporenbildner [m%-Zement]:			
Mapei Mapeair LP 100 ³	0,30 - 0,97	0,00 - 0,50	0,00 - 1,20
Mapei Mapeair LP 200	-	0,00 - 0,50	0,00 - 0,70
Sika Addiment LPS A NEU	-	-	0,00 - 0,15
Fließmittel [m%-Zement]:			
Mapei Dynamon LZF ⁴	0,00 - 0,31	0,20 - 0,39	0,28 - 0,64
Sika VC4030Ultra	-	-	0,00 - 0,15
Luftgehalt (Frischbeton) [%]	2,6 - 3,6	2,5 - 4,2	5,8 - 8,0
Rohdichte (Frischbeton) [kg/m³]	2379 - 2431	2362 - 2442	2224 - 2313
Frischbetontemperatur [°C]	21,5 - 22,9	21,8 - 24,1	19,8 - 23,3

Im Rahmen der Untersuchungen wurden für alle Betonsorten insgesamt drei bis vier unterschiedliche Nachbehandlungen verglichen. Die Tabelle 4 fasst die Lagerungsbedingungen je nach Probenalter für die verschiedenen Nachbehandlungen zusammen. Beim Beton B5 wurden alle Nachbehandlungsarten untersucht, beim Beton B3 und BS1C Plus nur die Nachbehandlungen NB2, Ohne NB und NB3; da die NB2 genauso gute Ergebnisse wie die NB1 lieferte und für die Baustellen viel mehr repräsentativ war. Um die Baustellentauglichkeit der Prüfmethode zu beurteilen sind die Laborergebnisse im Rahmen von Baustellenversuchen mit unterschiedlicher Nachbehandlungsdauer zu verifizieren.

Zur Reproduzierbarkeit der Versuche wurden die Proben für die Nachbehandlung NB3 in einer Klimakammer gelagert.

³ Es wurde als Luftporenbildner entweder den LP100, den LP200 oder den Sika Addiment LPS A Neu verwendet.

⁴ Es wurde als Fließmittel entweder Mapei Dynamon LZF oder Sika VC4030 Ultra verwendet.

Zur Charakterisierung der Betone und zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte wurden die fett in Tabelle 5 hervorgehobenen Verfahren eingesetzt. Die weiteren Verfahren haben sich nach der Literaturrecherche als impraktikabel oder zur Bewertung der Nachbehandlungsgüte als nicht ausreichend erwiesen.

Tabelle 4: Nachbehandlungsarten für die Laborversuche

	NB1	NB2	Ohne NB	NB3
Erzielte Nachbehandlung	optimale	sehr gute	schädlich	sehr schädlich
Behandlung bis zur Ausschalung (Tag 1)	Oberfläche geschützt 20°C	Oberfläche geschützt 20°C	Oberfläche nicht geschützt 20°C	Oberfläche nicht geschützt 30°C, 40%rLf
Nachbehandlung nach der Ausschalung und bis Tag 7	Wasser-lagerung - 20°C	In Folie dicht verpackt - 20°C	Nicht geschützt - 20°C & 60%rLf	Nicht geschützt - 30°C & 40%rLf
Lagerung ab Tag 7			Nicht geschützt 20°C & 60%rLf	

Tabelle 5: Bewertung von Nachweisverfahren der Nachbehandlung (angepasst nach [7]). Die angewandten Verfahren sind fett hervorgehoben

Druckfestigkeit (8+/2-)	Hydratationsgrad (4+/0-)	Karbonatisierungstiefe (10+/0-)
Haftzugfestigkeit (2+/2-)	Wasseraufnahme (1+/0-)	Gaspermeabilität (10+/0-)
Rückprallhammer (2+/2-)	Eindringvermögen (2+/0-)	Frost-Tausalz-Widerstand (1+/0-)
Pendelhammer (1+/0-)	Kapillares Saugen (3+/0-)	Abwitterung (2+/0-)
Nadeleindringversuch (0+/1-)	Sättigungsgrad (1+/0-)	Betontemperatur (1+/0-)
Kratzversuch (0+/1-)	Wasserabgabe (8+/0-)	Chlorideindringen (1+/0-)
Verschleißfestigkeit (0+/1-)	Gewichtsverlust (1+/0-)	Elektrischer Widerstand
Elastizitätsmodul (2+/0-)	Porosität (MIP) (5+/0-)	Multi-Ring-Elektrode

Es wurden einige Verfahren (Druckfestigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand, Karbonatisierungstiefe...) aus dieser Tabelle ausgewählt, um den Einfluss der Nachbehandlung auf die Betondauerhaftigkeit zu beurteilen. Andere Verfahren (Gaspermeabilität, Wassereindringvermögen, Gewichtsverlust...) wurden zusätzlich angewandt, um ihre Aussagekraft zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte zu untersuchen.

1. Einfluss der Nachbehandlung auf die Betondauerhaftigkeit

- **Druckfestigkeit**

Die Druckfestigkeit der untersuchten Betone wurde nach 28 Tagen gemäß ÖNORM EN 12390-3:2009 an Würfeln ($d = 15\text{ cm}$) aus dem Mittelwert von zwei Versuchswerten ermittelt (Abbildung 8). Die Lagerung weicht in Abhängigkeit der unterschiedlichen Lagerungsarten von der Norm ab.

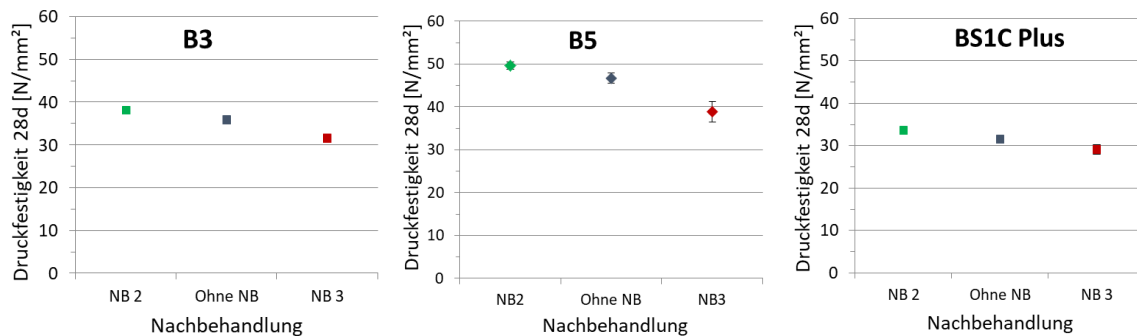


Abbildung 8: Druckfestigkeit von Würfeln ($d = 15\text{ cm}$) nach 28 Tagen von B3 (links), B5 (Mitte) und BS1C Plus (rechts) in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsqualität

Beim Vergleich der Betone B3 ($W/B = 0,53$) und B5 ($W/B = 0,48$) ist zu beobachten, dass die Druckfestigkeit mit steigendem W/B -Wert abnimmt. Diese ist beim Beton B5 um bis 12 N/mm^2 höher als beim B3. Wie in Tabelle 3 ersichtlich, enthält der Beton BS1C Plus ($W/B = 0,48$), im Vergleich zum B3 und B5, eine größere Menge an anrechenbaren Zusatzstoff und eine kleinere Menge an Zementklinker, was dazu führt, dass dessen Druckfestigkeit die niedrigste ist; und das obwohl der W/B -Wert gleich hoch wie der des Betons B5 ist. Weiters ist zu beobachten, dass die Druckfestigkeit des Betons generell bei schlechteren Nachbehandlungen abnimmt. Sie ist bei der NB3 um ca. 17 % (B3), 22 % (B5) und 16 % (BS1C Plus) niedriger als bei der „sehr guten“ Nachbehandlung NB2. Obwohl die Druckfestigkeit nach 28 Tagen von der Nachbehandlung beeinflusst wird, eignet sich diese Prüfung aufgrund der Varianz der Rohdichte, des Betonalters oder der Exposition der einzelnen Bauteile nur bedingt zum Nachweis der Nachbehandlungsqualität der Betonoberflächen. Darüber hinaus ist eine Zerstörung des Bauwerks durch eine Bohrkernentnahme erforderlich.

• **Frost-Tausalz-Widerstand**

Die Untersuchung der Betone hinsichtlich ihres Frost-Tausalz-Widerstands gemäß ONR 12390-9:2017 ist üblicherweise nur dann sinnvoll, wenn die Betone die Expositionsklassen XF2 oder XF4 abdecken. Die Versuche sollen primär zeigen, wie sich eine ungenügende Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit der Betone auswirkt, da in der Norm ONR 12390-9 die Schnittfläche und nicht die Schalseite oder die abgezogene Seite zu prüfen ist.

Es zeigte sich, wie in Abbildung 9 ersichtlich, dass eine fehlende Nachbehandlung bzw. eine schlechte Nachbehandlung zu größeren Abwitterungsmengen führt. Dies ist besonders deutlich beim Beton B5 zu erkennen. Der Beton BS1C zeigt in Bezug auf den Frost-Tausalz-Widerstand in Abhängigkeit von der Nachbehandlung die niedrigste Empfindlichkeit. Die angeführten Grenzwerte der Nullbetone sind hierbei nur informativer Natur, da sie sich auf Werte der Schnittflächen der Nullbetone beziehen. In den Versuchen wurden jedoch Schalseiten (keine Schnitte) untersucht, somit sind die Werte nicht vergleichbar.

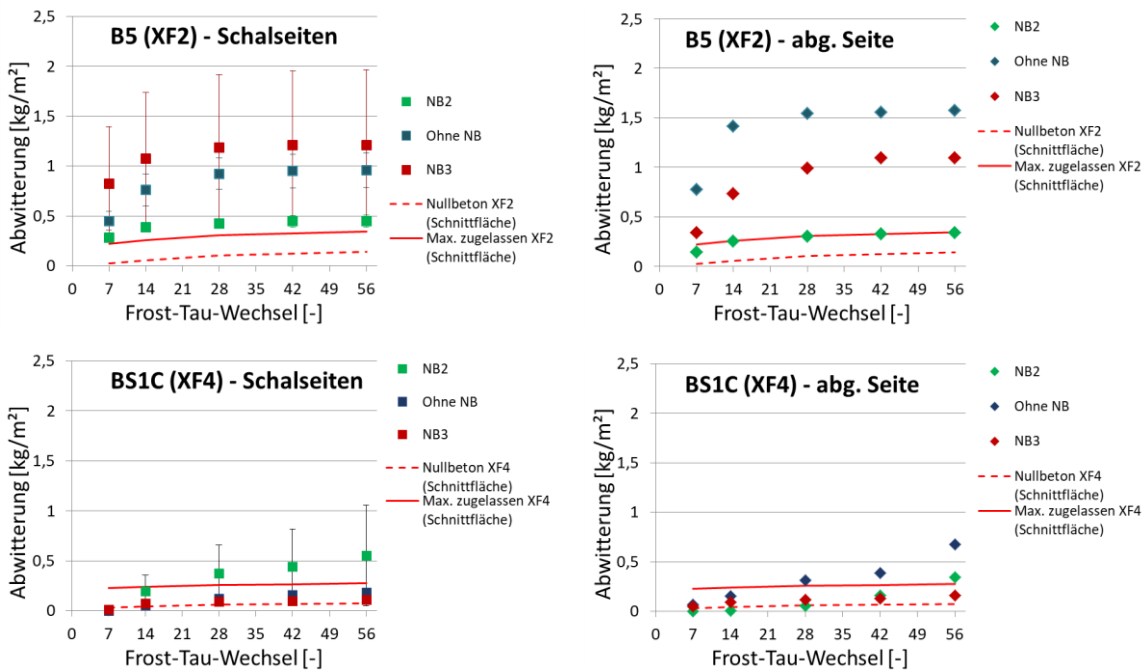


Abbildung 9: Abwitterung von Würfeln (d = 15cm) nach 7 bis 56 Frost-Wechseln von B5 (links) und BS1C Plus (rechts) in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsqualität und der untersuchten Würfelseite

- **Chlorideindringung**

Die Chlorideindringung wurde an Zylindern in unterschiedlichen Tiefenstufen gemäß ÖNORM EN 12390-11 gemessen; und der Chloriddiffusionskoeffizient, sowie der errechnete Chloridgehalt an der Oberfläche bei unterschiedlichen Nachbehandlungen, ermittelt. Die Expositionsdauer betrug 90 Tage, wobei die Chloridbeaufschlagung ab einem Betonalter von 28 Tagen erfolgte. Die Ergebnisse für den Beton B3, B5 und BS1C Plus sind in Abbildung 10 zusammengefasst.

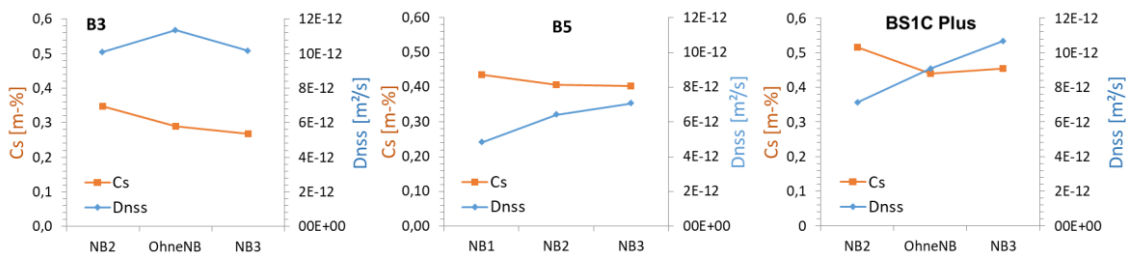


Abbildung 10: Abhängigkeit des rechnerischen Chloridgehalts an der beaufschlagten Oberfläche (Cs) und des Chloriddiffusionskoeffizienten (Dnss) von der Nachbehandlung für die Betone B3 (links), B5 (Mitte) und BS1C Plus (rechts) im instationären Zustand

Die Abbildung 10 zeigt eine Zunahme der Chloridpermeabilität (Diffusionskoeffizient, Dnss) bei sehr schädlicher Nachbehandlung (NB3), im Vergleich zur Wasserlagerung (NB1, optimale Nachbehandlung) oder der Lagerung in der Folie (NB2, sehr gute Nachbehandlung). Der Chloridgehalt an den Oberflächen (Cs) ist bei besser nachbehandelten Proben etwas höher, was mit dem niedrigeren Diffusionskoeffizienten dieser Proben gut begründbar ist. Anhand der Versuche konnte gezeigt werden, dass eine schädliche Nachbehandlung die Chloridpermeabilität begünstigt und sich somit negativ auf die Dauerhaftigkeit bewehrter Betone auswirkt.

- **Karbonatisierungstiefe**

Die Karbonatisierungstiefe wurde an Balken gemäß ÖNORM EN 12390-12:2009 gemessen. Auch hier wurde die Nachbehandlung abweichend zur Normlagerung angepasst. Durch die beschleunigte Exposition bei 4 %-CO₂ konnte am Ende der Versuche die Karbonatisierungstiefe nach 50 oder 100 Jahren unter normalen Bedingungen in Anlehnung an die Schweizer Norm SIA 262-1:2019 [24] umgerechnet werden.

Dabei wird im ersten Schritt der Karbonatisierungskoeffizient unter beschleunigten Bedingungen mittels linearer Regression der Karbonatisierungstiefe über die quadratische Wurzel des Alters (in Tagen) berechnet. Dann wird dieser Koeffizient mit 2,6 multipliziert, um den Karbonatisierungskoeffizienten unter natürlichen Bedingungen zu berechnen.

Die Schweizer Norm begrenzt für die Expositionsklasse XC4 und eine Expositionsdauer von 100 Jahren den Karbonatisierungskoeffizienten auf 4,5 mm/vJahr, was umgerechnet einer Karbonatisierungstiefe von 45 mm nach 100 Jahren entspricht. Die Abbildung 11 zeigt den Karbonatisierungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Nachbehandlung und veranschaulicht, wie eine unzureichende Nachbehandlung die Karbonatisierungstiefe ansteigen lässt. Gemäß der Norm SIA 262-1:2019 [24] würde der B3 mit der Nachbehandlung NB3 und der BS1C Plus mit allen Nachbehandlungsarten den Anforderungen der Expositionsklasse XC4 nicht mehr entsprechen (Karbonatisierungskoeffizient von 4,5 mm/vJahr und Karbonatisierungstiefe von 45 mm nach 100 Jahren).

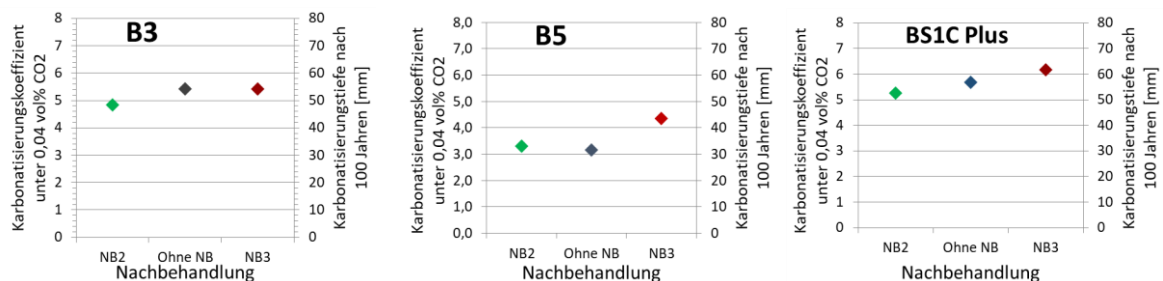


Abbildung 11: Geschätzter Karbonatisierungskoeffizient und Karbonatisierungstiefe nach 100 Jahren für die Betone B3 (links), B5 (Mitte) und BS1C Plus (rechts); berechnet in Anlehnung an die Norm SIA 262-1:2019 [24]

- **Zusammenfassung**

Der Einfluss der Nachbehandlung auf die Druckfestigkeit konnte mittels der durchgeführten Versuche eindeutig bestätigt werden und zeigt sich durch eine Zunahme der Festigkeit mit der Steigerung der Qualität der Nachbehandlung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes sind im Gegensatz dazu nicht sehr eindeutig. Dennoch lässt sich erkennen, dass eine schlechte oder falsche Nachbehandlung zu höheren Abwitterungsmengen führt.

Die Prüfverfahren zur Chlorideindringung und zum Widerstand gegen eine beschleunigte Karbonatisierung gemäß ÖNORM EN 12390 erlauben hingegen gute Aussagen über die Nachbehandlungsgüte. Aufgrund der langen Prüfdauer von mehreren Monaten und der Notwendigkeit der Bohrkernentnahme sind diese Prüfverfahren allerdings nur mäßig als baustellentaugliche Prüfverfahren zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte geeignet.

2. Beurteilung der Nachbehandlungsgüte

- **Gewichtsverlust**

Als erstes Verfahren zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte von Laborproben wurde der Gewichtsverlust pro Volumeneinheit ab dem Zeitpunkt des Ausschalens ermittelt. Dafür wurden die Proben in unterschiedlichen Abständen ab dem ersten Tag nach dem Ausschalen gewogen und der Gewichtsverlust im Vergleich zum ersten Tag ermittelt. Die Proben wurden bis zu 19-mal innerhalb der ersten vier Wochen gewogen. Beim B3 und BS1C Plus wurde außerdem der Gewichtsverlust der Proben mit der Nachbehandlung NB3 und Ohne NB ab der Betonage (Tag 0) auf Basis der Rohdichte geschätzt, um den Unterschied im Gesamtwasserverlust aufzuzeigen. Abbildung 12 fasst die Ergebnisse für die Betone B3, B5 und BS1C Plus zusammen.

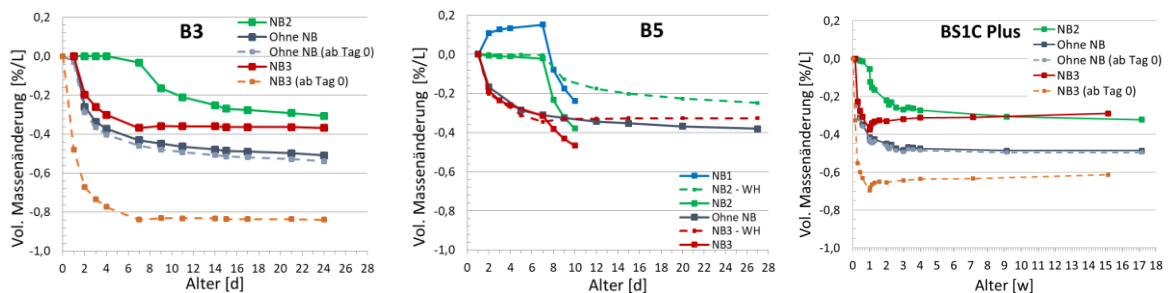


Abbildung 12: Gewichtsverlust bei Würfeln (d = 15 cm) für einen B3 (links), einen B5 (Mitte) und einen BS1C Plus (rechts, Altersangabe in Wochen) je nach Behandlung. Wenn nicht anders spezifiziert ist der Gewichtsverlust ab dem Ausschalen im Alter von einem Tag aufgezeichnet. Beim B5 wurden manche Versuche wiederholt, die mit „WH“ gekennzeichnet wurden

Die Abbildung 12 (Mitte) zeigt, dass die Wasserlagerung (NB1) beim Beton B5 zu einer Gewichtszunahme durch die Wasseraufnahme führt. Nach sieben Tagen wurde die unterschiedliche Nachbehandlung unterbrochen und alle Proben wurden bei 20 °C gelagert, wodurch sich der rapide Abfall der Masse zu diesem Zeitpunkt erklären lässt; die Proben der Reihe NB1 verlieren somit ihr aufgenommenes Wasser. Dabei zeigt die Probe NB1 durch ihre Wasseraufnahme – wie erwartet – insgesamt den geringsten Gewichtsverlust. Für alle Betone ist die NB2, also die Verhinderung der Verdunstung mithilfe einer Folie, sehr wirksam. Es erfolgte dabei kein Gewichtsverlust (Verdunsten des Wassers) der Proben bis zum Nachbehandlungsende im Alter von 7 Tagen. Die beiden Nachbehandlungen Ohne NB und NB3 zeigen hingegen deutliche Wasserverluste. Beim Beton B3 wurde zusätzlich noch der hohe Wasserverlust bei der Nachbehandlung NB3 (hohe Verdunstungsraten bei 30 °C Lagerung) ab der Betonage abgeschätzt und in

Abbildung 12 berücksichtigt (orange Kurve). Dies führte dann, im Vergleich zu den Probekörpern Ohne NB, zu deutlich höheren Wasserverlusten.

Insgesamt ist der Wasserverlust beim B3 etwas höher als beim B5, dies ist auf den höheren W/B-Wert zurückzuführen.

Die volumetrische Massenänderung eignet sich gut zur Beurteilung des Wasserverlusts von Beton und korreliert sehr gut mit der Nachbehandlungsgüte. Allerdings ist dieses Verfahren für Baustellen absolut ungeeignet, da kein betoniertes Bauteil abgewogen werden kann. Die SWOT-Analyse (**S**trengths (Stärken), **W**eaknesses (Schwächen), **O**pportunities (Chancen) und **T**hreats (Risiken)) zum Verfahren der Messung der Masseänderung ist in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: SWOT-Analyse Masseänderung

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Direkte Nachverfolgung des Wasserverlusts • Einfache Auswertung 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache, direkte Bestimmungsmethode
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für Bauwerke ungeeignet • Mehrmalige Messungen notwendig 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfluss der Umgebung hoch (Feuchtigkeit, Bewitterung, Temperatur, Strahlung)

- **Wassereindringtiefe nach Karsten**

Eine Möglichkeit zur baustellentauglichen Beurteilung einer Betonoberfläche, stellt die Messung der Wassereindringtiefe nach Karsten dar. Dabei wird ein Glasröhrchen mit einem bestimmten Durchmesser an der Oberfläche mit Dichtungsmasse befestigt, das Röhrchen mit Wasser gefüllt und nach einer Minute Wartezeit die Wasseraufnahme pro Zeiteinheit über die Kontaktfläche anhand der Messskala am Röhrchen gemessen⁵.

Beim Beton B5 wurde nur die abgezogene Seite (Oberseite) geprüft, bei den anderen Betonen auch die Schalseiten. Neben dem Einfluss der Nachbehandlung, wurde auch bei manchen Proben der Einfluss des Alters untersucht. Die Abbildung 13 fasst die Prüfergebnisse zusammen.

⁵ <https://www.bauemotion.de/baulexikon/karstensch-pruefroehrchen/15375157>, abgerufen am 23.09.2019

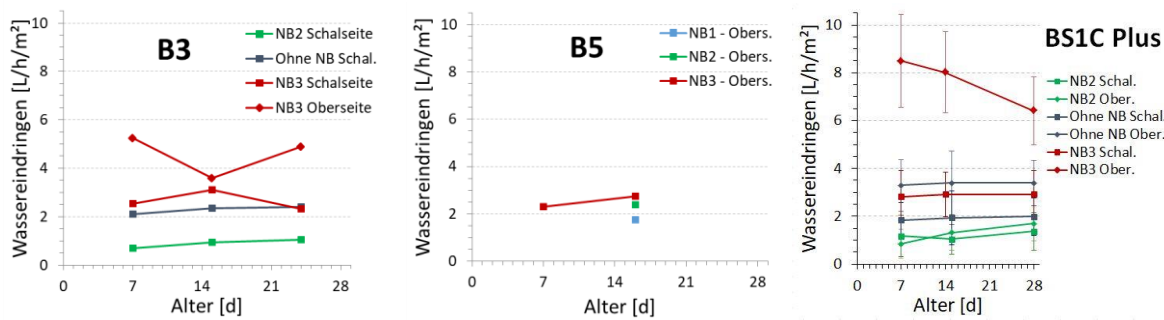


Abbildung 13: Wassereindringen unterschiedlicher Betone in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsart und des Alters

Die Wasserpermeabilität ist bei allen drei Betonen vergleichbar, nimmt meist mit dem Betonalter zu und ist für die am schlechtesten nachbehandelten Proben am größten. Die abgezogenen Oberflächen weisen außerdem eine noch höhere Wasserpermeabilität als die Schalseiten auf (s. „Oberseite“ und „Schalseite“ der Betone B3 und BS1C Plus). Dieses Prüfverfahren ist aufgrund seiner kurzer Messdauer und der einfachen Durchführung an allen Betonoberflächen gut baustellentauglich. Es ist allerdings nicht normiert und die großen Schwankungen in den Messergebnissen, je nach untersuchter Stelle (Trockenheit, Rauheit, Porosität), kombiniert mit den insgesamt niedrigen und ähnlichen Messwerten, führen zu hohen Unsicherheiten in der Bestimmung. Das Wassereindringen nach Karsten eignet sich deshalb in dieser Form nur bedingt zur baustellentauglichen Beurteilung der Nachbehandlungsgüte. Die SWOT-Analyse zum Verfahren der Wassereindringtiefe nach Karsten ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: SWOT-Analyse Wassereindringtiefe nach Karsten

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Direkte Bewertung der Oberflächendurchlässigkeit • Einfache Durchführung 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Preislich günstig
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Verbindung mit Dauerhaftigkeit • Unpräzise Messergebnisse 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfluss des Oberflächenzustands hoch (Feuchtigkeit, Nässe, Temperatur, Bauteilgeometrie, ...)

- **Gaspermeabilität**

Eine weitere Möglichkeit stellt die Ermittlung der Gaspermeabilität dar. Für die Messung der Gaspermeabilität von Betonproben wird eine Mindestabmessung der Probe von 15 cm benötigt. Eine weitere Voraussetzung für diese Messung ist eine trockene Probe, weshalb die Proben drei Tage lang bei 50 °C getrocknet wurden. Es wurden Betonproben mit den Abmessungen 15x15x15 cm mit drei verschiedenen Nachbehandlungen (NB1 - Wasserlagerung, NB2 - in Folie gelagert und NB3 - Lagerung bei hoher Temperatur) und unterschiedlicher Nachbehandlungsdauer (1, 4 und 7 Tage) untersucht. Die Messungen wurden mittels Permeatorr von Roberto Torrent sowie dem Gaspermeabilitätstester von der Firma Proceq durchgeführt. Die gemessene Gaspermeabilität k_T ist jeweils in 10^{-16} m^2 angegeben.

In Abbildung 14 sind die Werte für die gemessene Gaspermeabilität der beiden Geräte für den Beton *B5* dargestellt. Das Gerät von Proceq misst tendenziell eine höhere Gaspermeabilität als der Permeatorr. Wie erwartet zeigen Proben mit optimaler Nachbehandlung (NB1) eine deutlich geringere Gaspermeabilität, als Proben mit sehr schädlicher Nachbehandlung (NB3). Die Unterschiede in der Nachbehandlungsdauer sind dabei nur kaum ausgeprägt. Generell hatten die Oberseiten der Proben, im Vergleich zur Schalseite, eine höhere Gaspermeabilität.

B5

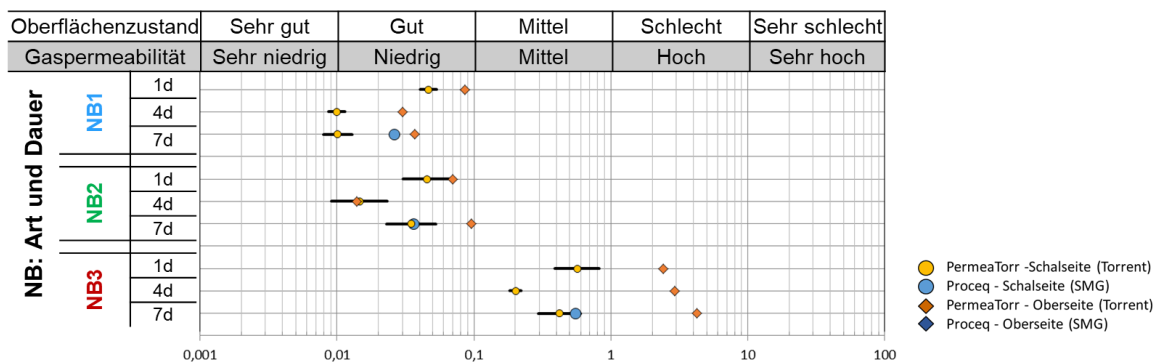


Abbildung 14: Gaspermeabilität von B5 Proben in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsqualität

Abbildung 15 zeigt die Gaspermeabilität des Betons *B3*. Im Vergleich zu den Betonen *B5* und *BS1C Plus* ist ersichtlich, dass die Ergebnisse mit dem W/B-Wert und der verwendeten Zementart korrelieren. Der Beton *B5* liefert mit einem W/B-Wert von 0,48 und gleicher verwendeter Zementart bessere Ergebnisse, als der Beton *B3* mit W/B = 0,53 und das bei gleicher Nachbehandlung und gleicher Nachbehandlungsdauer. Beim *B3* ist die Abhängigkeit der Gaspermeabilität von der Nachbehandlung am besten ersichtlich, was sich mit niedrigen Werten bei *NB2* (sehr gute NB) und schlechten bei *NB3* (sehr schädliche NB) zeigt.

Auf Abbildung 16 ist die Gaspermeabilitätsmessung des Betons *BS1C Plus* ersichtlich. Obwohl dieser den gleichen W/B-Wert wie *B5* aufweist (beide 0,48) und einen niedrigeren wie der *B3*, liefert der *BS1C Plus* die schlechtesten Ergebnisse dieser Reihe, was auf eine andere verwendete Zementart zurückzuführen ist. Der Einfluss der Nachbehandlung ist bei diesem ebenfalls gut ersichtlich.

B3

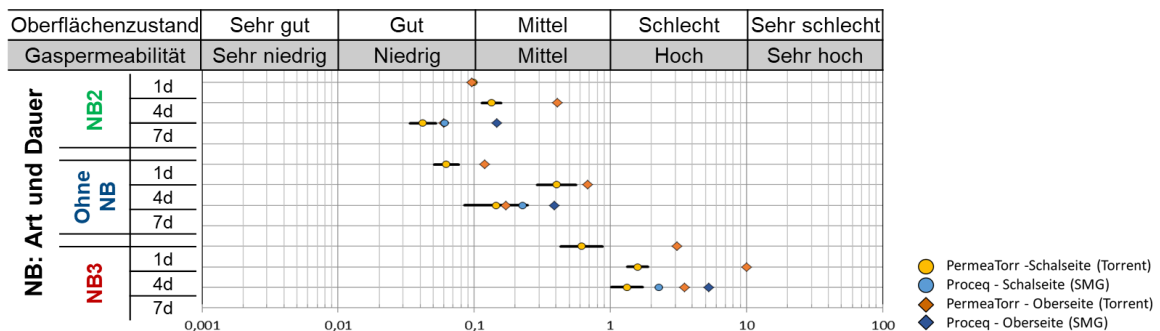


Abbildung 15: Gaspermeabilität von B3 Proben in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsqualität

Es lässt sich sagen, dass dieses Verfahren gut baustellentauglich ist. Es liefert eindeutige Aussagen über die Nachbehandlungsgüte und die Qualität der Oberfläche. Aufgrund der zu hohen Betonfeuchte bei sehr jungem Betonalter, kann die Gaspermeabilität an einem Bauteil allerdings erst etwa 2-4 Wochen nach dem Betonieren gemessen werden. Die SWOT-Analyse zur Messung der Gaspermeabilität ist in Tabelle 8 zusammengefasst.

BS1C Plus

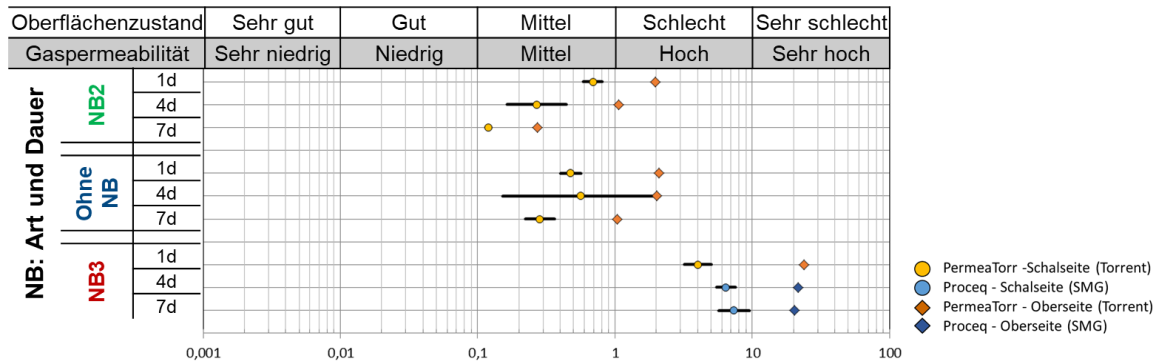


Abbildung 16: Gaspermeabilität von BS1C Plus Proben in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsqualität

Tabelle 8: SWOT-Analyse Gaspermeabilität

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Direkte Bewertung der Oberflächen-durchlässigkeit • Einfache Durchführung 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Preislich relativ günstig
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbindung mit Dauerhaftigkeit wird untersucht • Nur bei trockenen Proben durchführbar (> 14d.) 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichswerte nötig

- **Multiring-Elektrode**

Zum Nachweis der Veränderung der Betongüte zufolge unterschiedlicher Nachbehandlungsqualitäten, wurde eine Multiring-Elektrode in die Betonproben mit unterschiedlicher Nachbehandlung einbetoniert. Die Widerstandsprofile im Beton wurden bei einer Wechselstromfrequenz von 120 Hz ermittelt, Abbildung 17 fasst diese zusammen.

Abbildung 17 zeigt, dass der Beton *B5* empfindlicher auf die Nachbehandlung als der *B3* und der *BS1C Plus* reagiert, da dieser einen höheren Zementklinkergehalt aufweist und somit schneller hydratisiert. Die schnellere Hydratation führt offenbar dazu, dass der Beton – besonders in der Zeit kurz nach dem Ausschalen – nachbehandlungsintensiver ist. Die Oberfläche des Betons *B5* trocknet somit früher aus, was sich aus der Steigerung des elektrischen Widerstands ablesen lässt. Darüber hinaus ist der elektrische Widerstand in einer Tiefe von 7 bis 10 mm der NB3-Proben vom *B5* nach 16 bzw. 17 Tagen knapp dreimal so hoch wie jener vom *B3*. Der Vergleich vom *B5* mit der NB2 und vom *B5* mit der NB3 zeigt, dass durch eine gute Nachbehandlung der elektrische Widerstand nach 15 bzw. 16 Tagen deutlich (ca. Faktor 9) geringer ist. Die Tiefe der Randzone beträgt bei beiden Betonen *B3* und *B5* ca. 15-20 mm und variiert nur geringfügig mit der Nachbehandlung. Der Beton *BS1C Plus* zeigt ein ähnliches Verhalten wie der Beton *B3*; so ist eine Steigerung des Widerstandes durch die sehr ungenügende Nachbehandlung gut ersichtlich. Weiters dürfte der *BS1C Plus* aufgrund seiner langsameren Hydratation – hervorgerufen durch eine zum *B3* und *B5* unterschiedliche Zementmischung – eine passende Nachbehandlung über einen längeren Zeitraum benötigen.

Die Messung des elektrischen Betonwiderstands anhand der Multiring-Elektrode eignet sich nur mäßig zur Beurteilung der Nachbehandlungsgüte, da nur eine einzige Stelle pro Elektrode untersucht werden kann. Auch sind die Kosten für Bauteiluntersuchungen an Baustellen aufgrund des Einbettens von Elektroden im Bauteil relativ hoch. Die SWOT-Analyse zum Verfahren der Multiring-Elektrode ist in Tabelle 9 zusammengefasst

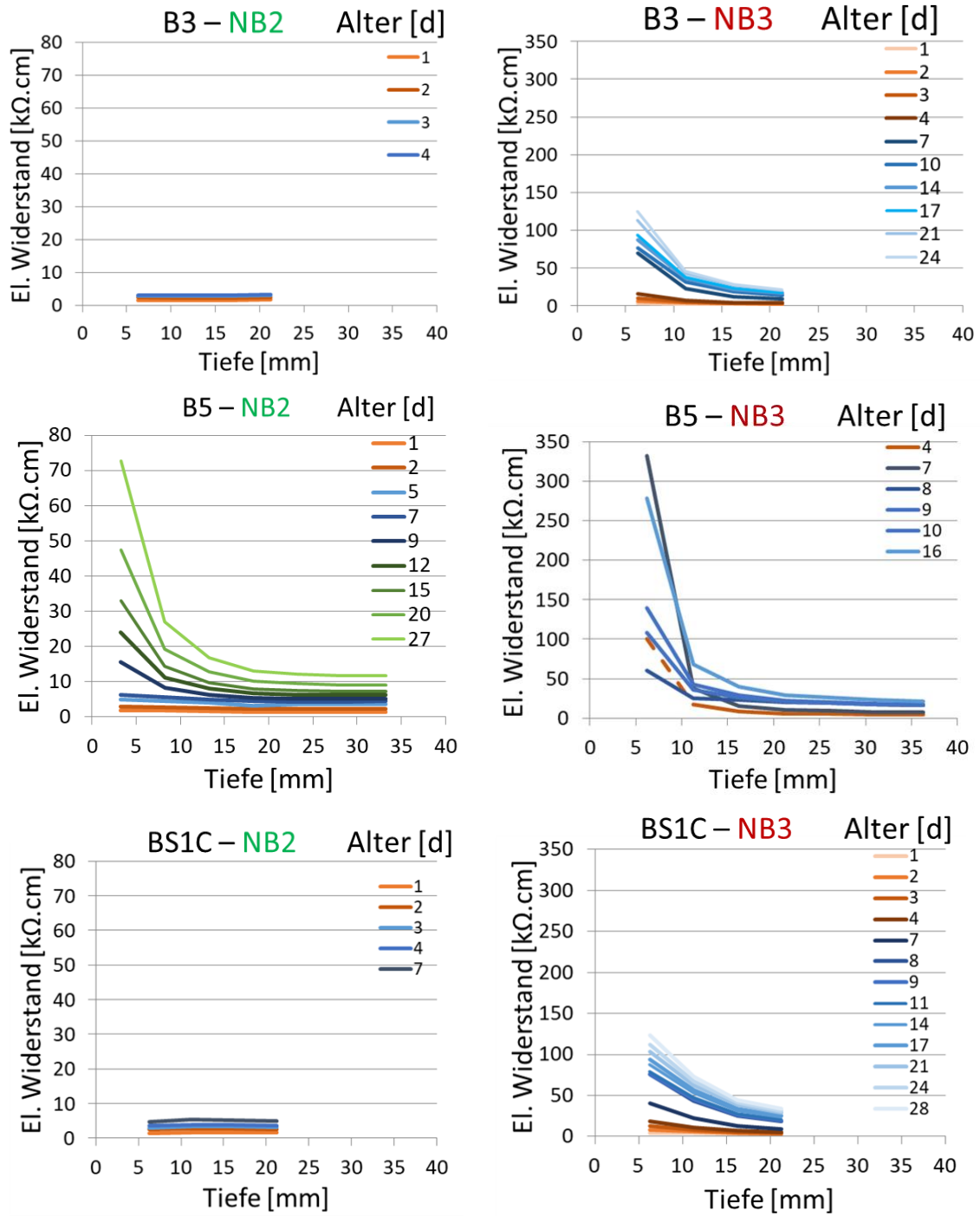


Abbildung 17: Elektrisches Widerstandsprofil im B3 (oben), B5 (Mitte) und BS1C Plus, die s. gut in Folie (NB2, links) und s. schädlich bei 30°C (NB3, rechts) nachbehandelt wurden

Tabelle 9: SWOT-Analyse Multiring-Elektrode

Stärken <ul style="list-style-type: none"> • Indirekte Bewertung der Betonqualität bis 5 cm Tiefe (über die Randzone) • Einfache Messung 	Chancen <ul style="list-style-type: none"> • Permanentes Monitoring des Bauwerks möglich
Schwächen <ul style="list-style-type: none"> • Wenig Erfahrung • Großer Einfluss des Alters • Einzige Stelle messbar • Preislich teuer 	Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Dauerhaft im Bauwerk eingebunden • Weitere Einflüsse (z.B. Feuchtigkeit, Chlorideindringen) unvermeidbar

- **Elektrischer Widerstand**

Der elektrische Widerstand von Beton wurde an den abgezogenen Flächen (Oberseite) und an den Schalseiten gleich nach dem Ausschalen im Alter von einem Tag und in regelmäßigen Abständen während den ersten vier Wochen ermittelt. Dabei wurde der Einfluss der Nachbehandlung an Würfeln ($d = 15 \text{ cm}$) und am $10 \times 10 \times 36 \text{ cm}$ -Balken (nur B5) untersucht. Abbildung 18 fasst die Entwicklung des relativen elektrischen Widerstands im Vergleich zum Betonalter ab dem 1 Tag für die Betone B3, B5 und BS1C Plus zusammen. Bei den Betonen B3 und BS1C Plus wurde der relative elektrische Widerstand bei der NB3 ab der Betonage (Tag 0) ermittelt.

Bei allen Betonen ist der Einfluss der Nachbehandlung unabhängig von der Probengeometrie sehr deutlich zu sehen. Insbesondere beim B5 mit NB3 (hohe Temperatur und niedrige Luftfeuchte) nimmt der Widerstand sehr schnell mit dem Betonalter zu. Die Zunahme des elektrischen Widerstands ist auf die Austrocknung der Betonoberfläche zurückzuführen. Die optimale Nachbehandlungen NB1 (Wasserlagerung) und NB2 (Folienlagerung) unterscheiden sich dagegen kaum. Die Nachbehandlung NB2 konnte also als „gute“ Nachbehandlung bestätigt werden. Es ist trotz der größeren volumetrischen Oberfläche der Balken, im Vergleich zu den Würfeln, nur ein geringer Einfluss der Probengeometrie auf die Austrocknung des Betons B5 feststellbar.

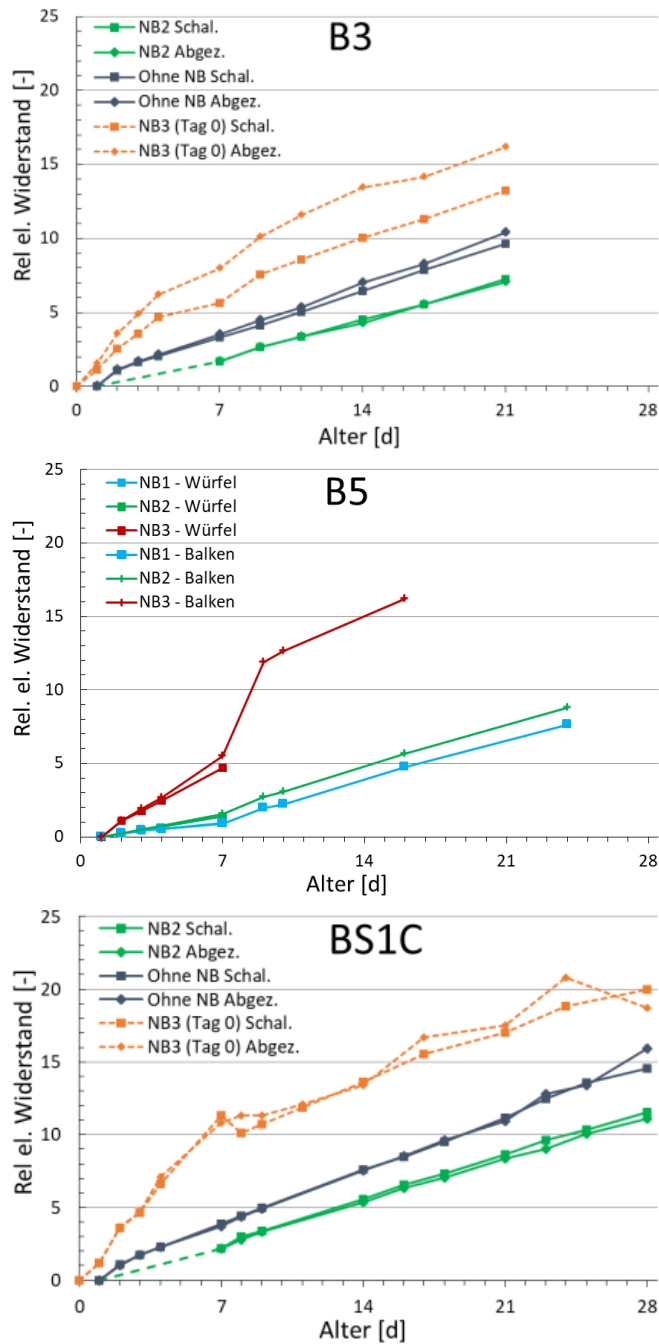


Abbildung 18: Relative Steigerung des elektrischen Widerstands von Würfeln (d = 15cm) aus B3 (oben), 15 cm-Würfeln und 10x10x36-Balken aus B5 (Mitte) und Würfeln (d = 15cm) aus BS1C Plus (unten) für verschiedene Nachbehandlungen und Probenseiten im Vergleich zum Betonalter

Beim Beton *B3* (Abbildung 18 oben) zeigt die Probe ohne Nachbehandlung – wie erwartet – eine höhere Steigerung des elektrischen Widerstands als die Probe in der Folie (NB2). Der sehr hohe Wasserverlust im Laufe des ersten Tages bei der NB3, aufgrund der

Temperaturlagerung bei 30 °C, wurde beim B3 und BS1C Plus entsprechend berücksichtigt, die Auswertung fängt deshalb ab Tag 0 an.

Der Beton *BS1C Plus* zeigt bei einer sehr guten (NB2) und schädlichen (Ohne NB) Nachbehandlung höhere Widerstände, als die beiden anderen Betone. Bei der sehr schädlichen NB3 liefert jedoch der *B5* die schlechtesten Ergebnisse, was auf den höheren Bindemittelgehalt des B5 zurückzuführen ist, der diesen Beton nachbehandlungsintensiver macht.

Für alle Betone ist die Steigerung des Widerstandes für die abgezogenen Flächen bei den Nachbehandlungen Ohne NB und NB3 höher als an den Schalseiten, da diese bis zum ersten Tag – also dem Ausschalen – vor Austrocknung nicht geschützt waren und daher am schnellsten austrockneten.

Insgesamt eignet sich die Messung des elektrischen Widerstands gut zur Abschätzung der Nachbehandlungsgüte im jungen Betonalter. Der Einfluss des Hydratationsfortschritts, der Betontemperatur und -feuchtigkeit muss allerdings berücksichtigt werden. Alte (ab ca. 2-4 Wochen) oder sehr trockene Betone können mit dieser Methode nicht mehr untersucht werden. Durch die zerstörungsfreie Prüfmethode ist dieses Verfahren gut für Baustellenuntersuchungen geeignet. Die SWOT-Analyse zum Verfahren der Messung des elektrischen Widerstandes ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: SWOT-Analyse elektrischer Widerstand

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indirekte Bewertung der Oberflächendurchlässigkeit • Einfache Durchführung 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Preislich günstig
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Verbindung mit Dauerhaftigkeit • Großer Einfluss des Alters • Koppelmittel (Wasser) notwendig 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfluss des Oberflächenzustands hoch (Feuchtigkeit, Temperatur...)

- **Rückprallhammer**

Versuche mit dem Rückprallhammer wurden am Beton BS1C Plus durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Versuchs geben Aufschluss über die Festigkeit der Betonoberfläche. Man erkennt auf Abbildung 19, dass eine bessere Nachbehandlung (NB2, sehr gute NB) zu höheren Rückprallwerten führt, was auf eine höhere Festigkeit hindeutet. Die sehr ähnlichen Ergebnisse bestätigen die mittelmäßige Aussagekraft des Rückprallhammers zur Bewertung der Nachbehandlungsgüte (s. Tabelle 2).

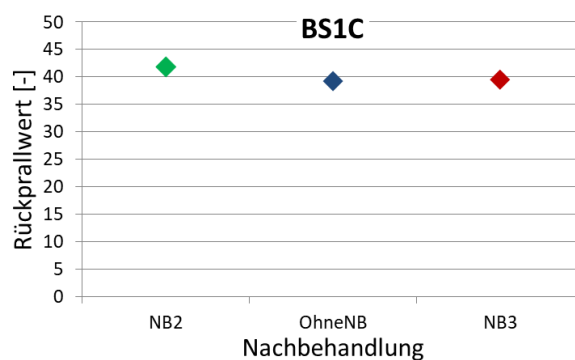


Abbildung 19: Rückprallwert des BS1C Plus nach 27d je nach Nachbehandlungsgüte

Die SWOT-Analyse zum Verfahren der Messung mit dem Rückprallhammer ist in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: SWOT-Analyse Rückprallhammer

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache, schnelle Messungen • Einfache Auswertung 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Routinierte Handhabung • Preislich günstig
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Große Streuung und Ähnlichkeit der Messergebnisse • Schwierige Interpretation aufgrund oft uneindeutiger Ergebnisse 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vergleichswerte nötig • Fehlinterpretation der Ergebnisse aufgrund der großen Streuung

3. Beurteilung der Baustellentauglichkeit

Zur Beurteilung der Baustellentauglichkeit von den Gaspermeabilitätsmessungen wurde anhand von Laborproben der Einfluss einer Außenlagerung untersucht.

- Außenlagerungsversuche**

Bei der **ersten Versuchsreihe** wurden BS1C Plus Probekörper untersucht, die bei einem Alter von ca. zwei Monaten außengelagert wurden. Nach 52 Tagen Außenlagerung wurden an ihnen Gaspermeabilitätsmessungen durchgeführt. Die gemessene Gaspermeabilität k_T ist jeweils in 10^{-16} m^2 angegeben. Zur „Akklimation“ der Proben auf das Laborklima (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) wurden sie ca. drei Tage vor den Versuchen ins Labor gebracht. Weiters wiesen die Proben eine unterschiedlich lange Nachbehandlungszeit auf, nämlich 1, 4 und 7 Tage.

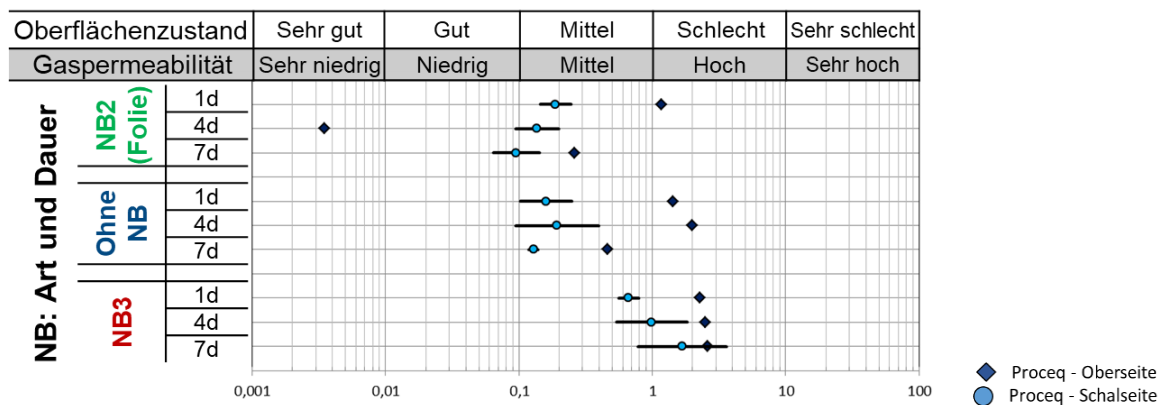


Abbildung 20: Gaspermeabilität von BS1C Plus Proben in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsqualität im Alter von ca. 4 Monaten und nach 52 Tagen Außenlagerung

Im Vergleich zu den Probekörpern die nicht der Umwelt ausgesetzt waren – siehe die in Abbildung 16 dargestellten Ergebnisse – ist eine Verringerung der Gaspermeabilität von über 60 % für alle Schalseiten aller Nachbehandlungsarten (im Durchschnitt -64 %) zu beobachten. Dabei erfolgte die höchste Verbesserung der Gaspermeabilität bei den sehr schädlich (NB3) nachbehandelten Proben. Jedoch blieben die Proben mit NB3 weiterhin deutlich permeabler als alle anderen Proben, was auf einen dauerhaften Einfluss der Nachbehandlung schließen lässt. Zuletzt lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der abgezogenen Seiten („Oberseite“) eine deutlich höhere Streuung aufweisen als die

Schalseiten und Zusammenhänge zwischen Nachbehandlungsqualität und Permeabilität nur schlecht aufgezeigt werden können.

Durchschnittliche Temperatur und Feuchtigkeitswerte während der Außenlagerung (Mitte Jänner bis Anfang März) waren:

- Lufttemperatur: $6,9 \pm 4,1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Luftfeuchtigkeit: $64 \pm 13 \text{ \%rLF}$

Bei der **zweiten Versuchsreihe** wurden Proben mit BS1C Plus Beton hergestellt und unterschiedlich nachbehandelt. Die Würfel ($d = 15 \text{ cm}$) wurden nach 28 Tagen entweder abwechselnd innen und außen (zwei Probewürfel pro Nachbehandlung), oder kontinuierlich im Labor (bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, ein Probewürfel pro Nachbehandlung) gelagert. Anschließend wurden an diesen Proben Gaspermeabilitätsmessungen durchgeführt, siehe Abbildung 21.

Während der ersten Außenlagerung (Mitte Februar bis Mitte April, Probenalter von vier bis zwölf Wochen) wurden folgende Durchschnittswerte für die Temperatur und Feuchtigkeit gemessen:

- Lufttemperatur: $10,0 \pm 4,9 \text{ }^\circ\text{C}$
- Luftfeuchtigkeit: $47 \pm 14 \text{ \%rLF}$

Während der zweiten Außenlagerung (Mitte Mai bis Anfang Juni, Probenalter von 16 bis 20 Wochen):

- Lufttemperatur: $16,5 \pm 3,9 \text{ }^\circ\text{C}$
- Luftfeuchtigkeit: $58 \pm 16 \text{ \%rLF}$

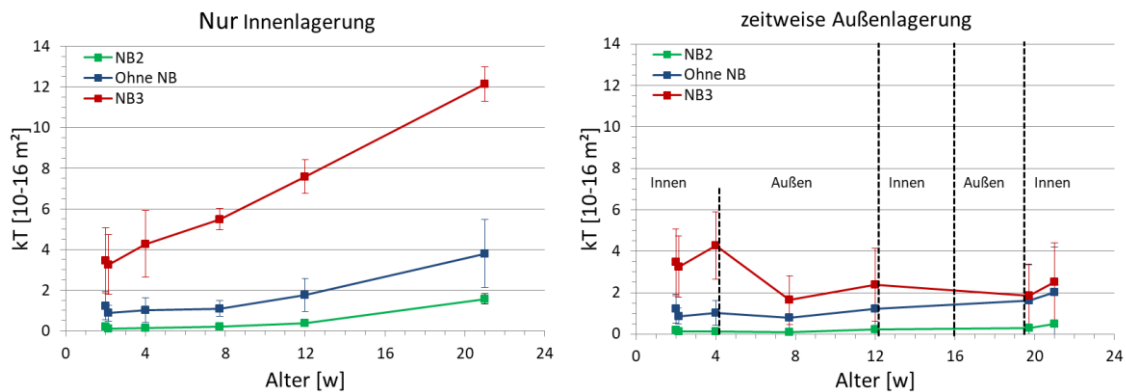


Abbildung 21: Gaspermeabilität von BS1C Plus Proben je nach Alter, Nachbehandlungsqualität und Art der Lagerung (kontinuierliche Innenlagerung links, abwechselnd Innen- und

Außenlagerung rechts). Es wurden nur die Ergebnisse der Schalseiten dargestellt

Beim Vergleich der beiden Lagerungsarten (siehe Abbildung 21) zeichnet sich in beiden Fällen ein ähnlicher Verlauf der Gaspermeabilität im ersten Monat ab. Bei der sehr schädlichen Nachbehandlung NB3 findet ein starker Anstieg der Permeabilität statt, bei der NB2 und der fehlenden Nachbehandlung Ohne NB ändern sich die Werte in den ersten vier Wochen kaum. Nach ca. vier Wochen ist bei der Innenlagerung ein stetiger Anstieg der Gaspermeabilität zu beobachten, vor allem ab einem Alter von acht Wochen bei den Proben mit NB2 und Ohne NB. Der Anstieg ist besonders bei den Proben NB3 sehr stark ausgeprägt. Dieser Trend lässt sich bei der zeitweisen Außenlagerung nicht beobachten. Nach vier Wochen Innenlagerung wurden die Proben außen gelagert, was einen Abfall der Gaspermeabilität mit sich zieht. Es kam somit zu einer Verbesserung des Gefüges an der Betonoberfläche. Diese Verbesserung ist vor allem bei NB3 zu beobachten, was sehr gut mit den Ergebnissen der Versuchsreihe 1 übereinstimmt. Beachtenswert ist die Zunahme der Gaspermeabilität aller Proben während der Innenlagerung bei der zeitweisen Außenlagerung, diese ist sehr gut im Probenalter von 20 bis 21 Wochen zu sehen. Anzumerken wäre noch die – im Gegensatz zur Innenlagerung – höhere Streuung (Standardabweichung) der Werte der Gaspermeabilität zwischen den Schalseiten und den abgezogenen Seiten bei der Außenlagerung. Sie könnte dadurch erklärt werden, dass die abgezogenen Seiten direkt der Bewitterung ausgesetzt wurden (Würfelseite „oben“), während die Schalseiten hingegen geschützt waren (Würfelseite „seitlich“).

Somit können folgende Schlussfolgerungen für die Baustellentauglichkeit des Gaspermeabilitätsmessgeräts nach Torrent gezogen werden:

- Es zeigte sich, dass sich die Außenlagerung mit wechselnder Bewitterung günstig auf die Gaspermeabilität auswirkt. Unklar ist, wie groß die Rolle der Probenfeuchtigkeit in diesem Fall ist, die das Ergebnis verfälschen könnte, oder ob es sich tatsächlich um eine Verbesserung der Oberflächenqualität handelt.
- Auch bei einer Verbesserung der Gaspermeabilität während der Außenlagerung bleibt der Unterschied zwischen den guten und schädlichen Nachbehandlungen bestehen, jedoch ist dieser deutlich geringer, als während der reinen Innenlagerung unter Laborbedingungen.

4. Analyse der Laboruntersuchungen

Aus der Auswertung der Laboruntersuchungen (siehe Kapitel 3) lässt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Qualität der Betonrandzone – in Bezug auf die Dauerhaftigkeit und Festigkeit – und der Nachbehandlung ableiten. Es konnte bestätigt werden, dass eine fehlende oder schädliche Nachbehandlung zu:

- niedrigeren Druckfestigkeiten,
- niedrigeren Frost-Tausalz-Widerständen,
- einer höheren Chlorideindringung,
- einer beschleunigten Karbonatisierung und
- zu einer erhöhten Gaspermeabilität des Bauwerks führt.

Diese Faktoren verschlechtern die Dauerhaftigkeit der betroffenen Betonkonstruktionen erheblich und können zu (auch finanziell) schwerwiegenden Schäden führen. Es zeigte sich, dass besonders in den Sommermonaten auf eine fachgerechte Nachbehandlung zu achten ist, da andernfalls Schäden ähnlich zur Nachbehandlung 3 (NB3, 30 °C Lufttemp. und 40 % rLf), zu erwarten sind.

Der schädliche Einfluss einer unzureichenden Nachbehandlung konnte somit mit allen Messmethoden nachgewiesen werden, auch wenn die Aussagekraft von Methode zu Methode variiert.

4. ALTERNATIVE SENSORBASIERTE BEURTEILUNGSMÖGLICHKEITEN

Zusätzlich zu den in Kapitel 3 angeführten Bewertungsverfahren wurden sensorbasierte Beurteilungsmöglichkeiten untersucht. Die Versuche mit diesen Methoden werden im Folgenden erklärt und die Ergebnisse dargestellt.

1. Labortests

- **Ultraschall**

Die Ultraschalluntersuchungen fanden an Betonproben mit den Abmessungen 10x10x10 cm statt. Dafür wurden Scherwellenköpfe verwendet, die links und rechts an den Betonproben angesetzt wurden (direkte Anordnung), um die Laufzeit der Scherwellen in μs zu messen. Um einen konstanten Anpressdruck zu erreichen, wurden die Scherwellenköpfe, wie in Abbildung 22 dargestellt, mittels Rex Gummis an den Proben fixiert. Die Messungen wurden mit dem Ultraschallgerät Pundit Lab + der Firma Proceq durchgeführt.



Abbildung 22: Messaufbau der Ultraschallmessungen mit direkter Anordnung der Scherwellenköpfe

Die Proben wurden an mehreren Tagen über eine Dauer von 4 Wochen gemessen, um festzustellen, ob sich die Scherwellenlaufzeit auf die Hydratationsdauer auswirkt, wobei eine gute Nachbehandlung in der Theorie die Laufzeit verkürzt. Es wurden Proben mit unterschiedlicher Nachbehandlung (NB2 – Folienlagerung, Ohne NB – ohne Nachbehandlung und NB3 – Lagerung bei hohen Temperaturen) untersucht. Zunächst wurden Tastversuche an insgesamt drei Betonproben mit den unterschiedlichen Nachbehandlungen und verschiedenen W/B-Werten durchgeführt.

Abbildung 23 zeigt die Scherwellenlaufzeit der drei verschiedenen Nachbehandlungsarten. Die Laufzeit ist wie erwartet bei guter Nachbehandlung deutlich geringer und nimmt mit dem Probenalter vor allem in den ersten Tagen der Hydratation stark ab. Mit zunehmend schlechter Nachbehandlung verlängert sich die Scherwellenlaufzeit. Die Scherwellenlaufzeit nimmt bei allen Nachbehandlungen mit zunehmendem Probenalter tendenziell ab.

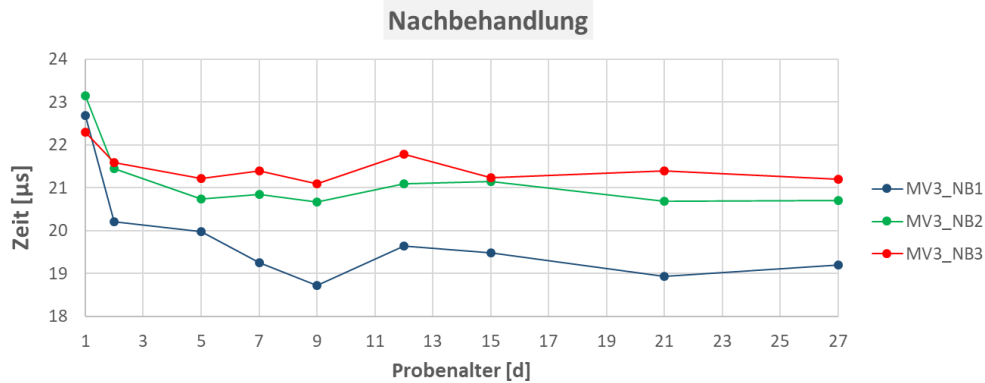


Abbildung 23: Scherwellenlaufzeit in Abhängigkeit vom Probenalter und der Nachbehandlung

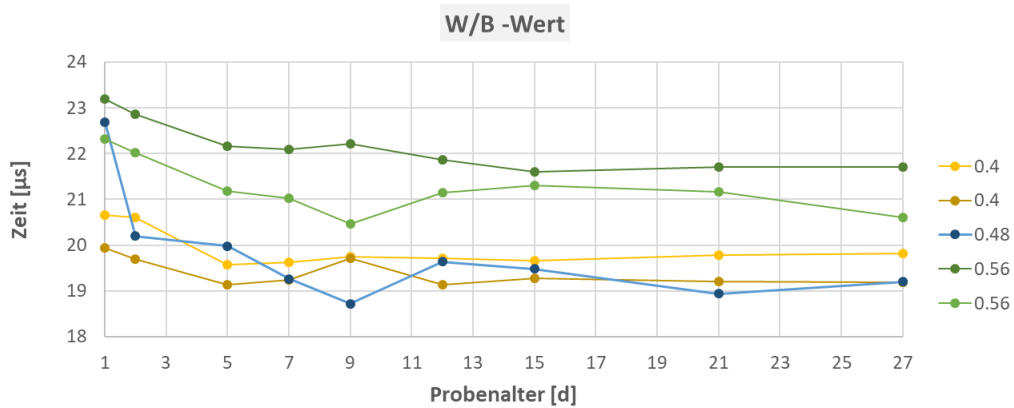


Abbildung 24: Scherwellenlaufzeit in Abhängigkeit vom Probenalter und dem W/B-Wert

Die Darstellung der Laufzeiten in Abhängigkeit vom W/B-Wert in Abbildung 24 veranschaulicht den Einfluss der Feuchtigkeit auf das Messergebnis. Zwischen den Proben mit den W/B-Werten 0,48 und 0,40 ist wenig Unterschied zwischen den Laufzeiten über das Probenalter zu verzeichnen. Die Proben mit dem W/B-Wert 0,56 zeigen wie erwartet aufgrund des höheren Wassergehaltes höhere Laufzeiten.

Dieses Verfahren eignet sich durch einfache und flexible Messungen der Scherwellenlaufzeit auch für Messungen auf Baustellen. Anhand der Aufzeichnung der Scherwellenlaufzeit ist es unter Berücksichtigung der Feuchtigkeitsbedingungen möglich Aussagen über die Nachbehandlungsqualität zu treffen.

Weitere Versuche wurden mit höherer Probenanzahl für die Betone B3, B5 und BS1C durchgeführt, um die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu prüfen. Für jede Nachbehandlung wurden vier Betonproben pro Betonsorte erstellt. Jede Probe wurde an zwei Seiten gemessen. Somit wurden pro Nachbehandlung, Betonsorte und Messtag 8 Laufzeiten erhoben.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der Ultraschalltests für den B3, B5 und BS1C dargestellt. Eine starke Änderung der Laufzeit in den ersten Tagen lässt sich vor allem bei NB2 und Ohne NB verzeichnen. Ab Tag 7 verändert sich Laufzeit nur noch gering. Bei NB3 tritt im Vergleich zu Tag 1 kaum eine Veränderung der Laufzeit ein, die relative Änderung der Scherwellenlaufzeit ist bei dieser NB am geringsten. Die NB2 und Ohne NB lassen sich schwer voneinander differenzieren. Bei B3 ist die Änderung der Laufzeit bei Ohne NB am stärksten.

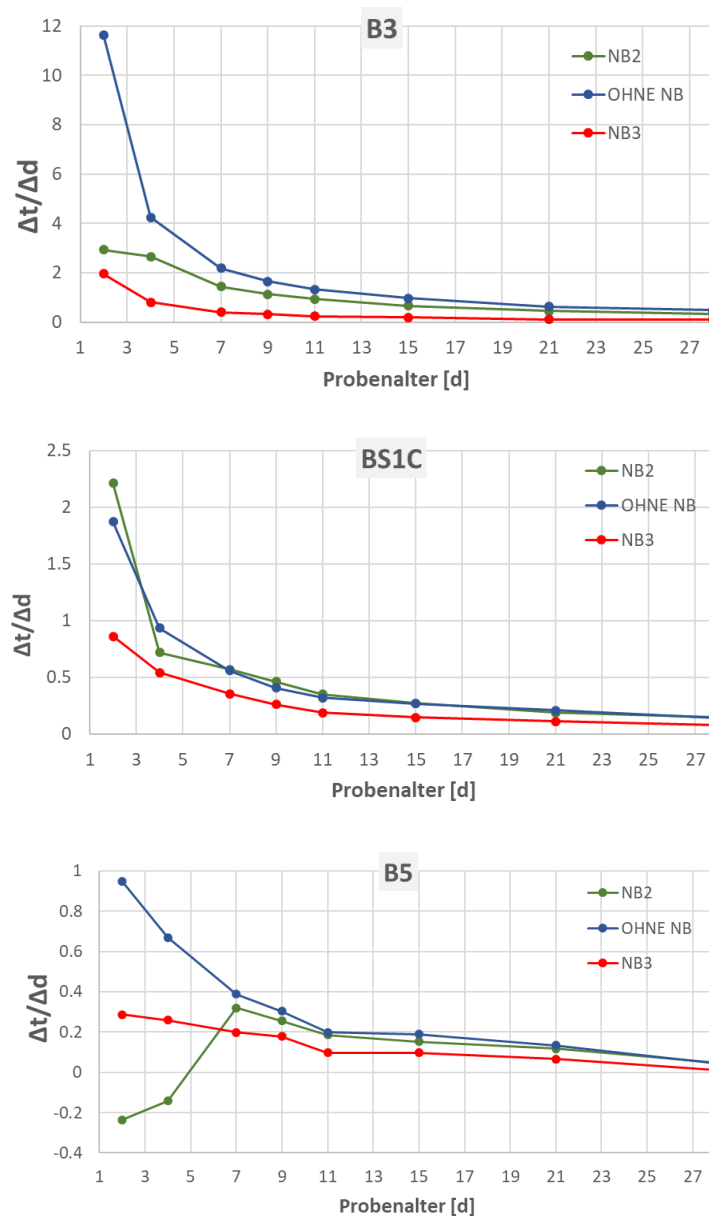


Abbildung 25: Relative Änderung der Scherwellenlaufzeit der Proben (d = 10 cm) aus B3 (oben), BS1C (Mitte), und B5 (unten) für verschiedene Nachbehandlungen im Vergleich zum Betonalter von 1 Tag

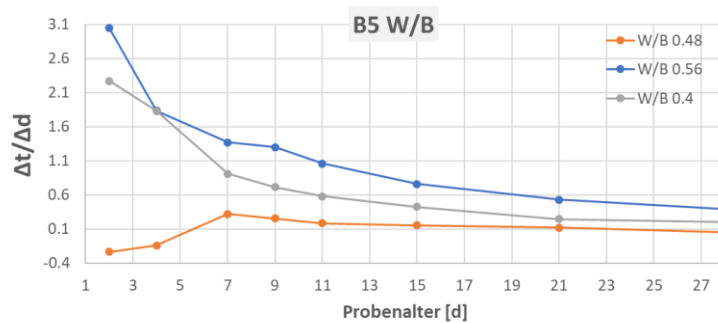


Abbildung 26: Relative Änderung der Scherwellenlaufzeit von B5 Proben (d = 10 cm) für verschiedene W/B-Werte im Vergleich zum Betonalter von 1 Tag

Die Relative Änderung der Scherwellenlaufzeit in Bezug auf das Probenalter von einem Tag von Proben mit unterschiedlichem W/B-Wert ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Proben mit dem höchsten W/B-Wert weisen wie erwartet die stärksten Änderungen der Laufzeit auf. Allerdings sind die Ergebnisse von den Proben mit den W/B-Werten 0,48 und 0,40 nicht eindeutig. Ein Grund für die nicht ganz eindeutigen Ergebnisse könnte die Anordnung der Schallköpfe sein. Durch die direkte Anordnung durchlaufen die Scherwellen, wie in Abbildung 27 gezeigt, die gesamte Probe. Da der Kern der Proben in den ersten Tagen nach der Betonage im Vergleich zur Oberfläche noch relativ feucht ist, kann das einen Einfluss auf die Ergebnisse der Scherwellenlaufzeit haben. Da für die Untersuchung der Nachbehandlungsgüte vor allem die Oberflächenbeschaffenheit von Bedeutung ist, wäre eventuell eine indirekte Anordnung der Schallköpfe zu empfehlen, bei der nur der oberflächennahe Bereich der Probe durchschallt wird.

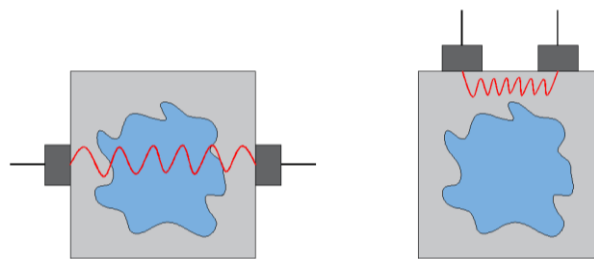


Abbildung 27: Direkte und indirekte Anordnung der Schallköpfe bei den untersuchten Betonproben

Die Stärken dieses Verfahrens liegen in der einfachen und schnellen Handhabung des Gerätes. Die Auswertung ist einfach und bedarf keiner aufwendigen Einschulung des Prüfers. Durch eine Optimierung der Messanordnung in Bezug auf die Positionierung der Scherwellenköpfe können klare Ergebnisse erzielt werden. Die Stabilität der Messergebnisse ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse noch nicht gegeben. Dazu

bedarf es noch umfassender Untersuchungen und Forschung in Bezug auf die optimale Schallkopfanzordnung, den Anpressdruck und den Einfluss von Feuchtigkeit, Temperatur und Korngefüge (Übersicht SWOT-Analyse siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: SWOT-Analyse Ultraschall

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zerstörungsfreies Verfahren • Einfache, schnelle Messungen • Einfache Auswertung • Bereits etabliertes Verfahren für die Entwicklung der Betonermüdung [51] 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Handhabung • Mit Mehrkopfsystem Messungen von kleinsten Hohlstellen bis 3 m Tiefe möglich [52]
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nur für gut erreichbare Stellen geeignet • Stabilität der Messergebnisse noch nicht erreicht 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfluss durch Feuchtigkeit, ev. Temperatur und Korngefüge • Vertieftende Forschung erforderlich (optimale Schallkopfanzordnung, Anpressdruck, ...)

- **Hyperspektralanalysen**

Die Hyperspektralen Analysen wurden an Betonproben mit unterschiedlicher Nachbehandlung (Folienlagerung - NB2, Lagerung ohne Folie - Ohne NB und Lagerung bei 30 °C - NB3) und W/B-Werten (0,4, 0,48 und 0,56) durchgeführt. Die Ergebnisse der Proben wurden anschließend miteinander verglichen und analysiert. Die Untersuchungen fanden an den Tagen 1, 2, 4, 7, 9, 11, 15, 21, und 28 nach der Betonage statt. Somit konnte die Entwicklung der Reflexionsintensität über den gemessenen Wellenlängenbereich während der Festigkeitsentwicklung des Betons beobachtet werden.

Für die Versuche wurde vom Institut für Holzforschung der Universität für Bodenkultur eine Hyperspektralkamera im Nahinfrarotbereich zur Verfügung gestellt. Das Messsystem besteht aus einer Xenics NIR (Nahinfrarot) Kamera, einem Specim N17E Spektrograph betrieben im Wellenlängenbereich zwischen 900 und 1700 nm, einer Beleuchtung aus Halogenlampen und einem mit Schrittmotor betriebenen Auflagetisch. Da die Größe der

Testkörper durch die Abmessungen des Systemaufbaus begrenzt ist, wurde für die Testkörper eine Größe von 10x10x10 cm gewählt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass es Korrelationen zwischen Materialeigenschaften und spektralen Signaturen des Betons gibt. Verschiedene chemische oder physikalische Eigenschaften können mittels hyperspektraler Bildgebungstechnologie untersucht werden. Spektralsignaturen, die an verschiedenen Tagen nach dem Betonieren von der gleichen Probe entnommen wurden, zeigten, dass der Reflexionsgrad mit den Hydratationstagen zunimmt (siehe Abbildung 28).

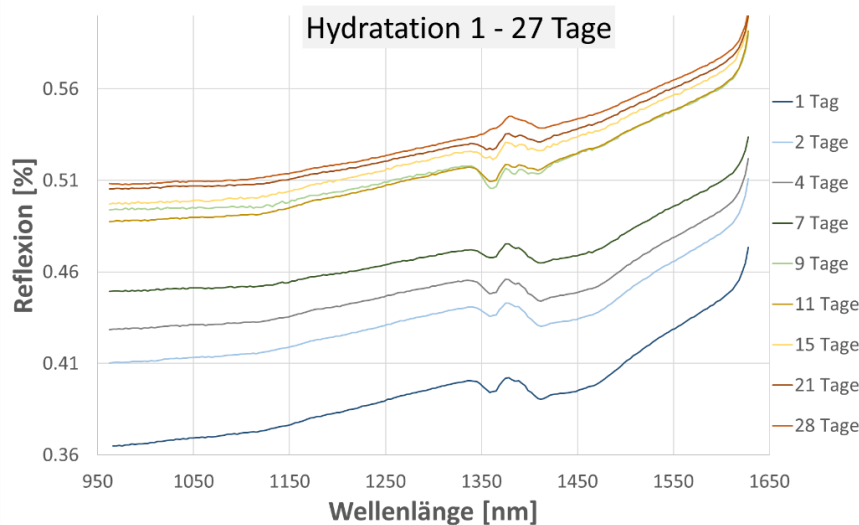


Abbildung 28: Anstieg der Reflexion einer gemessenen Probe (B3, NB2) in Abhängigkeit von der Hydratationsdauer

Darüber hinaus beeinflussen die Nachbehandlungen die Anstiegsrate der durchschnittlichen Reflexion. Die Probe mit den besten Nachbehandlungen wies die höchste Steigerungsrate auf. Ebenso steht die Anstiegsrate in Beziehung zum W/B-Wert. Die Probe mit dem höchsten W/B-Wert wies in allen Proben die höchste Anstiegsrate der Reflexion auf.

In Abbildung 29 ist die Steigung der durchschnittlichen Reflexion aller untersuchten Proben pro Nachbehandlung und Betonsorte dargestellt. Die NB2 weist in den ersten 7 Tagen nach der Betonage den stärksten Reflexionsanstieg auf und steigt bis zum Alter von 15 Tagen noch weiter an. Die Werte bleiben dann bis zum 27. Tag mehr oder weniger konstant. Bei Ohne NB steigen die Werte ebenfalls bis zum 7. Tag an, die Steigung ist aber weniger ausgeprägt als bei der NB2. Ab dem 7. Tag ist kaum noch ein Anstieg zu verzeichnen. Die Reflexion der Proben von NB3 weisen einen geringen Anstieg auf und bleiben auch relativ konstant. Der Reflexionsverlauf von NB3 unterscheidet sich signifikant von den anderen beiden Nachbehandlungen.

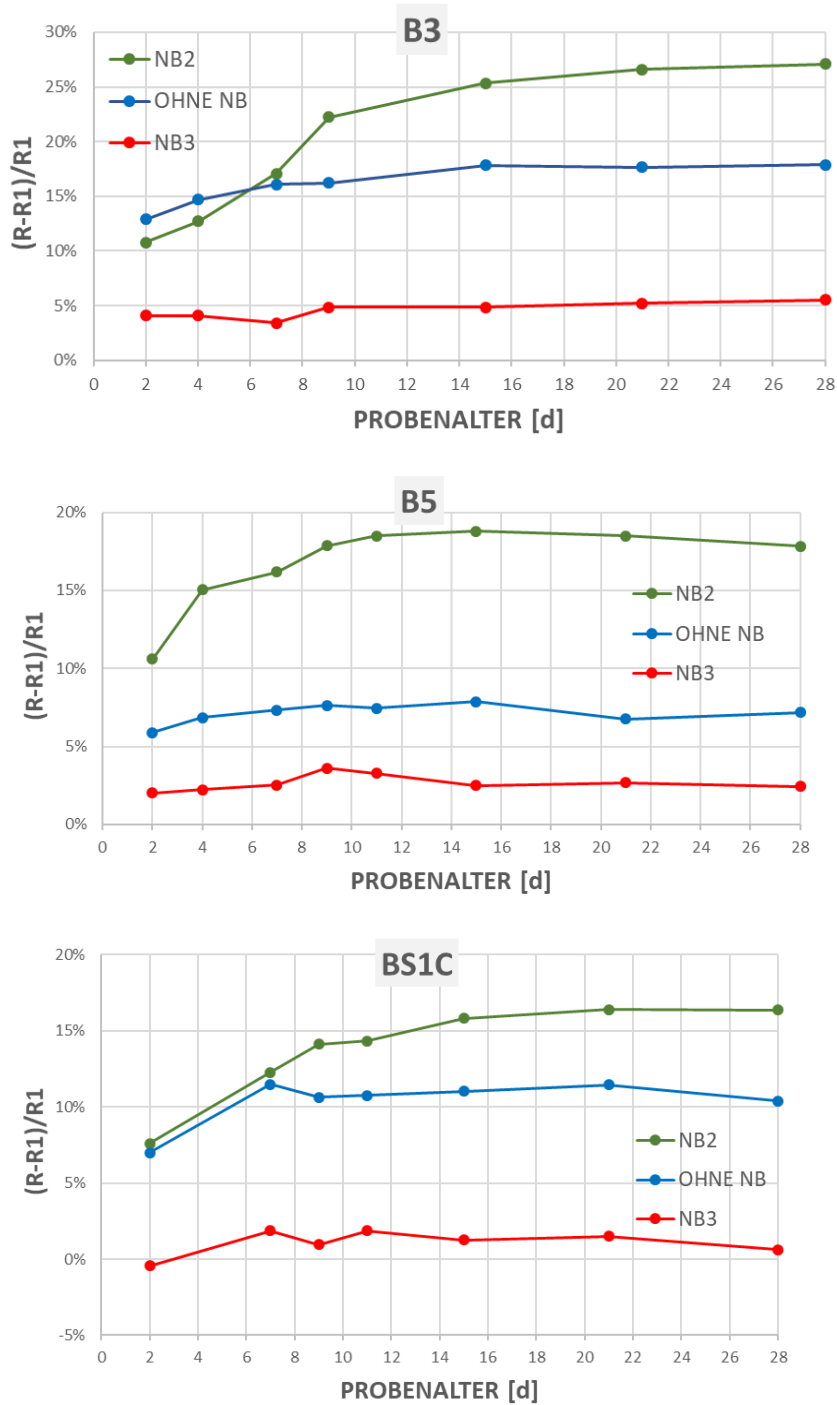


Abbildung 29: Relative Steigung des Reflexionsgrades der Proben (d = 10 cm) aus B3 (oben), B5 (Mitte), und BS1C (unten) für verschiedene Nachbehandlungen im Vergleich zum Betonalter von 1 Tag

Die Hyperspektralaufnahmen erweisen sich als ein zuverlässiges Verfahren die Nachbehandlungsqualität mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eindeutig zu bestimmen. Die Auswertungen liefern Informationen in Bezug auf die Druckfestigkeitsentwicklung, die Wassergehaltsentwicklung und die Nachbehandlungsqualität. Das Messverfahren ist einfach anwendbar, die Auswertungen sind jedoch komplex. Weiters ist eine entsprechende Auswertesoftware notwendig und die statistischen Analysen erfordern eine angemessene Expertise. Für eine zuverlässige Bestimmung der Nachbehandlungsqualität sind Referenzproben notwendig, um die Ergebnisse richtig einordnen zu können. Umwelteinflüsse, wie Feuchtigkeit, Temperatur und Lichteinfall spiegeln sich in den Ergebnissen der Hyperspektralaufnahmen wieder. Vor allem der Lichteinfall ist ein wesentlicher Einflussfaktor. Dadurch ist es schwer Laborergebnisse mit in situ Ergebnissen zu vergleichen. Wesentlich ist daher der Vergleich mit einer Referenzprobe, die unter gleichen Einflüssen aufgenommen wird. Eine SWOT-Analyse zur Hyperspektralmethode ist in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: SWOT-Analyse Hyperspektralmessungen

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zerstörungsfreies Verfahren • Eindeutige Ergebnisse in Bezug auf Druckfestigkeitsentwicklung, Wassergehaltsentwicklung und Nachbehandlungsqualität 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache schnelle Messungen • Messverfahren und komplexe Auswertesoftware automatisierbar
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Referenzkörper/-größen für Betonklassen • Expertise in statistischen Analysen • Messverfahren erfordert eine komplexere Auswertesoftware 	<p>Risiken (Forschungsbedarf)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einflüsse durch Umweltbedingungen (Lichteinfall, Oberflächentemperatur, Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit) • Laborergebnisse vs. OnSite-Ergebnisse

Um die Auswirkungen der Umwelteinflüsse und des Probenalters auf die Messergebnisse beurteilen zu können, wurden 3 von 4 Proben pro Nachbehandlung der Betonserie BS1C 2 Monate lang draußen gelagert und den Umwelteinflüssen ausgesetzt. Die Proben wurden anschließend im Alter von 115 und 224 Tagen gemeinsam mit den übrigen im Labor gelagerten Proben gemessen. Die Ergebnisse für die innen und außen gelagerten Proben sind in Abbildung 30 dargestellt.

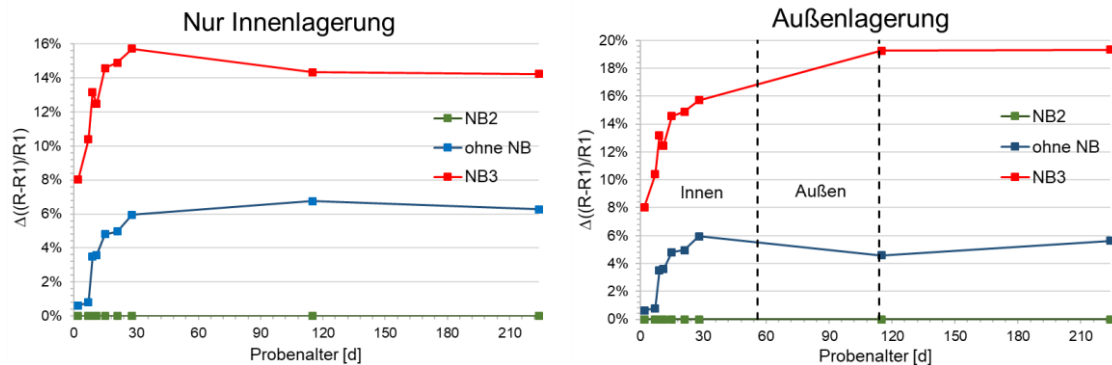


Abbildung 30: Relative Steigung des Reflexionsgrades der im Labor gelagerten Proben (links) und der teilweise außen gelagerten Proben (d = 10 cm) aus BS1C in Bezug auf Nachbehandlung 1 für verschiedene Nachbehandlungen im Vergleich zum Betonalter von 1 Tag

Der Reflexionsgrad der innen gelagerten Proben verändert sich ab einem Alter von einem Monat nur noch geringfügig. Durch die Außenlagerung verstärkt sich der Unterschied zwischen NB2 und NB3 noch deutlich. Ohne NB nähert sich durch die Außenlagerung leicht an die NB2 an. Die Unterschiede zwischen den Nachbehandlungen sind sowohl bei der Innen- als auch bei der Außenlagerung eindeutig zu erkennen.

- **Digitalmikroskop**

Die detaillierte Untersuchung der Oberflächenstruktur in Hinsicht auf Mikrorisse und Porenverteilung ist anhand der digitalen Bildkorrelationssysteme aufgrund der ungenügenden Auflösung nicht möglich.

Eine Alternative stellen Digitalmikroskope dar. Diese hochauflösenden Systeme ermöglichen eine umfassende Untersuchung der Mikrostruktur von Oberflächen. Die detaillierten Abbildungen ermöglichen eine genaue Auswertung der Porosität auf der Betonoberfläche (siehe Abbildung 31).

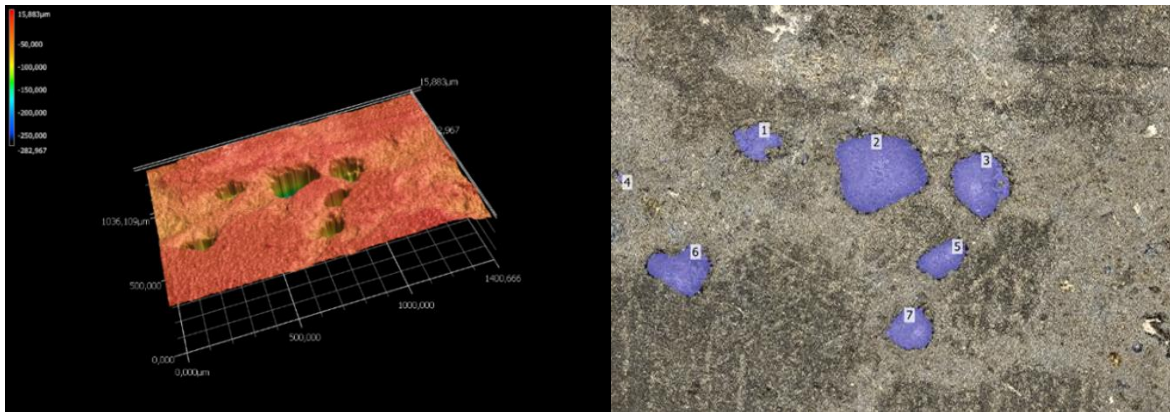


Abbildung 31: 3D Abbildung (links) und Analyse der Porosität (rechts) einer Betonoberfläche im µm- Bereich

Die Porosität der Betonoberfläche wird am besten durch eine 20- bis 30-fach vergrößerte Aufnahme der Oberfläche mit dem Digitalmikroskop dargestellt. Anschließend können mittels der dazugehörigen Software dunkle Flächen (= Poren) automatisch ausgewertet und quantifiziert werden. In Laborversuchen wurde der Porenanteil sowie der durchschnittliche Porendurchmesser von Aufnahmen der Proben der Serie BS1C ermittelt und die Ergebnisse der drei Nachbehandlungen verglichen (siehe Abbildung 32).

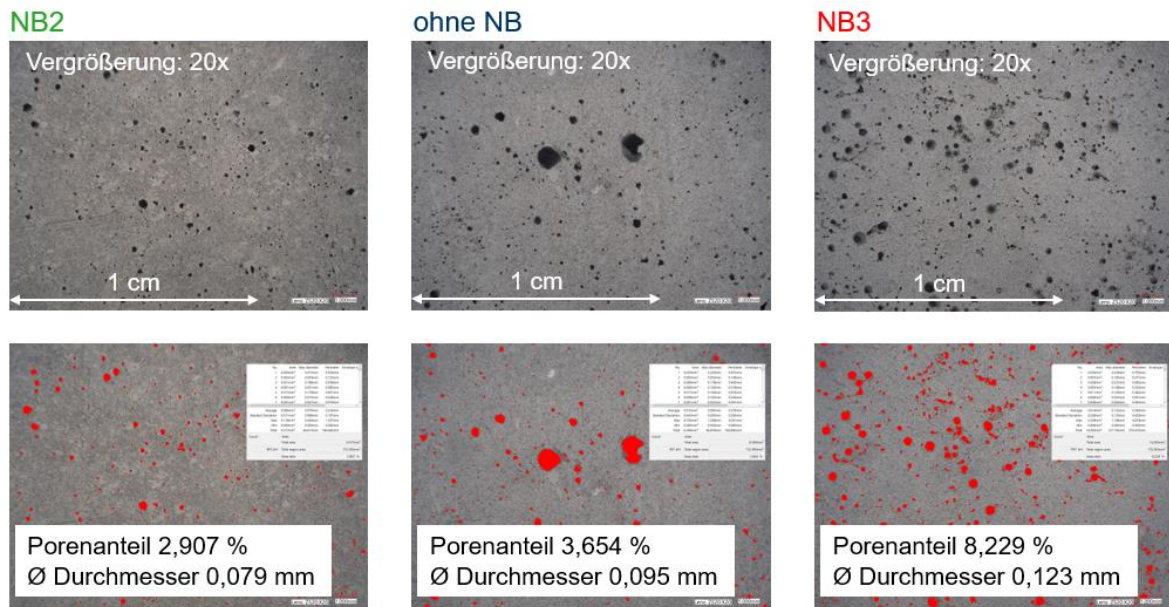


Abbildung 32: Mikroskopaufnahmen mit 20-facher Vergrößerung von NB2, Ohne NB und NB3 der Serie BS1C mit Auswertung des Porenanteils und des durchschnittlichen Porendurchmessers

Die Auswertungen aus Abbildung 32 zeigen, dass der Porenanteil mit zunehmend schlechterer Nachbehandlung (NB3) deutlich höher wird. Auch der durchschnittliche Porendurchmesser ist bei der schlechtesten Nachbehandlung am größten.

Die Anwendung dieser Methode ist einfach und schnell durchführbar. Die automatische Berechnung der Flächenanteile und durchschnittlicher Größen der Aufnahmen bei der Auswertung durch die Software ermöglicht eine rasche Darstellung der Ergebnisse. Der Vorteil dieser Methode liegt neben der einfachen Handhabung darin, dass Feuchtigkeit und Temperatur auf die Ergebnisse keinen Einfluss haben. Bei entsprechender Vergrößerung der Aufnahmen können zusätzlich Dünnschliff, Kristallisation und Mikrorisse untersucht werden.

Da durch die Nahaufnahmen pro Messung nur relativ kleine Flächen aufgenommen werden, sind diese oft nicht repräsentativ. Aus diesem Grund ist es zu empfehlen mehrere „zufällige“ Aufnahmen über den gesamten Oberflächenbereich verteilt durchzuführen. Die SWOT-Analyse zu den Digitalmikroskopaufnahmen ist in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: SWOT-Analyse Digitalmikroskopaufnahmen

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zerstörungsfreies, kontaktloses Verfahren • Einfache, schnelle Messungen • Einfache Auswertung 	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Handhabung • Kein Einfluss durch Feuchtigkeit, Temperatur • Untersuchung von Dünnschliff, Kristallisation, Porenanteil und Mikrorissen
<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aussagekraft der Ergebnisse • Ausreichend große Stichprobenzahl notwendig 	<p>Risiken (Forschungsbedarf)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mikroskopische Details aufgrund zufälliger „Punktaufnahmen“ nicht repräsentativ

- **Gasanalysen**

Anhand der Headspace Gaschromatographie wurden frische Mörtelproben auf flüchtige Komponenten untersucht. Für die Gasanalysen wurde der Betonmischung B3 Mörtel in geringen Mengen entnommen, in kleine Probefläschchen zur weiteren Untersuchung

abgefüllt und luftdicht verschlossen. Die Proben wurden im Gaschromatograph bis 60 °C erhitzt, um flüchtige Komponenten zu messen. Die Ergebnisse wurden mit denen eines „Blanks“ (einem leeren Probefläschchen) verglichen, um auszuschließen, dass Komponenten, die nicht direkt aus der Mörtelprobe stammen in die Analyse mit einbezogen werden. Die Messungen haben ergeben, dass die Mörtelproben keine Komponenten aufwiesen, die nicht auch im Blank nachgewiesen werden konnten.

Weitere Untersuchungen können aber durchaus Erfolge zeigen. Dabei ist abzuwägen, ob eine andere Analyseverfahren wie zum Beispiel die dynamische Headspace Methode sinnvoll wäre. Eine weitere vielversprechende Methode ist die Verwendung eines Tracers. Dieses Verfahren wird in anderen Materialbereichen und in der Geotechnik bereits eingesetzt. Eine Auswahl des geeigneten umweltfreundlichen Tracers benötigt jedoch noch vertiefte Analysen.

- **Infrarot**

Die Messgenauigkeit einer Thermokamera wie der FLIR E60bx liegt bei +/- 2 °C bzw. 2 %. Da die Temperaturveränderungen von Beton in den ersten Stunden der Hydratation am stärksten ist und die Betonoberfläche bereits am Folgetag keine wesentlichen Temperaturänderungen mehr aufweist, die mit einer Thermokamera aufgenommen werden könnten, ist diese Methode zur Untersuchung der Nachbehandlungsqualität von Beton auf Basis der getesteten Bedingungen weniger geeignet.

2. Analyse der alternativen sensorbasierten Beurteilungsmöglichkeiten

Die Auswertungen der Laboruntersuchungen der alternativen sensorbasierten Methoden beweisen, dass ein Zusammenhang der Nachbehandlung mit der Betonqualität besteht. Mithilfe der Hyperspektralanalysen lässt sich feststellen, dass die Festigkeitsentwicklung vom Beton bei guter Nachbehandlung am längsten andauert und stärker ausgebildet ist. Die Zunahme der Porosität mit schlechter werdender Nachbehandlung kann mit dem Digitalmikroskop festgestellt werden. Die Faktoren Druckfestigkeit und Porosität tragen wesentlich zur Dauerhaftigkeit von Beton bei, somit stellen Hyperspektralanalysen und Digitalmikroskopaufnahmen geeignete Methoden zur Bewertung der Nachbehandlungsqualität dar.

Die Güte der Nachbehandlung kann bei entsprechender Anordnung der Schallköpfe auch mittels Ultraschall ermittelt werden. Dies wird bei den Baustellenmessungen in Kapitel 0 gezeigt.

Empfehlenswert ist der Einsatz einer Kombination aus vielversprechenden alternativen sensorbasierten Verfahren und der Messung der Gaspermeabilität sowie der elektrischen Widerstandsmessung, um die Aussagequalität der Erhebungen zu verbessern. Mittels Gaspermeabilität, Ultraschall und elektrischer Widerstandsmessung können an einer Stelle, die als eine Art Kardinalpunkt fungiert, punktuelle Messungen zur Validierung weiterer Aufnahmen durchgeführt werden.

Die Hyperspektralanalysen ermöglichen bei entsprechender Kameraauswahl einen mobilen Einsatz auf Drohnen. Diese Anwendung eignet sich besonders zur flächenhaften Erfassung des Bauwerks.

Von den Ergebnissen des Kardinalpunkts ausgehend, kann eine flächenhafte Erfassung des Bauwerks mit der Hyperspektralen Bildgebung und die anschließende Evaluierung der Nachbehandlungsqualität erfolgen.

Durch die Kombination der Methoden kann die Qualität der Evaluierung sowie der zeitliche Aufwand bei der Erhebung und Auswertung der Daten optimiert werden. Unsicherheiten bei der Bewertung werden durch die Evaluierung der Testergebnisse mehrerer Verfahren gemindert.

Die Gasanalysen sowie Infrarotaufnahmen erwiesen sich aufgrund der zu hohen Messungengenauigkeiten bei der Untersuchung der Nachbehandlungsqualität als weniger geeignet.

5. ÜBERLEITUNG IN DIE PRAXIS – BAUSTELLENVERSUCHE

1. Wahl der Messmethoden

Für die weitere Vorgehensweise, also der Versuchsreihe am realen Bauwerk auf der Baustelle, war eine Auswahl an geeigneten Messmethoden notwendig. Dies erfolgte auf Basis von Tabelle 15. In dieser sind die in den Laborversuchen verwendeten Untersuchungsmethoden, die Aussagekraft ihrer Ergebnisse, die Möglichkeit diese auf der Baustelle durchzuführen und die Bewertung ihrer Eignung dargestellt. Die grün hervorgehobenen Methoden wurden dabei als am aussichtsreichsten ausgewählt und wurden deshalb für die Baustellenversuche herangezogen.

Tabelle 15: Eignung der Nachweisverfahren für die Baustellenversuche

Untersuchungsmethode	Ergebnis	Durchführbarkeit auf der Baustelle	Eignung
Druckfestigkeit	gut	schwer – Probennahme erf.	nicht geeignet
Frost-Tausalz-Widerstand	gut	schwer – Probennahme erf.	nicht geeignet
Chlorideindringung	gut	schwer – Probennahme erf.	nicht geeignet
Karbonatisierungstiefe	gut	mäßig – kleinflächige Zerstörung der Oberfläche	mäßig geeignet
Gewichtsverlust	gut	nein	nicht geeignet
Wassereindringtiefe nach Karsten	mäßig	leicht	mäßig geeignet
Gaspermeabilität	gut	leicht	gut geeignet
Multiring-Elektrode	gut	schwer – nur wenn diese vorher einbetoniert wird	nicht geeignet
Elektrischer Widerstand	gut	leicht	gut geeignet
Rückprallhammer	mäßig	leicht	mäßig geeignet
Ultraschall	mäßig	leicht	mäßig geeignet
Hyperspektralanalysen	gut	leicht	gut geeignet
Digitalmikroskop	mäßig	mäßig – großer Anzeigebildschirm zur Messung notwendig	mäßig geeignet

Zusätzlich zu den in der Tabelle 15 angeführten Methoden wurden auf der Baustelle Proben zur Analyse mittels Computertomografie entnommen sowie Georadarmessungen durchgeführt.

2. ÖBB Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf

Im Zuge dieses Projektes wurden Baustellenversuche auf der Baustelle des Bahnhofs Siebenbrunn-Leopoldsdorf auf der Bahnstrecke Stadlau-Marchegg durchgeführt. Es handelte sich dabei um Versuche am Baulos SM-20, auf einer ca. 11 m langen und ca. 3 m

hohen Stahlbetonwand mit der Blockbezeichnung 234, siehe Abbildung 33. Es handelte sich dabei um eine Weiße Wanne, die mit einem Beton C25/30(56) BS1C F52 GK22 42,5N hergestellt wurde. Die für die Betonage verwendete Rezeptur ist in Tabelle 16 ersichtlich.

Tabelle 16: Betonrezeptur BS1C

Betonbezeichnung	BS1C	
Erzielte Festigkeitsklasse	C25/30	[]
Zement (Lafarge CEM I 42,5N SR0 WT27 C ₃ A-frei)	275	kg/m ³
Anrechenbarer Zusatzstoff	80	kg/m ³
Gesamtwasser	165	kg/m ³
W/B-Wert	0,49	-
Gesteinskörnung RK 0/4	705	kg/m ³
Gesteinskörnung 4/16	619	kg/m ³
Gesteinskörnung 16/32	442	kg/m ³
Luftporenbildner WTB Air 102	1,53	kg/m ³
Fließmittel WTB Plast 100/3	2,17	kg/m ³
Luftgehalt (Frischbeton)	5,8	%
Rohdichte	2290	kg/m ³
Frischbetontemperatur	20	°C

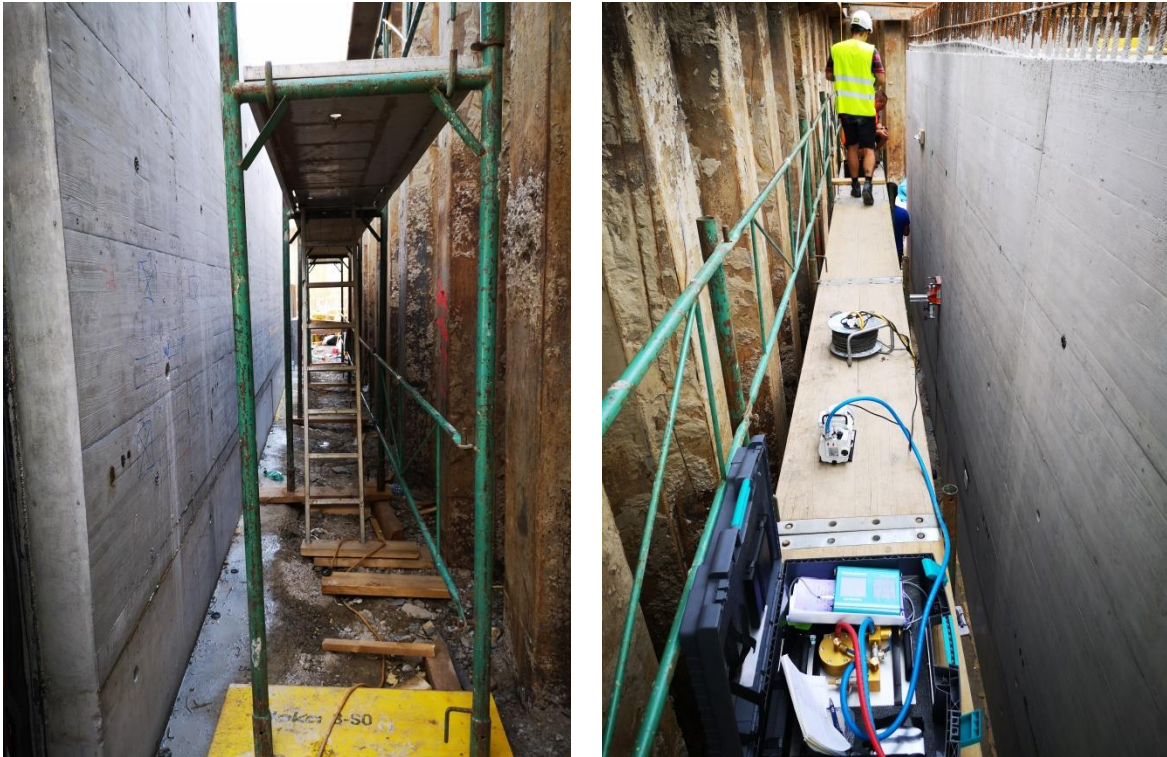


Abbildung 33: Für die Untersuchungen freigegebene Wand mit dem Bereich „unten“ (links) und dem Bereich „oben“ (rechts)

Die gegen Westen gerichtete Seite der Wand wurde dabei in drei Bereiche mit jeweils ca. 3-4 m Breite eingeteilt, siehe Abbildung 34.

Die drei Bereiche wiesen dabei eine jeweils unterschiedlich lange Nachbehandlungsdauer auf:

- Der Bereich „schlecht“ wurde nach einem Tag ausgeschalt und im Anschluss nicht nachbehandelt.
- Der Bereich „mittel“ wurde nach vier Tagen ausgeschalt und wie üblich nachbehandelt.
- Der Bereich „gut“ wurde nach sieben Tagen ausgeschalt und wie üblich nachbehandelt.

Die Nachbehandlung gestaltete sich folgendermaßen: Nach dem Ausschalen wurde der zu nachbehandelnde Bereich für ca. drei Tage mit Vließ eingehaust und jeweils vormittags mit Wasser berieselt.

Die unterschiedlich nachbehandelten Bereiche wurden zusätzlich in einen oberen und unteren Bereich unterteilt, um die Auswirkungen der stärkeren Umwelteinflüsse (Sonneneinstrahlung, Trockenheit, Schlagregen) oben und der eher feuchten Verhältnisse unten zu berücksichtigen, siehe Abbildung 34.

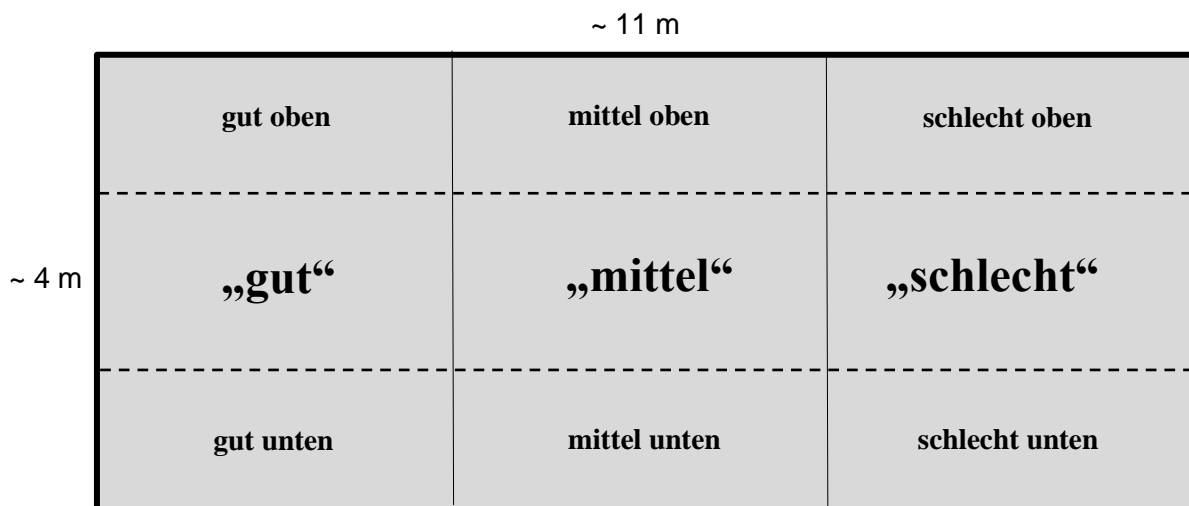


Abbildung 34: Skizze des untersuchten Wandbereichs im Block 234

Die meteorologischen Bedingungen Temperatur und Luftfeuchte wurden im Zeitraum von Beginn der Betonage bis zum Tag der Baustellenversuche mit einem Datenlogger aufgezeichnet und sind in Abbildung 35 sichtbar. Der Sensor befand sich dabei auf einer Höhe von ca. 1,5 Metern. Es ist ersichtlich, dass die meteorologischen Bedingungen relativ günstig waren: die Lufttemperaturen waren gemäßigt und die Luftfeuchtigkeit war hoch. Das Bauteil befand sich nämlich an einem verschatteten und windgeschützten Standort auf der Baustelle. Deswegen ist davon auszugehen, dass in diesem Fall eine fehlende Nachbehandlung (in diesem Fall die Nachbehandlung „schlecht“) keinen so großen negativen Einfluss hat wie beispielsweise bei Bauteilen, die in exponierteren Lagen mit direkter Sonnenbestrahlung hergestellt wurden.

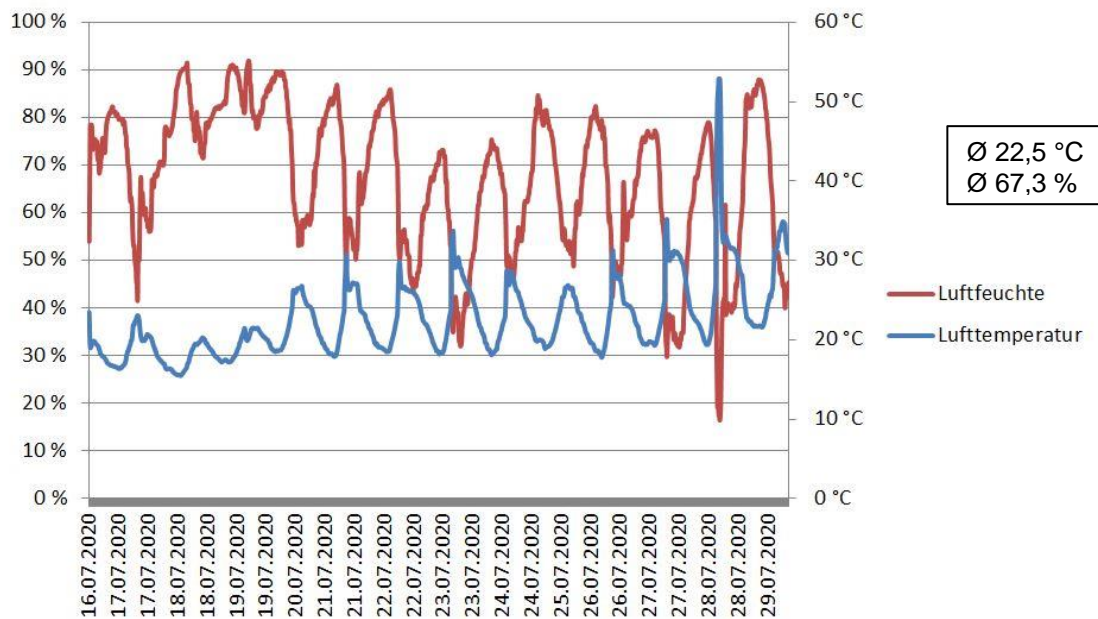


Abbildung 35: Temperatur- und Luftfeuchteverlauf im Zeitraum nach der Betonage

Das Wandbauteil wurde am 16. Juli hergestellt, die vor Ort durchgeführten Versuche wurden rund zwei Wochen später am 29. Juli durchgeführt. Gleichzeitig zu den Versuchen auf der Baustelle am Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf wurden vier Referenzwürfel im Labor untersucht. Diese Referenzwürfel mit einer Kantenlänge von 15 cm wurden zeitgleich zur Betonage des Wandbauteils aus derselben Betonmischung hergestellt. Nach der Herstellung auf der Baustelle wurden diese ins Labor transportiert, nach einem Tag ausgeschalt und danach sieben Tage lang in Wasser gelagert. Anschließend wurden sie in einem temperierten Raum bei 20 °C und 60 % Luftfeuchte gemäß ONR 23303 gelagert.

Für die Auswahl der durchzuführenden Versuche wurden die Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen (siehe Kapitel 3) in Betracht gezogen. Diese führten zu folgendem Versuchsaufbau für den Wandbereich auf der Baustelle und für die Referenzwürfel im Labor:

- Gaspermeabilitätsmessung
- Messung des elektrischen Widerstandes an der Oberfläche
- Messungen mit dem Rückprallhammer
- Digitalmikroskop
- Hyperspektralanalysen
- Ultraschall
- Georadar
- Computertomographie

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen (auf der Baustelle und im Labor) werden im Folgenden präsentiert.

- **Gaspermeabilität**

Die Laboruntersuchungen zur Gaspermeabilität aus Kapitel 3 konnten eine deutliche Abhängigkeit der Permeabilität von der Art der Nachbehandlung zeigen. Dies sollte nun auch in Situ bewiesen werden, siehe Abbildung 36.

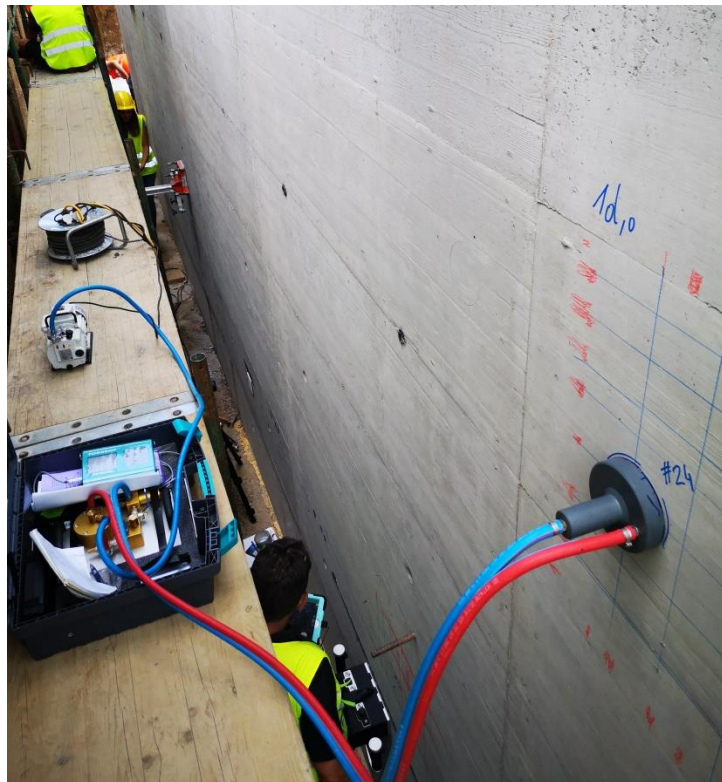


Abbildung 36: Gaspermeabilitätsmessung auf der Baustelle

Gemäß der Einteilung des Wandbereichs auf Abbildung 34, wurden Gaspermeabilitätsmessungen in den jeweiligen Bereichen durchgeführt. Diese wurden mit zwei Geräten durchgeführt: mit dem Gerät TORRENT der Firma Proseq und dem Gaspermeabilitätstester Permeatorr von Roberto Torrent. Zusätzlich wurden zeitgleich Gaspermeabilitätsmessungen an den Referenzwürfeln im Labor durchgeführt. Die gemessene Gaspermeabilität k_T ist jeweils in 10^{-16} m^2 angegeben. Die Ergebnisse dieser beiden Messungen sind in Abbildung 37 ersichtlich.

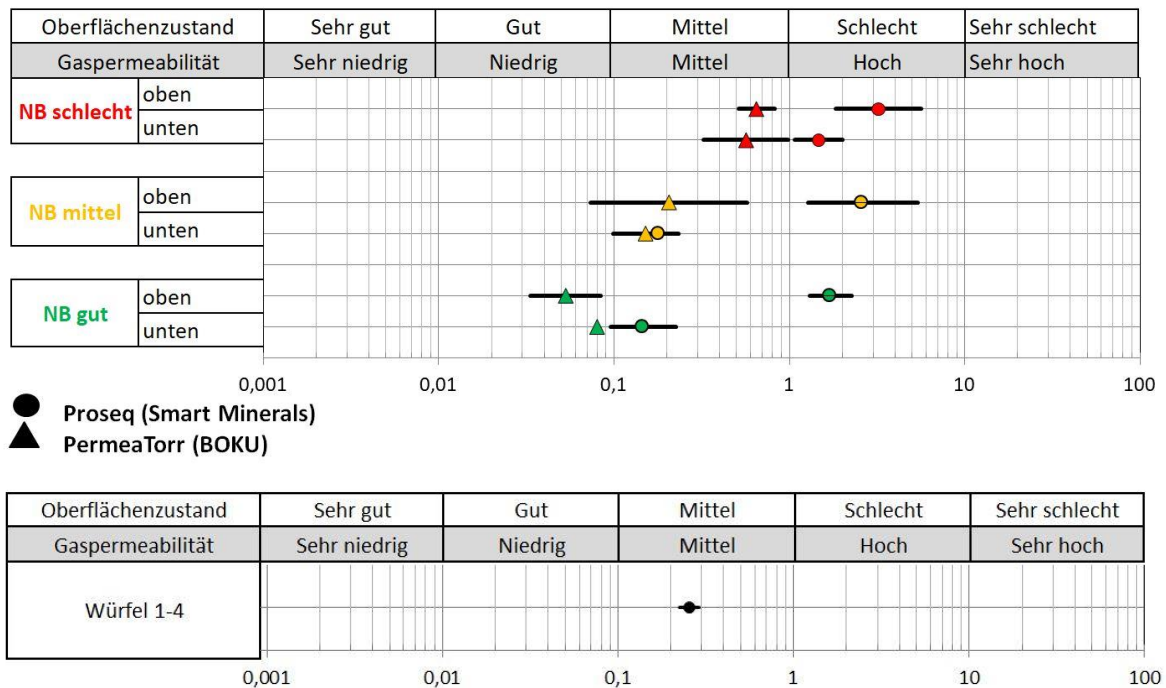


Abbildung 37: Gaspermeabilität der drei Wandbereiche auf der Baustelle (oben) und der Referenzwürfel im Labor (unten)

Wie in Abbildung 37 ersichtlich, korrelieren die Ergebnisse der Baustellenversuche mit jenen der Laboruntersuchungen aus Kapitel 3. Bei beiden lässt sich eine Verschlechterung der Gaspermeabilität, und deshalb auch ein negativer Einfluss auf die Oberflächenqualität von schlecht nachbehandelten Bereichen oder Proben, erkennen. Interessanterweise weisen die Ergebnisse der Messungen an den Referenzwürfel ähnliche Werte zu jenen der „mittleren“ Nachbehandlung auf der Baustelle auf. Und das, obwohl diese nach dem Ausschalen sieben Tage lang in Wasser gelagert wurden. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die im Durchschnitt höheren Temperaturen und Luftfeuchten auf der Baustelle zurückzuführen. Eine „gute“ Nachbehandlung auf der Baustelle erreichte damit bessere Ergebnisse als jene im Labor. Weiters ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Werten, die in den Bereichen „oben“ und in den Bereichen „unten“ gemessen wurden, zu sehen. Dies kann damit erklärt werden, dass der obere Wandbereich stärkerer Sonneneinstrahlung und damit größerer Trockenheit ausgesetzt war, wohingegen im unteren Bereich der Beton in einem relativ stabilen feuchten Klima hydratisieren konnte und ein dichteres Gefüge an der Oberfläche ausbildete.

Es konnte mit diesen Versuchen somit bewiesen werden, dass sich eine ausreichende Nachbehandlung eindeutig positiv auf die Dichtigkeit des Zementsteins an der Oberfläche auswirkt, was eine Steigerung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks zur Folge hat.

- **Elektrischer Widerstand**

Der elektrische Widerstand wurde, wie auch die Gaspermeabilität, an den verschiedenen Wandbereichen auf der Baustelle (siehe Abbildung 38) und auch an den Referenzwürfeln im Labor gemessen. Die Messungen wurden mit dem Gerät Resipod der Firma Proseq durchgeführt und lieferten, wie auch die Laboruntersuchungen, zufriedenstellende Ergebnisse.



Abbildung 38: Messung des elektrischen Widerstandes auf der Baustelle

Auch bei diesen Messungen (siehe Abbildung 39) konnte der Einfluss der Nachbehandlungen bestätigt werden. Dieser zeigt sich mit einem Abfall des elektrischen Widerstandes bei einer „mittleren“ und „guten“ Nachbehandlung aufgrund der höheren Feuchtigkeit des Zementsteins. Ebenfalls lässt sich ein Unterschied in den Werten der Messungen „oben“ und „unten“ feststellen, da die oberen Bereiche des Bauteils aufgrund der Sonneneinstrahlung und des stärkeren Windes schneller austrockneten und höhere elektrische Widerstände aufwiesen.

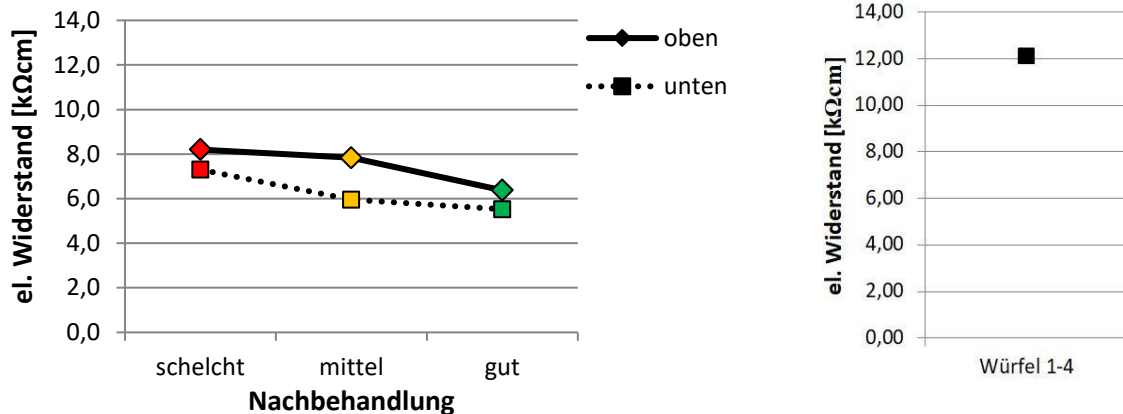


Abbildung 39: Elektrischer Widerstand der drei Wandbereiche auf der Baustelle (links) und der Referenzwürfel im Labor (rechts)

Für die Referenzwürfel im Labor konnten dabei höhere elektrische Widerstände als auf dem Wandbauteil auf der Baustelle gemessen werden; was damit zu tun haben könnte, dass die Luftfeuchtigkeit im Labor im Schnitt unter jener, die auf der Baustelle gemessen wurde, lag. Dies führe zu einem Austrocknen der Betonwürfeloberfläche und somit zu einem Anstieg des elektrischen Widerstandes. Im Gegensatz dazu wirkte sich die höhere Feuchtigkeit und Verschattung im unteren Wandbereich positiv auf den Feuchtegehalt der Betonoberfläche aus, was zu niedrigeren elektrischen Widerständen geführt hat. Die nur geringfügig höheren Werte des elektrischen Widerstands im oberen Bereich – die unter den Werten der Referenzwürfel liegen – lassen sich auf die relativ feuchten Verhältnisse auf der Baustelle zurückführen.

- **Rückprallhammer**

Die Messungen mit dem Rückprallhammer SilverSchmidt der Firma Proseq wurden wie die vorherigen Messungen auch an allen drei Wandbereichen durchgeführt. Die Auswertung der Messergebnisse (siehe Abbildung 40) gestaltete sich schwieriger als beispielsweise jene der Gaspermeabilität oder des elektrischen Widerstandes. Generell deuten höhere Rückprallwerte auf eine höhere Festigkeit hin. Jedoch kann dies nur im unteren Bereich der Wand bestätigt werden. Mit Ausnahme des mittleren Bereichs (Nachbehandlung „mittel“), lässt sich eine Steigerung der Festigkeit durch eine bessere Nachbehandlung („gut“) beobachten. Der Abfall des Rückprallwertes im oberen Bereich, lässt sich damit begründen, dass dieser Wandbereich – wie auch die vorigen Messergebnisse gezeigt haben – trockener ist, und somit keine vollständige Hydratation der oberflächennahen Bereiche

stattgefunden hat. Die Rückprallwerte für diesen Bereich sind einander sehr ähnlich; eine eindeutige Tendenz lässt sich dadurch nicht erkennen. Demnach dürften im oberen Bereich die Umwelteinflüsse Sonne, Regen, Wind etc. einen viel größeren Einfluss haben als die Nachbehandlung selbst.

Auch ein Vergleich mit den Messwerten der Referenzwürfel im Labor gestaltet sich schwierig. Die Werte der Betonwürfel liegen nämlich unter jenen der „schlechten“ Nachbehandlung – im oberen, wie auch im unteren Bereich. Es muss jedoch angemerkt werden, dass alle Messwerte nah beieinander liegen und somit keine eindeutige Aussage möglich ist.

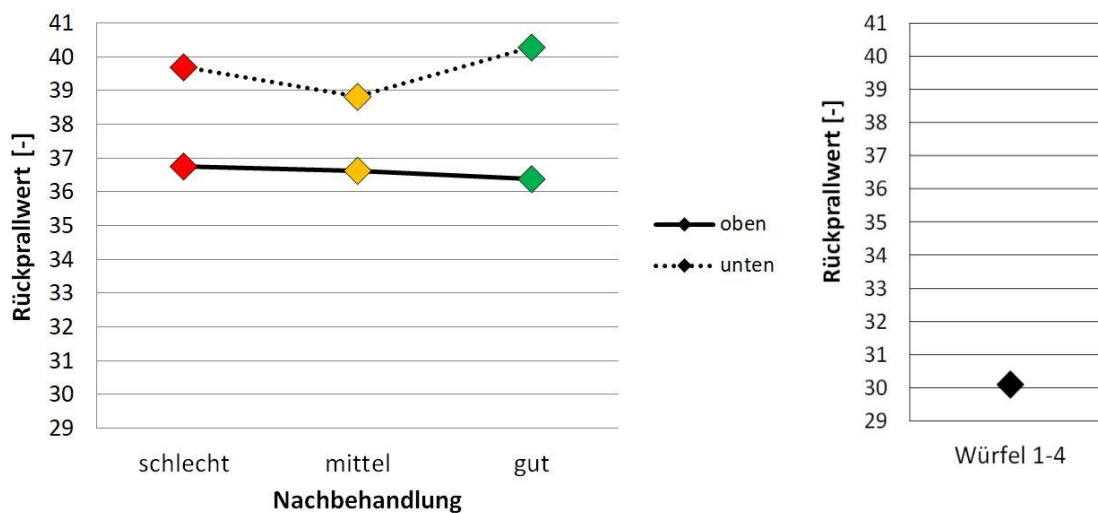


Abbildung 40: Rückprallwerte der drei Wandbereiche auf der Baustelle (links) und der Referenzwürfel im Labor (rechts)

- **Digitalmikroskop**

Die Untersuchungen mit dem Digitalmikroskop wurden im unteren und oberen Wandbereich durchgeführt. Pro Nachbehandlungsbereich wurden insgesamt 25 Stichproben mit unterschiedlicher Vergrößerung der Aufnahmen genommen. Die Aufnahmen im unteren Wandbereich wurden mit 20-facher, 30-facher und 100-facher Vergrößerung getätigt. Die Ergebnisse im unteren Wandbereich sind mit 20-facher und 30-facher Vergrößerung wie erwartet: der Porenanteil nimmt laut Abbildung 42 mit zunehmend schlechterer Nachbehandlung zu. Die 100-fach vergrößerten Aufnahmen weisen einen gegenteiligen Effekt auf. Es ist anzunehmen, dass eine zu starke Vergrößerung den Porenanteil nicht

mehr repräsentativ darstellen kann, da sich der durchschnittliche Porendurchmesser im hundertstel bis zehntel Millimeterbereich befindet. Deshalb ist es empfehlenswert, zur Auswertung die Ergebnisse aus den 20-fachen bzw. 30-fachen Vergrößerungen heranzuziehen.

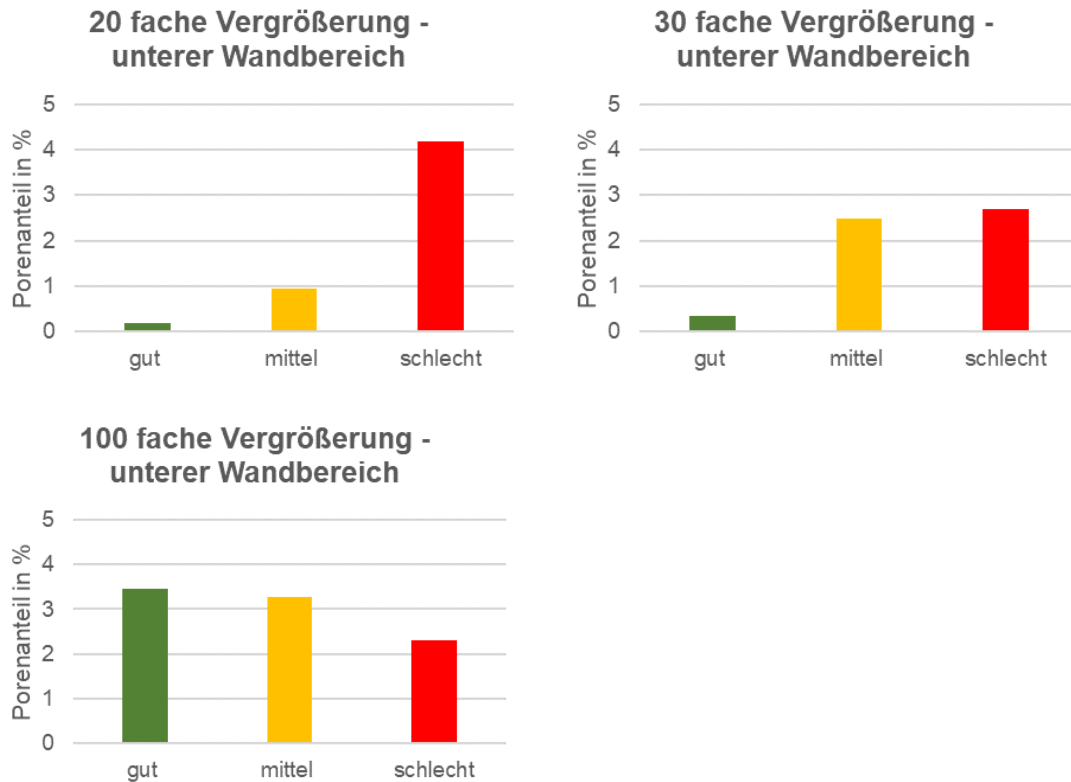


Abbildung 41: Porenanteil in % im unteren Wandbereich mit 20-facher, 30-facher und 100-facher Vergrößerung

Die Aufnahmen im oberen Wandbereich sind wie in Abbildung 42 dargestellt nicht eindeutig und weisen bei 30-facher Vergrößerung sogar einen gegenteiligen Effekt auf. Hier ist der Porenanteil bei der guten Nachbehandlung am größten. Die Ergebnisse im oberen Wandbereich lassen sich durch die vorherrschenden Umweltbedingungen, der stärkeren Sonneneinstrahlung und des größeren Windeinflusses, im Gegensatz zum unteren Wandbereich, erklären. Da die Aufnahmen des Digitalmikroskops nur punktuell erfolgten, ist eventuell ein höherer Stichprobenumfang empfehlenswert.

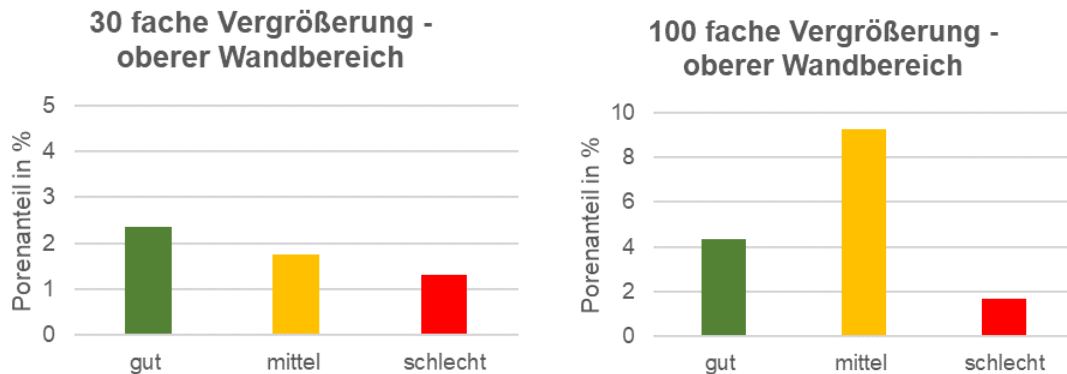


Abbildung 42: Porenanteil in % im oberen Wandbereich mit 30-facher und 100-facher Vergrößerung

- **Hyperspektralanalysen**

Die Hyperspektralanalysen auf der Baustelle wurden mit einer tragbaren Kamera (Specim IQ) durchgeführt, die Reflexionen im Wellenlängenbereich von 400 bis 1000 nm misst. Da die Ergebnisse stark vom vorherrschenden Licht abhängig sind, ist zeitgleich mit den Messungen im unteren Wandbereich eine Referenzprobe gemessen worden, die eine gute Nachbehandlung repräsentieren sollte. Pro Nachbehandlungsbereich sind sechs Aufnahmen gemacht worden. In den unten angeführten Grafiken sind die Mittelwerte der Messungen für alle drei Nachbehandlungen sowie das Ergebnis der Referenzprobe dargestellt.

In der Abbildung 43 sind die Ergebnisse des unteren Wandbereichs aufgezeigt. Ab dem Wellenlängenbereich von ungefähr 600 nm lassen sich die drei Nachbehandlungen deutlich voneinander unterscheiden. Die gemessene Referenzprobe deckt sich mit dem Verlauf der guten Nachbehandlung. Die Ergebnisse zeigen, dass mittels der Referenzprobe eine eindeutige Charakterisierung der Nachbehandlungsqualität vorgenommen werden kann: die mittlere Nachbehandlung liegt über dem Referenzbereich und die schlechte Nachbehandlung entsprechend noch höher.

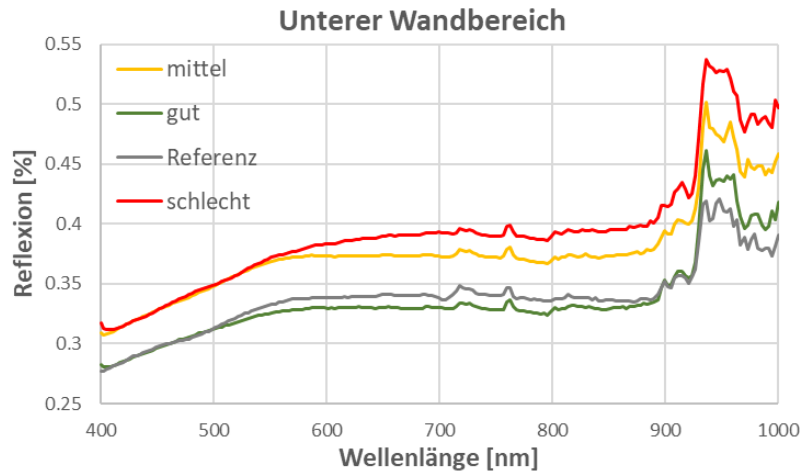


Abbildung 43: Reflexion der drei Nachbehandlungen und der Referenzprobe im Wellenlängenbereich 400 bis 1000 nm im unteren Wandbereich

Im oberen Wandbereich sind die Ergebnisse laut Abbildung 44 aufgrund der stärkeren Exponiertheit der Wand gegenüber Sonneneinstrahlung und Wind nicht eindeutig. Die Ergebnisse der drei Nachbehandlungsbereiche liegen im Vergleich zum unteren Wandbereich näher beieinander. Die Referenzprobe hebt sich deutlich ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Probe bei Lichtverhältnissen des unteren Wandbereichs aufgenommen wurde. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert die Referenzaufnahmen in unmittelbarer Nähe zum Messbereich durchzuführen, um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen. Dennoch ist in Abbildung 44 im Wellenlängenbereich von 700 bis 900 nm der gleiche Trend wie in Abbildung 43 erkennbar (die gute Nachbehandlung mit geringerer Reflexion als der mittlere und schlechte Bereich).

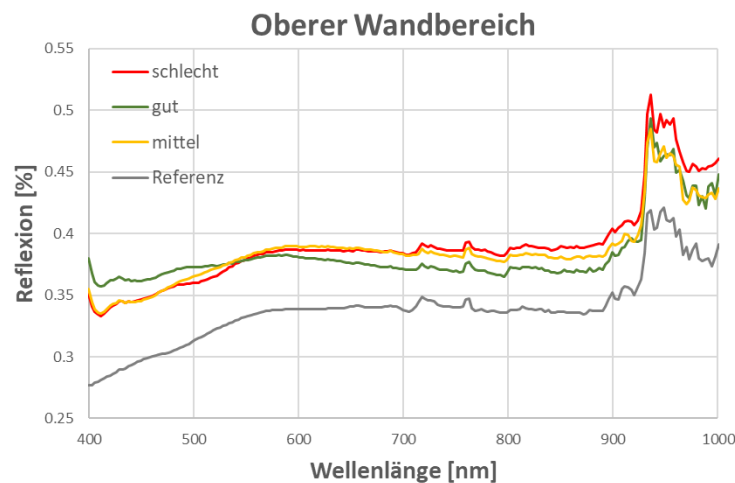


Abbildung 44: Reflexion der drei Nachbehandlungen und der Referenzprobe im Wellenlängenbereich 400 bis 1000 nm im oberen Wandbereich

- **Ultraschall**

Die Ultraschallmessungen auf der Baustelle wurden mit dem Gerät Pundit Lab (+) im unteren und oberen Wandbereich durchgeführt. Pro Nachbehandlungsbereich fanden sechs Messungen statt. Zur Untersuchung des Einflusses des Schallkopfabstandes auf die Ergebnisse, sind die Messungen mit den Abständen 10 und 15 cm durchgeführt worden. Die Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse der Scherwellenlaufzeit im unteren Wandbereich für 10 cm und 15 cm Schallabstand. Die Ergebnisse liegen im erwarteten Bereich – die Laufzeit wird mit zunehmend schlechter Nachbehandlung höher. Dieser Effekt lässt sich in diesem Fall am besten bei einem Schallkopfabstand von 15 cm herauslesen. Bei einem Abstand von 10 cm liegen der mittlere Bereich und der schlechte Bereich sehr nahe beieinander.

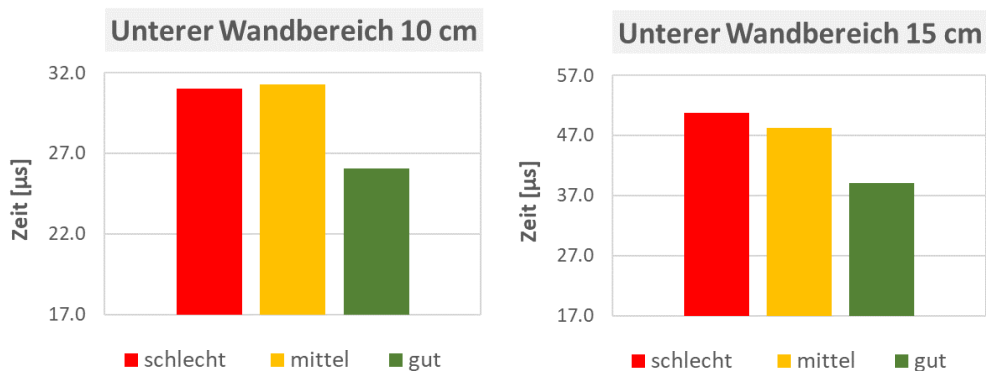


Abbildung 45: Scherwellenlaufzeit der drei Nachbehandlungen im unteren Wandbereich mit 10 bzw. 15 cm Schallkopfabstand

Im oberen Wandbereich sind die Ergebnisse laut Abbildung 46 nicht eindeutig, was auch schon bei den anderen Methoden festgestellt werden konnte. Durch die stärkeren Umweltweinflüsse im Vergleich zum unteren Wandbereich sind die Nachbehandlungen nicht unterscheidbar.

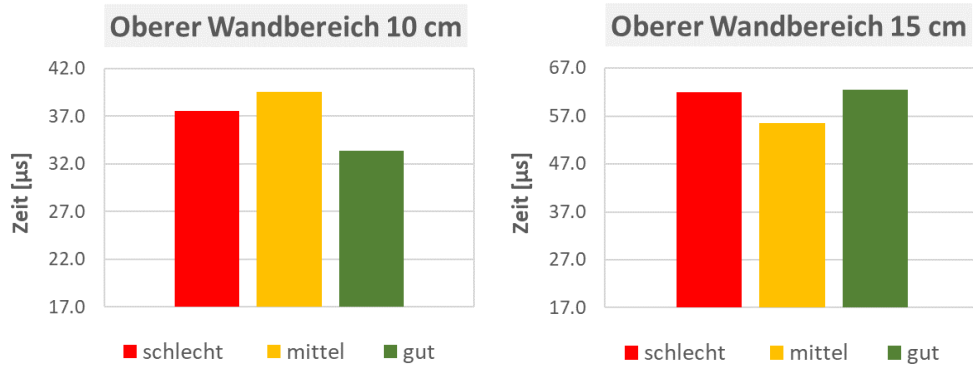


Abbildung 46: Scherwellenlaufzeit der drei Nachbehandlungen im oberen Wandbereich mit 10 bzw. 15 cm Schallkopfabstand

- **Georadar**

Auf der Baustelle wurden zusätzlich Georadarmessungen mit einem GPR Live durchgeführt. In der Regel wird dieses Gerät dazu eingesetzt die Bewehrungslage zu ermitteln. Da die Laufzeit der Radarwellen von der Materialbeschaffenheit abhängt, ist es theoretisch möglich, anhand der ermittelten Bewehrungstiefe die unterschiedlichen Nachbehandlungen zu unterscheiden. Angenommen wird, dass die Bewehrungslage mit zunehmend schlechter Nachbehandlung tiefer angezeigt wird. Da die Bewehrungslage aufgrund der Pläne bekannt ist, kann diese als Referenztiefe hergenommen werden.

In Abbildung 47 ist ein Beispiel für die gemessene Tiefe der Bewehrung, in diesem Fall bei ungefähr 6 cm, dargestellt. Aufgrund der Baustellenergebnisse konnte die Tendenz zur Messung einer größeren Tiefe bei schlechter Nachbehandlung nicht nachgewiesen werden. Ein Grund dafür könnte die Messgenauigkeit des Gerätes sein bzw. sind die Unterschiede eventuell zu gering, um sie mit dieser Methode zu erfassen. Um eine fundierte Aussage treffen zu können, müssten noch weitere Untersuchungen angestellt werden.

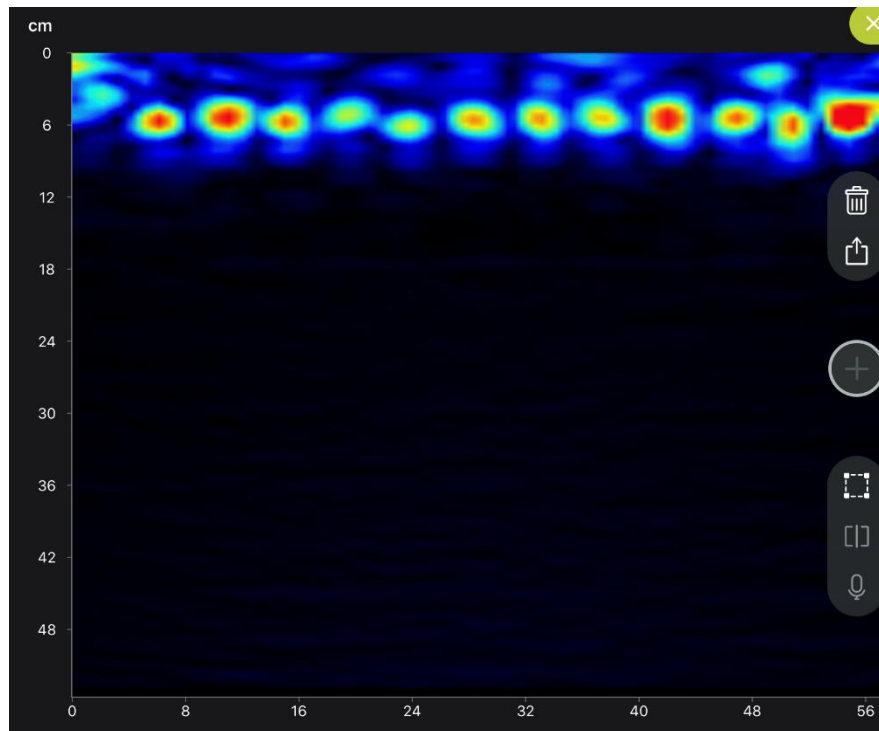


Abbildung 47: Bewehrungslage (Tiefe) gemessen mit einem GPR Live im mittleren Nachbehandlungsbereich

- **Computertomographie**

Aus jedem der drei Nachbehandlungsbereiche der Wand wurden zwei Bohrkern (oben und unten) mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Höhe von ca. 6,5 bis 8,5 cm entnommen. Die Proben wurden mittels Röntgenmikroskopie/Computertomografie untersucht.

Die Abbildung 48 zeigt eine Auswahl an Aufnahmen in unterschiedlichen Tiefenlagen des Bohrkernes aus dem oberen Wandbereich mit guter Nachbehandlung. Die Aufnahmen sind nach Tiefenlage sortiert, wobei das erste Bild die oberflächennächste Aufnahme zeigt. In den ersten Millimetern des Bohrkernes ist erhöhte Porenbildung zu sehen. In den tiefer liegenden Schichten ist die Porosität entsprechend geringer, da das Gefüge nach unten dichter wird. Die Porenbildung ist bei schlechter Nachbehandlung entsprechend verstärkt. Mittels einer Analyse der Porenverteilung in den unterschiedlichen Tiefenlagen, kann daher die Nachbehandlungsqualität evaluiert werden.

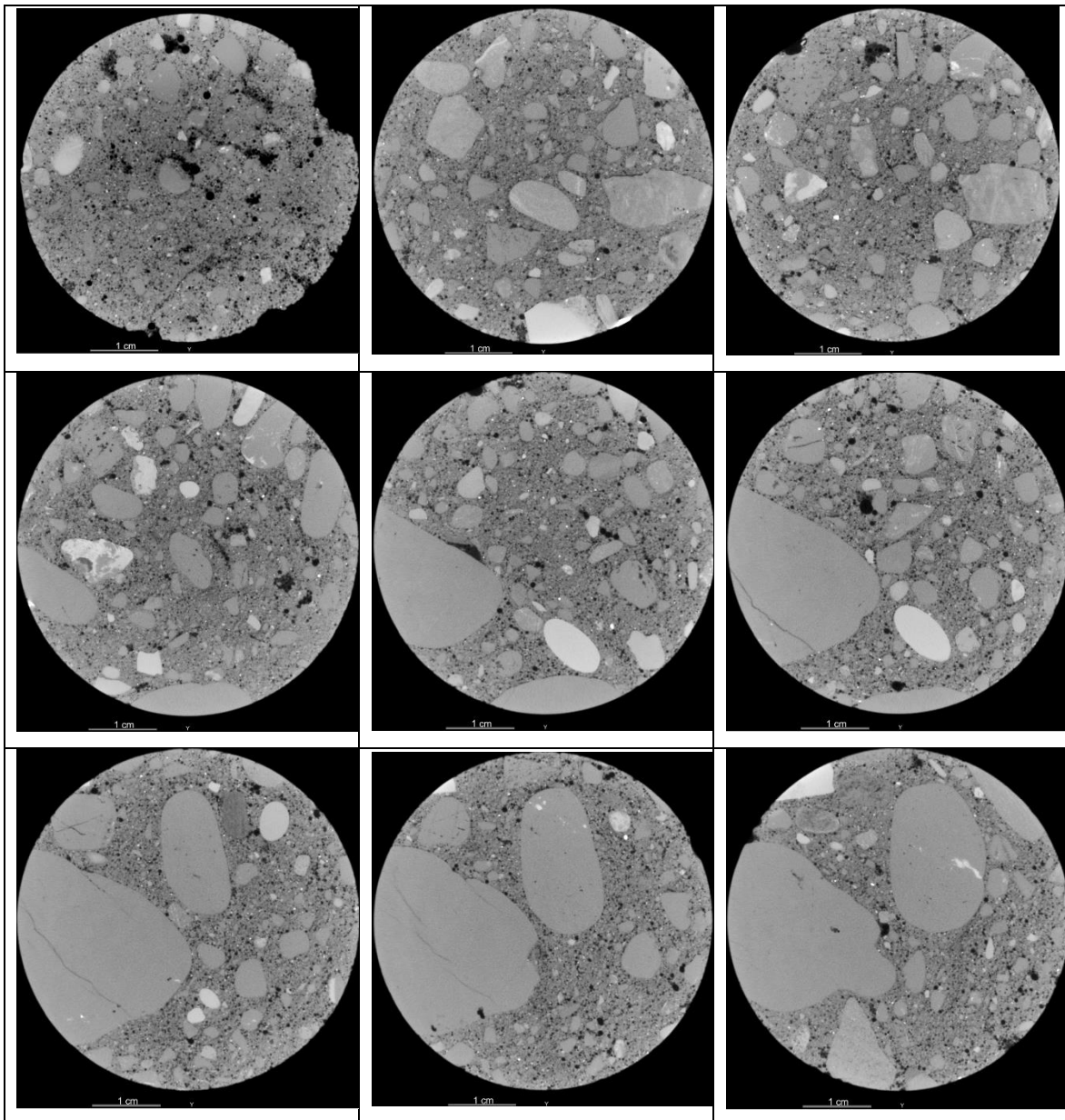


Abbildung 48: Computertomografieaufnahmen in unterschiedlichen Tiefenlagen des Bohrkerns aus dem oberen Wandbereich mit guter Nachbehandlung

Ebenso ist es möglich die Kornverteilung, Orientierung und Art der Körner sowie Störungen der Körner über die Tiefe zu bewerten.

Eine mögliche weitere Anwendungsmöglichkeit der Computertomografie ist die Analyse von Chlorideindringung und Karbonatisierung unter Zuhilfenahme von Tracern.

3. ASFINAG Absatzbecken Göttlesbrunn

Aufbauend auf den Ergebnissen erfolgte die Messdurchführung einer zweiten Versuchsreihe auf einer Baustelle in der Nähe der Raststation Göttlesbrunn in Niederösterreich. Die Versuche wurden auf den unterschiedlich nachbehandelten Wänden eines Absatzbeckens durchgeführt. So wie in der vorherigen Versuchsreihe am Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf, wurden drei ausgewählte Wandbereiche mit einer Länge von ca. 6 und 8 m und einer Höhe von 2,7 m unterschiedlich lange in der Schalung belassen. Keiner der drei Bereiche wurde jedoch nachbehandelt. Der für die Betonage verwendete Beton war ein C25/30 B7 GK22 F52 42,5N; die verwendete Betonrezeptur ist in Tabelle 17 ersichtlich.

Tabelle 17: Betonrezeptur B7

Betonbezeichnung	B7	
	Erzielte Festigkeitsklasse	C25/30
Zement	330	kg/m ³
Anrechenbarer Zusatzstoff	80	kg/m ³
Gesamtwasser	178	kg/m ³
W/B-Wert	0,43	-
Gesteinskörnung 3 Korngruppen (0/22)	1669	kg/m ³
Luftgehalt (Frischbeton)	6,0	%
Rohdichte	2251	kg/m ³
Frischbetontemperatur	30,4	°C

Die drei Bereiche, die im Grundriss des Beckens in Abbildung 49 ersichtlich sind, wiesen dabei eine jeweils unterschiedlich lange Ausschalzeit auf:

- Der Bereich „schlecht“ wurde nach einem Tag ausgeschalt.
- Der Bereich „mittel“ wurde nach fünf Tagen ausgeschalt.
- Der Bereich „gut“ wurde nach acht Tagen ausgeschalt.

Es erfolgte keine weitere Nachbehandlung des Bauwerks.

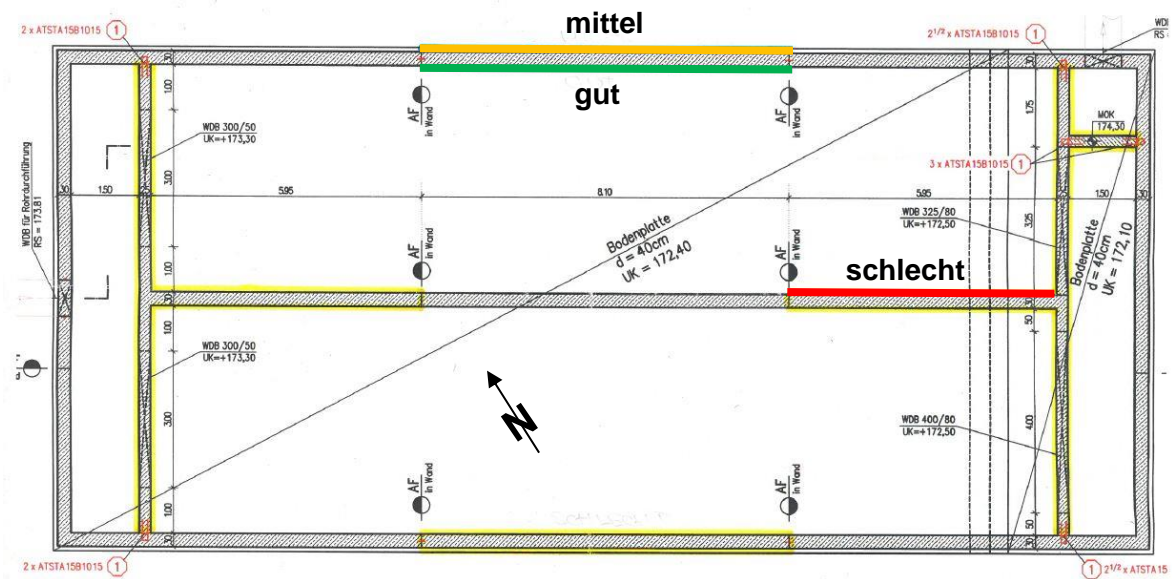


Abbildung 49: Grundriss des Absatzbeckens mit eingezeichneten Untersuchungsbereichen



Abbildung 50: Ansicht des Absatzbeckens mit Gaspermeabilitätsmessung im Wandbereich „mittel“

Die Betonage des Absatzbeckens fand am 4. November statt, die Versuche wurden rund zwei Wochen später am 19. November durchgeführt. Eine Ansicht des Bauwerks bietet Abbildung 50. Die Ausrichtung der Wandbereiche „mittel“ und „schlecht“ war gegen

Nordosten, die des Bereichs „gut“ gegen Südwesten; wobei aufgrund der nach der Betonage vorherrschenden Witterung der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf den untersuchten Bereich nur gering war.

Der Versuchsaufbau gestaltete sich ähnlich zu den Versuchen am Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf und umfasste folgende Messmethoden:

- Gaspermeabilitätsmessung
- Messung des elektrischen Widerstandes an der Oberfläche
- Messungen mit dem Rückprallhammer
- Hyperspektralanalysen
- Ultraschall

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden im Folgenden präsentiert.

- **Gaspermeabilität**

Die Messungen der Gaspermeabilität mit dem Gerät TORRENT der Firma Proseq wurden an allen drei Bereichen durchgeführt. Die Messung im Wandbereich „schlecht“ ist in Abbildung 51 ersichtlich.



Abbildung 51: Gaspermeabilitätsmessung im Wandbereich „schlecht“

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 52 dargestellt. Die gemessenen Gaspermeabilität k_T ist jeweils in 10^{-16} m^2 angegeben. Sie unterscheiden sich recht deutlich je nach durchgeführter Nachbehandlung, dabei weist – wie erwartet – der Wandbereich „gut“ die niedrigsten Gaspermeabilitätswerte auf. Der Bereich mit der Nachbehandlung „mittel“ zeigt geringfügig höhere Werte auf, was mit der Lage dieses Wandbereichs zu tun haben könnte. Dieser befindet sich nämlich auf der Nordseite des Bauwerks, in einer vor Wind geschützten Lage und in einer feuchten Umgebung aufgrund des umgebenden Erdreichs, siehe Abbildung 50. Diese Faktoren dürften die Austrocknung des oberflächennahen Bereichs der Betons (Betonrandzone) verlangsamt haben, was sich vorteilhaft auf dessen Hydratation ausgewirkt hat. Im Gegensatz dazu zeigte der Wandbereich mit der Nachbehandlung „schlecht“ eindeutig höhere Permeabilitätswerte auf als die anderen beiden Bereiche.

Aufgrund der vorherrschenden feuchten Witterung wurde der Feuchtegehalt des untersuchten Bauwerks an einer Stelle gemessen. Dieser betrug ca. 2,5 M.-% und lag unter dem Maximalwert von 5,5 M.-%, der für die Gaspermeabilitätsmessungen empfohlen wird.

Die Messungen lieferten zufriedenstellende Ergebnisse, denn auch in dieser Versuchsreihe konnte der Zusammenhang der Gaspermeabilität mit der Nachbehandlung bewiesen werden.

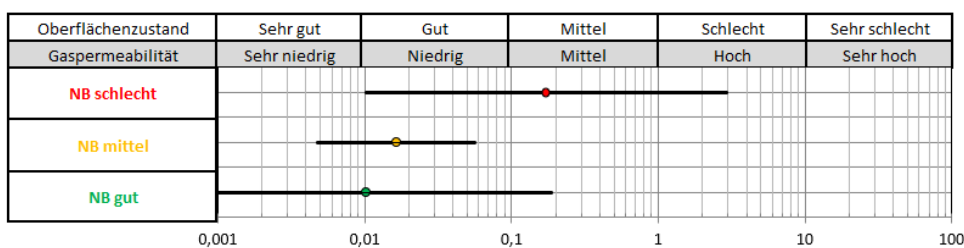


Abbildung 52: Gaspermeabilität der drei Wandbereiche „schlecht“, „mittel“ und „gut“

- **Elektrischer Widerstand**

Die Messungen des elektrischen Widerstandes mit dem Gerät Resipod der Firma Proseq wurden an den drei verschiedenen Wandbereichen durchgeführt. Es zeigte sich, wie auch bei vorherigen Versuchsreihen in diesem Projekt, dass eine schlechte Nachbehandlung zur Austrocknung der Betonrandzone führt. Infolge dessen steigt der elektrische Widerstand,

was sehr gut in Abbildung 53 ersichtlich ist. Die nicht sehr eindeutigen Messergebnisse der Wandbereiche „mittel“ und „gut“ sind mit der unterschiedlichen Lage und Orientierung dieser zwei Bereiche zu erklären. Der Bereich „mittel“ befand sich nämlich in einem Windgeschützten Teil des Bauwerks umgeben von feuchtem Erdreich.

Im Gegensatz zur Gaspermeabilitätsmessung konnten Wandbereiche in einer Höhe von 1,5 bis 2,0 m untersucht werden. Deshalb entschied man sich die Messorte in zwei Bereiche zu unterteilen, einen oberen und einen unteren. Wie erwartet zeigten die oberen Wandbereiche höhere Widerstände auf als die unteren. Denn der obere Wandbereich trocknete schneller aus, was den elektrischen Widerstand steigen ließ.

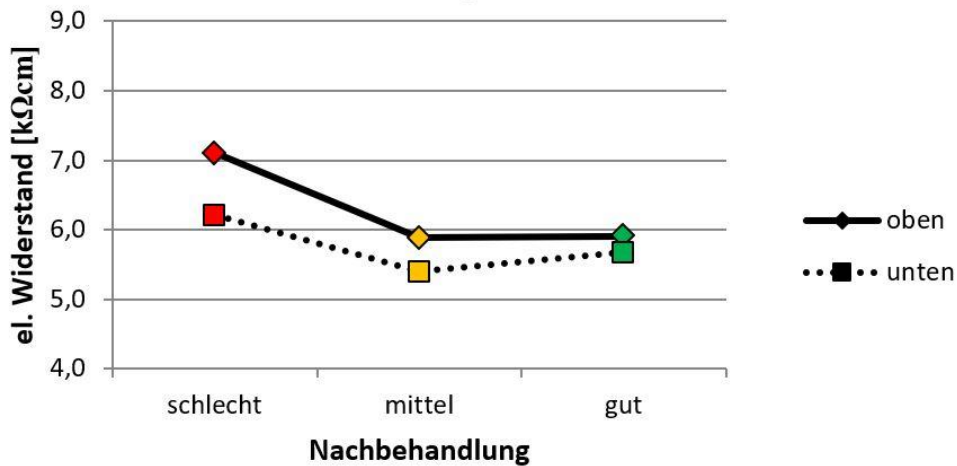


Abbildung 53: Elektrischer Widerstand der drei Wandbereiche „schlecht“, „mittel“ und „gut“

- Rückprallhammer

Die Messungen mit dem Rückprallhammer SilverSchmidt der Firma Proseq brachten keine eindeutigen Ergebnisse und ließ keine Abhängigkeit des Rückprallwertes von der Nachbehandlung erkennen, siehe Abbildung 54. Aufgrund der Messergebnisse, die alle drei nah beieinander liegen und zusätzlich noch statistischen Schwankungen unterliegen, lässt sich keine eindeutige Aussage tätigen.

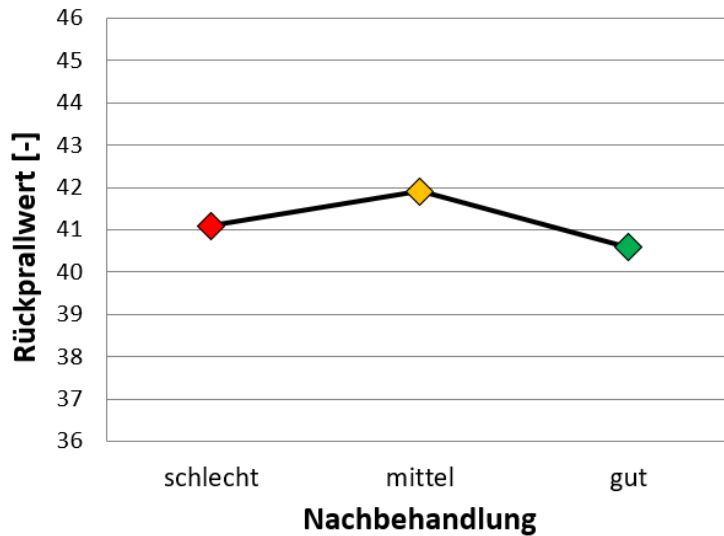


Abbildung 54: Rückprallwerte der drei Wandbereiche „schlecht“, „mittel“ und „gut“

- **Ultraschall**

Bei den Ultraschallmessungen wurden, wie auch bei den Laborversuchen, Scherwellenschallköpfe eingesetzt. Da sich der Schallkopfabstand von 15 cm bei den letzten Messungen auf der ÖBB Baustelle in Siebenbrunn bewährt hat (siehe Abbildung 45), wurde dieser auch für diese Versuche angewandt. In Summe wurden jeweils acht Messungen pro Nachbehandlungsbereich im mittleren bis unteren Wandbereich durchgeführt. Für die Durchführung der Messungen wird eine spezielle Scherwellen-Koppelpaste verwendet, damit die Scherwellen ordnungsgemäß auf die Probe übertragen werden können. Die Scherwellenpaste weist eine hohe Viskosität auf. Aufgrund der relativ niedrigen Temperaturen während der Messungen, war die Paste sehr hart und kaum bearbeitbar. Die Ergebnisse der einzelnen Nachbehandlungsbereiche variieren sehr stark. Daher muss angenommen werden, dass aufgrund der ungünstigen Konsistenz der Paste die Scherwellen nicht entsprechend übertragen werden konnten. Wie in Abbildung 55 gezeigt ergibt sich gemittelt für alle drei Nachbehandlungsbereiche annähernd die gleiche Scherwellenlaufzeit. Die Nachbehandlungen können aufgrund der durchgeführten Ultraschallmessungen nicht unterschieden werden.

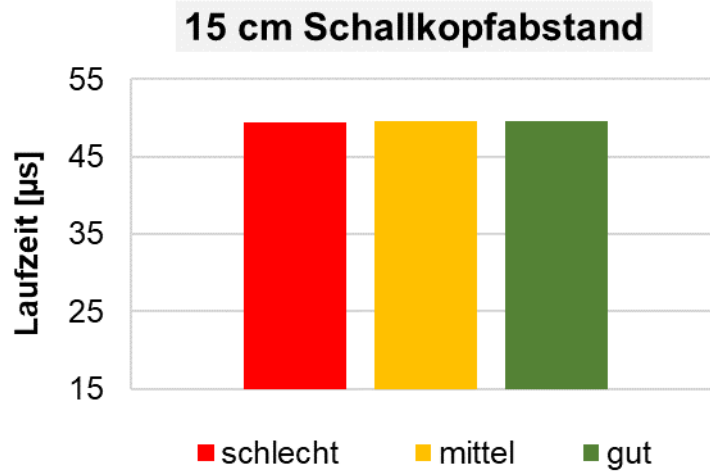


Abbildung 55: Scherwellenlaufzeit der drei Wandbereiche „schlecht“, „mittel“ und „gut

- **Hyperspektralanalysen**

Die Hyperspektralanalysen wurden mit einer Specim IQ durchgeführt, die die Lichtreflexion in einem Wellenlängenbereich von ca. 400-1000nm aufnimmt. Die Kamera wurde auf einem ca. 1 m hohen Stativ positioniert, von wo aus jeweils 6 Messungen pro Nachbehandlung durchgeführt wurden. Die gemittelten Werte der Messungen sind in Abbildung 56 dargestellt. Bei diesen Versuchen waren keine Referenzproben verfügbar, deshalb können nur die Nachbehandlungen untereinander verglichen werden. Die schlechte Nachbehandlung zeichnet sich deutlich von der mittleren und guten Nachbehandlung ab. Die gute und mittlere Nachbehandlung lassen sich kaum voneinander unterscheiden, wobei die gute Nachbehandlung leicht höhere Reflexionen aufweist als die mittlere. Dieser Effekt lässt sich aufgrund der Lage der Nachbehandlungsbereiche erklären. Der mittlere Nachbehandlungsbereich befindet sich im windgeschützteren Bereich und durch das angrenzende Erdreich ist anzunehmen, dass hier die Luftfeuchte höher war. Der gute Nachbehandlungsbereich liegt exponierter und trocknete deshalb wahrscheinlich schneller aus. Die Ergebnisse der Spektralmessungen decken sich mit den Ergebnissen der elektrischen Widerstandsmessung im unteren Wandbereich (siehe Abbildung 53).

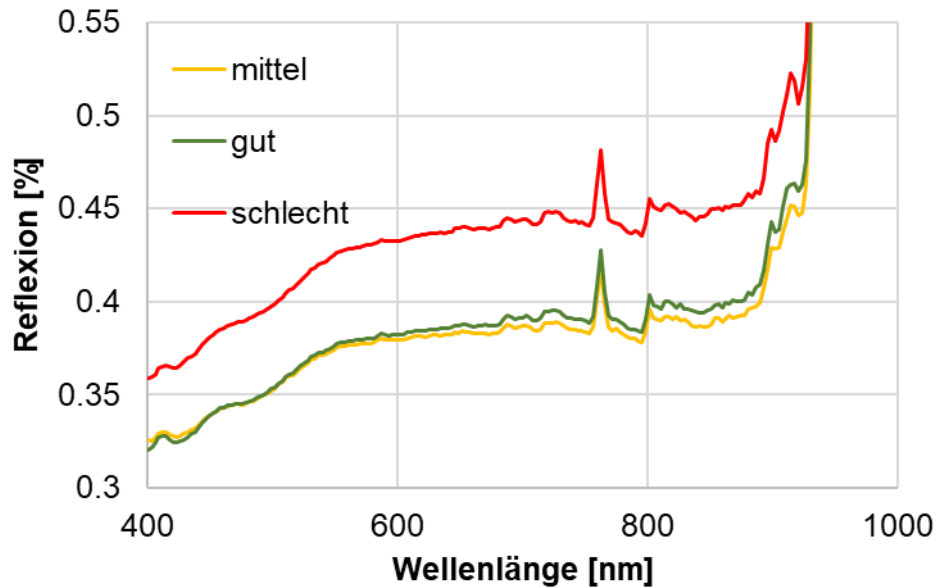


Abbildung 56: Durchschnittliche Reflexion im Wellenlängenbereich 400-1000 nm der drei Wandbereiche „schlecht“, „mittel“ und „gut“

6. GESAMTBEWERTUNG DER METHODEN

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Ergebnisse der Labor- und Baustellenuntersuchungen gegeben werden. Es sollen dabei die Resultate der insgesamt drei Versuchsreihen verglichen werden und auch eine Bewertung der einzelnen Methoden formuliert werden. Für den Vergleich mit den Messergebnissen auf der Baustelle wurden die Labormessungen am Beton BS1C herangezogen, da dieser Beton auch auf der Baustelle des Bahnhofs Siebenbrunn-Leopoldsdorf verwendet wurde. Auf der Baustelle des Absetzbeckens Göttlesbrunn hingegen, wurde der Beton B7 verwendet.

1. Gaspermeabilität

Die Gaspermeabilität erlaubt relativ gezielte Aussagen über den Zustand der Betonoberfläche und somit auch über die Qualität der Nachbehandlung zu treffen. Dies konnte in den Laboruntersuchungen und auf der Baustelle bestätigt werden, siehe Abbildung 57.

Eine *fehlende Nachbehandlung* auf der Baustelle („NB schlecht“) führte, ähnlich zur „NB3“ im Labor, zu einem schlechten oder sogar sehr schlechten Zustand der Betonoberfläche.

Bei einer *nicht fachgerechten* oder *nicht ausreichenden Nachbehandlung* würde es zu Ergebnissen wie „Ohne NB“ im Labor oder „NB mittel“ auf der Baustelle kommen. Ein mittlerer Zustand der Oberfläche wäre die Konsequenz davon.

Eine *optimale Nachbehandlung* wie sie mit der „NB gut“ auf der Baustelle erzielt wurde, würde demnach zu einer niedrigen Gaspermeabilität und somit zu einem guten Zustand der Betonoberfläche führen, mit all seinen Vorteilen für die Dauerhaftigkeit des Bauwerks.

Weiters ist – wie bei anderen Methoden auch – der Einfluss der Lage des Messbereichs auf der Baustelle zu beobachten. Die Messwerte, die im oberen Wandbereich der Baustelle ÖBB Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf gemessen wurden, lieferten schlechtere Ergebnisse als die Werte des unteren Bereichs. Dies ist auf die stärkere Verschattung und damit höhere Feuchte im unteren Bereich zurückzuführen. Der Beton in der Randzone konnte somit ausreichend hydratisieren und ein dichtes Gefüge aufbauen.

Insgesamt lässt sich somit sagen, dass diese Methode zur Beurteilung der Nachbehandlung gut geeignet ist. Sie ist weiters auch einfach auf der Baustelle durchführbar. Jedoch muss beachtet werden, dass die zu prüfenden Betonoberflächen ausreichend trocken für eine Untersuchung sein müssen. Deshalb ist diese Methode für jungen Beton nicht geeignet.

Zuletzt muss noch erwähnt werden, dass es sich bei dem auf der Baustelle untersuchten Beton um einen BS1C (ÖBB) und um einen B7 (ASFINAG) gehandelt hat. Der BS1C weist dabei einen niedrigeren Zementgehalt auf als beispielsweise der Beton B3 oder B5; was dazu geführt hat, dass bei allen Messungen höhere Werte der Gaspermeabilität – im Vergleich zu den Betonen B3 und B5 – gemessen wurden. Somit sollten die Messwerte der Baustellenmessungen nicht direkt für weitere Projekte übernommen werden, sondern lediglich als obere Grenze der Permeabilität (bei allen Nachbehandlungen) betrachtet werden.

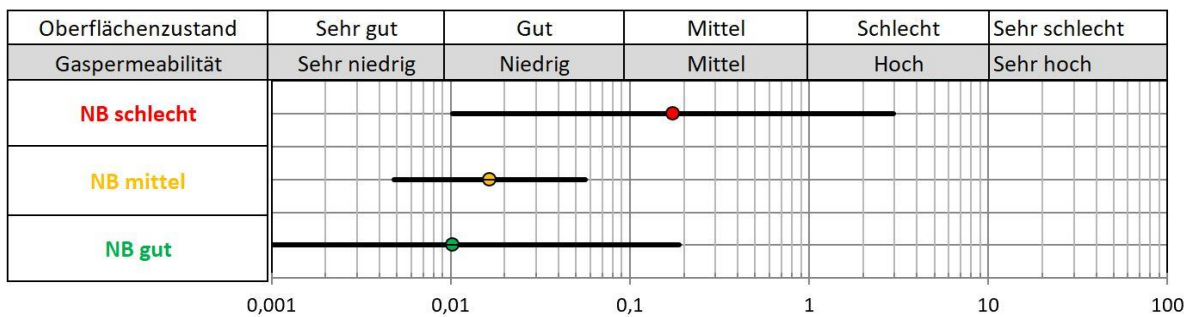
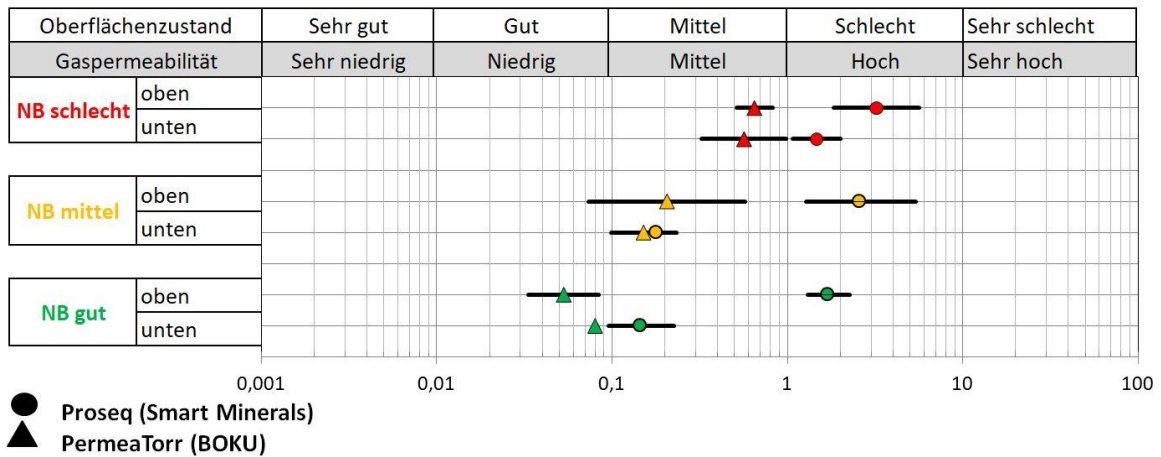
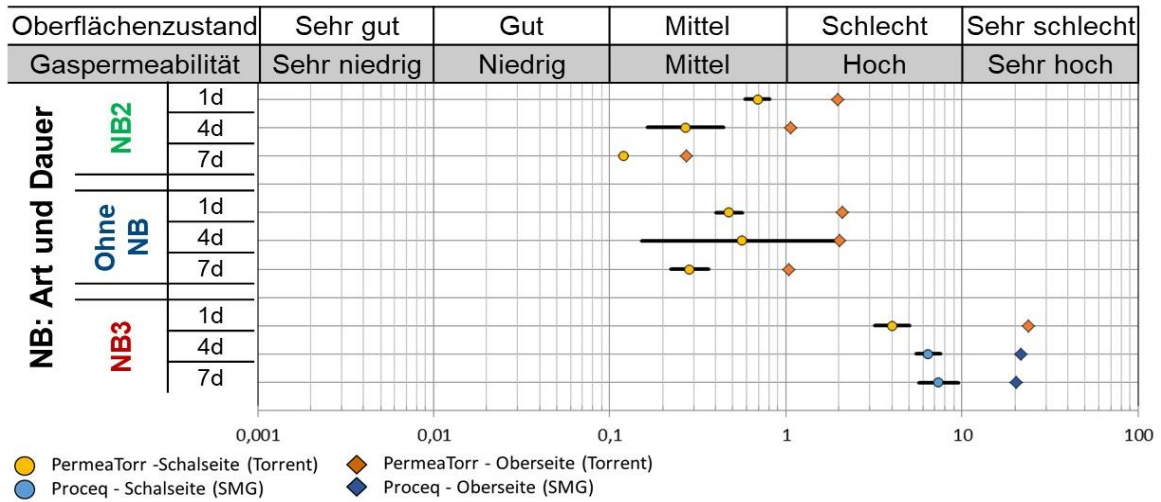


Abbildung 57: Ergebnisse der Gaspermeabilitätsmessungen im Labor (oben), auf der Baustelle ÖBB Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf (Mitte) und auf der Baustelle ASFINAG Absetzbecken Göttlesbrunn (unten)

Tabelle 18: Beurteilung der Messung der Gaspermeabilität

Gaspermeabilität					
Eignung zur Beurteilung der NB		Durchführung		Baustellentauglichkeit	
+	deutliche Ergebnisse, aber auch Einfluss des Alters	+	einfach, aber nur bei trockenen Oberflächen >14d	++	für jungen Beton nicht geeignet

2. Elektrischer Widerstand

Die Messungen des elektrischen Widerstandes erlauben ebenfalls zuverlässige Aussagen über die Qualität der Betonoberfläche. In Abbildung 58 sind die Ergebnisse der Messungen im Labor und auf der Baustelle ersichtlich. Die Messungen auf der Baustelle wurden rund 14 Tage nach der Betonage durchgeführt, sie sind somit mit den Laborergebnissen mit demselben Probenalter zu vergleichen.

Es zeigt sich, dass eine fehlende Nachbehandlung, siehe „NB3“ im Labor oder „NB schlecht“ auf der Baustelle, zu höheren elektrischen Widerständen führt. Weiters ist in den Ergebnissen der Baustelle ÖBB (siehe Abbildung 58 Mitte) ein deutlicher Unterschied zwischen den Werten der oberen und der unteren Wandbereiche zu sehen. Die höheren elektrischen Widerstände in den oberen Wandbereichen lassen sich durch den stärkeren Einfluss von Wind und Sonne und somit mit einer stärkeren Austrocknung der Betonrandzone in diesem Bereich erklären. Eine eindeutige Aussage welche Werte des elektrischen Widerstandes bei einer ungenügenden Nachbehandlung zu erwarten sind, ist jedoch nicht möglich, da die Ergebnisse auf der Baustelle sehr stark von den Umwelteinflüssen abhängen und deshalb auch der Vergleich mit den Werten der Laboruntersuchungen schwierig ist.

Zusammenfassend lässt sich mit dieser einfachen und sehr schnellen Untersuchungsmethode ein deutlicher Unterschied in den Messergebnissen der unterschiedlichen Nachbehandlungsarten erzielen. Die Festlegung eines Wertebereichs für den elektrischen Widerstand, der je nach Art der Nachbehandlung zu erwarten wäre, ist jedoch nur sehr schwer möglich.

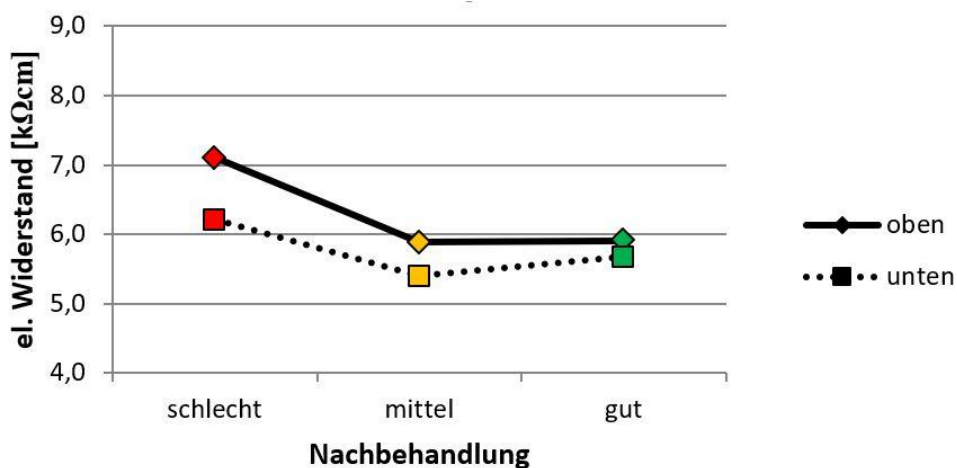
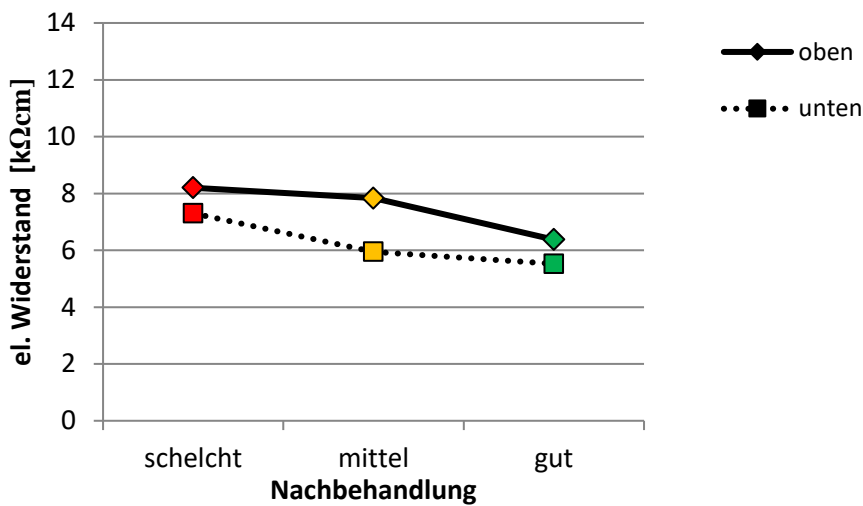
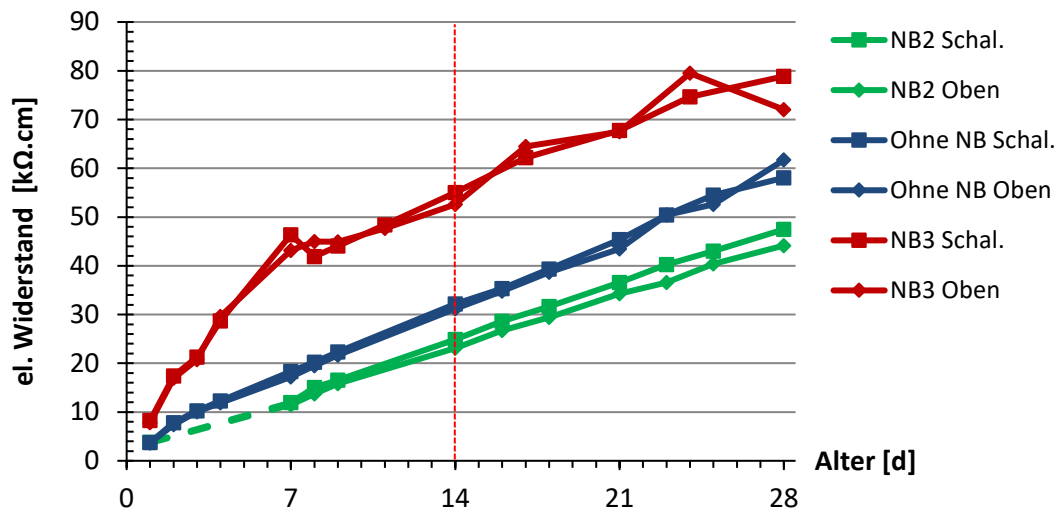


Abbildung 58: Ergebnisse der Messungen des elektrischen Widerstandes im Labor (oben) und auf der Baustelle ÖBB Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf (mitte) und auf der Baustelle ASFINAG Absetzbecken Göttlesbrunn (unten)

Tabelle 19: Beurteilung der Messung des elektrischen Widerstandes

Elektrischer Widerstand					
Eignung zur Beurteilung der NB		Durchführung		Baustellentauglichkeit	
+	deutliche Ergebnisse, aber großer Einfluss des Alters und der Feuchte	+	einfach, schnell, Koppelmittel (Wasser) notwendig	+	ev. für Sichtbeton und trockene/alte Betone nicht geeignet

3. Rückprallhammer

Die Messungen des Rückprallwertes mit dem Rückprallhammer erlauben nur mäßige Aussagen über die Art der Nachbehandlung. Grundsätzlich sind höhere Rückprallwerte bei einer guten Nachbehandlung zu erwarten. Die Ergebnisse sind jedoch für alle Nachbehandlungsarten sehr ähnlich, was eine eindeutige Unterscheidung erschwert. Die Messergebnisse der Rückprallwerte der Labor- und Baustellerversuche sind in Abbildung 59 ersichtlich, jedoch ist zu beachten, dass das Probenalter jeweils verschieden ist. Bei den Laboruntersuchungen wurden Proben in einem Alter von 27 Tagen untersucht. Im Gegensatz dazu hatte die untersuchte Wand in den Baustellenversuchen ein Alter von rund 14 Tagen.

Grundsätzlich lässt sich – wie bereits erwähnt – sagen, dass die Rückprallwerte mit der Qualität der Nachbehandlung steigen. Eine Aussage darüber welche Werte bei welcher Nachbehandlung zu erwarten sind, lässt sich jedoch nicht treffen. Diese Methode scheint deshalb nur wenig bis mäßig baustellentauglich zu sein.

Tabelle 20: Beurteilung der Messung mit dem Rückprallhammer

Rückprallhammer					
Eignung zur Beurteilung der NB		Durchführung		Baustellentauglichkeit	
+	große Streuung und Ähnlichkeit der Ergebnisse	+	einfach und schnell	-	wenig geeignet, Fehlinterpretationen möglich

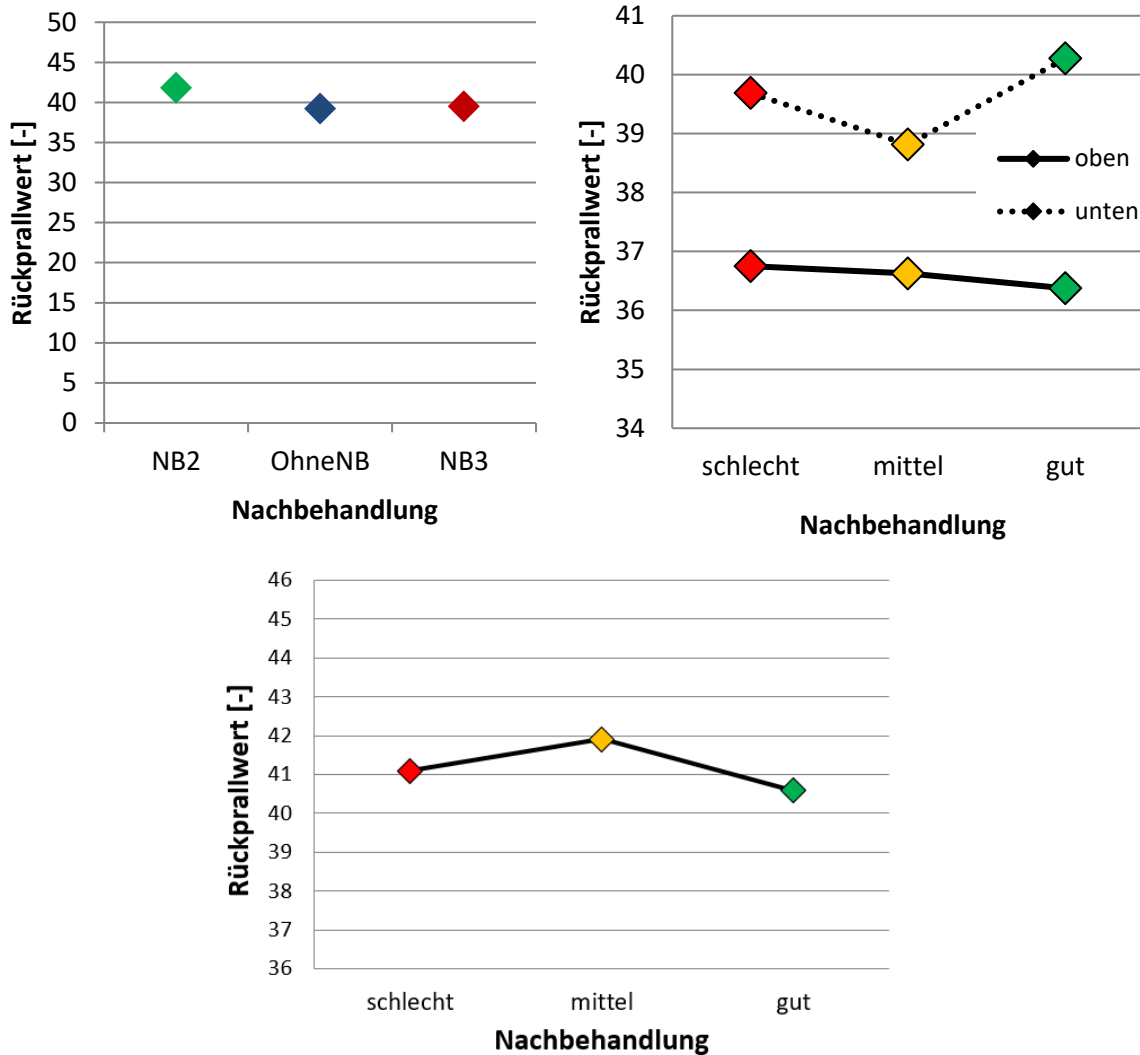


Abbildung 59: Ergebnisse der Messungen mit dem Rückprallhammer im Labor nach 27d (links), auf der Baustelle ÖBB Bahnhof Siebenbrunn-Leopoldsdorf nach 14d (rechts) und auf der Baustelle ASFINAG Absetzbecken Göttlesbrunn

4. Hyperspektralanalysen

Die Hyperspektralanalysen erlauben sowohl anhand der Labormessungen als auch aufgrund der Messungen auf der Baustelle die Nachbehandlungsarten klar voneinander zu unterscheiden. Bei den Laborauswertungen laut Abbildung 60 wurde der Anstieg der durchschnittlichen Reflexion in einem Wellenlängenbereich zwischen 900 und 1600 nm über die ersten 28 Tage nach der Betonage dargestellt. Die Nachbehandlungsarten sind klar abgegrenzt, die NB3 (die schlechteste NB) weist die niedrigste Reflexion auf. Die

Ergebnisse der Laborproben können nicht direkt mit den Baustellenergebnissen verglichen werden. Auf der Baustelle wurde eine tragbare Kamera eingesetzt, die die Reflexion in einem Wellenlängenbereich von 400-1000 nm misst (siehe Abbildung 60 unten). Dadurch lässt sich erklären, dass sich die Ergebnisse genau umgekehrt darstellen, nämlich die schlechte Nachbehandlung als jene mit der höchsten Reflexion. Außerdem spielen die Lichtverhältnisse unter denen die Aufnahmen gemacht werden eine große Rolle, diese unterscheiden sich stark zwischen Labor und draußen auf der Baustelle. Aus diesem Grund wurde bei den Baustellenmessungen eine Referenzprobe mit guter Nachbehandlung direkt bei der Betonwand gemessen und mit den Ergebnissen verglichen. Das Ergebnis deckt sich mit der guten Nachbehandlung der Betonwand.

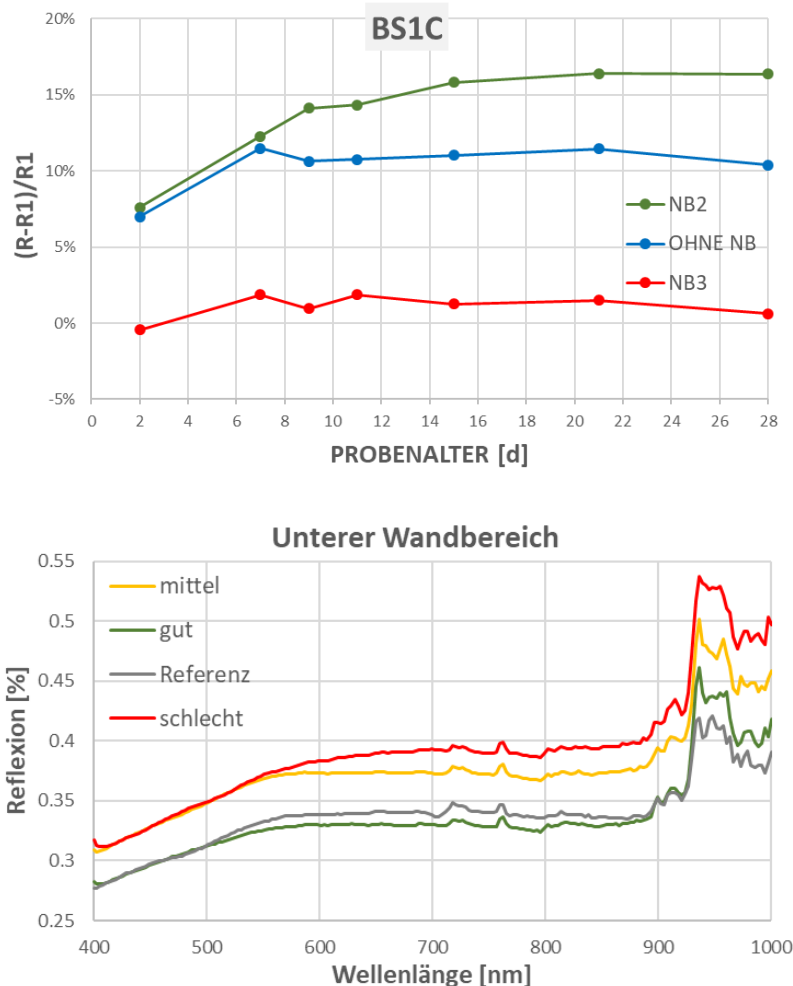


Abbildung 60: Ergebnisse der Aufnahmen mit dem Hyperspektralkamera im Labor (Durchschnittliche Reflexion im Wellenlängenbereich von 900-1600 nm) mit Probenalter von 1 bis 28 Tagen (oben) und auf der Baustelle im Wellenlängenbereich von 400-1000 nm (unten)

Zusammenfassend kann man sagen, dass mit den Hyperspektralanalysen auch auf der Baustelle sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Dies setzt voraus, dass direkt bei der Baustelle, zeitgleich mit den Aufnahmen am Bauwerk, die Referenzproben gemessen werden, um gleiche Lichtverhältnisse zu gewährleisten. Für die Auswertung der Daten ist ein geeignetes Programm notwendig, um die Ergebnisse z.B. in Excel zu überführen. Im Zuge dieser Auswertungen wurde das Programm Matlab angewandt. Die Bewertung dieser Methode ist in Tabelle 21 aufgezeigt.

Tabelle 21: Beurteilung der Hyperspektralanalysen

Hyperspektralanalysen					
Eignung zur Beurteilung der NB		Durchführung		Baustellentauglichkeit	
++	eindeutige Ergebnisse, aber großer Einfluss des Lichts	+	Messung einfach, Auswerteprogramm (z.B. Matlab) erforderlich	+	Tragbare Kameras sind handlich, Referenzproben notwendig

5. Ultraschall

Die Ultraschallmessungen zeigten bei den Laborversuchen (wie in Abbildung 64 oben ersichtlich) keine eindeutigen Ergebnisse. Die Änderung der Laufzeit über das Probenalter von 1 bis 28 Tagen ist bei der Nachbehandlung 3 (schlechteste Nachbehandlung) am geringsten. Die Ergebnisse der anderen beiden Nachbehandlungen unterscheiden sich kaum. Es ist anzunehmen, dass der Grund für die unklaren Ergebnisse die direkte Anordnung der Schallköpfe ist, wie bereits in Kapitel 4 erwähnt. Auch der Abstand zwischen den Schallköpfen hat einen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse. Diese Annahmen wurden durch die Auswertung der Baustellenmessungen bestätigt. Auf der Baustelle wurde eine indirekte Schallkopfanordnung angewandt. Die deutlichsten Aussagen lassen sich mit einem Schallkopfabstand von 15 cm tätigen. In Abbildung 64 unten sind die Baustellenergebnisse der Nachbehandlungsbereiche gut voneinander unterscheidbar.

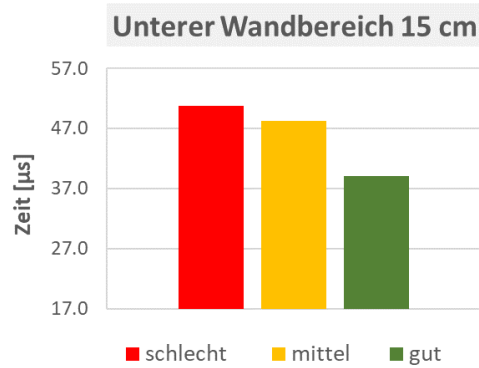
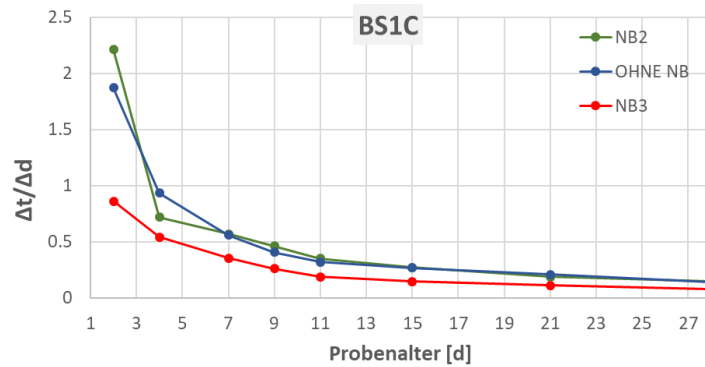


Abbildung 61: Ergebnisse der Ultraschallmessungen im Labor (Veränderung der durchschnittlichen Laufzeit über das Probenalter von 1 bis 28 Tagen) (oben) und auf der Baustelle (durchschnittliche Laufzeit) (unten)

Eine Bewertung der Ultraschallmethode zur Evaluierung der Nachbehandlungsqualität erfolgt in Tabelle 22. Die Ultraschallmessung ist ein einfaches und baustellentaugliches Verfahren, das bei entsprechender Schallkopfanordnung gute Ergebnisse erzielt.

Tabelle 22: Beurteilung der Ultraschallmessungen

Ultraschall					
Eignung zur Beurteilung der NB		Durchführung		Baustellentauglichkeit	
+	Gute Ergebnisse bei entsprechender Schallkopfanordnung	+	Messung einfach, richtige Schallkopfanordnung ist zu beachten	+	Ergebnisse können direkt auf der Baustelle abgelesen werden

6. Digitalmikroskop

Die Digitalmikroskopaufnahmen lieferten sowohl im Labor als auch vor Ort gut abgrenzbare Ergebnisse. In Abbildung 62 sind die Labor- und Baustellenergebnisse mit 20-facher Vergrößerung gezeigt. Die 20-fache Vergrößerung erwies sich als die geeignetste zur Evaluierung der Nachbehandlungsqualität.

Der Porenanteil ist bei den Labormessungen generell höher ausgefallen als bei den Baustellenuntersuchungen. Eine eindeutige Aussage, welcher Porenanteil eine bestimmte Nachbehandlungsqualität anzeigt, kann deshalb nicht getätigt werden. Unterschiede in der Nachbehandlungsqualität lassen sich bei beiden Untersuchungen eindeutig feststellen.

Da nur sehr kleine Ausschnitte der Betonoberfläche untersucht werden, muss eine entsprechend hohe Probenanzahl aufgenommen werden, um die Zuverlässigkeit dieser Methode zu gewährleisten. Im Labor sowie auf der Baustelle wurde eine begrenzte Stichprobenzahl genommen, diese muss für zuverlässige Aussagen zur Bestimmung der Nachbehandlungsqualität erweitert werden.

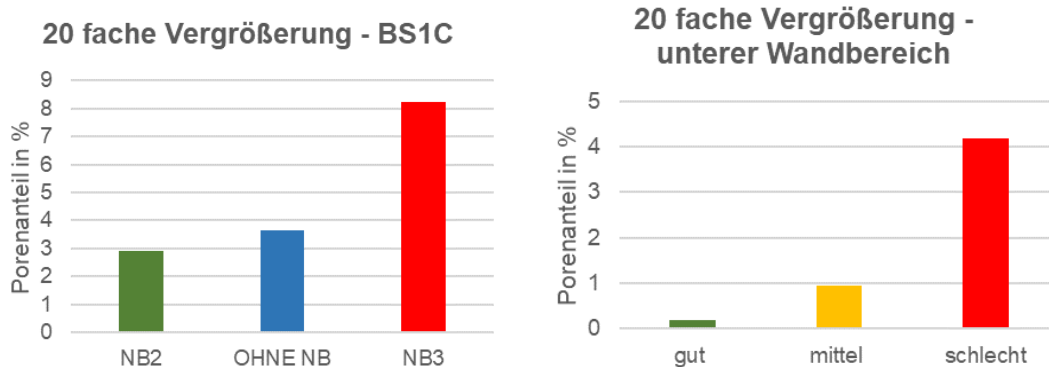


Abbildung 62: Ergebnisse der Digitalmikroskopauswertungen im Labor (links) und auf der Baustelle (rechts)

In Tabelle 23 erfolgt eine Bewertung der Methode. Mit Digitalmikroskopaufnahmen zur Auswertung des Porenanteils auf der Oberfläche lassen sich gute Ergebnisse erzielen. Um große Streuungen bei den Messergebnissen zu vermeiden, ist eine entsprechend große Stichprobenanzahl notwendig. Die Messungen sind einfach durchführbar. Umwelteinflüsse wie Licht oder Feuchtigkeit haben keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Da für die Aufnahmen ein spezieller Bildschirm ans Mikroskop angeschlossen werden muss, um die Aufnahmen zu steuern, ist der Einsatz auf der Baustelle aufwendig und die Methode daher eher für Laboruntersuchungen geeignet.

Tabelle 23: Beurteilung der Digitalmikroskopaufnahmen

Digitalmikroskop					
Eignung zur Beurteilung der NB		Durchführung		Baustellentauglichkeit	
+	Gute Ergebnisse, hohe Stichprobenzahl für zuverlässige Aussagen erforderlich	+	Messung und Auswertung einfach, kein Einfluss durch Feuchtigkeit und Licht	-	Gerät für Baustelle weniger geeignet, Aufbau und Transport aufwendig

7. MODELLTECHNISCHE ERFASSUNG

1. Bewertung der Nachbehandlungsqualität

Die erhobenen Daten aus dem Labor und der Baustelle können dazu herangezogen werden, weitere Messergebnisse in Hinsicht auf die Nachbehandlungsgüte zu bewerten. Zur Abschätzung der Nachbehandlungsqualität werden die Ergebnisse aus dem Labor und von der Baustelle mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsfunktionen dargestellt. Für jede Nachbehandlung wird ein Mittelwert und eine Standardnormalabweichung aus den Messdaten berechnet und anhand einer Normalverteilung dargestellt. Die Darstellung der Normalverteilungen für die drei untersuchten Nachbehandlungen veranschaulicht die Überschneidungen der Ergebnisse und ermöglicht die Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung neuer Messungen zur entsprechenden Nachbehandlung. Je weiter die Verteilungsfunktionen auseinanderliegen, desto eindeutiger lassen sich neue Messergebnisse zur entsprechenden Nachbehandlung zuordnen. Im Folgenden sind die Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Ergebnisse der Gaspermeabilität, der Hyperspektralanalysen, der Digitalmikroskopaufnahmen und der Ultraschallmessungen erklärt und mögliche Vorgehensweisen für die Bewertung von neuen Messergebnissen aufgezeigt.

In Abbildung 63 sind die Dichtefunktionen für die Ergebnisse der Gaspermeabilität mit dem Torrent Gerät aus den Laborversuchen am BS1C (schwarz) sowie die Untersuchungen auf der Baustelle (grau) dargestellt. Jede Nachbehandlung wird als eigene Dichtefunktion gezeigt. Die Bewertung der Betonqualität anhand der Gaspermeabilität ist in der Schweizer Norm SIA 262/1:2019 [24] festgelegt und wird in der Grafik anhand eines Bewertungsbalkens von „Sehr gut“ bis „Schlecht“ angegeben.

In der Grafik ist zu erkennen, dass die Ergebnisse auf der Baustelle tendenziell eine geringere Gaspermeabilität aufweisen als die Laboruntersuchungen. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Betonwand auf der Baustelle durch natürliche Umwelteinflüsse ausgetrocknet ist und im Gegensatz dazu die Laborproben bei 50 °C getrocknet wurden und somit eine höhere Porosität aufweisen. Die Ergebnisse der Baustellenmessungen weisen geringere Streuungen auf als die Laborwerte. Das zeigt, dass die Methode für die direkte Anwendung am Bauwerk gut geeignet ist.

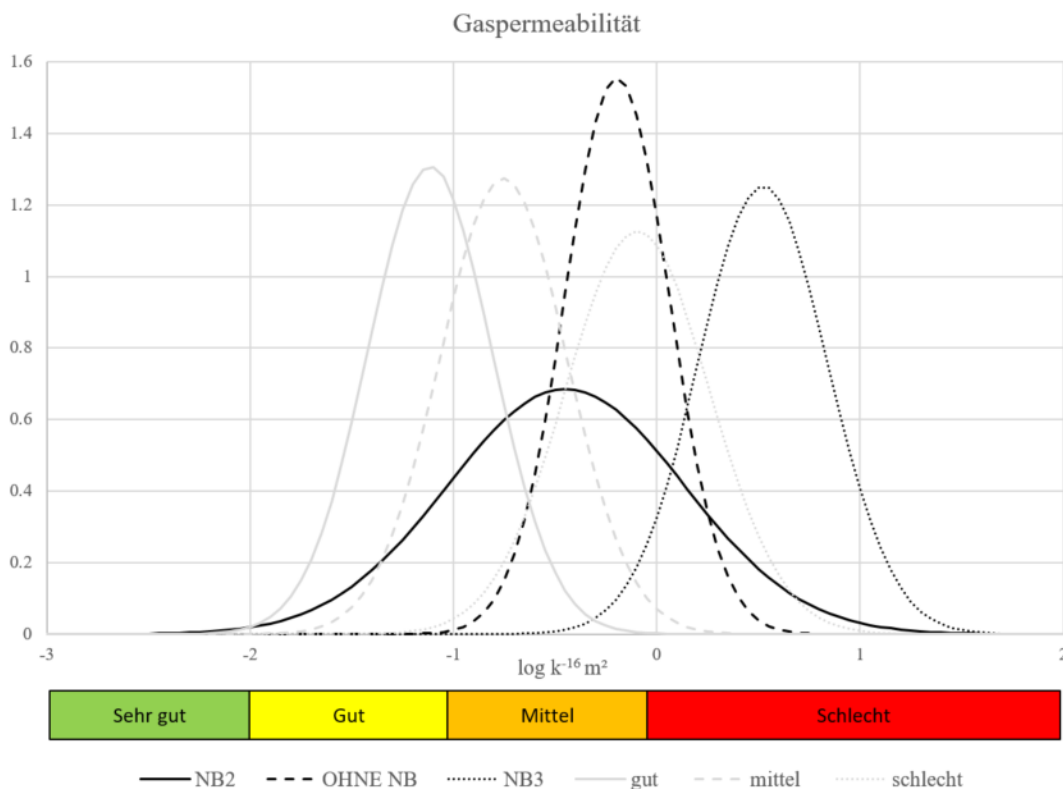


Abbildung 63: Dichtefunktionen der Ergebnisse für die Gaspermeabilität aus Labor- (NB2, Ohne NB und NB3) und von den Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht)

Stellt man die Ergebnisse wie in Abbildung 64 anhand von Verteilungsfunktionen dar, kann die Wahrscheinlichkeit, dass das neue Messergebnis zu einer der drei Nachbehandlungen gehört, abgelesen werden. In Abbildung 64 sind die Ergebnisse der Baustellenuntersuchungen für die Gaspermeabilität sowie ein beispielhaftes „neues“ Messergebnis dargestellt. Das „neue“ Messergebnis wird durch die Überschneidung mit den Funktionen der guten, mittleren und schlechten Nachbehandlung mit den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Laut diesem Beispiel ist die Messung zu 27 % der guten Nachbehandlung, zu 77 % der mittleren Nachbehandlung und zu 5 % der schlechten Nachbehandlung zugehörig.

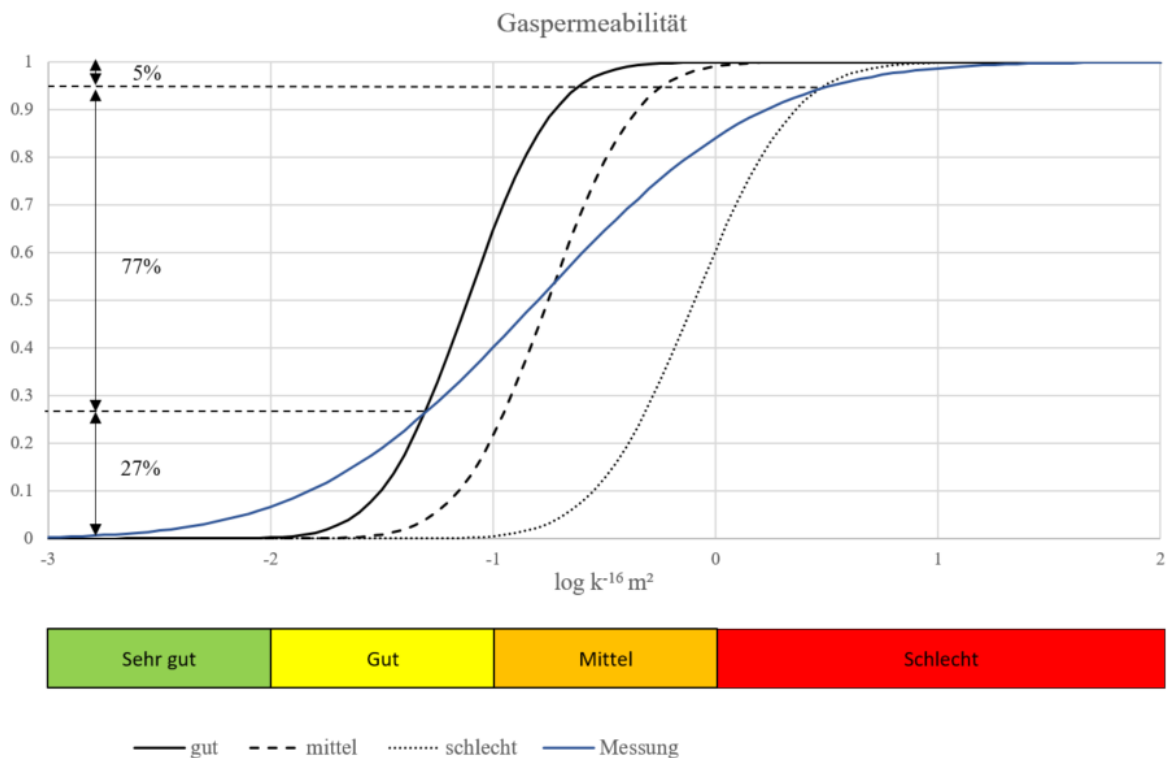


Abbildung 64: Verteilungsfunktionen der Ergebnisse für die Gaspermeabilität von den Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht) sowie für eine neue Messung

Die Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung der Baustellenuntersuchungen sind in Abbildung 65 als Dichtefunktionen und in Abbildung 66 als Verteilungsfunktionen dargestellt.

Die Funktionen der guten und schlechten Nachbehandlung überschneiden sich nicht, woraus man schließen kann, dass mit dieser Methode eine gute von einer schlechten Nachbehandlung eindeutig unterschieden werden kann. Die mittlere Nachbehandlung weist eine höhere Streuung auf, weshalb diese Nachbehandlung schwerer von den anderen beiden Nachbehandlungen zu differenzieren ist. Dennoch liegt die mittlere Nachbehandlung wie erwartet zwischen der guten und schlechten Nachbehandlung, wobei sie eher zur guten Nachbehandlung tendiert. Aufgrund der dargestellten Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung lassen sich zuverlässige Aussagen zur Nachbehandlungsqualität treffen.

Eine eindeutige Aussage welche Nachbehandlung bei bestimmten Werten des elektrischen Widerstandes zu erwarten sind, lässt sich nicht treffen, da die Ergebnisse auf der Baustelle sehr stark von den Umwelteinflüssen abhängen. Deshalb ist die Bewertungseinteilung in Abbildung 65 und in Abbildung 66 nur ein Vorschlag und lediglich für die durchgeführten Baustellenmessungen anwendbar.

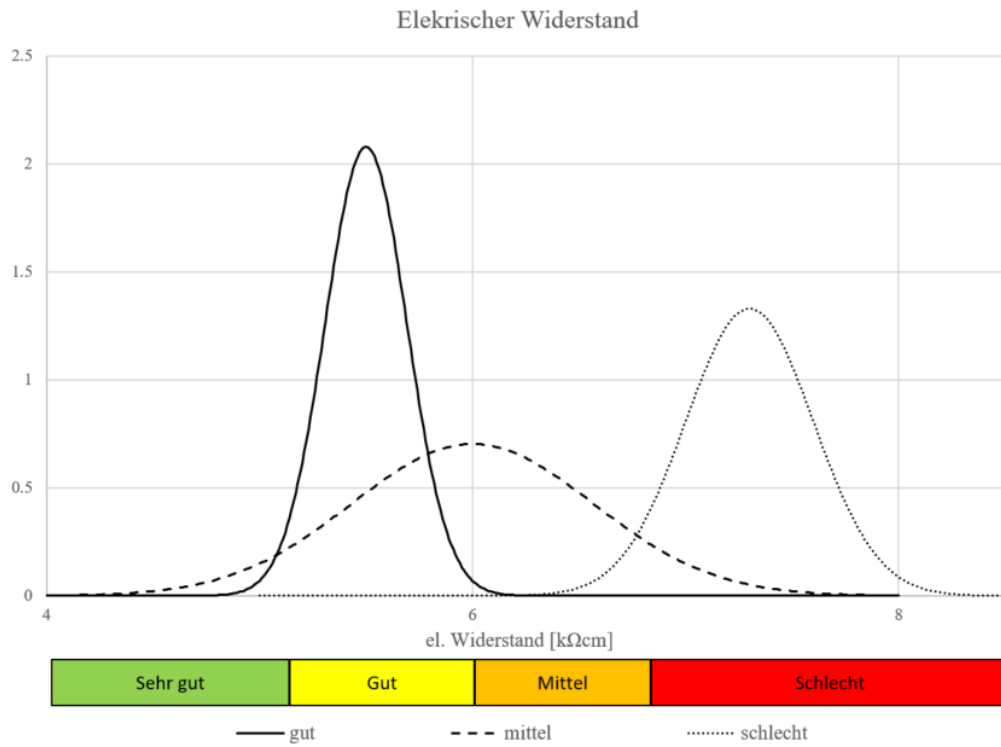


Abbildung 65: Dichtefunktionen der Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung der Baustellenuntersuchungen (gut, mittel, schlecht)

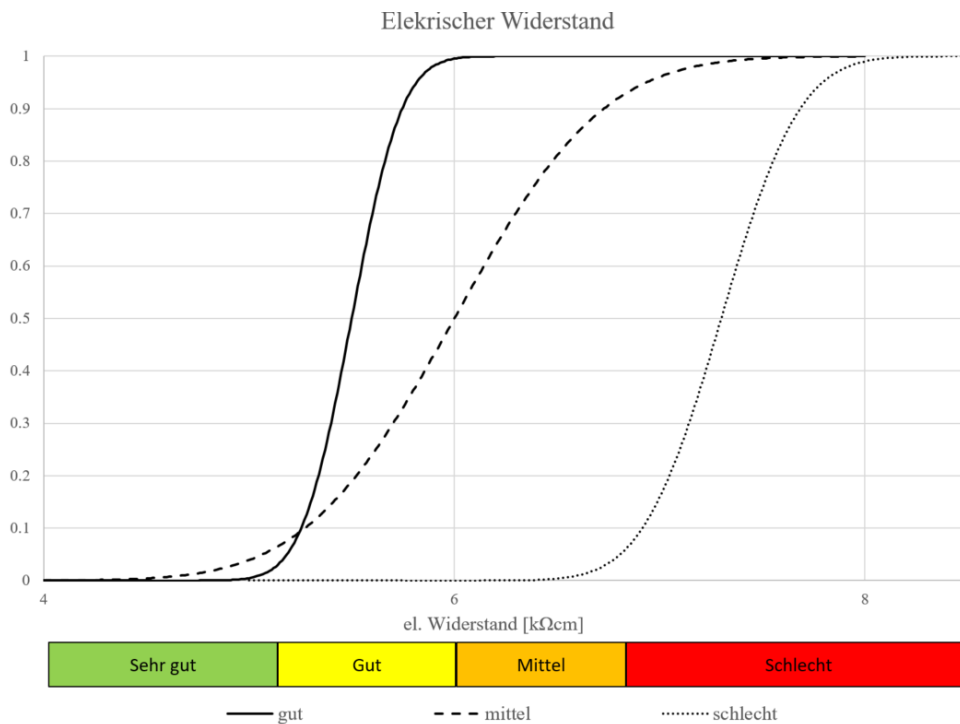


Abbildung 66: Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung der Baustellenuntersuchungen (gut, mittel, schlecht)

In Abbildung 67 sind die Dichtefunktionen für die Ergebnisse der Hyperspektralanalysen der Baustellenmessungen dargestellt. Gezeigt wird der gute, mittlere sowie der schlechte Nachbehandlungsbereich und das Ergebnis der Referenzprobe (gut nachbehandelt). Die gemessenen Reflexionen sind stark von Licht und Feuchtigkeit beeinflusst. Deshalb ist es nicht wie bei den Gaspermeabilitätsmessungen möglich, die Qualitätsgrenzen (sehr gut – schlecht) generell zu quantifizieren. Die Beurteilung der Qualität richtet sich immer nach der Referenzmessung und wird für jedes Messobjekt individuell angepasst. In Abbildung 67 und Abbildung 68 ist ersichtlich, dass die Dichte - bzw. Verteilungsfunktion der Referenzmessung wie erwartet sehr ähnlich der Funktion der guten Nachbehandlung ist. Der Vergleich mit der Referenzmessung erweist sich daher als zuverlässige Methode die Betonqualität zu bewerten.

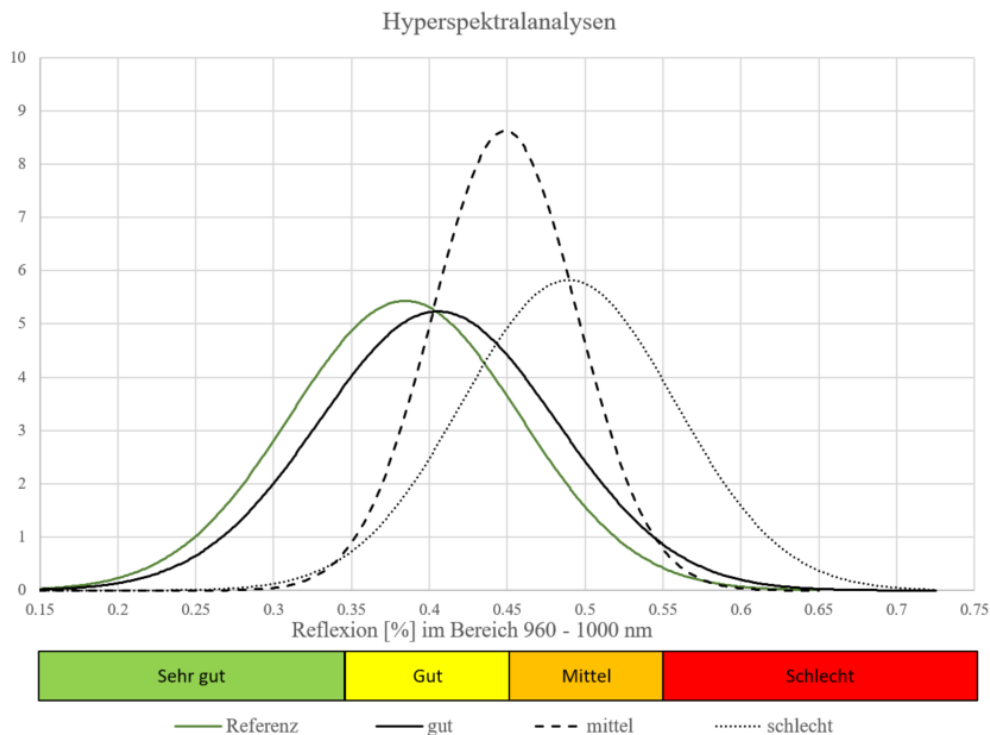


Abbildung 67: Dichtefunktionen der Ergebnisse für die Hyperspektralanalysen von den Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht und Referenz)

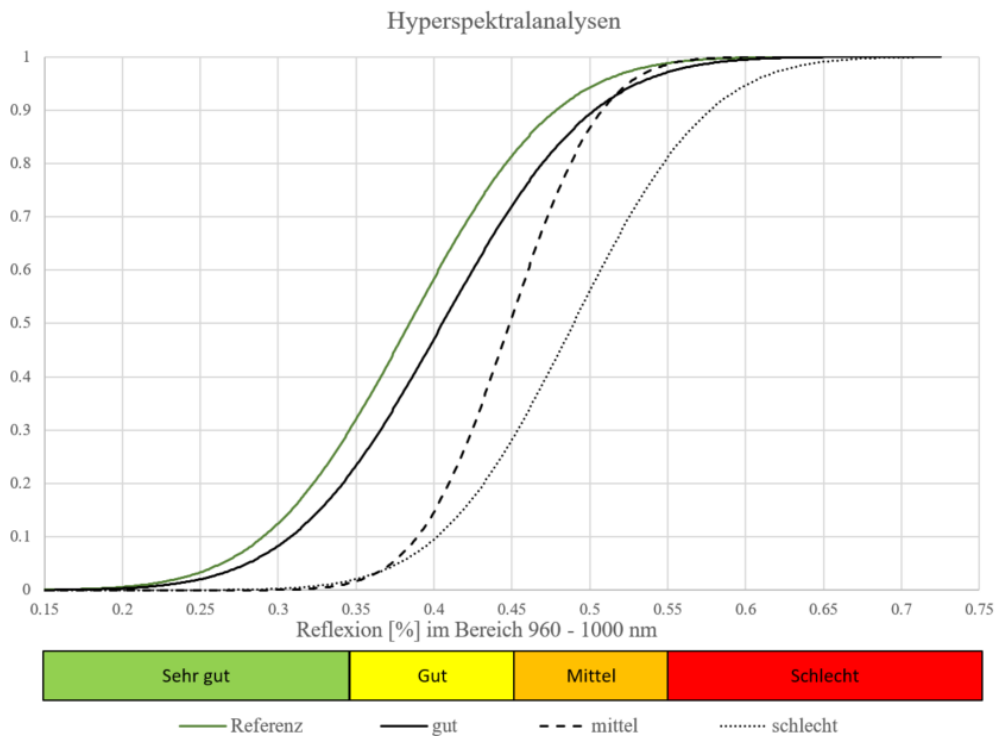


Abbildung 68: Verteilungsfunktionen der Ergebnisse für die Hyperspektralanalysen von den Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht und Referenz)

Die Dichte- und Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der Digitalmikroskopmessungen auf der Baustelle sind in Abbildung 69 und in Abbildung 70 dargestellt. Die Nachbehandlungsbereiche weisen sehr unterschiedliche Streuungen auf. Bei der guten Nachbehandlung ist kaum eine Abweichung vom Mittelwert vorhanden, die Streuung ist im schlechten Nachbehandlungsbereich am größten. Mit dem Digitalmikroskop werden nur sehr kleine Ausschnitte aufgenommen. Bei schlechter Nachbehandlung ist die Porosität am größten, daher ist es möglich, dass durch die Punktaufnahmen teilweise große Poren erfasst werden und dadurch die Ergebnisse stärker streuen. Die Oberfläche ist bei guter Nachbehandlung hinsichtlich der Porenverteilung eher heterogen, deshalb ist hier die Streuung sehr gering. Trotz der großen Streuung im schlechten Bereich ist es möglich neue Messergebnisse hinsichtlich der Oberflächenqualität zu beurteilen. Um die Grenzen zwischen sehr guter bis hin zur schlechten Qualität quantitativ festzulegen bedarf es noch weiterer Testergebnisse um eine repräsentative Statistik zu erstellen. Die Bewertungsleiste in Abbildung 69 und Abbildung 70 ist lediglich ein Vorschlag für die bereits durchgeführten Tests.

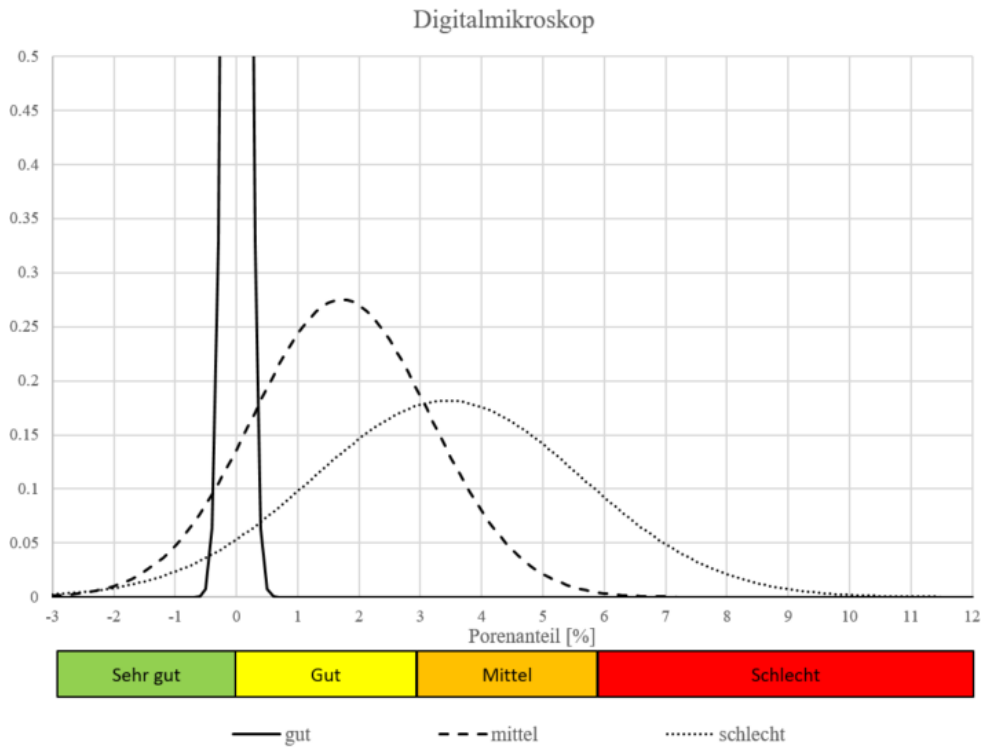


Abbildung 69: Dichtefunktionen der Ergebnisse vom Digitalmikroskop der Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht)

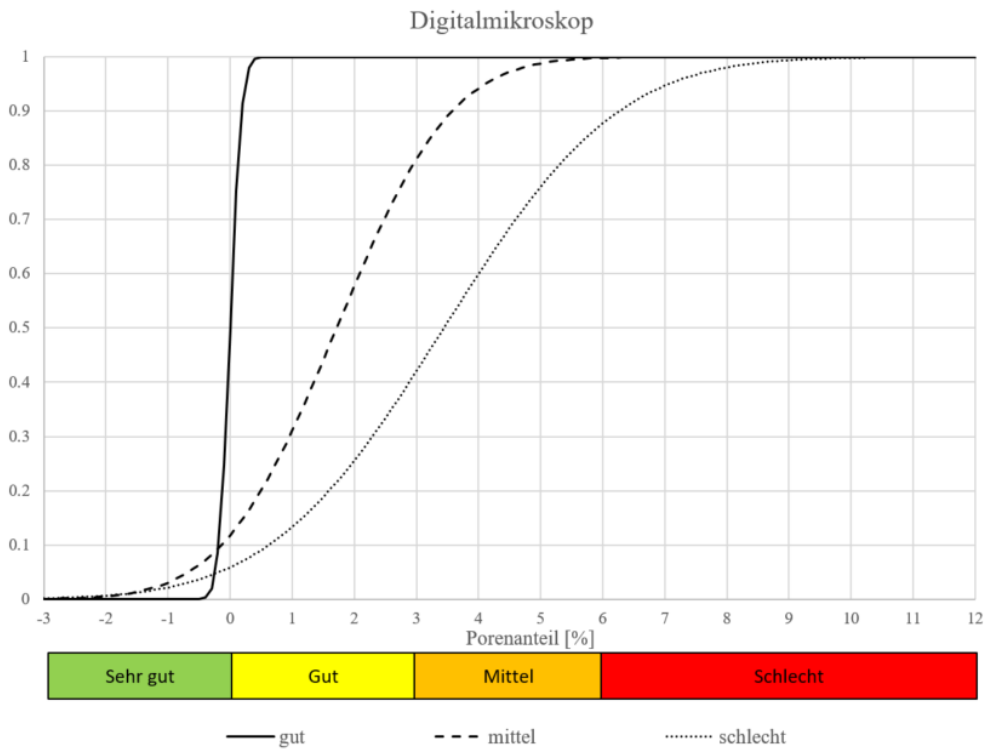


Abbildung 70: Verteilungsfunktionen der Ergebnisse vom Digitalmikroskop der Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht)

Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen werden mit der Scherwellenlaufzeit in μs angegeben. Die Laufzeit ist abhängig vom Schallkopfabstand und von der Betonbeschaffenheit. Die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Ultraschallergebnisse der Baustellentests mit einem Schallkopfabstand von 15 cm sind in Abbildung 71 und Abbildung 72 abgebildet. Die Ergebnisse weisen stärkere Überschneidungen auf als bei oben genannten Methoden. Die drei Nachbehandlungen können voneinander abgegrenzt werden, allerdings überschneiden sich die mittlere und schlechte Nachbehandlung stark aufgrund nah beieinanderliegender Mittelwerte und der großen Streuung der mittleren Nachbehandlung. Zur Beurteilung der Oberflächenqualität ist es notwendig noch weitere Vergleichsmessungen durchzuführen. Die Bewertungsleiste unter den Grafiken ist ein Vorschlag aufgrund der bisher vorhandenen Ergebnisse und muss bei ausreichender Stichprobenanzahl noch einmal angepasst werden.

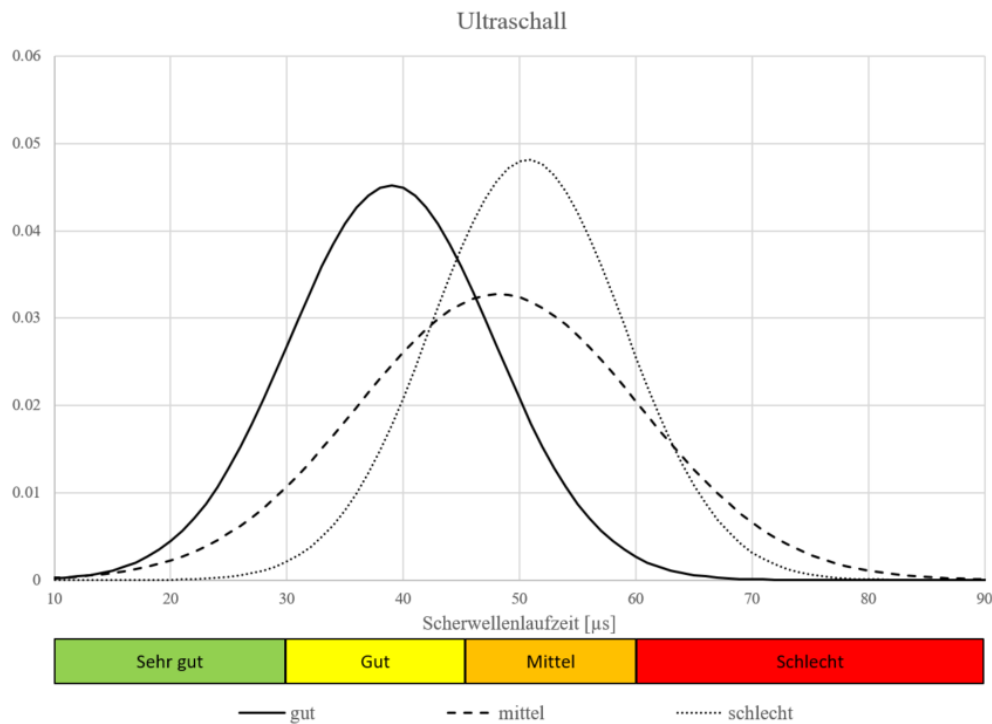


Abbildung 71: Dichtefunktionen der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen von den Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht)

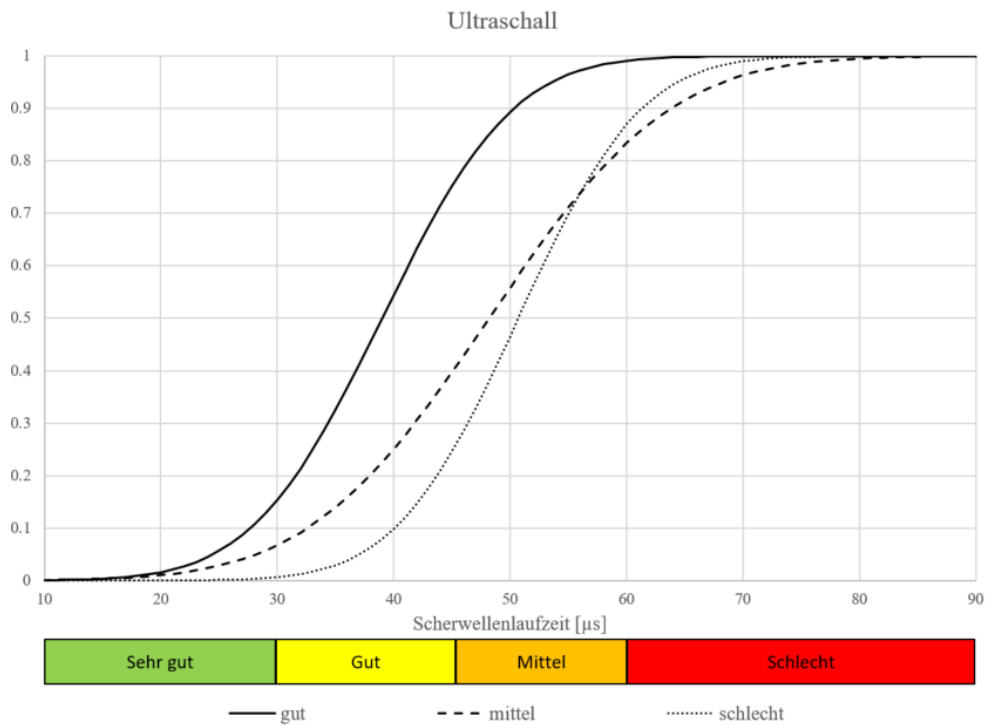


Abbildung 72: Verteilungsfunktionen der Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen von den Baustellenmessungen (gut, mittel, schlecht)

2. Bayes'sches Updating

Der vorhandene Datensatz für die Bewertung der Nachbehandlungsqualität kann mittels Bayes'schem Updating kontinuierlich erweitert werden. Die Labordaten und Ergebnisse der Baustelle werden durch Informationen „neuer Messungen“ ergänzt und upgedatet. Somit werden die Datensätze mit jeder neuen Messung größer und die Informationen mit denen die Bewertung erfolgt zuverlässiger.

Beim Bayes'schen Updating liegen sogenannte Prädiktordaten vor. In diesem Fall sind das die Labor- bzw. Baustellendaten. Für jede Nachbehandlung ist eine Wahrscheinlichkeit gegeben die beschreibt mit welcher Zuverlässigkeit die entsprechende Nachbehandlung einer neuen Messung zugeordnet wird. In Abbildung 73 sind die Prädiktorwerte für die Nachbehandlungen NB2, Ohne NB und NB3 beispielhaft dargestellt. Der tatsächliche Zustand ist in der linken Spalte angeführt. Rechts davon ist der Prädiktor angegeben mit der Wahrscheinlichkeit, dass zum Beispiel eine NB2 als NB2, als Ohne NB oder als NB3 bewertet wird. In diesem Fall besteht eine Wahrscheinlichkeit von 0,90, dass eine NB2 als solche erkannt wird. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,09 wird ein Beton mit NB2 als Ohne NB und mit 0,01 als NB3 bewertet usw.

tatsächlicher Zustand NB _j		NB2	OhneNB	NB3	Prädiktor P(I NB _j)
	NB2	0,90	0,09	0,01	
	OhneNB	0,09	0,90	0,01	
	NB3	0,01	0,04	0,95	

Abbildung 73: Beispiel für Prädiktordaten bei Bayes'schem Updating

Diese Prädiktordaten können mit neuen Messdaten upgedatet werden. Wie in Kapitel 7 Punkt 1 erklärt, werden die Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit einer neuen Messung zu den drei Nachbehandlung anhand von Verteilungsfunktionen ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeiten werden als sogenannte „a-priori“ Werte in die Berechnung der „a-posteriori“ Wahrscheinlichkeiten herangezogen. In Abbildung 74 sind die a-priori Werte für eine Messung mit 0,80 bei NB2, 0,15 bei Ohne NB und 0,05 bei NB3 angegeben. Laut dieser Wahrscheinlichkeiten ist anzunehmen, dass es sich zu 80 % um einen Beton mit NB2 handelt.

		NB2	OhneNB	NB3	
NB2	0,80	0,90	0,09	0,01	
OhneNB	0,15	0,09	0,90	0,01	
NB3	0,05	0,01	0,04	0,95	
	1				1
	↑				↑
	a-priori P(NB _j)				a-posteriori P(NB _j I)

Abbildung 74: A-priori Wahrscheinlichkeiten für die neue Messung

Integriert man die a-priori Daten in den ursprünglichen Datensatz, ergeben sich die a-posteriori Daten für die NB2 laut folgender Formel:

$$P(NB_2|I) = \frac{P(I|NB_2) * P(NB_2)}{P(I|NB_2) * P(NB_2) + P(I|OhneNB) * P(OhneNB) + P(I|NB_3) * P(NB_3)}$$

Die Ergebnisse für die a-posteriori Werte sind in Abbildung 75 in der rechten Spalte angeführt. Laut dem Update wird eine NB2 zu 98 % als solche erkannt und zu 2 % als Ohne NB bewertet.

		NB2	OhneNB	NB3	
NB2	0,80	0,90	0,09	0,01	0,98
OhneNB	0,15	0,09	0,90	0,01	0,02
NB3	0,05	0,01	0,04	0,95	0,00
	1				1

Abbildung 75: A-posteriori Wahrscheinlichkeiten für NB2

Das Bayes'sche Updating bietet die Möglichkeit neue Ergebnisse aus dem vorhandenen Datensatz zu kombinieren und die Zuverlässigkeit der Qualitätsbewertung zu evaluieren. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise können die Datensätze ständig durch neue Informationen ergänzt und verbessert werden.

3. Prozessplan

Abbildung 76 zeigt den gesamten Prozessplan für die Bewertung der Nachbehandlungsqualität.

Der erste Schritt ist die Messung und Analyse von Labor- und Baustellendaten zum Aufbau eines Datensatzes anhand dessen weitere Messdaten bewertet werden können. Im zweiten Schritt werden die erhobenen Daten in Basisvariablen umgewandelt – in Mittelwerte und Standardabweichungen – um Unsicherheiten zu erfassen. Anhand der Basisvariablen werden im nächsten Schritt die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der drei Nachbehandlungsarten für den Entscheidungsprozess aufgestellt. Die neuen Messergebnisse werden mit den Wahrscheinlichkeitsfunktionen abgeglichen um die Nachbehandlungsqualität wahr-scheinlichkeitstheoretisch zu bewerten. Durch Bayes'sches Updating bzw. Künstliche Neuronale Netze (KNN) erfolgt ein kontinuierliches Updating der vorhandenen Datensätze mit den Informationen aus neuen Messdaten. Aufgrund der beschränkten Datenmenge wird die Anwendung des Bayes'schen Updatings empfohlen, bei ausreichender Datenmenge ist der Aufbau von KNN vorteilhaft.

Eine höhere Bewertungszuverlässigkeit kann durch die Kombination mehrerer Methoden erlangt werden. Die Bayes'sche Bewertungsmatrix wird um die Ergebnisse einer oder

mehrerer Methoden zur Untersuchung der Nachbehandlungsqualität erweitert. Durch die Zuführung von Informationen einer weiteren unabhängigen Messung wird die Wahrscheinlichkeit die Betonqualität richtig zu klassifizieren höher. Je mehr unterschiedliche Verfahren bei einer Untersuchung angewandt werden und in die Bewertungsmatrix einfließen, desto zuverlässiger wird die Bewertung der Betonqualität.

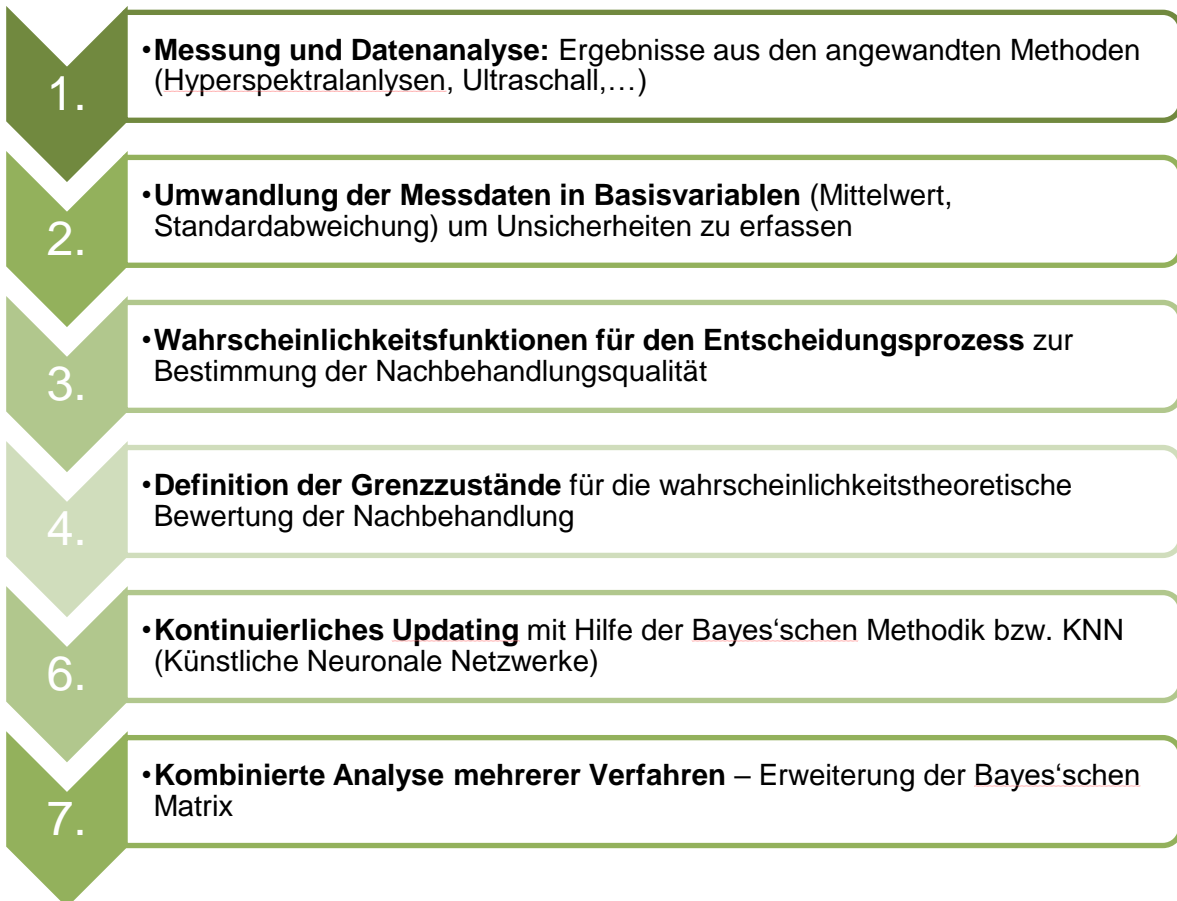


Abbildung 76: Prozessplan für die Bewertung der Nachbehandlungsqualität

Der Bewertungsprozess kann mit Hilfe der Probabilistiksoftware FReET durchgeführt werden. Die Software ermöglicht die Eingabe der Messdaten in Form von Basisvariablen. Diese werden als Wahrscheinlichkeitsfunktionen dargestellt und können zum Vergleich neuer Messdaten herangezogen werden. Durch die Anpassung der Basisvariablen können die neuen Messergebnisse in den Datensatz integriert werden. Eine detaillierte Anleitung zur Umsetzung des Bewertungsprozesses in FReET befindet sich in Anhang 1. Beispielhafte FReET-Dateien für die Auswertung der Ergebnisse der Methoden

Gaspermeabilität, elektrischer Widerstand, Ultraschall, Hyperspektralanalysen und Digitalmikroskop sind dem Bericht beigelegt. Eine Auflistung der Dateien befindet sich in Anhang 2.

8. PRÜFEMPFEHLUNG

In diesem Kapitel wird eine Empfehlung für den Prüfprozess zur Erhebung der Nachbehandlungsqualität von Betonbauwerken aufgrund der im Zuge des Projektes untersuchten Methoden gegeben.

Ein möglicher Prozessplan für die Erhebung der Nachbehandlungsqualität ist in Abbildung 77 aufgezeigt.

Als ersten Schritt wird eine punktuelle Erhebung des Oberflächenzustandes des zu untersuchenden Bauwerkes mit Hilfe der Messung der Gaspermeabilität empfohlen. Die Gaspermeabilität liefert zuverlässige Ergebnisse, die als Referenzwerte für weitere Messpunkte dienen.

Im zweiten Schritt erfolgt eine flächenhafte Erfassung des Bauwerkes mittels elektrischer Widerstandsmessung. Diese kann in Rastern über das Bauwerk verteilt durchgeführt werden und liefert in Kombination mit Punkt 1 aussagekräftige Ergebnisse zur Nachbehandlungsqualität eines größeren Bereiches.

Zur großflächigen Untersuchung des Bauwerkes sind die in Schritt 3 genannten Hyperspektralanalysen geeignet. Diese können, über Drohnen gesteuert, das gesamte Bauwerk zeiteffektiv abbilden. Die Kombination dieser Ergebnisse mit denen aus Punkt 1 und 2 ermöglichen eine detaillierte Aussage über die Nachbehandlungsqualität des gesamten Bauwerks.

Die Evaluierung der Nachbehandlungsqualität erfolgt im vierten Schritt mittels statistischer Auswertung der Daten und Vergleich mit früheren Messdaten mit Hilfe des Bayes'schen Updatings, wie in Kapitel 7 erläutert.

Eine Verifizierung der Messergebnisse kann mittels Labortests, wie z.B. Schnellkarbonatisierung durchgeführt werden.

Zur zusätzlichen Verifizierung der Daten können dem Bauwerk Bohrkern mit 20 mm Durchmesser entnommen werden und damit eine tiefere Analyse der Betonqualität mittels Computertomografie erfolgen.

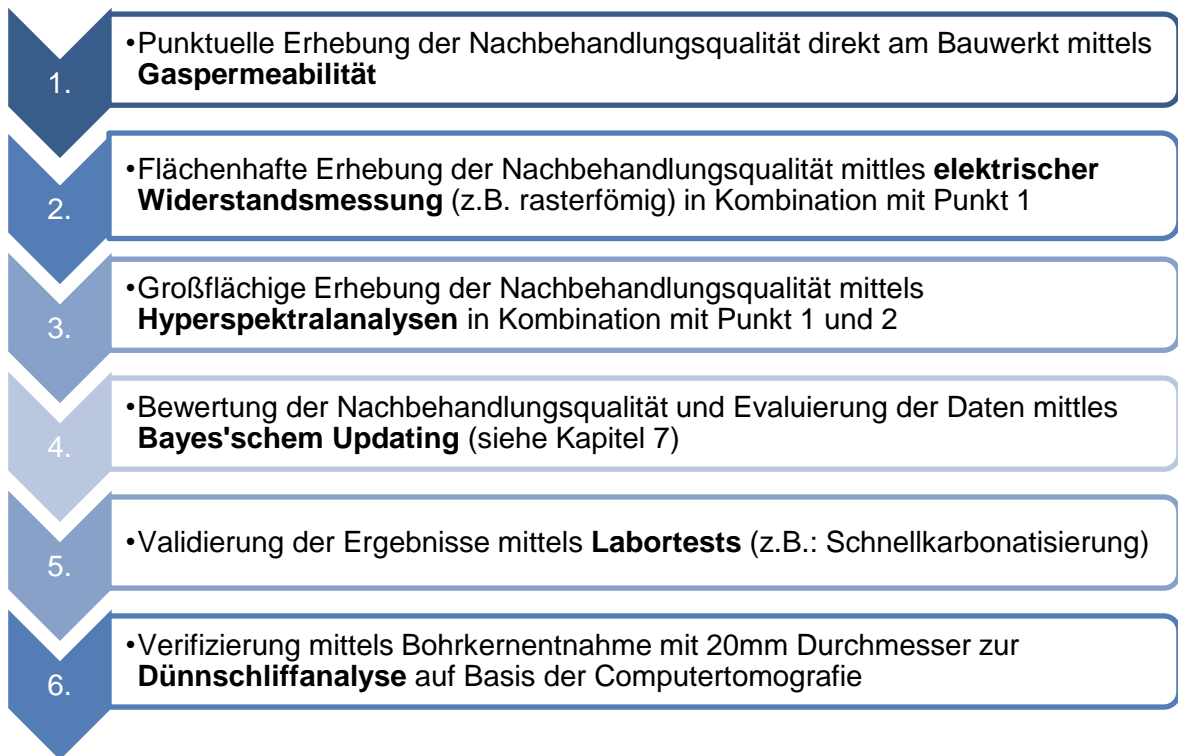


Abbildung 77: Prüfeempfehlung für die Erhebung der Nachbehandlungsqualität

9. CONCLUSIO

Die Nachbehandlung stellt einen wichtigen Arbeitsschritt beim Bau von Stahlbetonbauwerken dar. Nur mit einer fachgerechten Nachbehandlung kann eine vollständige Hydratation der oberflächennahen Bereiche der Bauteile – der Betonrandzone – gewährleistet werden. Diese Randzone ist für die Dauerhaftigkeit des Bauwerks verantwortlich und stellt eine Barriere für viele negative Umwelteinflüsse dar. Eine unzureichende Nachbehandlung führt primär zu einem vorzeitigen Austrocknen dieser Betonrandzone, die Hydratation kommt somit zum Erliegen und die Porosität des Zementsteins steigt. Die Erhöhte Porosität der Betonrandzone beschleunigt und fördert viele den Beton schädigende Prozesse. Die beiden wichtigsten davon sind die Karbonatisierung (Korrosion der Bewehrung) und das Eindringen von Chlorid-Ionen (Reduktion des Frostwiderstands). Weiters wird die Festigkeit und damit auch der Verschleißwiderstand herabgesetzt.

Das Ziel dieses Projektes war es, die Auswirkungen einer nicht fachgerecht durchgeführten Nachbehandlung zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden zunächst passende Methoden zur Untersuchung der Betonoberflächenqualität ausgewählt und diese in an unterschiedlich nachbehandelten Betonprobewürfeln – die aus drei unterschiedlichen Betonsorten gefertigt wurden – unter Laborverhältnissen getestet. Diese Laboruntersuchungen lieferten mit den meisten Methoden zufriedenstellende Ergebnisse und konnten eindeutige Unterschiede zwischen den verschiedenen Nachbehandlungen aufzeigen. Es wurden dafür vier unterschiedliche Nachbehandlungen gewählt: eine optimale (NB1), eine sehr gute (NB2), eine schädliche (Ohne NB) und eine sehr schädliche (NB3). Die Untersuchungen der Gaspermeabilität und des elektrischen Widerstands lieferten dabei die eindeutigsten Ergebnisse. Weiters bieten die untersuchten sensorbasierten Beurteilungsmöglichkeiten eine gute Alternative zur Bestimmung der Nachbehandlungsqualität. Bei den Laboruntersuchungen hat sich die Hyperspektralanalysen als genaueste Methode herausgestellt. Zuverlässige Ergebnisse können bei weiterführenden Tests auch von Ultraschallmessungen und Digitalmikroskopaufnahmen erwartet werden.

Im weiteren Verlauf dieses Projektes wurden die am aussichtsreichsten eingestuften Messmethoden – die Erkenntnisse der Laboruntersuchungen dienten dabei der Auswahl – in der Praxis an Bauteilen getestet. Die zu untersuchenden Bauteile wurde dabei in

Bereiche unterteilt, die sich in Nachbehandlungsdauer und Lage unterscheiden. Auch hier lieferten die Messungen der Gaspermeabilität und des elektrischen Widerstands deutliche Unterschiede zwischen den Nachbehandlungsarten und zeigten weiters den Einfluss der Exposition (hier Lage oben und unten) auf. Die Untersuchungen mit den sensorbasierten Verfahren Ultraschall, Digitalmikroskop und Hyperspektrale Bildgebung zeigten ebenfalls klare Unterschiede in der Oberflächenqualität der drei Bereiche. Der Einfluss der Lage der exponierteren Bereiche auf den Oberflächenzustand war auch bei diesen Methoden deutlich erkennbar.

Die modelltechnische Erfassung der im Zuge des Projektes erhobenen Messdaten ermöglicht die wahrscheinlichkeitstheoretische Evaluierung der Nachbehandlung neuer Messungen. Die neuen Ergebnisse können in den bestehenden Datensatz mittels Bayes'schem Updating (bzw. bei größeren Datensätzen mittels künstlicher Neuronaler Netze) implementiert werden und erhöhen in weiterer Folge die Zuverlässigkeit der Bewertung der Betonqualität.

Mit Hilfe dieses Projektes konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Güte der Nachbehandlung und der Qualität der Betonoberfläche des Nachbehandelten Bauteils – somit dessen Dauerhaftigkeit – bewiesen werden. Die Messergebnisse der im Projekt verwendeten Methoden können dabei als grobe Referenzwerte verwendet werden. Jedoch muss dabei der Einfluss der unterschiedlichen Umweltbedingungen (z.B. Sonneneinstrahlung, Temperatur, Luftfeuchte), wie auch der verwendeten Betonsorten beachtet werden, da diese – wie auch andere Faktoren – sich stark auf die Werte der Messungen auswirken.

Als weitere Forschungsfragen könnten deshalb der Einfluss des Bauteilstandortes und die für dessen Herstellung verwendete Rezeptur auf die Messwerte der unterschiedlichen Methoden gesehen werden.

10. LITERATUR

- [1] ACI 77 Committee 305, Hot weather concreting, Journal of the American Concrete Institute 74, H.7, S. 317, 1977
- [2] Springenschmid R. Betontechnologie für die Praxis, 1. Auflage, 2007
- [3] Grübl P, Weigler H, Karl S, Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, 2001
- [4] Freimann T, Dauerhafte Betonmatrix; Einfluss der Betonzusammensetzung, Betonrandzone und Nachbehandlung, Technische Hochschule Nürnberg, 2019
- [5] Adam T., Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2006
- [6] Verein Deutscher Zementwerke, Zement Taschenbuch, 50. Ausgabe, 2002
- [7] Carrier R E, Cady P D, Evaluating Effectiveness of concrete curing compounds, Journal of materials +, Jahrgang 5, H. 2, S. 294, 1970
- [8] Jacobs F, Hunkeler F, Mühlhan B, Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton, Bundesamt für Strassen, 2014
- [9] Ehrhardt D, Zum Einfluss der Nachbehandlung auf die Gefügeausbildung und den Frost-Taumittelwiderstand der Betonrandzone, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2016
- [10] Kim TK, Choi SJ, Choi JH, Kim JHJ, Prediction of Chloride Penetration Depth Rate and Diffusion Coefficient Rate of Concrete from Curing Condition Variations due to Climate Change Effect, Int. J. Concr. Struct. Mater. 13:15, 2019
- [11] ÖNORM B 4710-1, Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal- und Schwerbeton). Österr. Normungsinstitut, Ausgabe 2007.
- [12] Jacobs F, Hunkeler F, Mühlhan B, Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton, Bundesamt für Strassen, 2014
- [13] Adam T, Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, Dissertation, 2006
- [14] Ehrhardt D, Zum Einfluss Der Nachbehandlung Auf Die Gefügeausbildung Und Den Frost-Taumittelwiderstand Der Betonrandzone, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2016
- [15] Kim TK, Choi SJ, Choi JH, Kim JHJ, Prediction of Chloride Penetration Depth Rate and Diffusion Coefficient Rate of Concrete from Curing Condition Variations due to Climate Change Effect, Int J Concr Struct Mater 13:15, 2019
- [16] Chrisp TM, McCarter WJ, Starrs G, Basheer PAM, Blewett J, Depth-related variation in conductivity to study cover-zone concrete during wetting and drying, Cement & Concrete Composites 24, S.415-426, 2002
- [17] Huber J, Schießl P, Nachweisverfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln (NBM), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn, Heft 938, 2006
- [18] Huber J, Zur Nachbehandlung von Beton, Dissertation, Technische Universität München, 2008
- [19] Younsi A, Turcry Ph, Aït-Mokhtar A, Staquet S, Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying, Cement and Concrete Research 43, 2013
- [20] Balayssac JP, Détriché Ch H, Grandet J, Effects of curing upon carbonation of concrete, Construction and Building Materials 9 (2), 1995

- [21] Ekolu SO, A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete, *Construction and Building Materials* 127, 2016
- [22] Ramezaniapour AA, Malhotra VM, Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume, *Cement & Concrete Composites* 17, 1995
- [23] Khatib JM, Mangat PS, Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete, *Cement and Concrete Research* 32, 2002
- [24] Schweizer Norm SIA 262/1:2019, *Betonbau - Ergänzende Festlegungen, Anhang E*, 2019
- [25] Komárková T, Králíková M, Kovács P, Kocáb D, Stavař T, Application of computed tomography in comparison with the standardized methods for determining the permeability of cement-composite structures, *Materials and technology* 49 (4), 2015
- [26] Ballim Y, Curing and the durability of OPC, fly ash and blast-furnace slag concretes, *Materials and Structures* 26 (238), 1993
- [27] NEXCO-West USA, Inc. Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning: Vol.2 Field Test at Haymarket Bridge, 2014
- [28] Nischer P, Zückert U, Temperaturanstieg bei der Erhärtung von Beton. *ZEMENT+BETON*, 2002
- [29] Hintzen W, Thielen G, Betontechnische Einflüsse auf die Rißbildung infolge Hydratationswärme, *Betontechnische Berichte 1998-2000*, 2001. Verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/061-072_Beton.chn_Einfl_sse.pdf
- [30] Arita J, Sasaki K, Endo T, Yasuoka Y, Assessment of Concrete Degradation with Hyperspectral Remote Sensing. In Singapore, 2001
- [31] Lee J-D, Dewitt BA, Lee S-S, Bhang K-J, Sim J-B, Analysis of Concrete Reflectance Characteristics Using Spectrometer and Vnir Hyperspectral Camera. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 39, 2012
- [32] Maruthi Sridhar BB, Chapin TL, Vincent RK, Axe MJ, Frizado JP, Identifying the effects of different construction practices on the spectral characteristics of concrete. *Cement and Concrete Research* 38 (4), 2008
- [33] Watanabe A, Furukawa H, Miyamoto S, Minagawa H, Non-destructive chemical analysis of water and chlorine content in cement paste using near-infrared spectroscopy, *Construction and Building Materials* 196, 2019
- [34] Zahiri Z, Laefer DF, Gowen A, The feasibility of short-wave infrared spectrometry in assessing water-to-cement ratio and density of hardened concrete. *Construction and Building Materials* 185, 2018
- [35] Beck M., Rübner K., Burkert A., Einsatz der Quecksilberporosimetrie zur Charakterisierung von Feinkornbetonen für elektrochemische Untersuchungen. XIII. Workshop über die Charakterisierung von feinteiligen und porösen Festkörpern, 2006
- [36] Agilent Technologies. *Fundamentals of Gas Chromatography*, 2002
- [37] Hjellström T, Wadsö L, Kristenson J, Multiple headspace extraction gas chromatography for quantification of VOC's in concrete. *Indoor Air* 6, 2002
- [38] Spanka G, Thielen G, Freisetzung flüchtiger Substanzen aus zementgebundenen Bauprodukten, *Beton : die Fachzeitschrift für Bau + Technik* 49, 1999. Verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/123-134_fl_ch.ge_Substanzen.pdf

- [39] Jeknavorian AA, Barry EF, Serafin F, Determination of grinding aids in portland cement by pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry. Cement and Concrete Research 28 (9), 1998
- [40] Hunkeler F, Elektrischer Widerstand von Mörteln und Beton, 1993. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/20467120-Elektrischer-widerstand-von-moerteln-und-beton.html>
- [41] Hunkeler F, Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten, Bericht Teil 1, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 1994
- [42] Wojtas H, Elektrochemische, zerstörungsfreie Prüfmethode für Zustandsanalysen und Qualitätssicherung bei Instandsetzung von Stahlbetonbauten, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3, 1997
- [43] Proceq SA, Resipod family, Bedienungsanleitung - Prüfung der Dauerhaftigkeit von Beton, 2016
- [44] Reichling K, Asgharzadeh A, Raupach M, Neuer Ansatz zur Bestimmung des elektrischen Betonwiderstandes bei vorhandener Bewehrung, Bautechnik 91 (11), 2014
- [45] Rajabipour F, Weiss J, Electrical conductivity of drying cement paste, Mater Struct 40 (10), 2007
- [46] Breit W, Raupach M, Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone mit Multi-Ring-Elektroden, Aktuelle Forschungsergebnisse der Institut für Bauforschung der RWTH Aachen 6, Kurzbericht 41, 1993
- [47] Torrent R, Szychowski J, Innovation in Air-Permeability NDT: Concept and Performance, 2017
- [48] Ji-Hwan A, Jeong-Hee N, Soo-Ahn K, Sung-Ho J, Estimation of the Compressive Strength of Concrete Using Shear Wave Velocity, 2009
- [49] Voigt T, Dehn F, Surendra PS, Zerstörungsfreie Prüfung von jungem Beton mittels einer Ultraschallreflexionsmethode, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2006
- [50] Kumarapu K, Shashi M, Venkata Reddy K., Thermal Remote Sensing in Early Age Concrete Strength Estimation. Lecture Notes in Civil Engineering, 2020
- [51] Haar, Christoph & Hümme, Julian & Marx, Steffen & Lohaus, Ludger. Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten eines höherfesten Normalbetons. Beton- und Stahlbetonbau, 2015
- [52] Niederleithinger E, Herbrand M, Müller M, Monitoring von Querkraftversuchen an Spannbetondurchlaufträgern mit Ultraschall und Codawelleninterferometrie, Bauingenieur Band 92, November 2017

ANHANG 1

Bewertungsvorgang in FReET

Im Folgenden ist die Eingabe der Messdaten im Programm FReET zur Evaluierung der Nachbehandlungsqualität erklärt.

Als Beispiel wird die Datei „01_Gaspermeabilität_Labor.fre“ (siehe Anhang 2) herangezogen.

Öffnet man die Datei, gelangt man zur Eingabe der Variablen, also der Vergleichsdaten, unter „Random variables“, wie in Abbildung 78 abgebildet. Hier werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der drei Nachbehandlungen (hier NB1, Ohne NB und NB3) aus den Laborergebnissen eingegeben. Als Verteilungsfunktion wird die Normalverteilung gewählt. Als Bezugswert wird die NB1 herangezogen. Die Messwerte werden also alle auf die NB1 (beste Nachbehandlung) bezogen, weshalb diese noch einmal als Bezugsvariable, in diesem Fall als NB1_1 bezeichnet, eingegeben wird.

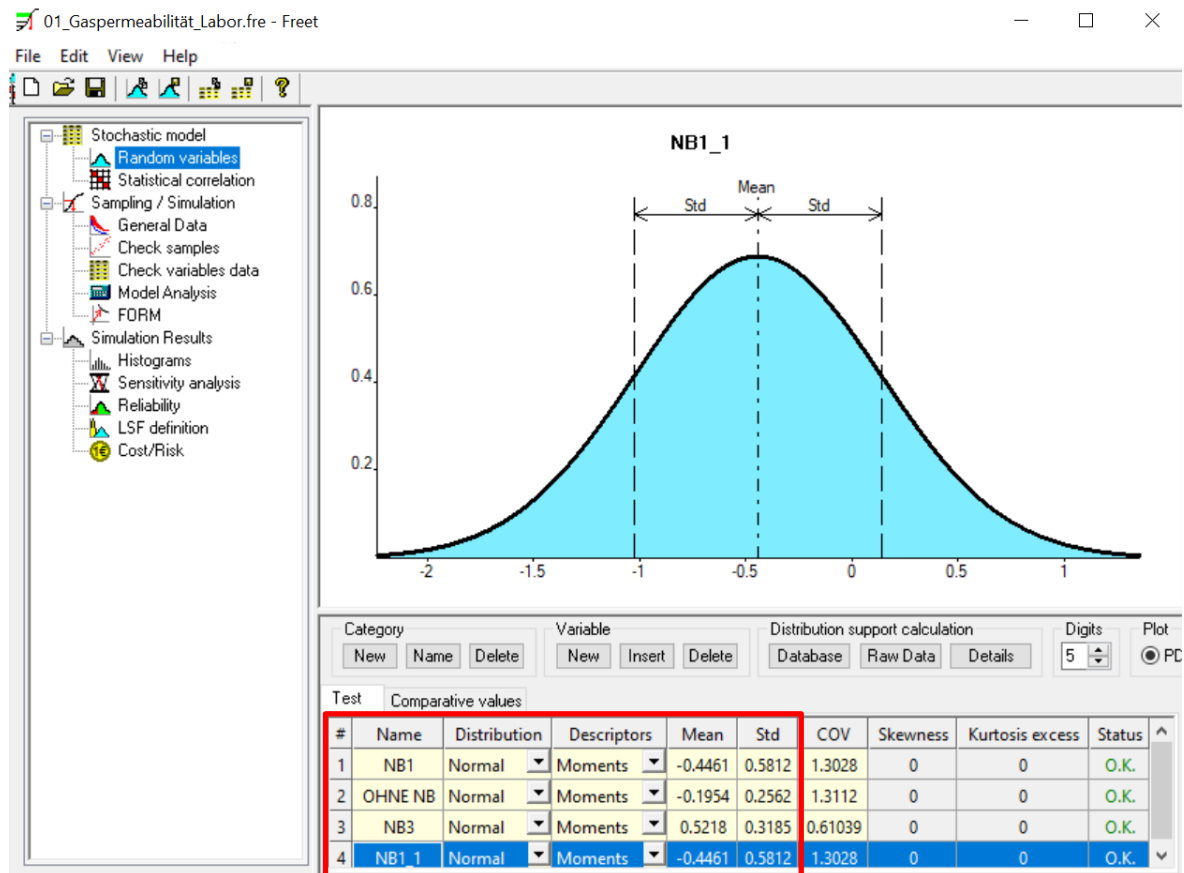


Abbildung 78: Eingabe der vorhandenen Daten (hier aus dem Labor) in FReET

Unter „Comparative Values“ (siehe Abbildung 79) werden die neuen Messdaten zum Vergleich mit den Labordaten eingegeben. Gewählt wird wieder eine Normalverteilung. Da sich die Ergebnisse in FReET auf die NB1 beziehen, wird für den Mittelwert der neuen Messung die Differenz zwischen dem Mittelwert der NB1 und des neuen Messwertes eingetragen.

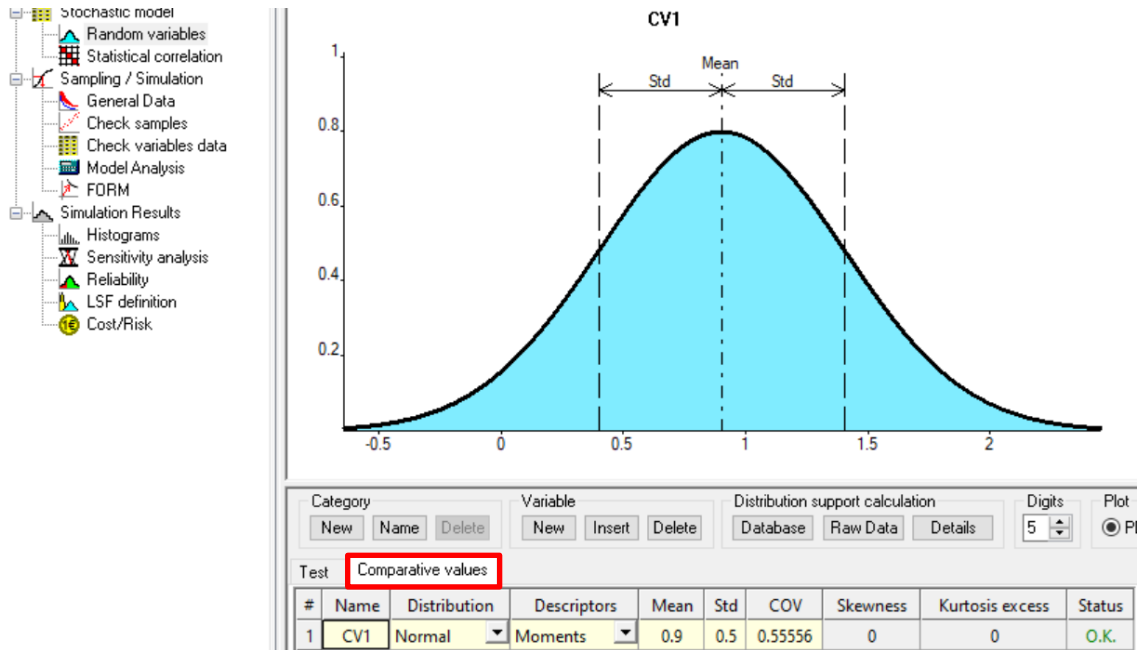


Abbildung 79: Eingabe der neuen Messdaten unter „Comparative Values“

Der nächste Schritt ist die Durchführung der Simulationen. Diese erfolgt, wie in Abbildung 80 gezeigt, unter „General Data“. Die Anzahl der Simulationen wurde hier mit 5000 gewählt, anschließend klickt man auf „Run“.

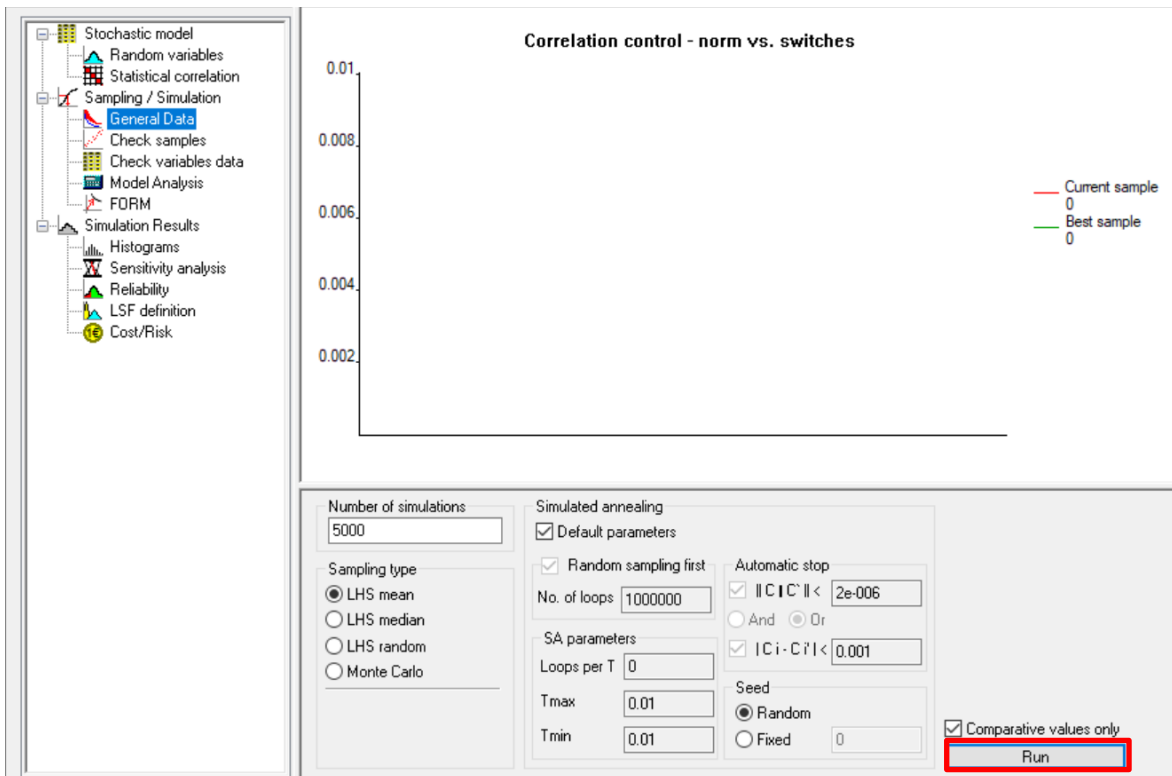


Abbildung 80: Durchführung der Simulationen unter „General Data“

Die Grenzzustandsfunktionen werden, wie in Abbildung 81 dargestellt, unter „Model Analysis“ eingegeben. Hier werden die Labordaten jeder Nachbehandlung auf die NB1 bezogen. X1 und X4 steht für die Variablen von NB1. X2 entspricht Ohne NB, X3 steht für die Werte von NB3. Anschließend klickt man auf „Run Model Analysis“.

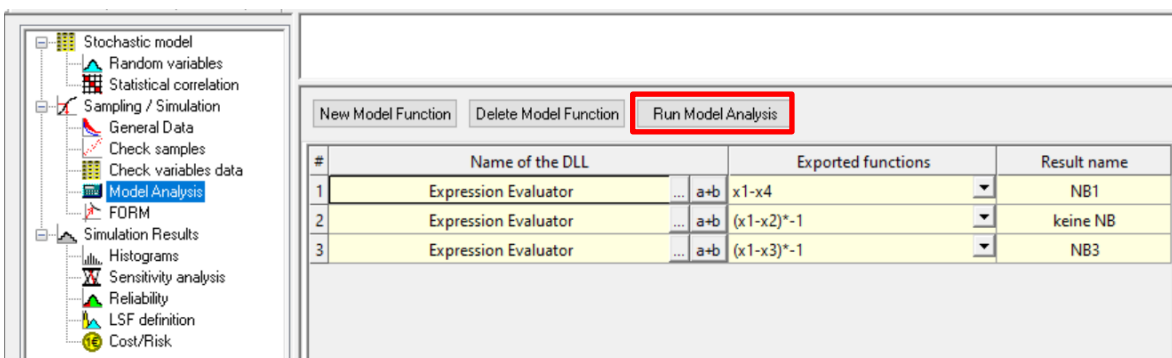


Abbildung 81: Festlegung der Grenzzustandsfunktionen unter „Model Analysis“

Im nächsten Schritt können die „Comparative Values“, also die neuen Messdaten, mit den Grenzzustandsfunktionen für NB1, Ohne NB und NB3 verglichen werden. In Abbildung 82 wird die Funktion von NB1 mit dem neuen Messergebnis abgeglichen. Je größer die

Überschneidung der beiden Funktionen ist, desto wahrscheinlicher liegt das neue Messergebnis in diesem Nachbehandlungsbereich.

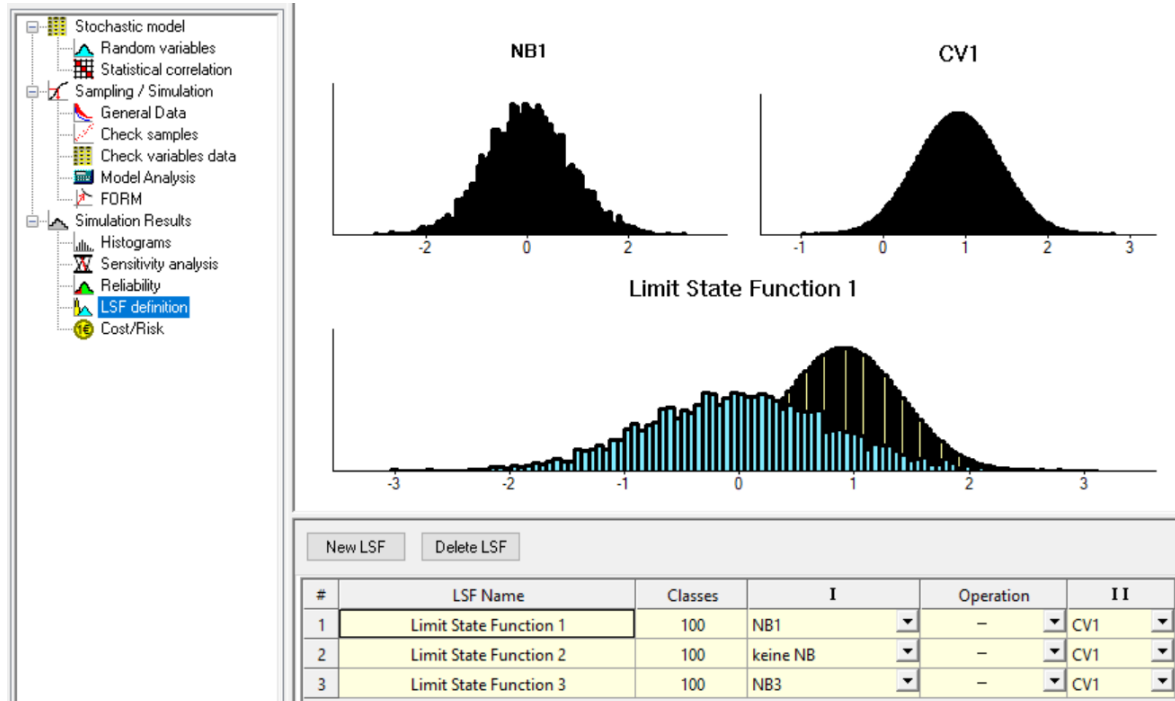


Abbildung 82: Vergleich der Grenzzustandsfunktionen mit den neuen Messdaten unter „LSF definition“

Die Wahrscheinlichkeit, mit welcher das Messergebnis einer der drei Nachbehandlungen zugehörig ist, kann unter „Reliability“ abgelesen werden. In Abbildung 83 werden die Ergebnisse für die Limit State Function 1 (steht für NB1), Limit State Function 2 (steht für Ohne NB) und Limit State Function 3 (steht für NB3) gezeigt. Relevant sind der Cornell- β und der Cornell-pf Wert. Für den β Wert gilt, dass je näher das Ergebnis bei 0 liegt, desto mehr entspricht das Messergebnis der Nachbehandlung. Beim pf-Wert ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Messergebnis der Nachbehandlung zugehörig ist größer, je näher der Wert bei 0,5 liegt. In diesem Fall, wie in Abbildung 83 gezeigt, weist die Limit State Function 3 mit $\beta = 0,08$ und $pf = 0,46$ die höchste Wahrscheinlichkeit auf. Somit ist anzunehmen, dass das Messergebnis der NB3 entspricht.

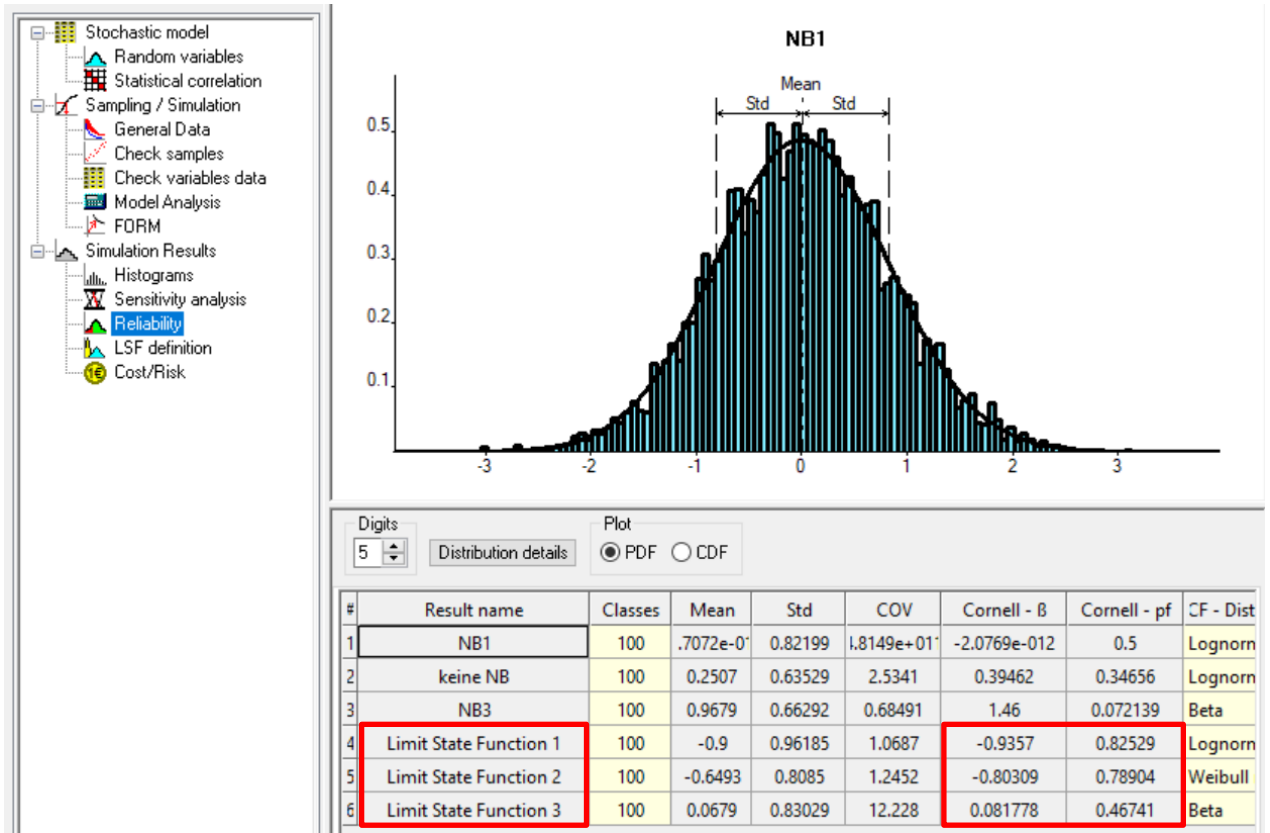


Abbildung 83: Ablesen des β und pf Wertes unter „Reliability“ zur Evaluierung des neuen Messwertes

ANHANG 2

Unten angeführte Beispieldateien für die Datenevaluierung mit Freet sind unter dem Link <https://drive.boku.ac.at/d/a744d6d1284c4f86b2e1/> zu finden.

Freet Dateien zur Gaspermeabilität:

- 01_Gaspermeabilität_Labor.fre
- 02_Gaspermeabilität_Baustelle.fre

Freet Datei zur elektrischen Widerstandsmessung:

- 03_Elektrische Widerstandsmessung_Baustelle.fre

Freet Datei zu Ultraschall:

- 04_Ultraschall_Baustelle.fre

Freet Datei zu den Hyperspektralanalysen:

- 05_Hyperspektralanalysen_Baustelle.fre

Freet Datei zum Digitalmikroskop:

- 06_Digitalmikroskop_Baustelle.fre

Kontakt für Rückfragen: lisa.ptacek@boku.ac.at