

Chloriddiffusionswiderstand bei österreichischem Transportbeton

**MASTERARBEIT
von**

Birgit Prielinger, B.Sc.

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie
mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

Betreuer/In:

Joachim Juhart, Dipl.-Ing. Dr.techn.

Mitbetreuende Assistentin:

Claudia Baldermann, M.Sc.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZ-online is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

ANMERKUNG:

In der vorliegenden Masterarbeit wird auf eine Aufzählung beider Geschlechter oder die Verbindung beider Geschlechter in einem Wort zugunsten einer leichteren Lesbarkeit des Textes verzichtet. Es soll an dieser Stelle jedoch ausdrücklich festgehalten werden, dass allgemeine Personenbezeichnungen für beide Geschlechter gleichermaßen zu verstehen sind.

.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich vielmals bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart, Frau Claudia Baldermann, M.Sc. und sämtlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Baustofftechnologie und Materialprüfung. Sie sind mir immer geduldig und hilfsbereit bei Fragen entgegengekommen und haben mir ermöglicht, durch diese Arbeit neue Seiten am Bauwesen kennenzulernen.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Familie und meinem Freund, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützten, ermutigten und mir Rückhalt gaben.

Graz, am (Datum)

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit wird der Chloridwiderstand von neun Betonzusammensetzungen bestimmt, die das Spektrum typischer österreichischer Transportbetone repräsentieren und vom Güteverband Transportbeton ausgewählt wurden. Sie unterscheiden sich in Bezug auf das Verhältnis von Zementgehalt zum Gehalt an einem aufbereiteten, hydraulisch wirksamen Zusatzstoff (AHWZ) und in Bezug auf ihren Wasser-/Bindemittelwert (W/B)-Wert. Die Expositionsklassen für Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Chloride (XD1, XD2 und XD3) gemäß ÖNORM B 4710-1:2018 werden mit diesen Zusammensetzungen abgebildet. Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss des Ersetzens von Zement durch 20%, 40% und 60% AHWZ und des variierten W/B-Wertes bei Chloridangriff zu ermitteln.

Das Eindringen von Chloriden aus der Umgebung in den Beton kann über Poren, Risse und Betonfehler durch verschiedene Transportmechanismen, aber dominiert von Diffusion, erfolgen. Besonders im Stahlbetonbau ist es wichtig die Bewehrung durch geeigneten Beton vor chloridinduzierter Korrosion zu schützen und somit die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit eines Bauwerkes zu sichern.

Um den Widerstand eines Betons bei Chloridbelastung darstellen zu können, wird der Diffusionskoeffizient, welcher die Geschwindigkeit beschreibt mit der das Chlorid in den Beton eindringt, gemäß ÖNORM EN 12390-11:2015 ermittelt. Dafür wurden Profile der Chloridkonzentrationen in definierten Tiefenstufen von Prüfkörpern, welche 90 Tage in einer Chloridlösung gelagert wurden und analysiert. Die Chloridanalyse wurde an Bohrmehlproben mittels eines Titrationsverfahrens durchgeführt. Die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten erfolgte mit Hilfe einer nicht-linearen Regressionsanalyse der Chloridprofile, welches auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz basiert.

In den Ergebnissen der Chloridanalysen zeichnet sich ab, dass sowohl ein niedriger Wasser-Bindemittel-Wert, als auch ein höherer Anteil an aufbereiteten, hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen (AHWZ mit einem Anteil von ca. 2/3 M-% Hüttsand, 1/6 M-% Flugasche und 1/6 M-% inertem Kalksteinmehl) den Widerstand des Betons bei Chloridbelastung positiv beeinflusst und eine geringere Eindringtiefe des Chlorids bewirkt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Einfluss des anrechenbaren hydraulisch wirksamen Zusatzstoffes wesentlich größer ist als der des Wasser-Bindemittel-Wertes.

Abstract

In this master thesis, the chloride resistance of nine mix concrete compositions is determined. The compositions cover the spectrum of typical Austrian ready-mixed concretes and have been selected by Austrian Association for ready-mixed concrete. They differ with regard to the ratio of cement content to the content of processed, hydraulically active additives (AHWZ) and with regard to their water/binder-ratio (W/B-Wert). The exposure classes for reinforcement corrosion caused by chlorides (XD1, XD2 and XD3) according to ÖNORM B 4710-1:2018 are represented by these compositions. The aim of the work is to determine the influence of the replacement of cement by 20%, 40% and 60% AHWZ and the varied water/binder ratio on chloride attack.

Chlorides from the environment penetrate into concrete via pores, cracks and concrete defects through different transport mechanisms, but dominated by diffusion. Especially in reinforced concrete construction it is important to protect the reinforcement by appropriate of the concrete against chloride-induced corrosion and thus to secure the bearing capacity and durability of a structure.

In order to be able to describe the resistance of a concrete to chloride exposure, the diffusion coefficient, which describes the speed at which the chloride penetrates the concrete, is determined according to ÖNORM EN 12390-11:2015. For this purpose, profiles of the chloride concentration in defined depths of test specimens, which were stored in a chloride solution for 90 days, were analyzed. The chloride analysis was performed on powdered samples of sections of drilled cores using a titration method. The determination of the diffusion coefficient was performed using a non-linear regression analysis of the chloride profiles based on Fick's second law of diffusion.

The results of the chloride analyses show that both, a low water/binder-ratio and a higher portion of hydraulically active additives (2/3 wt-% GBFS, 1/6 wt FA and 1/6 wt-% inert limestone powder), have a positive effect on the resistance of the concrete to chloride loading and tend to reduce the penetration depth of the chloride. It can also be seen that the influence of the processed, hydraulically active additives is significantly greater than the influence of the water/binder-ratio.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und der Wissenschaft	2
2.1	Festlegungen der ÖNORM.....	2
2.2	Chlorideindringung in Beton	3
2.2.1	Chlorid aus den Bestandteilen.....	3
2.2.2	Chlorid durch äußere Einwirkungen	5
2.2.3	Auswirkungen auf den Stahlbeton	5
2.3	Chloridwiderstand von Beton.....	7
2.3.1	Dichtigkeit des Betongefüges	8
2.3.2	Einfluss der Karbonatisierung auf den Chloridwiderstand.....	9
2.3.3	Einfluss der Ausgangskomponenten auf den Widerstand.....	9
2.4	Prüfverfahren und Konzepte für die Bestimmung des Chloridwiderstandes...	10
2.4.1	Prüfverfahren	10
2.4.2	Konzepte und Normen	14
2.4.3	Vergleich mit der Schweizer Norm für Betonbau	15
3	Herstellung und Prüfung von systematisch variierten Betonzusammensetzungen.....	16
3.1	Betonrezepturen & Ausgangsstoffe	16
3.1.1	<i>k</i> -Wert-Konzept	16
3.1.2	Zusammensetzung der Betonvarianten.....	17
3.1.3	Systematik für die Bezeichnung der Zusammensetzungen	18
3.1.4	Ausgangsstoffe	19
3.2	Chemische Analyse der Ausgangsstoffe	22
3.2.1	Röntgenfluoreszenz-Analytik RFA.....	22
3.2.2	Röntgendiffraktometrieanalyse RDA	23
3.2.3	Anmerkungen zu den chemisch-mineralogischen Analysen.....	24
3.3	Herstellung.....	24
3.4	Frischbetonprüfungen	24
3.4.1	Konsistenz	25
3.4.2	Luftgehalt des Frischbetons	25
3.4.3	Frischbetonrohddichte.....	26
3.5	Festbetonprüfungen	26
3.5.1	Offene Porosität	26

3.5.2	Prüfung der Wassereindringtiefe „WU“	26
3.5.3	Druckfestigkeit	27
3.5.4	Ermittlung des Chlorids im Beton	27
3.6	Chemische Analyse des vorhandenen Chlorids	31
3.6.1	Bestimmung des Chloridgehalts nach ÖNORM EN 14629 [27]	31
3.6.2	Modifizierte Bestimmung des Chloridgehalts	31
3.7	Mathematische Analyse und Auswertung der Ergebnisse	32
3.7.1	Nichtlineare Regressionsanalyse	33
3.7.2	Lineare Regressionsanalyse	36
3.7.3	Präzision	37
4	Ergebnisse	39
4.1	Frischbeton	39
4.1.1	Luftgehalt des Frischbetons	39
4.1.2	Frischbetonrohichte	40
4.2	Festbeton	40
4.2.1	Offene Porosität	40
4.2.2	Wassereindringtiefe „WU“	42
4.2.3	Druckfestigkeit	43
4.2.4	Anfänglicher Chloridgehalt	45
4.2.5	Ergebnisse der Chloridanalysen	46
5	Diskussion	51
5.1	Berücksichtigung des k -Wertes	51
5.2	Einfluss des verwendeten Berechnungsmodells	52
5.2.1	Verwendbare Schichten des Chlorid-Profiles	52
5.2.2	Einfluss der Rand- und Umweltbedingungen	54
5.2.3	Anmerkungen zu Schwierigkeiten bei der Analyse	55
5.3	Bewertung der Analysen	55
5.3.1	Korrelationen	56
5.3.2	Diskussion der Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen	60
5.3.3	Vergleich der unterschiedlichen Lagerungen	61
5.3.4	Vergleich unterschiedlicher Auswertungen	64
6	Schlussfolgerung & Ausblick	66
6.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse der durchgeführten Prüfungen	66
6.2	Empfehlungen für weiterführende Versuche	67

6.3 Ausblick.....	67
Literaturverzeichnis	68
Glossar.....	71
Anhang.....	1
Anhang A	2
Anhang B	7
Anhang C	27
Anhang D	29
Anhang E	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Darstellung von chloridbelasteten Infrastrukturbauwerken[1].....	6
Abbildung 2	Schematische Darstellung der chloridinduzierten Korrosion von Betonstahl [12]	6
Abbildung 3	zeitlicher Ablauf der chloridinduzierten Schädigung [13].....	7
Abbildung 4	Schema einer Prüfvorrichtung für den Rapid Chlorid Migration Test [1].....	12
Abbildung 5	Schematische Darstellung der Chlorideindringung beim STIT [21].....	13
Abbildung 6	Vergleich gesamt Bindemittelgehalt B_G mit anrechenbarem Bindemittel B_a	19
Abbildung 7	Grenzsieblinie nach ÖNORM B 4710-1:2018 für GK16	20
Abbildung 8	Sieblinie GK16, nahe B mit Gesteinskörnung „Gradenberg“.....	20
Abbildung 9	Sieblinie 0/2e KK.....	21
Abbildung 10	Sieblinie 4/16 KK.....	21
Abbildung 11	Menge an Betonzusatzmitteln	25
Abbildung 12	Lage der Teilprobekörper im ursprünglichen Probekörper	28
Abbildung 13	Sägefläche des Probekörpers nach ÖNORM EN 12390- 11:2015 [26]	28
Abbildung 14	Schematische Darstellung der drei Möglichkeiten zur Probenlagerung [26].....	29
Abbildung 15	Darstellung eines Chloridprofils über die Tiefe	36
Abbildung 16	Luftgehalt des Frischbetons	39
Abbildung 17	Vergleich der Frischbetonrohddichte mit der Rohddichte des Betons	40
Abbildung 18	Ergebnisse der WU-Prüfung.....	42
Abbildung 19	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung.....	43
Abbildung 20	prozentuelle Steigerung der Druckfestigkeit (28d auf 119d).....	44
Abbildung 21	erreichte Druckfestigkeitsklassen	44
Abbildung 22	Ergebnisse der Analyse des anfänglichen Chloridgehalts C_i	45
Abbildung 23	Korrelation anfänglicher Chloridgehalt C_i mit dem Zementgehalt	45
Abbildung 24	Ergebnis der Regressionsanalyse für die Variante V1.1.	47
Abbildung 25	Ergebnis der Regressionsanalyse für die Variante V2.1	48
Abbildung 26	Ergebnis der Regressionsanalyse für die Variante V3.1	48
Abbildung 27	Darstellung der ermittelten Diffusionskoeffizienten.....	49

Abbildung 28	Darstellung des ermittelten Chloridgehalts an der Betonoberfläche	50
Abbildung 29	Feuchte- und Chloridprofil bei Spritzwasserbeanspruchung [4]	53
Abbildung 30	Korrelation D_{nss} - AHWZ-Gehalt [kg/m^3]	56
Abbildung 31	Korrelation D_{nss} - AHWZ-Gehalt [M-%]	56
Abbildung 32	Korrelation D_{nss} - W/B-Wert	57
Abbildung 33	Korrelation D_{nss} -WU	59
Abbildung 34	Korrelation D_{nss} -Druckfestigkeit	59
Abbildung 35	Korrelation D_{nss} -Porosität nach 28d	60
Abbildung 36	Vergleich der Lagerungen 1.1	62
Abbildung 37	Vergleich der Lagerungen 2.1	62
Abbildung 38	Vergleich der Lagerungen 3.1	63
Abbildung 39	Korrelation der unterschiedlichen Lagerungen	63
Abbildung 40	Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertungen	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Expositionsklasse XD [2]	2
Tabelle 2	Höchstzulässiger Chloridgehalt von Beton lt. ÖNORM B 4710-1:2018	4
Tabelle 3	Mindestbetondeckung $C_{min,dur}$ nach Eurocode 2	14
Tabelle 4	max. Zugabemenge für k -Wert-Ansatz für Zusatzstoffe nach ÖNORM B 3309	16
Tabelle 5	Betonzusammensetzungen	17
Tabelle 6	Unterschiede und Vergleich der Betonvarianten	18
Tabelle 7	Ausgangsstoffe für die herzustellenden Betone	19
Tabelle 8	RFA: chemische Analyse der Ausgangsstoffe.....	22
Tabelle 9	RDA mineralogische Analyse	23
Tabelle 10	Ausbreitmaßklassen nach ÖNORM B 4710-1:2018.....	25
Tabelle 11	Symbole und Abkürzungen nach ÖNORM EN 12390-11 [26]	34
Tabelle 12	Präzisionsdaten nach ÖNORM EN 12390-11	38
Tabelle 13	Zusammenfassung der Ergebnisse der Frischbetonprüfungen	39
Tabelle 14	Messung der Porosität und Rohdichte nach 28d (n=4)	41
Tabelle 15	Messung der Porosität und Rohdichte nach 270d (n=4)	41
Tabelle 16	Ergebnisse der WU-Prüfung.....	42
Tabelle 17	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach 28d und 119d	43
Tabelle 18	Zusammenfassung der Ergebnisse für C_s und D_{nss} mittels der nichtlinearen Regressionsanalyse.....	46
Tabelle 19	W/B-Werte Gegenüberstellung.....	51
Tabelle 20	multiple - lineare Regressionsstatistik D_{nss} -W/B _G - AHWZ [kg/m ³].....	58
Tabelle 21	Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Lagerungen	61
Tabelle 22	Zusammenfassung der Ergebnisse für C_s und D_{nss} mit Berücksichtigung der Werte der ersten Schicht j_1	64
Tabelle 23	Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Regressionsanalysen	65

1 Einleitung

Bei der Planung und Errichtung eines Bauwerkes ist es wichtig, dieses auf die geplante Nutzungszeit auszulegen, um während der gesamten Nutzungsdauer die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gewährleisten zu können. Die Dauerhaftigkeit der verwendeten Materialien spielt dabei eine zentrale Rolle, deshalb wird versucht, durch eine Optimierung der Betonzusammensetzung den Einwirkungen von außen bestmöglich entgegenzuwirken und Stand zu halten.

In Österreich sind die Herstellung und Zusammensetzung von Betonen hauptsächlich durch die ÖNORM B 4710-1:2018, sowie weitere ÖNormen und nationale Anwendungsrichtlinien, geregelt. Diese basieren auf dem deskriptiven Konzept und enthalten vorgegebene Kennwerte (W/B-Wert, Mindestbindemittelgehalt,...) mit denen gewisse Expositionsklassen eingehalten werden können, damit die geforderte Dauerhaftigkeit sichergestellt wird. Bei Chloridangriff (ausgenommen Meerwasser) entspricht das den Expositionsklassen XD1-XD3.

Insgesamt wurden 9 Betonrezepturen, welche den österreichischen Transportbetonen in Bezug auf die Expositionsklassen XD1- XD3 entsprechen, untersucht. Um eine repräsentative Untersuchung der Betonzusammensetzungen erreichen zu können und eine schematische Auswertung möglich zu machen, wurden dabei die Grenzen der Norm ausgelotet. Konkret wurde der Wasser-Bindemittelgehalt dreimal variiert und zusätzlich wurden bei diesen Varianten jeweils drei verschiedene Prozentanteile des Zements mit AHWZ ersetzt. Neben der Bestimmung des Chloriddiffusionswiderstandes nach ÖNORM EN 12390-11:2015 wurden auch die Dichtigkeit des Gefüges und begleitende Frisch- und Festbetonkennwerte ermittelt.

Ziel der Masterarbeit ist es, durch Variation der Bestandteile des Betons, besonders hinsichtlich des Zement- und Zusatzstoffanteils, jene Einflüsse festzustellen, die für den Chloriddiffusionswiderstand maßgeblich sind. Dies ist wichtig, da das Chlorid maßgeblich zur Schädigung der Stahlbewehrung des Betons, abhängig von den variieren Parametern, beiträgt und somit eine Reduzierung oder gar einen vollständigen Verlust der Tragfähigkeit eines Bauwerks bewirken kann.

Schlussendlich werden die Ergebnisse der Untersuchungen ausgewertet, verglichen, gegenübergestellt und diskutiert, um die Auswirkungen der variierten Bestandteile beurteilen zu können.

2 Stand der Technik und der Wissenschaft

Chloride werden in Österreich hauptsächlich durch ihre Verwendung in Form von NaCl als Tausalz in die Umwelt eingebracht und haben somit nicht nur einen ökologischen Einfluss auf Böden und Gewässer, sondern verursachen auch Schäden an Infrastrukturbauwerken. Die Chloride wirken sich nachteilig auf die Dauerhaftigkeit von Verkehrsbauwerken aus, da sie den Stahlbeton angreifen.[1]

In dieser Arbeit wird besonders auf den Angriff durch Natriumchlorid (NaCl), ein übliches Tausalz, auf den Stahlbeton eingegangen. Der Beton soll die Bewehrung vor chloridinduzierter Korrosion schützen und somit ist entscheidend, wie weit das Chlorid in den Beton eindringen kann und wie stark bzw. dick die Betondeckung ausgebildet ist.

2.1 Festlegungen der ÖNORM

Zur Beschreibung der Umwelteinwirkungen auf den Beton dienen die Expositionsklassen (Tabelle 1), welche in der ÖNORM EN 206 und der ÖNORM B 4710-1:2018 definiert und angeführt sind. Die Beanspruchung des Betons durch Chloride (ausgenommen Meerwasser) wird mit den Expositionsklassen XD1-XD3 beschrieben. Auf den Chloridangriff durch Meerwasser (Expositionsklasse XS) wird nicht weiter eingegangen, da dieser in Österreich nicht relevant ist.

Tabelle 1 Expositionsklasse XD [2]

3 Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser		
Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, chloridhaltigem Wasser, einschließlich Tausalz, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
ANMERKUNG Hinsichtlich der Feuchtigkeitsbedingungen ist auch Abschnitt 2 dieser Tabelle zu beachten		
Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Zuordnung von Expositionsklassen
XD1	mäßige Feuchte	Betonoberflächen, die chloridhaltigem Sprühnebel ausgesetzt sind
XD2	nass, selten trocken	Schwimmbäder; Beton, der chloridhaltigen Industrierwässern ausgesetzt ist
XD3	wechselnd nass und trocken	Bauteile, die erhöhter Chloridbelastung (Spritzwasser) ausgesetzt sind z.B.: Parkdecks, Fahrbahndecken, Salzlager

2.2 Chlorideindringung in Beton

Chloride können auf zwei unterschiedliche Arten in den Beton gelangen[1]:

- Durch die Bestandteile des Betons:
Zement, Gesteinskörnung, Anmachwasser, Zusätze
- Durch äußere Einwirkungen:
z.B.: Tausalz, Meerwasser, Brandfall

2.2.1 Chlorid aus den Bestandteilen

Jeder Bestandteil einer Betonmischung kann Chloride, wenn auch nur Spuren davon, enthalten. Sie können sowohl im Zement, in den Zusatzstoffen, in der Gesteinskörnung, als auch im Anmachwasser vorhanden sein. Ein Teil dieser Chloride kann chemisch in den Hydratphasen des Zementsteins oder absorptiv an die innere Oberfläche der Zementsteinmatrix physikalisch gebunden werden, der andere Teil des vorhandenen Chlorids ist frei gelöst im Porenraum vorhanden [3]. Generell sind alle Klinkerphasen am Einbau des Chlorids in CSH-Phasen beteiligt, jedoch wird es größtenteils durch Aluminat gebunden. Das Aluminat (C_3A) und Aluminatferrit (C_3AF) bilden mit Chlorid das Friedel'sche Salz. Die Menge an Chlorid, das während der Hydratation eingebunden werden kann ist jedoch begrenzt und von materialspezifischen Eigenschaften des Betons und der Temperatur, sowie der Zusammensetzung der Chloridlösung abhängig.[4]

2.2.1.1 Das Friedel'sche Salz

Das Friedel'sche Salz ($3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaCl_2 \cdot 32 H_2O$) wird gebildet, wenn Chlorid in einer Konzentration von mindestens 2 gCl/L vorhanden ist. Die Bildung des Friedel'schen Salzes ist konzentrationsabhängig, das bedeutet, der Gehalt an Friedel'schem Salz nimmt mit zunehmender Salz-Konzentration zu, jedoch gibt es eine Obergrenze von 10 g/l, bei welcher kein Chlorid mehr gebunden werden kann. Das Chloridbindevermögen der Hydratationsphasen liegt bei 80°C bei etwa 0,3 bis 0,35% Cl und bei Temperaturen von 20°C bei etwa 0,25% bis 0,30% Cl [5]. Die im Beton gebildeten Hydratphasen wie Calcium-Aluminiathydrat-Monophasen, auch AFM-Phasen genannt, oder Monosulfat binden das Chlorid, welches meistens in Form von NaCl oder $CaCl_2$ vorhanden ist. Da die Bildung des Friedel'schen Salzes in Verbindung mit den Hydratphasen eintritt, ist dieser Vorgang zu hauptsächlich zu betrachten, wenn Chlorid in den Bestandteilen vorhanden ist, jedoch ist der chemische Einbau des Chlorids auch bei nachträglichem Chlorideintrag möglich [6].

Das Friedel'sche Salz weist eine hohe Stabilität auf, auch bei Lösungstemperaturen von bis zu 90°C und einem pH-Wert im Bereich zwischen 7 – 12,6 [1]. Die Zufuhr von Kohlenstoffdioxid (CO_2), bekannt als Ursache für die Karbonatisie-

zung von Beton, kann das Friedel'sche Salz wieder zersetzen und das freiwerdende Chlorid gelangt in die Porenlösung.

2.2.1.2 Höchstzulässiger Eigenchloridgehalt

Der höchstzulässige Eigenchloridwert wird als Masseanteil, bezogen auf den Zement im Beton, angegeben. In der Literatur wird kein eindeutiger Wert für einen kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt angegeben, die Angaben liegen bei 0,2 bis 0,4 Masse-% bezogen auf den Zementgehalt bei Stahlbeton und 0,1 bis 0,2 Masse-% für Spannbeton, jedoch sind diese nicht als unschädliche Absolutwerte anzusehen [7]. Zusätzlich ist die Terminologie zu beachten, da die Definitionen der angegebenen Grenzwerte variieren können. Zum Beispiel definieren Schießl und Raupach [8] den kritischen Chloridgehalt auf zwei Arten, der kritische Chloridgehalt bei dem die Depassivierung der Stahloberfläche eintritt und der kritische Chloridgehalt bei dem die Korrosionserscheinung bereits als Schaden auftritt. Ähnlich wird auch in weiterer Literatur zwischen korrosionsauslösender und schadensauslösender Korrosion unterschieden. Korrosionsauslösend wird dabei der Zeitpunkt betrachtet, ab dem eine Depassivierung des Betonstahls messbar ist und schadensauslösend wird definiert durch eine Korrosionserscheinung, welche als Schaden einzustufen ist [9].

In den deutschen Regelwerken werden die Höchstwerte für Chloridgehalte der Ausgangsstoffe angegeben, in der ÖNORM B 4710-1:2018 werden Werte für den höchstzulässigen Chloridgehalt von Beton sowohl für die Ausgangsstoffe, als auch für vorgesehene Verwendung angegeben.

Der höchstzulässige Chloridgehalt für Zement, Zusatzmittel und Zusatzstoffe beträgt 0,1 Masse-% des Zementgehalts, für die Gesteinskörnung gilt ein Wert von 0,01 Masse-% [2], wie in Tabelle 2 angeführt ist.

Tabelle 2 Höchstzulässiger Chloridgehalt von Beton lt. ÖNORM B 4710-1:2018

Betonverwendung	Klasse des Chloridgehalts ^a	Höchstzulässiger Chloridgehalt bezogen auf den Zement ^b im Masseanteil
Ohne Betonstahlbewehrung oder anderes eingebettetes Metall (mit Ausnahme von korrosionsbeständiger Anschlagvorrichtungen)	Cl 1,0	1,0%
Mit Betonstahlbewehrung oder anderem eingebetteten Metall	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40 ^c	0,40%
Mit Spannstahlbewehrung	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%

^a Die Auswahl der Klasse für den spezifischen Verwendungszweck des Betons hängt von den am Ort der Verwendung des Betons geltenden Regeln ab.

^b Werden Zusatzstoffe verwendet und für den Zementgehalt angerechnet, wird der Chloridgehalt als Chloridionengehalt (Massenanteil bezogen auf den Zement), zuzüglich der Gesamtmasse der zu berücksichtigenden Zusatzstoffe, ausgedrückt.

^c Für Beton, der CEM-III-Zemente enthält, können nach den am Ort der Verwendung geltenden Regeln, andere Klassen des Chloridgehalts zulässig sein.

2.2.2 Chlorid durch äußere Einwirkungen

Vor allem bei Verkehrsbauwerken wie Brücken, Pfeilern oder Tunnelportalen ist mit einer hohen Belastung durch Chloride zu rechnen. Besonders in den Wintermonaten kommt es zu einer erheblichen Belastung durch Tausalz, welche nicht konstant ist. (Abbildung 1)

Der Chloridangriff findet durch die frei gelösten Chloridionen in der Porenlösung statt, welche durch die Chloridbelastung von außen eindringen können. Der Chloridtransport wird neben den äußeren Bedingungen auch stark durch die betontechnologischen Parameter bestimmt. Die freien Chloridionen können über unterschiedliche Transportmechanismen Richtung Bewehrung gelangen und dort den kritischen korrosionsauslösenden Grenzwert überschreiten. Welcher Transportmechanismus vorliegt, ist von der Wassersättigung des Betons abhängig [4]:

- Diffusion: bei wassergesättigtem Beton
- Konvektion (Kapillartransport): bereichsweise nicht wassergesättigtem Beton
- Konvektion (Mikroislinsenpumpe)

Die Diffusion ist ein Vorgang, bei dem Atome, Ionen oder Moleküle versuchen eine gleichmäßige Verteilung in einem Medium zu erreichen, wenn ein Konzentrationsunterschied vorliegt. Die Bewegung wird verursacht durch die thermische Eigenbeweglichkeit von Teilchen (Brown'sche Molekularbewegung) und kann sowohl in Flüssigkeiten als auch in Gasen stattfinden. Das 1. Fick'sche Gesetz beschreibt die Diffusion im stationären Zustand, wobei hier das Konzentrationsgefälle die treibende Kraft ist [10]. Die Diffusion im instationären Zustand wird durch das 2. Fick'sche Gesetz (Kapitel 3.7.1.1) beschrieben und berücksichtigt zusätzlich eine zeitlich Änderung der Konzentration im Medium [11].

2.2.3 Auswirkungen auf den Stahlbeton

Die Bewehrung des Stahlbetons ist durch das alkalische Milieu, welches durch den Beton hervorgerufen wird (pH-Wert liegt meist bei ca. 12,5 -13,5), mit einer, nur wenige Atomlagen dicken, Oxidschicht geschützt. Diese Schicht bildet sich an der Oberfläche des Stahls aus und wird auch als Passivschicht bezeichnet, da sie die Eisenauflösung so weit verhindert, dass praktisch keine Korrosion stattfindet.[1]

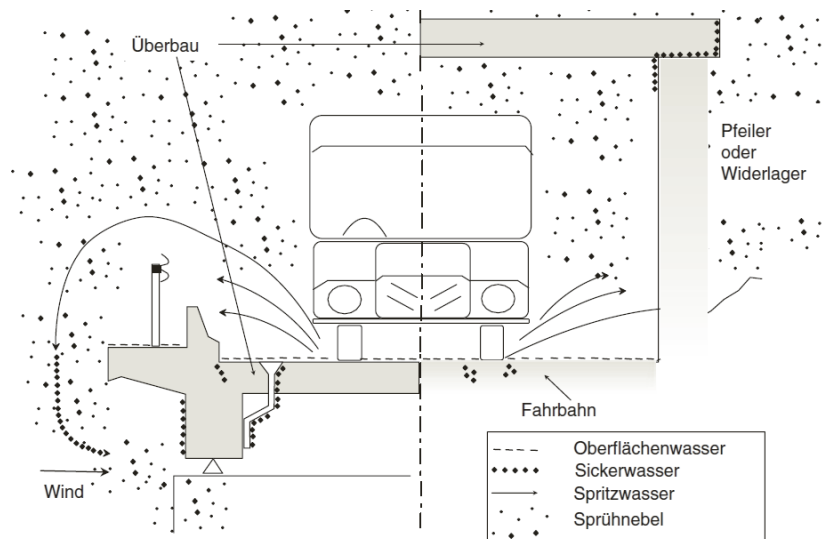


Abbildung 1 Darstellung von chloridbelasteten Infrastrukturbauwerken[1]

Chloridinduzierte Korrosion ist ein elektrochemischer Vorgang und kann erst stattfinden, wenn gewisse Randbedingungen gegeben sind [1]. Verbindet man zwei unterschiedliche Metalle elektrisch miteinander, so fließen Elektronen vom unedlen (Anode) zum edlen (Katode) Metall. Der chloridinduzierte Korrosionsprozess ist in Abbildung 2 dargestellt.

Randbedingungen für die chloridinduzierte Korrosion:

- Depassivierung durch Karbonatisierung oder Überschreitung eines kritischen Chlorid-Grenzwertes in Tiefe der Stahlbewehrung.
- Genügend Sauerstoff muss vorhanden sein
- Feuchtigkeitsangebot muss ausreichen
- Elektrisch leitfähiges Metall
- Potentialdifferenzen an der Stahloberfläche durch z.B.: Überlagerung örtlicher Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Betons, Unterschiedliche Belüftungsverhältnisse, ungleichmäßige Belegung der Stahloberfläche mit Korrosionsprodukten

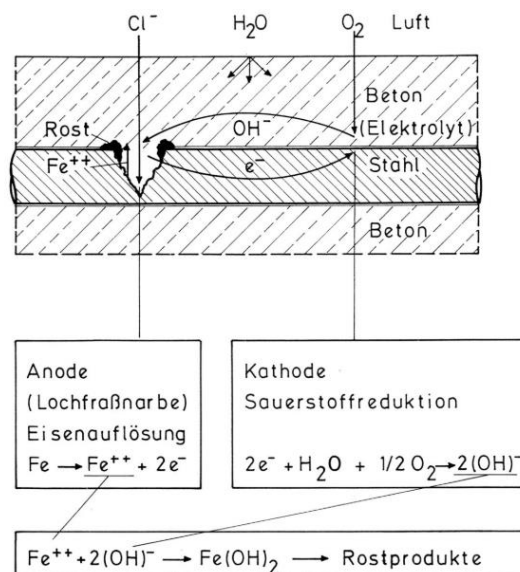
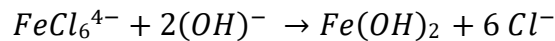
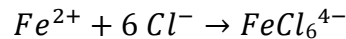


Abbildung 2 Schematische Darstellung der chloridinduzierten Korrosion von Betonstahl [12]

2.2.3.1 Chemische Reaktionen bei der chloridinduzierten Korrosion

Die freibeweglichen Chloridionen können durch die Depassivierung des Stahls mit dem Eisen reagieren. Die Chloride werden dabei nicht verbraucht, sondern nur kurz gebunden und stehen anschließend für weitere Reaktionen zur Verfügung, deshalb können schon geringe Mengen Chlorid starke Korrosionsschäden verursachen.[1]



Im Gegensatz zur Karbonatisierung findet die chloridinduzierte Korrosion sehr lokal statt und bewirkt eine beträchtliche Reduktion des Stahlquerschnittes und damit einhergehend auch der Tragfähigkeit. Diese lokale Korrosion wird aufgrund ihrer Ausformung oft als „Lochfraß“ bezeichnet. Die Korrosionsgeschwindigkeit ist temperaturbedingt und schwankt somit über das Jahr gesehen.

2.2.3.2 Zeitlicher Ablauf der Schädigung

Erst nachdem das Chlorid bis in die Tiefe der Bewehrung eingedrungen ist und den kritischen korrosionsauslösenden Grenzwert überschritten hat, beginnt die Korrosion der Bewehrung (Abbildung 3). Der korrosionsauslösende Grenzwert ist hierbei als jener Grenzwert definiert, bei dem die Depassivierung des Betonstahls beginnt.

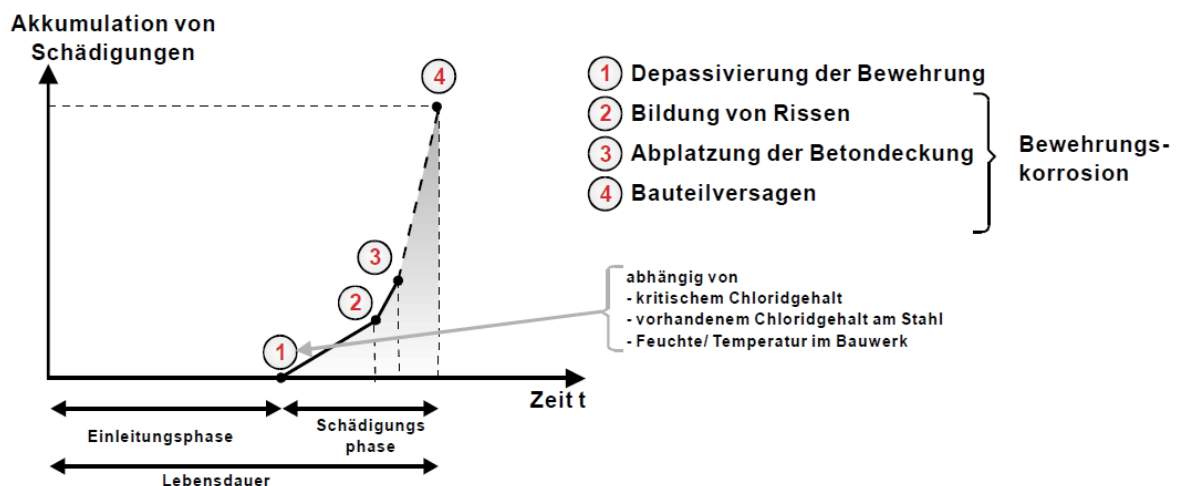


Abbildung 3 zeitlicher Ablauf der chloridinduzierten Schädigung [13]

2.3 Chloridwiderstand von Beton

Um das Eindringen des Chlorids zu vermeiden, bzw. zu reduzieren soll der Beton in seiner Zusammensetzung optimiert werden. Dabei spielt einerseits die zu erreichende Dichtigkeit des Gefüges eine große Rolle, andererseits auch die chemischen Eigenschaften der verwendeten Bestandteile. Es gibt neben dem

stofflichen Widerstand des Betons noch weitere Möglichkeiten den Stahlbeton zu schützen, diese werden von Stark & Wicht [1] in aktiven und passiven Korrosionsschutz eingeteilt.

2.3.1 Dichtigkeit des Betongefüges

Die Dichtigkeit eines Betons lässt sich am besten durch seine Porosität beschreiben, welche wiederum auf den Porengehalt zurückzuführen ist. Bei der Diffusion wird eine gleichmäßige Verteilung der Moleküle im Medium angestrebt und der Chloridtransport findet hauptsächlich über die Poren in der Zementsteinmatrix statt. Dabei spielen besonders die Gesamtporosität, die Porenradialverteilung und die Vernetzung des Porensystems eine wichtige Rolle. Das Porensystem besteht aus verschiedenen Porenarten mit unterschiedlichen Porenradien. Gelporen entstehen bei der Hydratation und lassen sich nicht vermeiden, wobei das Volumen der Gelporen vom Zementgehalt und dem Hydratationsgrad abhängt. Kapillarporen bilden sich einerseits durch überschüssiges Wasser und andererseits durch chemisches Schwinden. Umso größer der W/B-Wert ist, desto mehr Kapillarporen sind im Gefüge vorhanden. Luftporen können geschlossene Poren oder als künstliche Mikroluftporen vorliegen, um Expansionsräume für die Eisbildung zu schaffen.

Beton generell ist als ein inhomogenes Gefüge anzusehen, in welches das Chlorid ungleichmäßig eindringt. Die Diffusion des Chlorids findet über die Zementsteinmatrix statt, welche sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt:

- Zement
- Hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ)
- Mehlkorn der Gesteinskörnung und inerte Füller
- Gesamtwasser
- Luftgehalt

Um eine konstante Größe in den Versuchen zu erreichen, ist es somit sinnvoll, den Leimgehalt konstant zu halten, da dadurch auch der Bereich, in dem eine Diffusion stattfinden kann, konstant gehalten wird. Die Einflüsse der Bestandteile, welche die Zementsteinmatrix bilden, sollen damit deutlicher zum Vorschein kommen. Eine Methode zum Bestimmen der Dichtigkeit ist es, die Porosität zu messen.

- Offene Porosität:
Die offene Porosität beschreibt das Volumen der offenen, zugänglichen Poren im Vergleich mit dem Gesamtvolumen des Betons in Prozent.
- Rohdichte:
Die Rohdichte errechnet sich aus der Masse durch das Rohvolumen, welches das Volumen der Poren beinhaltet.

2.3.2 Einfluss der Karbonatisierung auf den Chloridwiderstand

Durch die Karbonatisierung von Beton wird dessen pH-Wert gesenkt und somit die basische Schutzfunktion des Betons für den Stahl vermindert.

Untersuchungen zeigen, dass der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt eine pH-Wert-Abhängigkeit aufweist und die Karbonatisierung die Chloridbindekapazität verändert. Dieser Zusammenhang wurde durch elektrochemische Korrosionsuntersuchungen an Stahl in chloridhaltigen Lösungen untersucht [9]. Mit abnehmendem pH-Wert nahm auch der kritische korrosionsauslösende Cl^-/OH^- -Verhältnis ab. Demzufolge bestimmen der pH-Wert und die Hydroxidionenkonzentration in der Porenlösung die Höhe des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts, wobei ein geringerer pH-Wert eine geringere notwendige Chloridkonzentration in der Porenlösung indiziert [9]. Der karbonatisierte Beton mindert somit auch die Widerstandsfähigkeit des Betons bei einer Beanspruchung durch Chloride.

2.3.3 Einfluss der Ausgangskomponenten auf den Widerstand

Die einzelnen Ausgangsstoffe des Betons und deren Zusammenwirken haben einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons. Inwieweit das AHWZ Einfluss auf den Widerstand nimmt, wird in dieser Diplomarbeit versucht zu ermitteln. Es muss vermieden werden, beim Mischen des Betons Chlorid einzubringen, deshalb ist zum Beispiel die Chloridzugabe als Erhärtungsbeschleuniger seit mehreren Jahrzehnten verboten.[9]

2.3.3.1 Aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff (AHWZ)

Das AHWZ ist eine Mischung aus puzzolanischen und latent hydraulischen Zusatzstoffen und deren Anwendbarkeit wird in der ÖNORM B 4710-1 geregelt. Die Zusammensetzung von AHWZ ist in der ÖNORM B 3309-1 bis B 3309-3 geregelt. Es gibt 3 Arten von AHWZ: Kombinationsprodukte, welche aus Hüttensand, Flugasche und Kalksteinmehl bestehen, sowie AHWZ aus Hüttensand und AHWZ aus Flugasche. Der Anteil der jeweiligen Zusatzstoffe ist vom Hersteller und dem Verwendungszweck abhängig. In den folgenden Versuchsreihen wurde eine Mischung aus Flugasche (puzzolanischer Zusatzstoff), Hüttensand (latent-hydraulischer Zusatzstoff) und Kalkstein verwendet. Besonders im Hinblick auf die puzzolanischen Zusatzstoffe wurden schon zahlreiche Versuche durchgeführt, welche den Einfluss auf den Chloridwiderstand untersuchen. Eine Forschung von Hariharat et al. zeigt, dass durch die Zugabe von Flugasche und Silikastaub eine höhere Druckfestigkeit und eine geringere Chlorideindringung bewirkt wird [14]. Auch weitere Forschungen haben einen positiven Effekt auf den Widerstand bei Chlorid durch Zugabe von Flugasche und Hüttensand ergeben [15]. Thomas & Bamforth vergleichen in Langzeitversuchen von 8 Jahren reinen Portlandzement und Zement mit Flugasche (25% und

56%) und erhalten eine deutliche Steigerung des Widerstands bei den Versuchskörpern, welche Flugasche enthalten [16].

2.3.3.2 Wasser-Bindemittelwert

Der Wasser-Bindemittelwert (W/B-Wert) des Betons beschreibt das Verhältnis des Wassergehalts zu dem Zement- und Zusatzstoffgehalt unter Berücksichtigung des k-Wert Konzeptes, welches in Kapitel 3.1.1 erklärt wird. Grundsätzlich führt ein geringerer W/B-Wert zu einem dichteren Gefüge, da der Anteil des Porenvolumens mit sinkendem W/B-Wert abnimmt und somit weniger Porenraum vorhanden ist, wodurch das Eindringen von Chloriden erschwert wird. Dabei ist jedoch zu beachten, dass beim Transportbeton eine gute Verarbeitbarkeit über einen längeren Zeitraum (90 min) gegeben sein muss, welche mit niedrigerem W/B-Wert abnimmt und somit betontechnologisch zu berücksichtigen ist.

2.3.3.3 Gesteinskörnung

Die Mindestanforderungen an die Gesteinskörnung sind in der ÖNORM B 4710-1 bzw. der ÖNORM B 3131 und ÖNORM EN 12620 angeführt. Für alle Expositionsklassen gilt hierbei chloridfreie Gesteinskörnung, der Chloridgehalt muss weniger als 0,01 Masse-% betragen, zu verwenden.

2.4 Prüfverfahren und Konzepte für die Bestimmung des Chloridwiderstandes

2.4.1 Prüfverfahren

Um den Widerstand eines Betons bei Chloridangriff zu beschreiben und zu messen, gibt es verschiedene Methoden, welche teilweise bereits normiert sind. Unter anderem wird durch veränderte Prüfverfahren versucht, die Versuchsdauer einer Chlorideindringungsprüfung zu verringern. Die einzelnen ermittelten Parameter aus den unterschiedlichen Verfahren können nicht direkt miteinander verglichen werden, da unterschiedliche Berechnungsverfahren verwendet werden. Lality beschreibt in seiner Masterarbeit die Kombination der Prüfmethode zur Chlorideindringung mit jenen der Frost-Tausalzbeanspruchung, dabei werden auch die Versuchsaufbauten genauer erläutert [17]. Diese Prüfverfahren zur Ermittlung der Chlorideindringung unterscheiden sich hauptsächlich in den folgenden Punkten:

- Diffusions- oder Migrationsversuch
- Stationär oder instationär
- Konventionell oder beschleunigt
- Im Labor hergestellte Prüfkörper oder am Bauwerk entnommene Prüfkörper

Langzeiteinlagerungsversuche sind eine weit verbreitete Methode um den Diffusionskoeffizienten eines Betons zu bestimmen, wohingegen kurzzeitige Methoden mit elektrischen Spannungen arbeiten und einen Migrationskoeffizienten ermitteln.

2.4.1.1 Der Nordtest 443

Der Nordtest 443 ist eine Methode, die Chlorideindringung instationär zu ermitteln und mittels Diffusionskoeffizienten zu beschreiben. Der Versuchskörper muss dabei älter als 28 Tage sein, kann aus einem bestehenden Bauwerk entnommen sein, wobei er frei von Rissen sein muss, oder im Labor hergestellt werden. Der Versuch findet an gesättigten Proben statt. Der Prüfkörper sollte eine zylindrische Form aufweisen und an allen Seiten bis auf eine versiegelt sein. Nach der Versiegelung ist der Probekörper in einen Behälter zu stellen, welcher anschließend mit einer 16,5%igen NaCl-Lösung zu befüllen ist. Alle fünf Wochen ist ein Lösungswechsel durchzuführen und die Lagerungsdauer beträgt mindestens 35 Tage. Nach der Lagerung sind acht Schichten abzuschleifen. In die Erstellung des Profils werden die Chloridgehalte bis zum Chloridanfangsgehalt plus 0,03 Masse-% verwendet. Die mathematische Auswertung findet nach Gleichung 1 statt. Mit dem ermittelten effektiven Chloridtransportkoeffizienten wird der Eindringungsparameter K_{Cr} nach Gleichung 2 berechnet.[18]

$$C(x, t) = C_s + (C_s - C_i) * \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 * D_e * t}}\right) \quad \text{Gleichung 1}$$

$$K_{Cr} = 2 * \sqrt{D_e} * \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{C_s - C_r}{C_s - C_i}\right) \quad \text{Gleichung 2}$$

$C(x, t)$	Chloridkonzentration zum Messzeitpunkt in der gemessenen Tiefe [Masse-%]
C_s	Berechneter Chloridgehalt an der beanspruchten Betonoberfläche [Masse-%]
C_i	Anfänglicher Chloridgehalt [Masse-%]
C_r	ausgewählte Referenz Chloridkonzentration [Masse-%]
x	Messtiefe [m]
D_e	Effektiver Chloridtransportkoeffizient [m^2/s]
t	Beaufschlagungszeit [s]
erf	Fehlerfunktion
K_{Cr}	Eindringungsparameter [$\text{mm}/\sqrt{\text{s}}$]

2.4.1.2 Der Nordtest 492 – Rapid Chloride Migration

Der Nordtest 492 ist ein instationäres Prüfverfahren zur Ermittlung eines Migrationskoeffizienten. Diese Prüfmethode ist die standardisierte Form des Rapid Chlorid Migrationstest (RCM). Bei Prüfverfahren mit Migration wird eine elektri-

sche Spannung an den Prüfkörper angelegt und ein wesentlich schnelleres Eindringen des Chlorids erreicht als bei Diffusionsprüfverfahren, wodurch jedoch keine reale Abbildung der Eindringbedingungen erlangt wird und somit die Prüfung mit Vorsicht anzuwenden ist. Migrationsmethoden werden somit oft verwendet, um die Prüfdauer deutlich zu verringern [19]. Das Ergebnis des RCM-Tests ist der Chlorid Migrationkoeffizient D_{RCM} oder auch als D_{NSSM} bezeichnet (Gleichung 3). Wie auch beim Nordtest 443 wird in diesem Prüfverfahren vorzugsweise ein zylindrischer Betonkörper für die Prüfung verwendet [20]. Das Schema der Prüfvorrichtung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Prüfdauer beträgt zwischen 6 und 96 Stunden, anschließend wird der Prüfkörper gespalten und mit Silbernitratlösung besprüht um die Eindringtiefe ablesen zu können.

$$D_{NSSM} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad [20] \text{ Gleichung 3}$$

D_{NSSM}	instationärer Migrationskoeffizient (non-steady-state migration) [x10 ⁻¹² m ² /s]
U	absoluter Wert der angelegten Spannung [V]
T	durchschnittlicher Wert der Anfangs- und Endtemperatur [°C]
L	Dicke des Probekörpers [mm]
x_d	durchschnittlicher Wert der Eindringtiefe [mm]
t	Prüfdauer [h]

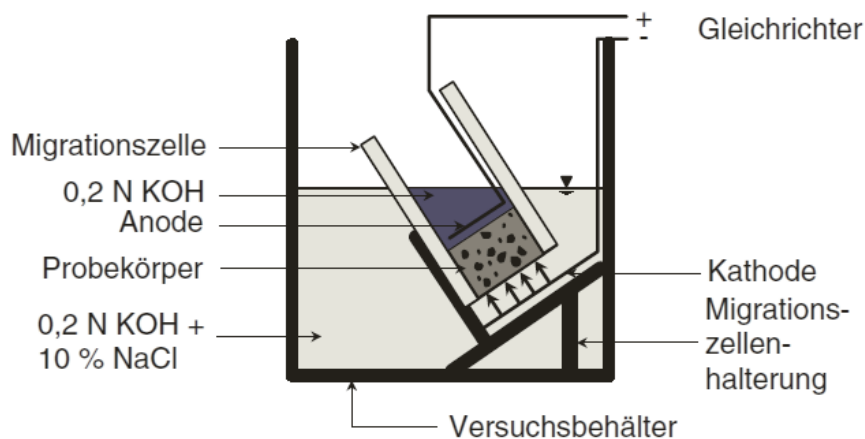


Abbildung 4 Schema einer Prüfvorrichtung für den Rapid Chlorid Migration Test [1]

2.4.1.3 Kurzzeit-Diffusionstest (STIT)

Der Kurzzeit-Diffusionstest versucht die Vorteile des instationären Nordtests 443 und des instationären Nordtests 492 (RCM) zu kombinieren und somit das Eindringverhalten des Chlorids realitätsnaher darzustellen und dabei die kurze Prüfzeit beizubehalten [17],[21]. Bei einer Langzeitbetrachtung ist auch die Veränderung des Diffusionskoeffizienten zufolge des noch nicht abgeschlossenen Hydratationsprozesses zu betrachten.

2.4.2 Konzepte und Normen

2.4.2.1 Konzept der ÖNORM EN 12390-11:2015

Die in der ÖNORM EN 12390-11:2015 beschriebenen Verfahren zu Bestimmung der Chlorideindringtiefe in den Beton basieren auf dem Nordtest 443. Jedoch wird der Prüfkörper in der Norm in 3%iger NaCl-Lösung gelagert im Gegensatz dazu ist im Nordtest 443 eine 16,5%ige Lösung angegeben. Das nicht-stationäre Prüfverfahren zur Ermittlung des Chloriddiffusionskoeffizienten dauert mindestens 119 Tage, welches eine Prüfdauer, und somit Lagerung in einer NaCl-Lösung, von mindestens 90 Tagen bedeutet.

Um die Messwiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit des Prüfverfahrens festzustellen, wurde 2006 ein Ringversuch, an dem weltweit 27 verschiedene Labore teilnahmen, vorgenommen, von Castellote und Antrade ausgewertet. In diesem Ringversuch wurden vier verschiedene Betonrezepturen mit unterschiedlichen Bindemitteln geprüft. Zusätzlich wurden insgesamt 13 Methoden aus vier unterschiedlichen Gruppen von Methoden angewandt, wobei nicht jedes Labor jede Methode verwendete.

Die vier Gruppen von Methoden waren [22]:

- Natürliche Diffusionsmethode (stationär und instationär)
- Migrationsmethode (stationär und instationär)
- Resistivitätsmethode
- Kolometische Methode

Die am häufigsten durchgeführten Methoden waren der Nordtest 443 (D2) und der Nordtest 492 (M4). Einige Methoden wurden von zu wenigen Laboren ausgeführt, deshalb wurden diese als statistisch nicht repräsentativ bewertet. Als Resultat der durchgeführten Versuche konnten statistische Präzisionsdaten ermittelt werden, welche nun in der Norm angeführt sind.

Um die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks zu gewährleisten sind im Eurocode 2 und der ÖNORM EN 206 Mindestbetonüberdeckungen angegeben, um die Bewehrung vor Chlorid zu schützen abhängig von der Expositionsklasse und der Nutzungsdauer. Diese Mindestanforderungen an die Konstruktion werden in Tabelle 3 angeführt.

Tabelle 3 Mindestbetondeckung $C_{\min,dur}$ nach Eurocode 2

Anforderungsklasse	XD1/XD2	XD3
$C_{\min,dur}$ (50 Jahre)	30 mm	40 mm
$C_{\min,dur}$ (100 Jahre)	35 mm	45 mm

2.4.3 Vergleich mit der Schweizer Norm für Betonbau

Die Schweizer Norm SIA 262 Betonbau – Ergänzende Festlegungen verweist auf die europäische Norm EN 12390-11:2015. In der SIA werden grundsätzlich drei Prüfungsarten definiert, wobei Prüfungsart TT-1 an Probekörpern bzw. Prüfkörpern, Prüfungsart TT-2 an Bohrkernen mit Nachbehandlung und Prüfungsart TT-3 an Bohrkernen durchgeführt wird. Für die Expositionsklasse XD1 gilt ein maximaler Grenzwert für den Wasser-Zementwert von 0,5 für XD2 wird kein Wert angegeben und für XD3 ein Wert von 0,45.

Im Gegensatz zum beschriebenen Verfahren in der ÖNORM EN 12390-11:2015 wird in der SIA 262 das Migrationsverfahren nach Nordtest 492 angewendet und somit durch Anlegen einer elektrischen Spannung die Eindringtiefe der Chloridionen bestimmt. Anschließend wird ein Chloridmigrationskoeffizient D_{Cl} [m²/s] berechnet (Gleichung 5). Das Prüfverfahren beginnt nach 28 Tagen und dauert 2 Tage, wobei für 24 Stunden eine Spannung von 20 Volt angelegt wird.[23]

Die angeführten Grenzwerte in der SIA für den Chloridwiderstand sind:

Prüfungsart TT-1:	$D_c \leq 10 * 10^{-12}$ [m ² /s] (Grenzwert)
Prüfungsart TT-2:	$D_c \leq 12 * 10^{-12}$ [m ² /s] (Richtwert)

$$D_{Cl} = \frac{z}{t} * (x_d - 1,5462 * \sqrt{zx_d}) \quad \text{Gleichung 5}$$

mit $z = 8,619 * 10^{-5} \frac{hT}{U}$

D_{Cl}	Chloridmigrationskoeffizient [m ² /s]
T	Absolute, mittlere Temperatur der KOH und KOH mit NaCl während des Versuchs [K]
x_d	mittlere Eindringtiefe der Chloridionen der beiden Prüfkörperhälften [m]
U	Mittelwert der Spannung zu Beginn und Ende des Versuchs [V]
t	Messzeit [s]

3 Herstellung und Prüfung von systematisch variieren Betonzusammensetzungen

3.1 Betonrezepturen & Ausgangsstoffe

3.1.1 *k*-Wert-Konzept

Der *k*-Wert erlaubt, bei der Berechnung des Wasser/Bindemittelwertes, eine Berücksichtigung von Zusatzstoffen vom Typ II. Das sind zum Beispiel Zusatzstoffe wie Flugasche, Hüttensand, Silikastaub oder aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ).

Wasser/Bindemittelwert:
$$\frac{W}{B} = \frac{W}{\text{Zement} + k \cdot \text{Zusatzstoff}}$$

Anrechenbares Bindemittel:
$$B_a = \text{Zement} + k \cdot \text{Zusatzstoff}$$

Gesamtbindemittel:
$$B_G = \text{Zement} + \text{Zusatzstoff}$$

In der Regel wird das Wasser-Bindemittel Verhältnis als W/B-Wert angegeben, welcher mit dem W/B_a-Wert gleichzusetzen ist. Der W/B_G-Wert gibt das Verhältnis des Wassers mit dem Gesamtbindemittel an und wird deshalb mit dem Index G gekennzeichnet. In der ÖNORM B 4710-1:2018 wird für Betone mit AHWZ die Anwendung des *k*-Wert-Konzeptes empfohlen und die maximalen Zugabemengen an AHWZ angeführt. Bei Betonen mit dem Zusatzstoff AHWZ ist ein *k*-Wert von 0,8 anzusetzen. Die zulässigen Mengen an AHWZ in Kombination mit der jeweiligen Zementart sind in Tabelle 4 angegeben. Das „Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff“ in der ÖNORM 4710-1:2018 erlaubt eine zusätzliche, festgelegte Bandbreite von Kombinationen des Zements nach ÖNORM EN 197-1 und Zusatzstoffen mit nachgewiesener Eignung.[2]

Tabelle 4 max. Zugabemenge für *k*-Wert-Ansatz für Zusatzstoffe nach ÖNORM B 3309

Maximale Zugabemenge für den <i>k</i> -Wert-Ansatz als Masseanteil, bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt B _G		Berechnung für k=0,8	
Zementsorte	AHWZ [%]	min. Z	max. ZU
CEM I	30	0,745 B	0,319 B
CEM II/A 32,5	15	0,878 B	0,154 B
CEM II/A 42,5 (und höher)	20	0,833 B	0,208 B
CEM II/B 42,5 (und höher)	10	0,918 B	0,102 B

3.1.2 Zusammensetzung der Betonvarianten

Die Rezepturen der herzustellenden Betone wurden diskutiert und vom GVTB definiert. Ziel der gewählten Rezepturen war es, die Bandbreite möglicher Zusammensetzungen für die Expositionsklassen XD1/XD2 und XD3 zu repräsentieren (Tabelle 6). Diese Expositionsklassen lt. ÖNORM B 4710-1:2018 unterscheiden sich vor allem durch den maximal zulässigen W/B-Wert. Deshalb wurde festgelegt, den W/B-Wert dreimal zu variieren.

Um den Einfluss des AHWZs auf den Chloridwiderstand des Betons ermitteln zu können, wurden 20%, 40% bzw. 60% des Gesamtbindemittelgehalts B_G durch AHWZ ersetzt. Die Zugabemenge an AHWZ nach ÖNORM B 3309 für das k-Wert-Konzept (siehe Tabelle 4) wurde teilweise überschritten, da eine strukturierte und signifikante Änderung der Betonrezepturen aussagekräftigere Ergebnisse liefert. Die sich daraus ergebenden Bindemittelgehalte sind in Abbildung 6 dargestellt. Zusätzliche beschlossen wurden folgende Festlegungen:

- Ein konstanter Leimgehalt von 313 l/m^3 wurde festgelegt. (Einfluss des Leimgehalts auf die Zementsteinmatrix wird im Kapitel 2.3.1 erläutert)
- Ein Ausbreitmaß von F52 wurde gefordert, wobei hier anzumerken ist, dass dieses nur direkt nach dem Mischen ermittelt wurde, jedoch nicht nach 90min erneut, wie es für den Transportbeton üblich ist.

Die neun definierten Betonvarianten werden in Tabelle 5 dargestellt und die Unterschiede in Tabelle 6 angeführt.

Tabelle 5 Betonzusammensetzungen

Rezeptur	W/B-Wert	anrech. Bindemittelgehalt B_a [kg/m^3]	Wassergehalt [kg/m^3]	Zementgehalt [kg/m^3]	AHWZ-Gehalt [kg/m^3]	Gesteinskörnung [kg/m^3]	Zementsorte	AHWZ-Anteil von B_G
V1.1	0,65	315	206	262	67	1853	CEM I 52,5N	20%
V1.2	0,68	299	203	195	131	1866	CEM I 52,5N	40%
V1.3	0,71	283	201	129	202	1864	CEM I 52,5N	60%
V2.1	0,55	350	194	292	73	1850	CEM I 52,5N	20%
V2.2	0,58	332	192	217	144	1851	CEM I 52,5N	40%
V2.3	0,60	314	189	143	214	1853	CEM I 52,5N	60%
V3.1	0,45	396	178	330	83	1853	CEM I 52,5N	20%
V3.2	0,47	375	176	245	163	1851	CEM I 52,5N	40%
V3.3	0,49	355	174	161	242	1850	CEM I 52,5N	60%

3.1.3 Systematik für die Bezeichnung der Zusammensetzungen

- Die erste Zahl in der Bezeichnung der Betonvariante steht für den W/B-Wert, wobei die Eins den höchsten W/B-Wert von 0,63 annimmt und die Drei dem niedrigsten W/B-Wert von 0,43 entspricht.
- Der AHWZ-Anteil wird durch die zweite Zahl dargestellt. Hier steht die Eins für 20%, die Zwei für 40% und die Drei für 60% AHWZ-Anteil des Gesamtbindemittels.

Die wesentlichen Unterschiede der neun Betonvarianten sind:

- W/B- Werte
- AHWZ Anteile
- Gesamtbindemittelgehalt B_G
- Anrechenbarer Bindemittelgehalt B_a

Tabelle 6 Unterschiede und Vergleich der Betonvarianten

Bezeichnung	Expositions-kategorie	W/B _G k=1	W/B _a k=0,8	W/Z	AHWZ- Gehalt des B _G	Gesamtbindemittel- gehalt B _G [kg/m ³]	anrech. Bindemittel- gehalt B _a , k=0,8 [kg/m ³]	Gesamtwasser [l/m ³]	Zementgehalt [kg/m ³]	Leimvolumen [l/m ³]
V1.1			0,65	0,78	20%	328	315	206	262	318,0
V1.2	n. g.	0,63	0,68	1,04	40%	325	299	203	195	314,4
V1.3			0,71	1,56	60%	322	283	201	129	313,8
V2.1			0,55	0,66	20%	365	350	194	292	313,0
V2.2	XD1/XD2	0,53	0,58	0,88	40%	361	332	192	217	314,0
V2.3			0,60	1,33	60%	357	314	189	143	313,7
V3.1			0,45	0,54	20%	413	396	178	330	313,7
V3.2	XD3	0,43	0,47	0,72	40%	408	375	176	245	312,3
V3.3			0,49	1,08	60%	403	355	174	161	313,4

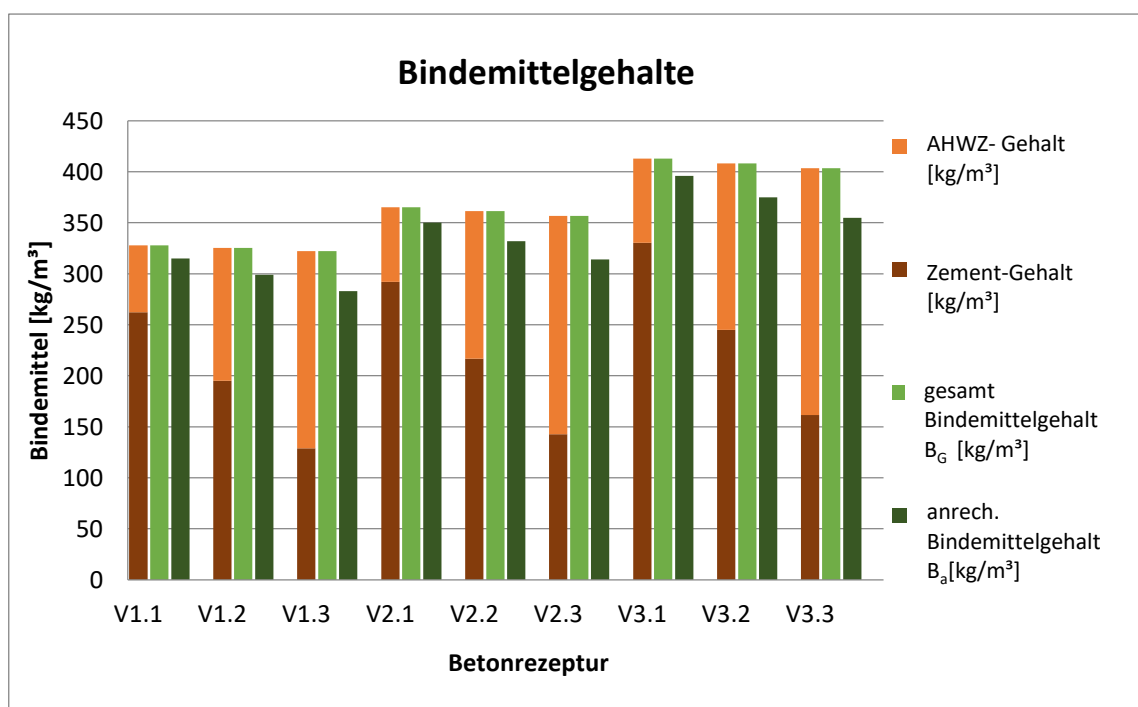


Abbildung 6 Vergleich gesamt Bindemittelgehalt B_G mit anrechenbarem Bindemittel B_a

3.1.4 Ausgangsstoffe

Die definierten Betone wurden in einem Labor, welches eine akkreditierte Prüf- und Inspektionsstelle für Bauwesen ist hergestellt (Bautech Labor GmbH).

Die verwendeten Ausgangsstoffe für die hergestellten Rezepturen sind in Tabelle 7 angeführt und die dazugehörigen Produktdatenblätter befinden sich im Anhang A.

Tabelle 7 Ausgangsstoffe für die herzustellenden Betone

Ausgangsstoff:	Firma	Bezeichnung
Gesteinskörnung GK16	Schotterwerk Gradenberg	KK 0/2e; KK 4/16
Zement	w&p Zement GmbH, Wietersdorf	CEM I 52,5 N
AHWZ	w&p Zement GmbH, Peggau	Supermix C
Fließmittel	Mapei Austria GmbH	Dynamon RC650
Entschäumer	BT3 Betontechnik GmbH	Premadd Foam EX T

Die karbonatische Gesteinskörnung mit dem GK16 stammt aus dem Schotterwerk Gradenberg. In Abbildung 7 wird die Grenzsieblinie nach ÖNORM B 4710-1:2018 dargestellt. Bei der Einwaage wurde die Gesteinskörnung in KK 0/2e und KK 4/16 aufgeteilt und die Sieblinie nach ÖNORM EN 12620 bestimmt. Die IST-Sieblinie entspricht den Anforderungen der ÖNORM B 4710-1:2018 und liegt im günstigen Bereich (Abbildung 8- Abbildung 10).

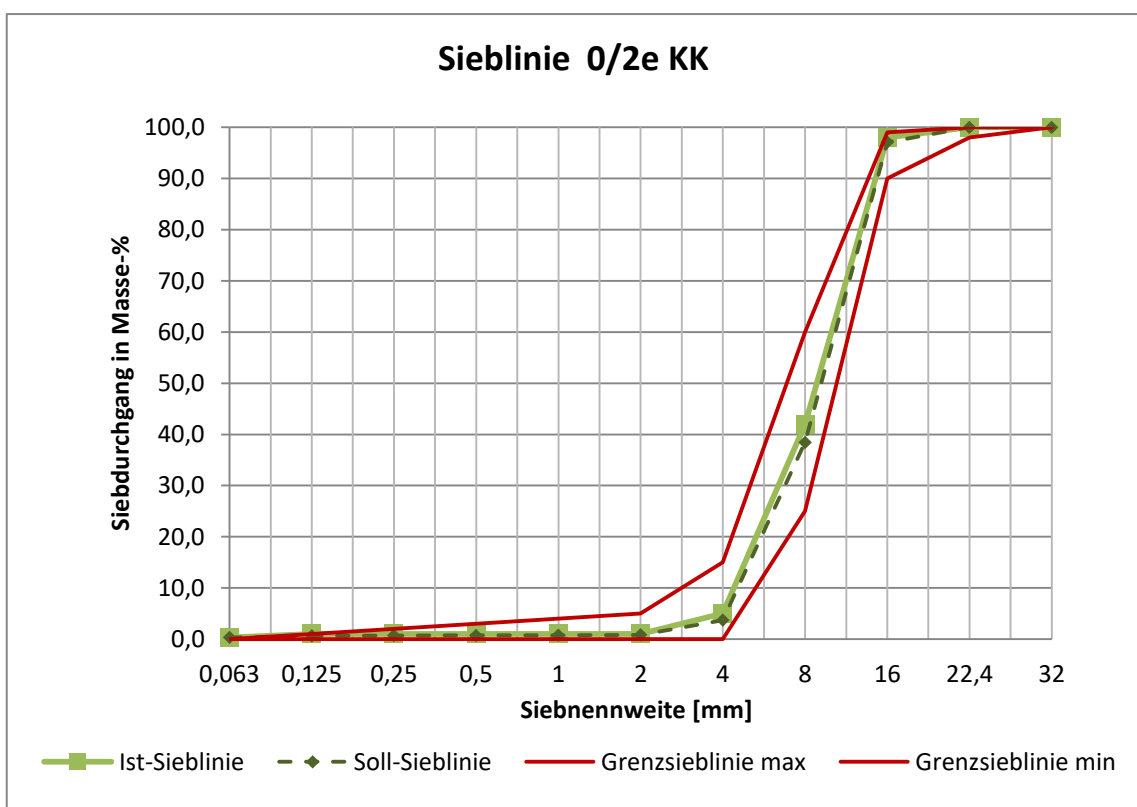


Abbildung 9 Sieblinie 0/2e KK

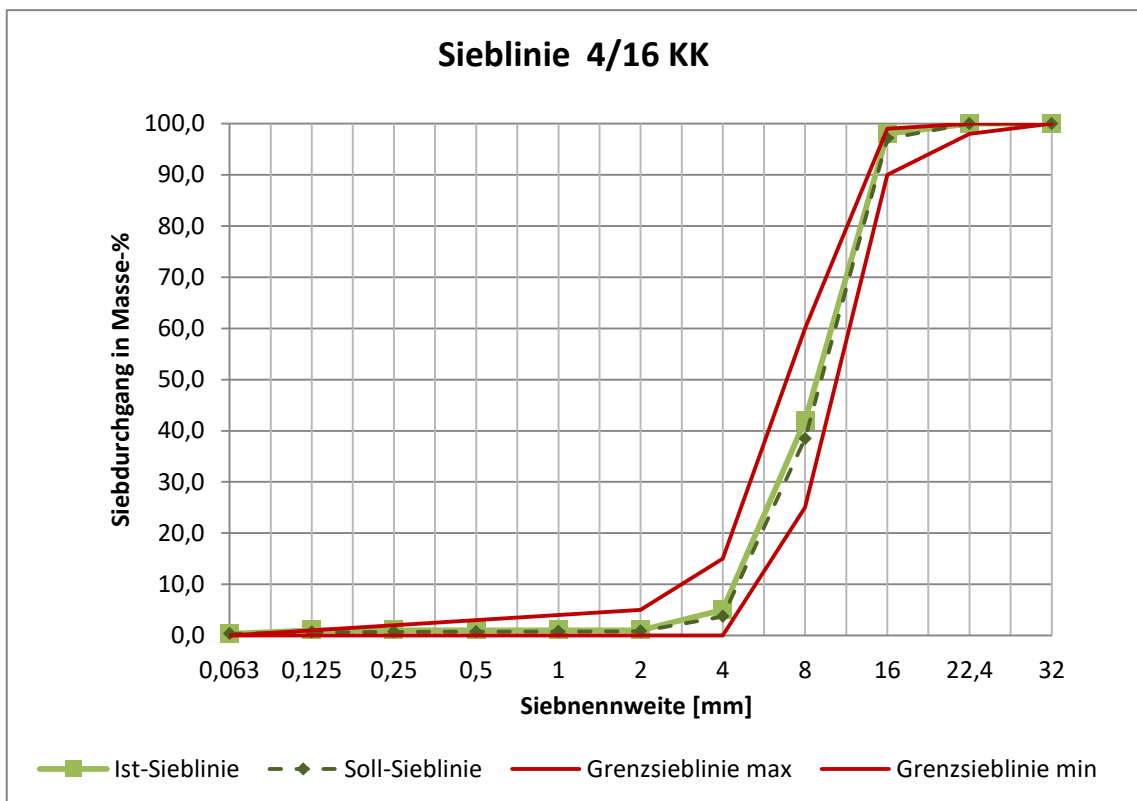


Abbildung 10 Sieblinie 4/16 KK

3.2 Chemische Analyse der Ausgangsstoffe

Die Gesteinskörnung, der Zement und das AHWZ wurden chemisch-mineralogisch durch das Institut für angewandte Geowissenschaften an der TU Graz analysiert. Die Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA) wurde zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung durchgeführt und die Röntgendiffraktometrieanalyse (RDA) zur Ermittlung der mineralogischen Bestandteile.

3.2.1 Röntgenfluoreszenz-Analytik RFA

Die Röntgenfluoreszenz-Analytik wird zur quantitativen Bestimmung der molekularen Zusammensetzung von Feststoffen eingesetzt und liefert die Hauptelemente, Nebenelemente und bedingt auch Spurenelemente eines Feststoffes, wie sie in Tabelle 8 dargestellt sind. Um die besten Ergebnisse zu bekommen wird ein Schmelzaufschluss vorgenommen. Dazu wird die feingemahlene Probe getrocknet und anschließend bei ca. 1000°C geglüht, um flüchtige Bestandteile freizusetzen. Dabei wird der Glühverlust, auch L.O.I. („loss on ignition“) genannt, bestimmt. Verflüchtigte Anteile können zum Beispiel H₂O, CO₂ oder F sein.

Tabelle 8 RFA: chemische Analyse der Ausgangsstoffe

Komponente	AHWZ (%)	CEM (%)	GK 0/2 (%)	GK 4/16 (%)
L.O.I.	6,08	2,31	41,24	42,62
Na ₂ O	0,43	0,34	0,10	0,07
MgO	9,61	2,09	1,26	0,95
Al ₂ O ₃	12,11	5,05	1,23	0,57
SiO ₂	35,01	20,26	4,21	1,80
P ₂ O ₅	0,05	0,21	0,02	0,01
SO ₃	1,58	3,06	0,35	0,17
K ₂ O	1,59	-	0,28	-
CaO	27,27	62,87	50,75	53,53
TiO ₂	0,43	0,35	0,07	0,06
MnO	2,28	0,13	-	-
Fe ₂ O ₃	3,48	3,11	0,47	0,20
Rb	0,01	-	-	-
Sr	0,05	0,16	0,02	0,03
Y	0,01	0,03	-	-
Zr	0,01	0,03	-	-

3.2.2 Röntgendiffraktometrieanalyse RDA

Bei der Röntgendiffraktometrieanalyse können die kristallinen Phasen der Probe bestimmt werden. Durch den in der RFA ermittelten Glühverlust und die Rietveldanalyse¹ kann man auf die Anteile in den kristallinen und amorphen Phasen der Probe rückschließen. Ein ausgesendeter Röntgenstrahl wird an einer geordneten Struktur (kristalline Phase) gebeugt und über diese Beugung können ein Winkel und eine Distanz gemessen werden, wodurch man wiederum auf eine Wellenlänge schließen kann, welche einem Mineral zugeschrieben wird. (Gleichung 6) [24]

$$n \lambda = 2d \sin(\theta) \quad \text{Gleichung 6}$$

- n Ganze Zahl, beschreibt das Vielfache von λ
- λ Wellenlänge
- d Distanz
- θ Beugungswinkel

Die amorphen Phasen können mit dieser Methode nicht genauer bestimmt werden, da sie keine geordnete Struktur der Atome, wie es bei den kristallinen Phasen der Fall ist, aufweisen. Die ermittelten kristallinen Phasen sind in Tabelle 9 aufgelistet

Tabelle 9 RDA mineralogische Analyse

Kristalline Phasen	Zement	AHWZ	GK 0-2	GK 4-16
Alite C ₃ S	52,7			
Belite C ₂ S	16,7			
Aluminate C ₃ A	6,3			
Ferrite C ₄ AF	9,7			
Calcite CaCO ₃	6,3	13,7	92,5	95
Portlandite CH	1,2			
Quartz		2,3	2,3	1,4
Arcanite K ₂ SO ₄	1,2			
Aphthalite K ₃ Na(SO ₄) ₂	0,9			
Bassanite CaSO ₄ ·0.5(H ₂ O)	1,6			
Anhydrite CaSO ₄	3,3			
Dolomite			2,3	1,9
Muscovite			2,6	1,7
Albite			0,3	
amorphe Phasen		84		
Total [%]	99,9	100,0	100,0	100,0

Zusatzinformationen:

	Klinkerphasen		amorphe Phasen
	Sulfatträger		sonstige mineralische Phasen

¹ Methode zur quantitativen Phasenanalyse [41]

3.2.3 Anmerkungen zu den chemisch-mineralogischen Analysen

Die europäische Norm EN197-1 legt die Grenzen der Anteile von Haupt- und Nebenbestandteile der jeweiligen Zementsorte fest. Bei einem Portlandzement (CEM I) sollte der Klinkergehalt (ergibt sich aus den Klinkerphasen und Portlandit) zwischen 95%-100% des Zements liegen, ohne dass der Sulfatträger in dieser Summe berücksichtigt wird. Die Werte der Tabelle 9 sind die Ergebnisse einer Röntgendiffraktometrieanalyse, welche nicht dem Referenzverfahren (nasschemischer Aufschluss) nach ONR 29196-4 entspricht.

Laut Angaben des AHWZ Herstellers bestand der verwendete SupermixC zu 70% aus Hüttensand, zu 15% aus Flugasche und zu 15% aus Kalkstein. Diese Werte wurden für diese Masterarbeit nicht separat überprüft, jedoch wurde eine Analyse des verwendeten AHWZ im Zuge der vorangegangenen Masterarbeit durchgeführt [25]. Die Analyse nach ONR 29196-4 des Labors eines Zementherstellers ergab dabei, dass das AHWZ aus 66% Hüttensand, 19% Flugasche und 15% Kalkstein besteht [25] und ist somit vergleichbar mit den erhaltenen Angaben. Die durchgeführte Röntgendiffraktometrieanalyse ergab 16% inerte Stoffe (Kalkstein CaCO_3 und Quarz) und 84% hydraulisch wirksame Stoffe. Das AHWZ setzten sich somit aus ca. 65-70 M-% Hüttensand, ca.15-19 M-% Flugasche und inertem Gesteinsmehl (überwiegend inertes Kalksteinmehl) zusammen.

3.3 Herstellung

Die Probekörper wurden an zwei Tagen in einem akkreditierten Betonlabor nach ÖNORM EN 12390-2 hergestellt. Insgesamt wurden neun Betonrezepturen hergestellt, Frischbetonprüfungen durchgeführt und in die Probekörperformen gegeben. Das Herstellungsprotokoll befindet sich im Anhang B.

3.4 Frischbetonprüfungen

Vor Ort wurden während des Betonierens folgende Frischbetonprüfungen nach ÖNORM EN 12350-11:2015 bzw. der darauf basierenden ONR 23303:2010 durchgeführt.

- Frischbetontemperatur
- Lufttemperatur
- Konsistenz
- Luftgehalt des Frischbetons
- Frischbetonrohddichte

3.4.1 Konsistenz

Die Konsistenz wird zehn Minuten nach der Wasserzugabe gemäß ONR 23303:2010 durch das Ausbreitmaß auf einem Ausbreittisch geprüft und in die Konsistenzklasse laut ÖNORM B 4710-1:2018 eingestuft. Die Ausbreitmaßklassen sind in Tabelle 10 dargestellt. Um die gewünschte Konsistenz und den Luftporengehalt zu erhalten werden Betonzusatzmittel eingesetzt. Die verwendeten Mengen Fließmittel und Entschäumer sind in Abbildung 11 dargestellt.

Tabelle 10 Ausbreitmaßklassen nach ÖNORM B 4710-1:2018

Ausbreitmaßklassen in Österreich	Ausbreitmaß, ermittelt nach ÖNORM EN 12350-5	Beschreibung
	mm	
F38	350 bis 410	steif plastisch
F45	420 bis 480	plastisch
F52	490 bis 550	weich
F59	560 bis 620	sehr weich
F66	630 bis 690	fließfähig
F73	700 bis 760	sehr fließfähig

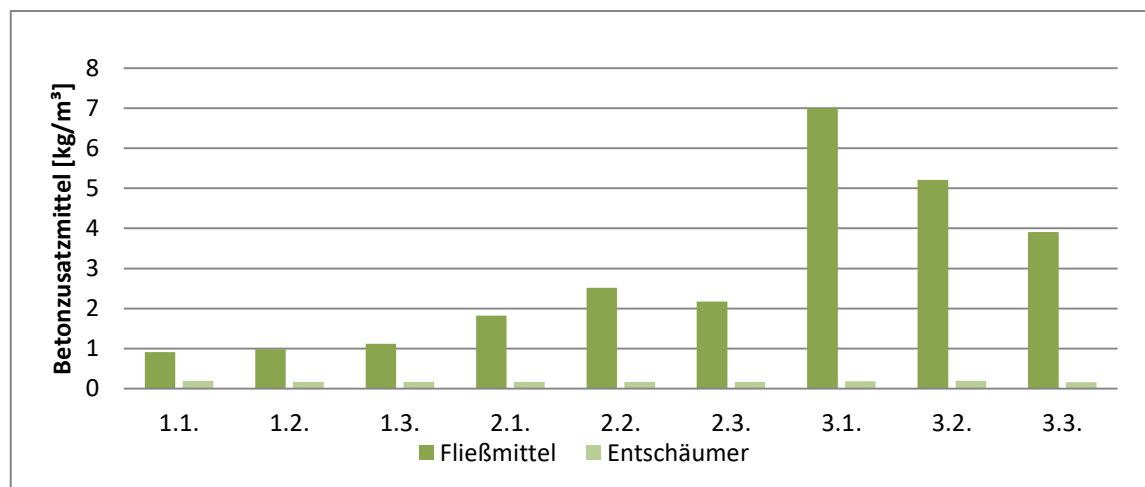


Abbildung 11 Menge an Betonzusatzmitteln

3.4.2 Luftgehalt des Frischbetons

Die Prüfung des Luftgehalts fand zehn Minuten nach der Wasserzugabe statt und wurde gemäß ONR 23303:2010 mit dem Druckausgleichsverfahren geprüft und in Prozent der Betonprobe angegeben.

3.4.3 Frischbetonrohichte

Die Frischbetonrohichte wurde zehn Minuten nach der Wasserzugabe gemäß ONR 23303:2010 ermittelt, indem der Frischbeton in einen biegesteifen und wasserdichten Behälter verdichtet und gewogen wurde.

3.5 Festbetonprüfungen

Alle Probekörper wurden nach einem Tag ausgeschalt und der vorgesehenen Festbetonprüfung entsprechend nach ONR 23303:2010 gelagert, vorbereitet und geprüft.

- Offene Porosität
- WU – Wasserundurchlässigkeit
- Druckfestigkeit
- Chloridgehalt

3.5.1 Offene Porosität

Für die Bestimmung der Porosität wurde je Rezeptur ein Betonwürfel mit 150 mm Seitenlänge hergestellt. Dieser Würfel wurde nach einem Tag ausgeschalt und danach bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Aus dem ursprünglichen Probekörper wurden vier kleinere Würfel ($n=4$) mit einer Seitenlänge von ca. 5cm herausgeschnitten. Diese Würfel wurden nach mindestens 28 Tagen unter Wasser mit der Tauchwaage gewogen und anschließend im Trockenschrank getrocknet, bis die prozentuelle Massendifferenz zwischen zwei Trockenwägungen kleiner als 0,1% betrug. Die Prüfung erfolgte nach ÖNORM EN 1936:2007. Es wurde eine zusätzliche Prüfung der Porosität im Alter von 270 Tagen durchgeführt, wobei diese Probekörper nach dem ausschalen bis zur Prüfung durchgehend unter Wasser gelagert wurden.

Durch die Kapillarporen und teilweise größere Poren in einem Körper kann Wasser aufgenommen werden, welches beim Trocknen des Probekörpers wieder abgegeben wird. Somit wurde über die Massendifferenz im trockenen und wassergesättigten Zustand die Wasseraufnahme bestimmt und anschließend mit Hilfe der offene Porosität p_0 die Rohdichte p_b ermittelt.

3.5.2 Prüfung der Wassereindringtiefe „WU“

Die Probekörper für die Wasserundurchlässigkeit wurden nach dem Ausschalen unter Wasser gelagert. Die WU-Prüfung fand nach der ÖNORM EN 12390-8:2017 bzw. der ONR 23303:2010 im Alter von 28 Tagen statt und dient zur Ermittlung der Wassereindringtiefe. Pro Rezeptur wurden 2-3 Probekörper, mit den Maßen 200/200/120 mm, für die WU-Prüfung hergestellt. Die Prüfkörper wurden in den Prüfstand eingebaut und mit einem Wasserdruck von 1,75 bar beaufschlagt, welchen nach 3 Tagen auf 7 bar erhöht und nach insgesamt 14

Tagen wurden die Prüfkörper ausgebaut. Anschließend wurde der Prüfkörper in der Mitte gebrochen und es wurde ersichtlich, wie weit das Wasser in den Beton eingedrungen war. Hier ist anzumerken, dass bei zwei Prüfkörpern nicht zu erkennen war, wo die Eindringgrenze lag und diese nicht in die Ermittlung der Ergebnisse miteingebunden wurden.

3.5.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde sowohl nach 28 Tagen, als auch nach 90 Tagen an 3 Probekörpern, gemäß ÖNORM EN 12390-3:2012 bzw. der ONR 23303:2010, geprüft. Die Würfel mit einer Seitenlänge von 150 mm wurden die ersten sieben Tage unter Wasser gelagert und die anschließende Lagerung fand an der Raumluft (65% relative Luftfeuchte, 20°C), bis zur jeweiligen Druckfestigkeitsprüfung, statt.

3.5.4 Ermittlung des Chlorids im Beton

Die Ermittlung des Chlorids im Beton wird nach der ÖNORM EN 12390-11:2015 - Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton - Einseitig gerichtete Diffusion durchgeführt [26]. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, bei welchem die Probekörper für 90 Tage in einer 3%igen NaCl-Lösung gelagert werden und anschließend Proben in mehreren Tiefenstufen analysiert werden, um am Chloridprofil mittels der Regressionsanalyse den Diffusionskoeffizienten zu bestimmen.

3.5.4.1 Vorbereitung

Die Probewürfel, welche für die Bestimmung des Chloriddiffusionswiderstandes vorgesehen waren, wurden nach der Herstellung 28 Tage unter Wasser gelagert. Nach dieser Lagerung wurden die Probewürfel in vier Teilprobekörper geschnitten, so wie in Abbildung 12 ersichtlich. Es wurden zwei der vier Quader zur Bestimmung des Chloridwiderstandes verwendet, indem diese zwei in der Mitte durchgeschnitten wurden. Diese Sägefläche war die mit Chlorid zu beaufschlagende Fläche (Abbildung 13). Jeweils eine Hälfte des zerschnittenen Quaders wurde in Chlorid eingelagert und die zweite Hälfte wurde zur Bestimmung des anfänglichen Chloridgehaltes C_i verwendet. Die Beschriftungen in der Abbildung 12 geben die Lage und spätere Verwendung des Probekörpers an.

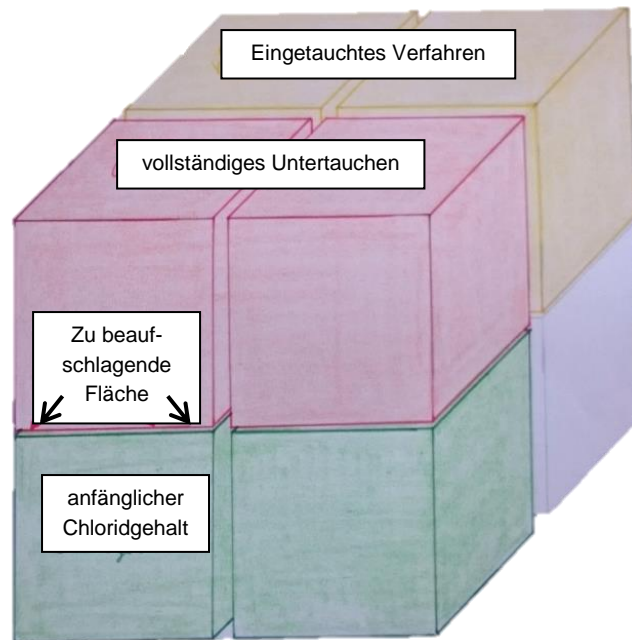
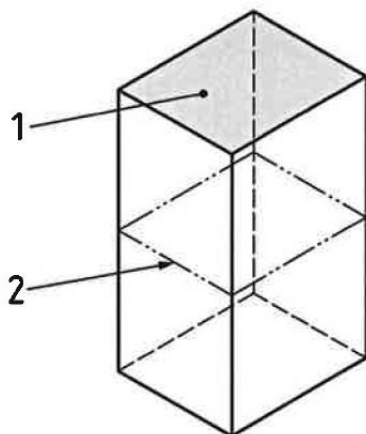


Abbildung 12 Lage der Teilprobekörper im ursprünglichen Probekörper



Legende:

- 1 abgezogene Oberfläche
- 2 an dieser Linie sind die Probekörper zu schneiden um so die Beaufschlagungsflächen herzustellen

Abbildung 13 Sägefläche des Probekörpers nach ÖNORM EN 12390-11:2015 [26]

Alle Flächen des Teilprobekörpers, ausgenommen die zu beaufschlagende Fläche, wurden mit Epoxidharz versiegelt um das Eindringen der Chloridionen in den Beton ausschließlich über die einseitig gerichtete Diffusion zu gewährleisten.

Für die Bestimmung des anfänglichen Chloridgehaltes wurde eine Scheibe, auf der Seite der Sägefläche, heruntergeschnitten, zerkleinert und in einen dicht verschlossenen Behälter gegeben. Der anfängliche Chloridgehalt wird als Ausgangswert für den unbeaufschlagten Beton verwendet.

3.5.4.2 Lagerung

In der ÖNORM EN 12390-11:2015 werden drei Möglichkeiten angeführt, wie die Probekörper in der Chloridlösung gelagert werden können.

(Bezeichnungen 1, 2, 3 in den Skizzen siehe ÖNORM EN 12390-11:2015)

1. Probekörper bei vollständigem Untertauchen
2. Probekörper bei Anwendung eines Aufsatzzylinders
3. Verfahren mit eingetauchtem Probekörper

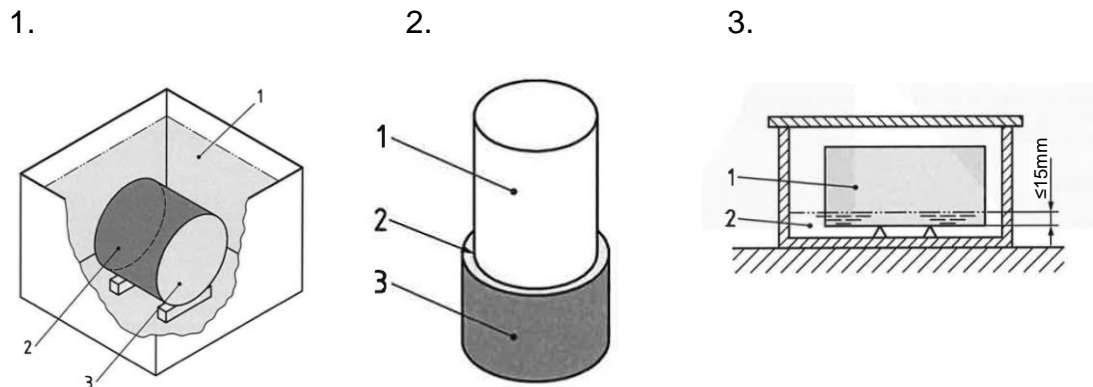


Abbildung 14 Schematische Darstellung der drei Möglichkeiten zur Probenlagerung [26]

Bei der vollständig untergetauchten Lagerung der Probekörper ist die nicht mit Epoxidharz versiegelte Fläche seitlich, bei der eingetauchten Lagerung ist die zu beaufschlagende Fläche nach unten gerichtet und Flüssigkeit tritt nur durch kapillares Saugen gegen die Schwerkraft ein. Der Probekörper bei eingetauchter Lagerung wird wie in Abbildung 14-3 dargestellt mindestens 15mm in die Lösung eingetaucht.

Um eventuelle Unterschiede der Chlorideindringung durch die Lagerung zu erkennen und zu berücksichtigen, wurden drei der neun Betonvarianten sowohl bei vollständigem Untertauchen als auch mit dem Verfahren mit eingetauchtem Probekörper gelagert (V1.1; V2.1; V3.1). Die Probekörper der restlichen Betonvarianten wurden mit dem Verfahren bei vollständigem Untertauchen eingelagert. Die Variante mit dem Aufsatzzylinder wurde nicht angewendet.

3.5.4.3 Prüfung

Zur Durchführung der Prüfung wurde eine 3%ige NaCl-Lösung verwendet, welche in einen Behälter gegeben wurde und nach der nach Einlagerung der Probekörper fest verschlossen wurde. Das Volumen der verwendeten Prüflösung muss mindestens 12,5 ml je cm² der beaufschlagten Prüffläche betragen. Die Lagerung bei vollständigem Untertauchen und die eingetauchte Lagerung fanden in getrennten Behältern statt. Pro Betonrezeptur und Lagerungsart wurden 2 Probekörper geprüft. Die Probekörper wurden 90 Tage in dieser Lösung gela-

gert, wobei kein Wechsel der Lösung stattfand, da in der Norm empfohlen wird, die Lösung erst bei einer Lagerung, die länger als 90 Tage dauert, zu wechseln.

3.5.4.4 Profilschneiden

Nach 90 Tagen erfolgte die Entnahme der Probekörper aus der NaCl- Lösung und im Anschluss wurden 8 parallele Schichten von den Probekörpern geschnitten, wobei die erste Schicht gemäß Norm eine Dicke von mindestens 1mm aufweisen muss, diese jedoch nicht in die Berechnung miteinbezogen werden darf. Die Schichten wurden vom Probekörper geschnitten und mussten so abgetragen werden, um pro Schicht eine trockene Probe von mindestens 5 g zu erhalten. Der Probekörper und die jeweilige Schicht wurden nach jedem Schnitt vermessen um im Anschluss das Tiefenprofil zu erstellen. Das Ziel des Profilschneidens war es, ein Profil mit mindestens 6 relevanten Punkten zu erhalten, welche zwischen der beaufschlagten Fläche und dem anfänglichen Chloridgehalt liegen. In der ÖNORM EN 12390-11 sind empfohlene Schichtdicken und Tiefenstufen von 1-2 mm angeführt. In der Arbeit wurde vereinfacht in Tiefenstufen von etwa 5 mm Probenmaterial aus Schichten von i. M. 2,5 mm entnommen.

3.5.4.5 Analyse

Die chemische Analyse wurde nasschemisch mittels Titration nach EN 14629 an gepulverten Proben durchgeführt, dafür wurden die Schichten mittels Scheibenschwingmühle auf Analysefeinheit zerkleinert.

3.6 Chemische Analyse des vorhandenen Chlorids

3.6.1 Bestimmung des Chloridgehalts nach ÖNORM EN 14629 [27]

Die chemische Analyse des Chloridgehalts kann laut ÖNORM EN 14629 durch zwei Verfahren durchgeführt werden.

- Verfahren nach Vollhard (Verfahren A)
- Potentiometrische Titration (Verfahren B)

Für diese Anwendung wird nur auf die potentiometrische Titration eingegangen. Zuerst wird von der auf Analysefeinheit zerkleinerten Betonprobe 1 g – 5 g abgewogen und anschließend in einem 250-ml-Becherglas mit 50 ml Wasser angefeuchtet. Danach werden 10 ml 5 mol/l Salpetersäure und 50 ml Wasser in das Becherglas gegeben und anschließend wird das Gemisch für 3 Minuten gekocht, wobei darauf zu achten ist, dass ein Spritzen verhindert wird. Die Probe ist nicht standardmäßig zu filtrieren, sondern nur, wenn dies als erforderlich angesehen wird. Der Chloridgehalt wird durch Zugabe einer 0,1 M% Silbernitratlösung bestimmt. Während der Titration wird der Verbrauch der Silbernitratlösung gemessen und aufgezeichnet, um davon auf den Chloridgehalt rückzuschließen zu können. Diese Berechnung wird durch die folgende Gleichung 7 durchgeführt.

$$CC = 3,545 * f * \frac{(V_4 - V_3)}{m} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit:

V_3 das Volumen der bei der Titration verbrauchten Silbernitratlösung (ml)

V_4 das Volumen der bei der Blindtitration verbrauchten Silbernitratlösung (ml)

m die Masse der Betonprobe (g)

f die Molarität der Silbernitratlösung

3.6.2 Modifizierte Bestimmung des Chloridgehalts

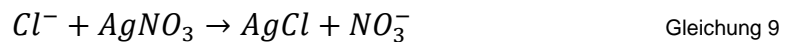
An der TU Graz wurde ein eigenes Hausverfahren entwickelt, welches das Verfahren nach Norm etwas modifiziert, da es bei Analyse des Chloridgehalts Schwierigkeiten geben kann, wenn AHWZ im Beton vorhanden ist. Es wurde versucht, die Menge der Probe so zu wählen, dass der Titriermittelverbrauch zwischen 2 und 15 ml bzw. idealerweise zwischen 5 und 10 ml liegt. Deshalb wurden bei Bedarf 5ml Salzsäure (HCl) zur Probe hinzugefügt, um im idealen Messbereich des Titrators zu liegen. Die Probe wurde anstatt mit Salpetersäure HNO_3 durch 25ml Essigsäure CH_3COOH aufgeschlossen, bis zum Sieden erhitzt, 4 min gekocht und anschließend mit destilliertem Wasser bis zur 100ml Marke aufgefüllt [28].

Auch bei diesem Verfahren wurde mit einer Silbernitratlösung (AgNO_3 -Maßlösung 0,01 mol/l) titriert. Der Verbrauch an Silbernitratlösung wurde gemessen, aufgezeichnet und anschließend, mit der unten angeführten Gleichung 8, auf das vorhandene Chlorid in der Probe zurückgerechnet. Das vorhandene Chlorid im Beton wird in Masseprozent angegeben.

$$Cl \text{ in } M\% = \frac{ml \text{ Verbrauch} * 0,3545 * 100}{mg \text{ Einwaage}} \quad \text{Gleichung 8}$$

Die Elektrode des Titrators misst den elektronischen Widerstand (mV) der Prüflösung und gibt so lange Silbernitrat hinzu, bis es zu einem Äquivalenzpunkt (Wendepunkt) in der gemessenen Kurve kommt. Um diesen Potentialumschlag messen zu können wird eine Cl^- sensitive Elektrode benötigt.

- Chemische Reaktion während des Titrationvorganges:



Die Chlorid-Ionen reagieren mit der Silbernitratlösung zu Silberchlorid und Nitrat-Ionen (Gleichung 9) und bilden einen milchig weißen Niederschlag aus, deren Potentialumschlag von der Cl^- sensitiven Elektrode gemessen wird.

3.7 Mathematische Analyse und Auswertung der Ergebnisse

Die mathematische Auswertung der Messergebnisse erfolgte zum überwiegenden Teil durch die in der ÖNORM EN 12390-11 vorgeschriebenen nicht-linearen Regressionsanalyse. Diese wird in Kapitel 3.7.1 noch genauer erläutert. Für die Auswertung dieses Regressionsverfahrens sind Programme nötig, da zwei unbekannte Variablen in der Formel vorhanden sind und das Ziel ist, eine Kurve mit möglichst geringem Fehler (die kleinste Quadratsumme der Differenz zwischen den Messergebnissen und der Fehlerfunktionslösung) und hohem Bestimmtheitsmaß an die gemessenen Werte zu finden. Die Norm erlaubt ein manuelles Annähern mittels der Solver-Funktion in Microsoft Excel, jedoch ist das eine sehr zeitintensive Tabellenkalkulation. Deshalb wurde ein eigenes Programm geschrieben, um die am besten angenäherte Kurve zu ermitteln. Der Programmcode wurde in der Programmiersprache Python im Programm PyChram geschrieben und befindet sich im Anhang D, er variiert die zwei Unbekannten so oft, bis die optimale Kurve gefunden wird und das Bestimmtheitsmaß gegen eins geht. Denn es ist ein Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,95 gefordert, ansonsten sollte die Prüfung und Analyse wiederholt werden. Umso geringer die Summe der Quadrate ist, umso höher ist das Bestimmtheitsmaß.

- Die Summe der Quadrate aus den Differenzen zwischen dem berechneten Wert C_f (Gleichung 10) und dem gemessenen Wert C_m sollte möglichst klein werden.

$$\sum_{i=2}^{i=n} (C_f - C_m)^2 \quad \text{Gleichung 10}$$

- Bestimmtheitsmaß: Beschreibt, wie gut sich die berechnete Kurve an die gemessenen Werte oder einer Punktwolke anpasst. Es kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei eine Eins bedeutet, dass es eine 100%ige Übereinstimmung gibt und eine Null, dass überhaupt kein Zusammenhang besteht.
- Fehlerfunktion erf(x): wird auch Gauß'sche Fehlerfunktion (Gleichung 11) genannt und spielt eine große Rolle in der Statistik und Fehlerrechnung. Eine Beobachtungsreihe aus n Messungen derselben physikalischen Größe beinhaltet in der Regel Beobachtungsfehler und wird durch die Fehlerfunktion beschrieben.

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\pi} e^{-r^2} dr \quad \text{Gleichung 11}$$

- Fehlerfunktionslösung: Beschreibt die errechnete Kurve nach der Fehlerfunktion.

3.7.1 Nichtlineare Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist das, in der ÖNORM EN 12390-11, angeführte Verfahren zur Auswertung der gemessenen Werte aus der Chloridgehaltsbestimmung. Grundsätzlich wird versucht, eine Kurve zu ermitteln, welche sich optimal an die gemessenen Werte angleicht und somit der Chloridgehalt C_x in einer gewissen Tiefenstufe x nach einer gewissen Zeit t ermittelt werden kann. Sämtliche Variablen werden in Tabelle 11 angeführt. Dieser Vorgang wird auch als „Curve fitting“ bezeichnet. Für die Regressionsanalyse dürfen die gemessenen Chloridgehalte, ab der zweiten Schicht j_2 bis zu jener Betonschicht mit einem Chloridgehalt von $C_{i+0,015\%}$, herangezogen werden, wobei die Anzahl der verwendeten Punkte eines Profils mindestens 6 betragen soll. Um diese Anzahl zu erreichen werden in dieser Arbeit die Messwerte von zwei Chloridprofilen eines Betonprobekörpers miteinander kombiniert.

Die nicht-lineare Regressionsanalyse variiert zwei Unbekannte einer Gleichung, um die optimale Kurve zu erhalten. Die Variablen dieser Analyse sind der Chloridgehalt an der Oberfläche C_s und der Chloriddiffusionskoeffizient im instationären Zustand D_{nss} . Die nachfolgende Gleichung 12 der ÖNORM EN 12390-11, mit der die Regressionsanalyse durchgeführt wird, basiert auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz, welches Kapitel 3.7.1.1 genauer erläutert wird. Es ist zu beachten, dass diese Regressionsanalyse zeitabhängig ist und somit die Beaufschlagungsdauer t einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, welche in diesem Projekt 90 Tage beträgt.

$$C_x = C_i + (C_s - C_i) * \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_{nss} * t}} \right) \right] \quad \text{Gleichung 12}$$

Zusammenfassung der Anforderungen für die Regressionsanalyse:

- Erste Schicht geht nicht in die Regressionsanalyse mit ein.
- Die Summe der Quadrate soll minimal werden
- Bestimmtheitsmaß: $R^2 \geq 0,950$
- Der letzte miteinzubeziehende gemessene Wert C_0 , auch Nullpunkt genannt, ist jener Wert, der unter dem anfänglichen Chloridgehalt plus 0,015% der Masse der Probe liegt.
 $C_i < C_0 < C_i + 0,015\%$

Tabelle 11 Symbole und Abkürzungen nach ÖNORM EN 12390-11 [26]

C_i	Anfänglicher Chloridgehalt, in % Masseanteil des Betons (initial chloride)
$C_{m,j}$	Gemessener Chloridgehalt der Betonschicht j, in % Masseanteil des Betons
$C_{r,j}$	Chloridgehalt der Schicht j, berechnet nach Gleichung (1) unter Anwendung der am besten geeigneten Kombination von C_s und D_{nss} , in % Masseanteil des Betons
C_s	Berechneter Chloridgehalt an der beanspruchten Betonoberfläche, in % Masseanteil des Betons (surface chloride)
C_x	Der bei einer durchschnittlichen Tiefe x und der Beaufschlagungszeit t gemessene Chloridgehalt in % Masseanteil des Betons
D_{nss}	Chloriddiffusionskoeffizient im instationären Zustand, in m^2s^{-1}
F	Summe der Quadrate der Restgrößen
FR	Durchflussrate (Fluss), in $mol m^{-2}s$
j1 bis jn	Abgezogene Schicht, bezogen auf die Anzahl der abgezogenen Schichten, wobei die oberste Schicht (die beaufschlagte Oberfläche) als j1 definiert wird
r	Wiederholpräzision
R	Vergleichspräzision
R^2	Bestimmtheitsmaß
sr	Wiederholstandardabweichung
sR	Vergleichsstandardabweichung
S	Summe der Quadrate
t	Beaufschlagungszeit, in Sekunden
u	Variable des Integrals
x	Tiefe unterhalb der beaufschlagten Oberfläche bis zum Mittelpunkt der geschliffenen Schicht j, in m
z	Adimensionaler Parameter ohne Einheiten
$\partial c / \partial x$	Konzentrationsgradient, wobei die Konzentration in mol/m^3 angegeben wird

3.7.1.1 2. Fick'sches Grundgesetz

Das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz (Gleichung 13) beschreibt nicht-stationäre Verhältnisse, bei denen zeitlich und örtlich variable Konzentrationen vorhanden sind [29]. Ist die Teilchenkonzentration in einem Medium nicht gleichmäßig verteilt, so versuchen diese den Konzentrationsunterschied durch Diffundieren auszugleichen.

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D_{nss} \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{Gleichung 13}$$

Das 2. Fick'sche Gesetz ist gültig unter der Annahme, dass keine Teilchen vernichtet werden. Die zeitliche Änderung der Konzentration des diffundierenden Stoffes ist proportional zur zweiten Ableitung der Konzentration nach dem Ort, dabei ist der Diffusionskoeffizient die Proportionalitätskonstante.[10]

3.7.1.2 Diffusionskoeffizient

Der Diffusionskoeffizient D_{nss} beschreibt die Geschwindigkeit eines diffundierenden Stoffes im instationären Zustand (die Initialen werden von der englischen Bezeichnung für „non steady state“ abgeleitet). Ein nicht stationärer Zustand bedeutet, dass die zeitliche und örtliche Konzentration der Chloride variabel sind wie in Gleichung 14 ersichtlich ist [4]. Im Gegensatz dazu beschreibt der Diffusionskoeffizient D_{ss} stationäre Prüfbedingungen, bei denen ein konstanter Fluss von Chloridionen vorhanden ist.[26]

$$D = - \frac{FR}{\partial c / \partial x} \quad \text{Gleichung 14}$$

D	allgemeiner Diffusionskoeffizient [m ² /s]
FR	die Durchflussrate (Fluss), in mol m ⁻² s
$\partial c / \partial x$	der Konzentrationsgradient über der Konzentration, in mol/m ³

3.7.1.3 Darstellung des Chloridprofils

Nach der Methode der kleinsten Quadrate werden mit Hilfe der nicht linearen Regressionsanalyse die Werte für Diffusionskoeffizienten im instationären Zustand und der Chloridgehalt an der Oberfläche bestimmt. Die Darstellung der Regressionsanalyse kann über den Diffusionskoeffizienten, welcher durch die Steigung der Kurve sichtbar wird, oder durch die Tiefenstufe erfolgen, wie in Abbildung 15 ersichtlich ist.

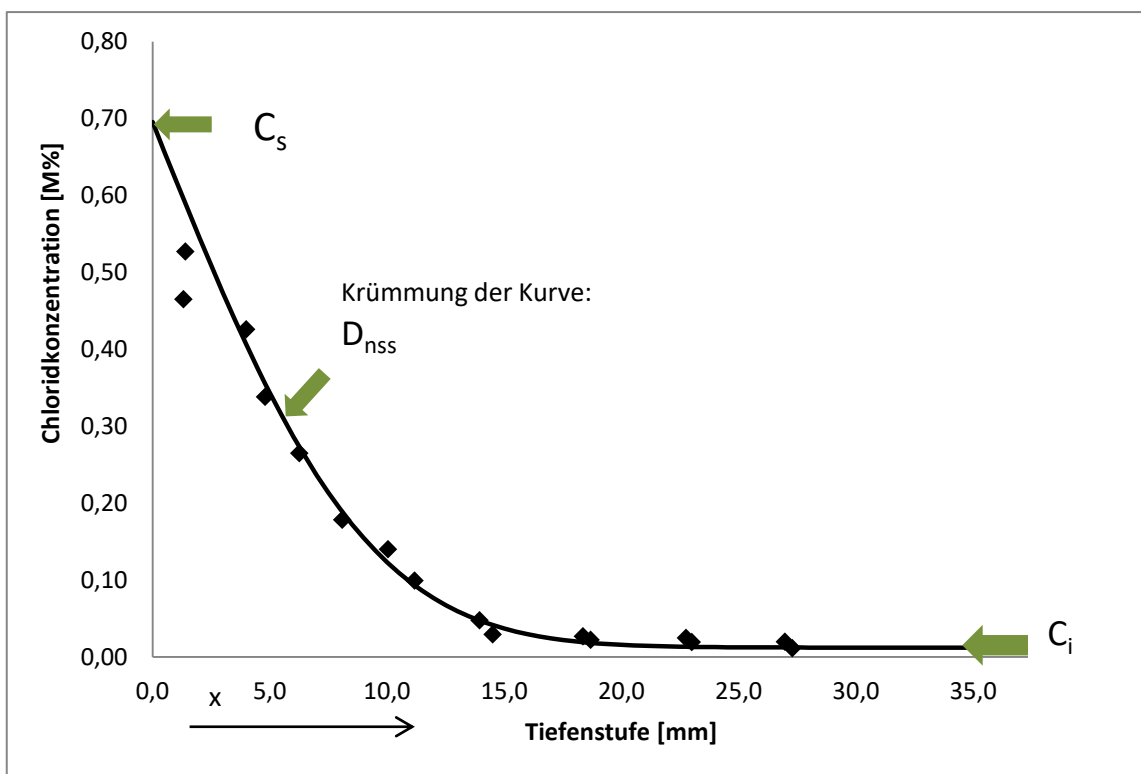


Abbildung 15 Darstellung eines Chloridprofils über die Tiefe

3.7.2 Lineare Regressionsanalyse

Die lineare Regressionsanalyse wird verwendet, um die Korrelation zwischen einer abhängigen Variable und einer unabhängigen Variable zu finden und Vorhersagen für das untersuchte Gebiet treffen zu können. Auf diese Arbeit bezogen bedeutet das, einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Chloridanalyse und den Ausgangskomponenten zu ermitteln und zu bewerten. Die Korrelation kann entweder auf eine einzelne unabhängige Variable bezogen werden, oder auf die Kombination von mehreren unabhängigen Variablen zur selben Zeit.

3.7.2.1 Einfache lineare Regressionsanalyse

Die einfache lineare Regressionsanalyse ist ein statistisches Modell um die Korrelation zwischen einer abhängigen Variable (Zielvariable) und einer unabhängigen Variable (Einflussvariable) zu untersuchen. Es wird untersucht, wie weit das Eintreten der Zielvariable durch die Einflussvariable erklärt werden kann.[30] Im Gegensatz zur nichtlinearen Regressionsanalyse wird hier nur auf Basis einer Variablen eine Gerade ermittelt, welche die Beziehung zwischen den Variablen am besten beschreibt (Gleichung 15).

Nach der Ermittlung der Geradengleichung wird das Bestimmtheitsmaß der Punktwolke zu der Gerade angegeben.

$$y = a + b * x + u, \quad a, b \in \mathbb{R}$$

Gleichung 15

y	abhängige Variable
x	unabhängige Variable
a, b	Parameter
u	Fehlervariable

Die Fehlervariable u umfasst alle unsystematischen, zufälligen Fehler, jedoch wird sie meistens gleich Null gesetzt, da angenommen wird, dass sich die Fehlervariablen im Mittel aufheben.[30]

3.7.2.2 Multiple lineare Regressionsanalyse

Bei der multiplen linearen Regressionsanalyse wird der gleichzeitige Einfluss von mehreren Einflussvariablen auf die Zielvariable untersucht und mittels Gleichung 16 beschrieben.[31]

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \dots + \beta_n * x_n + \varepsilon \quad \text{Gleichung 16}$$

y	abhängige Variable
x_i	unabhängige Variable
β_i	Parameter
ε	Error

Die Darstellung der multiplen linearen Regressionsanalyse erfolgt durch eine Regressions-Statistik. Die berechneten Parameter, wie zum Beispiel der Korrelationskoeffizient, das adjustierte Bestimmtheitsmaß oder der Standardfehler, müssen projektspezifisch interpretiert werden, um sinnvolle Aussagen treffen zu können. Das Bestimmtheitsmaß bei der multiplen linearen Korrelation wird größer, umso mehr unabhängige Variablen in die Berechnung mit eingehen. Deshalb wird das adjustierte Bestimmtheitsmaß verwendet, welches die Anzahl der eingegangenen Variablen berücksichtigt. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß nimmt in der Regel einen geringeren Wert an als das Bestimmtheitsmaß bei der einfachen linearen Regression. Auf die Interpretation und Diskussion dieser ermittelten Parameter wird im Kapitel 5.3.1 näher eingegangen.

3.7.3 Präzision

Um die Präzision, des in der ÖNORM EN 12390-11:2015 beschriebenen Verfahrens zu ermitteln, wurde eine Präzisionsprüfung von insgesamt 12 Laboren durchgeführt. Die dabei ermittelten Daten sind in Tabelle 12 ersichtlich. Diese sind anzuwenden, wenn eine einzelne Bestimmung des Diffusionskoeffizienten und der Oberflächenkonzentration pro Rezeptur durchgeführt wurde. Die Daten basieren auf dem Mittelwert aus vier Betonmischungen und drei Beanspruchungsverfahren. Bei Ergebnissen aus n Prüfungen sind die unten angeführten Werte zu modifizieren.[26]

Auf die durchgeführten Analysen sind die Standardabweichung und Präzision der Wiederholungsbedingungen anzuwenden. Der Variationskoeffizient für die Ergebnisse dieses Prüfverfahrens kann mit rund 15% bis 30% angenommen werden.[26]

Tabelle 12 Präzisionsdaten nach ÖNORM EN 12390-11

Parameter	Stufe	Wiederholbedingungen		Vergleichsbedingungen	
		sr (Standard- abweichung)	r (Präzision)	sR (Standard- abweichung)	R (Präzision)
D_{nss} (E-12)m ² /s	5,09	1,17	3,27	1,54	4,31
C_s m/m (nach Masse des Betons)	0,45	0,20	0,23	0,20	0,24
Präzision als Variations- koeffizient angegeben		CVr (%)	r (%)	CVR (%)	R (%)
D_{nss} (E-12) ±		23	65	33	92
C_s % ± (nach Masse des Betons)		13	37	19	54

Wiederholbedingungen:

Die Wiederholpräzision und Wiederholstandardabweichung beschreiben die gegenseitige Annäherung der Analyseergebnisse unter gleichbleibenden Bedingungen, wie in etwa dasselbe Labor, der gleiche Laborant oder das gleiche Gerät. [32]

Vergleichsbedingungen

Die Vergleichspräzision und Vergleichsstandardabweichung sind anzuwenden, wenn identische Proben mit einem festgelegten Analyseverfahren unter unterschiedlichen Bedingungen, wie zu verschiedenen Zeiten, von verschiedenen Laboren und Geräten, analysiert werden. [32]

4 Ergebnisse

4.1 Frischbeton

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13 Zusammenfassung der Ergebnisse der Frischbetonprüfungen

Rezeptur	Lufttemperatur [°C]	Frischbetontemperatur [°C]	Ausbreitmaß [cm]	LP-Gehalt [%]	Frischbetonrohichte [kg/m ³]
V1.1	20,0	20,0	52	0,6	2395
V1.2	19,2	19,9	50	0,5	2397
V1.3	19,7	20,4	52	0,5	2389
V2.1	21,4	20,7	50	0,5	2408
V2.2	20,0	19,8	53	0,5	2408
V2.3	18,5	18,9	55	0,4	2410
V3.1	19,5	20,6	49	0,8	2429
V3.2	20,3	19,7	50	0,9	2424
V3.3	21,6	27,3	52	0,8	2444

Das Ausbreitmaß wurde etwa 10 min nach Wasserzugabe bestimmt. Die Zielkonsistenz F52 wurde bei allen Mischungen erreicht.

4.1.1 Luftgehalt des Frischbetons

Der Luftgehalt wurde als standardmäßige Frischbetonprüfung geprüft und ist sehr gering, wie in Abbildung 16 ersichtlich. Es wurde ein Entschäumer verwendet.

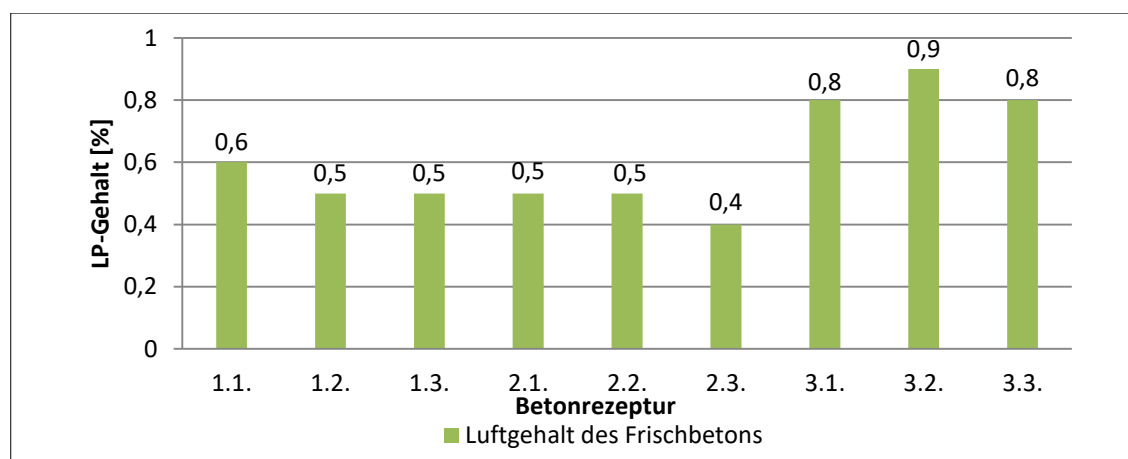


Abbildung 16 Luftgehalt des Frischbetons

4.1.2 Frischbetonrohddichte

Die Frischbetonrohddichte ist in Abbildung 17 dargestellt und wurde als standardmäßige Frischbetonprüfung überprüft. In den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Frischbetonrohddichte mit abnehmendem W/B_G -Wert zunimmt, jedoch bei zunehmendem AHWZ-Gehalt nimmt die Dichte leicht ab. Die Rezepturen 1.1. und 2.3. weisen hier leichte Abweichungen vom Schema auf.

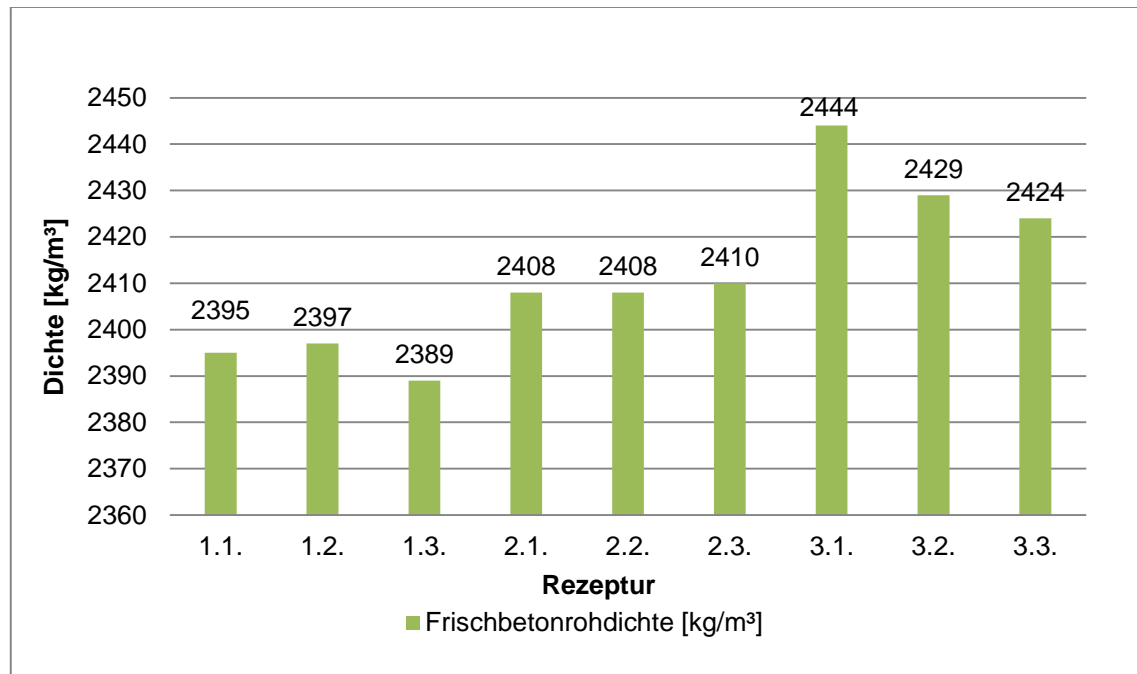


Abbildung 17 Vergleich der Frischbetonrohddichte mit der Rohddichte des Betons

4.2 Festbeton

4.2.1 Offene Porosität

Bei der Prüfung der Porosität wird ersichtlich, dass die Rezepturen mit einem abnehmenden W/B_G -Wert, wie zu erwarten, eine geringere offene Porosität aufweisen und somit die Prüfkörper ein geringeres Porenvolumen enthalten. Wie in Tabelle 14 dargestellt ergaben, bei jedem der drei gewählten W/B -Werte, die Proben mit dem höchsten AHWZ-Anteil die geringere offene Porosität, trotz zunehmendem W/B_a -Wert.

Die Porosität wurde nach 270 Tagen Wasserlagerung erneut gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 aufgelistet. Beim Vergleich mit den Resultaten der Porositätsprüfung nach 28 Tagen ist zu erkennen, dass die Ergebnisse bei der Prüfung (nach 28 Tagen bzw. nach 270 Tagen) ähnliche Werte ergeben, jedoch die offene Porosität teilweise leicht zugenommen hat. Diese Ergebnisse widersprechen den Erwartungen für Betone mit AHWZ und sind mit Vorbehalten zu betrachten. Es ergeben sich Versuchstechnische Fragezeichen bezüglich der Probenbehandlung, etwa beim Scheiden oder bei der Lagerung der Probekörper. Die Lagerung der zu prüfenden Probekörper war nicht vollkom-

men ident. Die zwei Prüfungen wurden von zwei unterschiedlichen Personen durchgeführt und daraus ergibt sich zusätzlich eine höhere statische Unsicherheit, obwohl das Prüfverfahren gleich bleibt.

Tabelle 14 Messung der Porosität und Rohdichte nach 28d (n=4)

	Rohdichte 28d [kg/m³]	Standard- abweichung σ	Wasserauf- nahme [%]	Standard- abweichung σ	offene Porosität 28d [%]	Standard- abweichung σ
1.1.	2306	12,7	6,0	0,21	13,9	0,42
1.2.	2331	9,7	5,5	0,16	12,8	0,33
1.3.	2313	2,6	5,3	0,08	12,3	0,18
2.1.	2367	3,8	4,8	0,05	11,4	0,11
2.2.	2352	10,5	4,9	0,18	11,6	0,37
2.3.	2365	10,6	4,4	0,15	10,4	0,32
3.1.	2375	6,9	4,3	0,09	10,1	0,19
3.2.	2383	10,9	4,1	0,13	9,7	0,26
3.3.	2385	4,2	3,7	0,13	8,8	0,30

Tabelle 15 Messung der Porosität und Rohdichte nach 270d (n=4)

	Rohdichte 270d [kg/m³]	Standard- abweichung σ	Wasserauf- nahme [%]	Standard- abweichung σ	offene Porosität 270d [%]	Standard- abweichung σ
1.1.	2286	20,1	6,2	0,32	14,3	0,61
1.2.	2285	9,7	6,1	0,20	13,9	0,41
1.3.	2287	7,4	5,6	0,13	12,8	0,28
2.1.	2323	8,9	5,4	0,14	12,5	0,29
2.2.	2329	17,6	4,9	0,30	11,5	0,62
2.3.	2341	17,2	4,5	0,33	10,5	0,71
3.1.	2352	7,8	4,2	0,07	10,0	0,16
3.2.	2380	7,1	3,5	0,17	8,4	0,39
3.3.	2390	7,3	3,3	0,10	7,8	0,23

4.2.2 Wassereindringtiefe „WU“

Die Ergebnisse der WU-Prüfung (Abbildung 18) zeigen, dass der W/B-Wert einen großen Einfluss auf die Eindringtiefe des Wassers in den Beton hat. Zusätzlich ist aber auch eine Tendenz dahin zu erkennen, dass das AHWZ eine Reduktion der Eindringtiefe bewirkt. Diese Ergebnisse korrelieren mit der Porosität nach 28 Tagen, denn ein geringerer Anteil an Poren bedeutet auch ein erschwertes Eindringen des Wassers.

Tabelle 16 Ergebnisse der WU-Prüfung

Rezeptur	Wassereindringtiefe [mm]			Mittelwert	Standardabweichung
1.1.	18,9	10,6	-	14,8	4,15
1.2.	12,0	10,0	10,5	10,8	0,85
1.3.	8,8	nicht erkennbar	9,2	9,0	0,2
2.1.	7,4	8,4	-	7,9	0,5
2.2.	6,8	6,2	4,6	5,9	0,93
2.3.	nicht erkennbar	6,4	7,2	6,8	0,4
3.1.	7,4	6,8	-	7,1	0,3
3.2.	7,0	5,4	7,0	6,5	0,75
3.3.	3,6	3,4	2,4	3,1	0,48

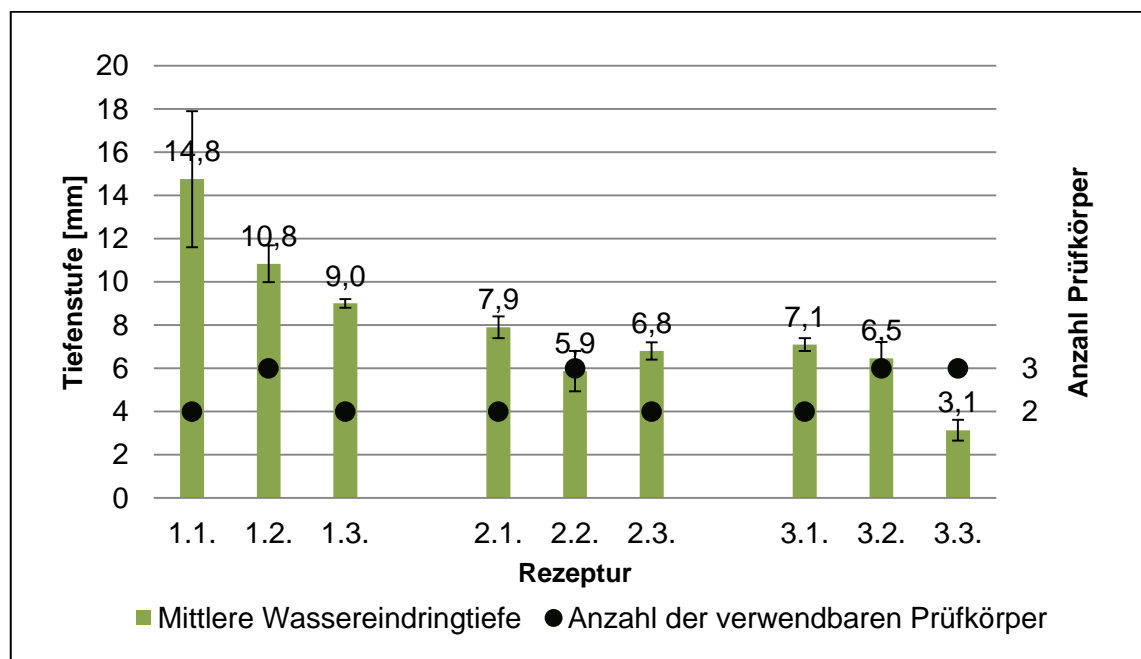


Abbildung 18 Ergebnisse der WU-Prüfung

4.2.3 Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle 17 aufgelistet und in Abbildung 19 dargestellt. Bei allen Rezepturen findet eine Steigerung der Druckfestigkeit mit zunehmenden Alter statt (Abbildung 20), wobei die Prüfkörper mit dem höheren AHWZ-Gehalt eine größere prozentuelle Steigerung aufweisen als jene mit nur 20% AHWZ-Anteil, da vor allem durch das AHWZ die Festigkeit mit dem Alter noch zunimmt. Allerdings wird bei den Rezepturen mit einem höheren AHWZ-Gehalt die Festigkeit der Rezepturen mit höherem Zementanteil (jeweils V1.) nicht erreicht. Die erreichten Druckfestigkeitsklassen nach 28d werden in Abbildung 21 dargestellt.

Tabelle 17 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach 28d und 119d

	Alter [d]	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Druckfestigkeit nach Tagen [N/mm ²]	28	43,2	42,2	32,6	57,3	55,2	47,0	76,5	78,7	69,9
	28	44,3	41,0	31,5	57,4	54,3	48,3	78,7	75,8	70,5
	28	45,6	42,4	33,5	58,2	53,5	47,3	80,6	78,7	67,1
	119	51,4	49,1	37,8	64,2	60,6	53,2	77,5	80,1	78,1
	119	50,7	48,2	38,3	64,9	61,9	53,1	80,7	80,3	74,2
	119	50,4	48,8	39,8	62,3	61,8	53,5	81,2	79,2	74,5
Mittelwert	28	44,4	41,9	32,5	57,6	54,3	47,6	78,6	77,7	69,2
	119	50,9	48,7	38,6	63,8	61,4	53,3	79,8	79,9	75,6
Standardabweichung	28	1,2	0,8	1,0	0,5	0,8	0,3	2,1	1,6	1,8
	119	0,5	0,4	1,0	1,3	0,8	0,2	2,0	0,6	2,2

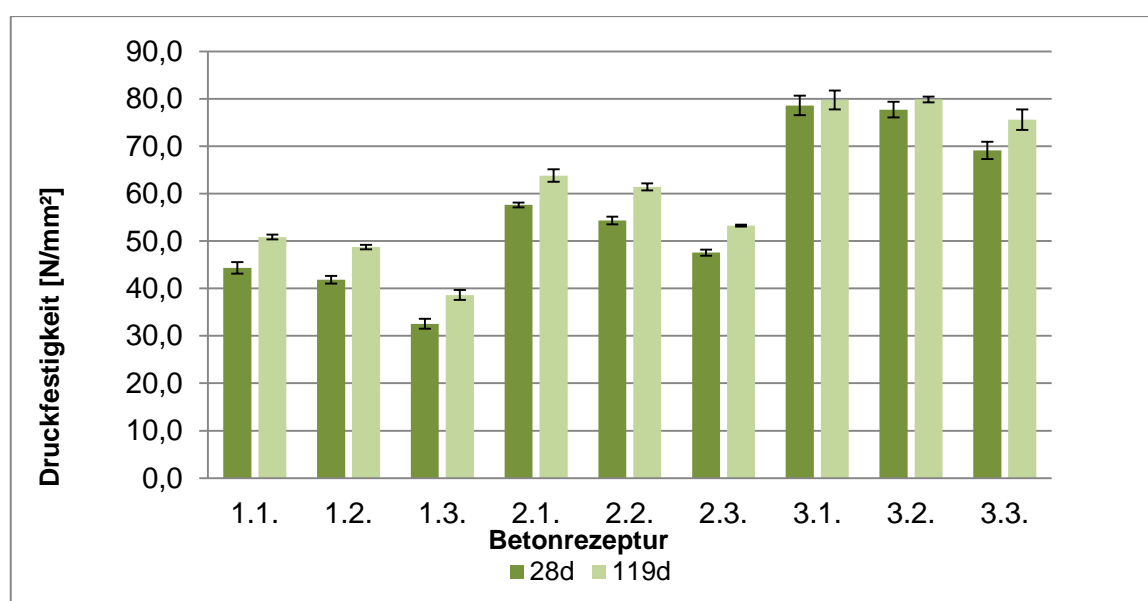


Abbildung 19 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung

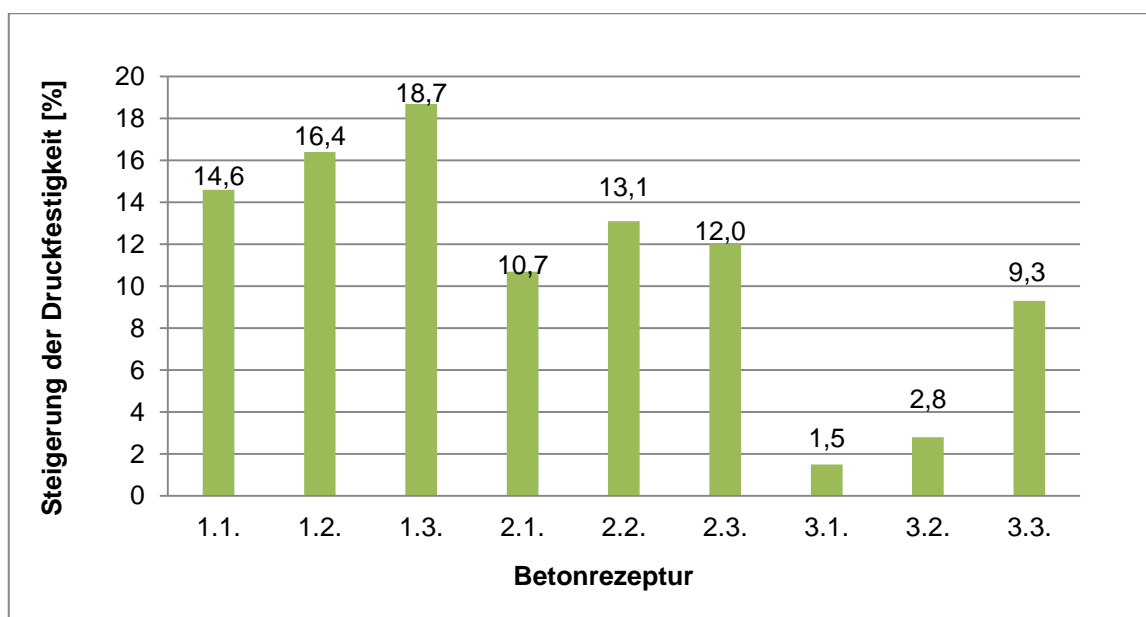


Abbildung 20 prozentuelle Steigerung der Druckfestigkeit (28d auf 119d)

Die Festigkeitsklassen wurden gemäß ÖNORM B 4710-1:2018 eingeteilt:

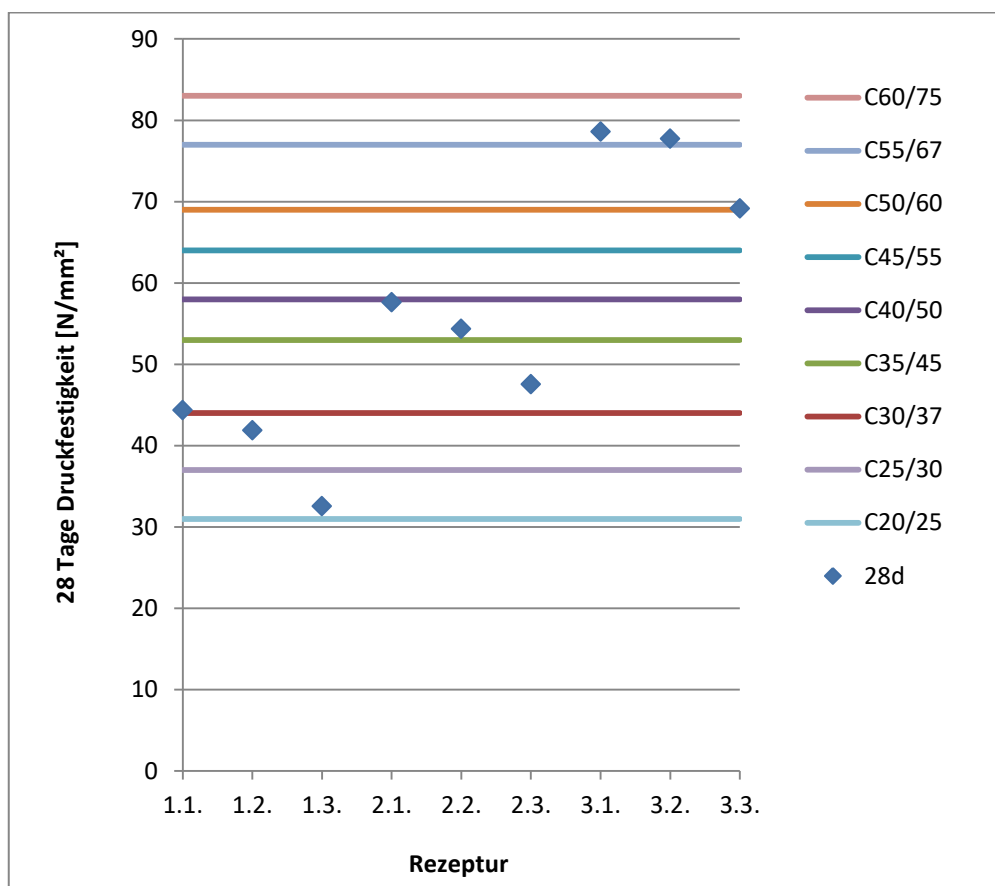


Abbildung 21 erreichte Druckfestigkeitsklassen

Rezeptur	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Festigkeitsklasse	C30/37	C25/30	C20/25	C35/45	C35/45	C30/37	C55/67	C55/67	C50/60

4.2.4 Anfänglicher Chloridgehalt

Der anfängliche Chloridgehalt ist in einem Probekörper vorhanden bevor die Chlorideindringungsprüfung. Dieser nahm relativ niedrige Werte an und wird in Masseprozent des Betons angegeben. Es wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt, wobei die Analyse wiederholt werden musste, um Einflüsse auf den Chloridgehalt von Sulfiden in den Proben zu minimieren. Der anfängliche Chloridgehalt wird in Abbildung 22 dargestellt. Es scheint eine geringe Korrelation zwischen dem anfänglichen Chloridgehalt C_i und dem Zementgehalt vorhanden zu sein (Abbildung 23).

Rezeptur	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
[M%]	0,023	0,012	0,0095	0,013	0,0095	0,010	0,013	0,011	0,008

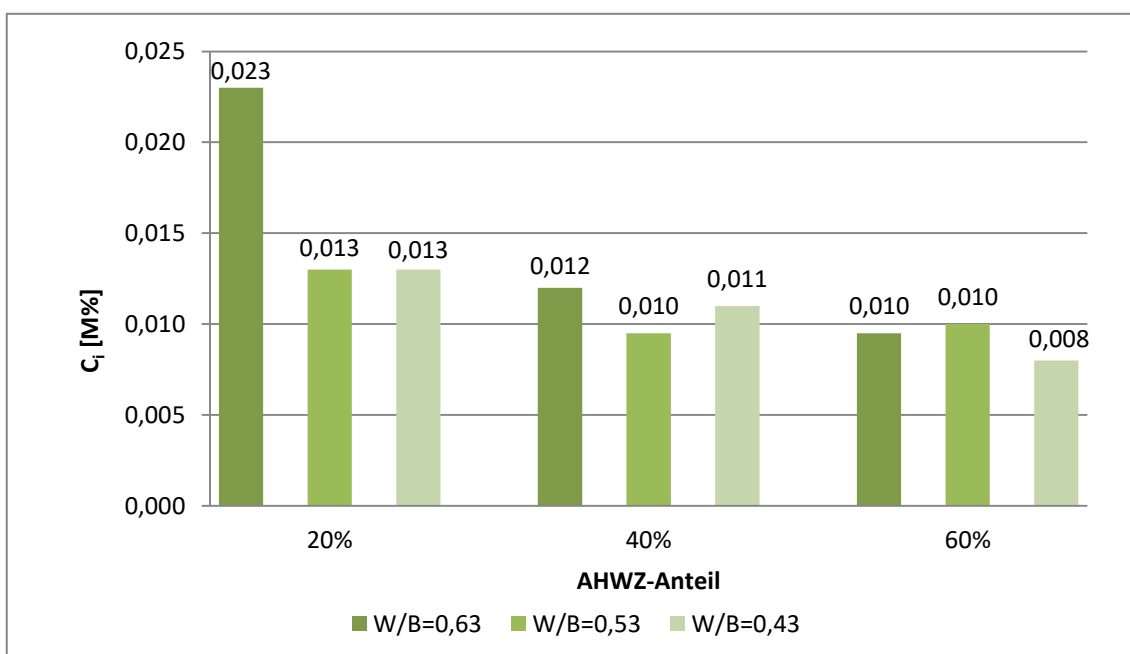


Abbildung 22 Ergebnisse der Analyse des anfänglichen Chloridgehalts C_i

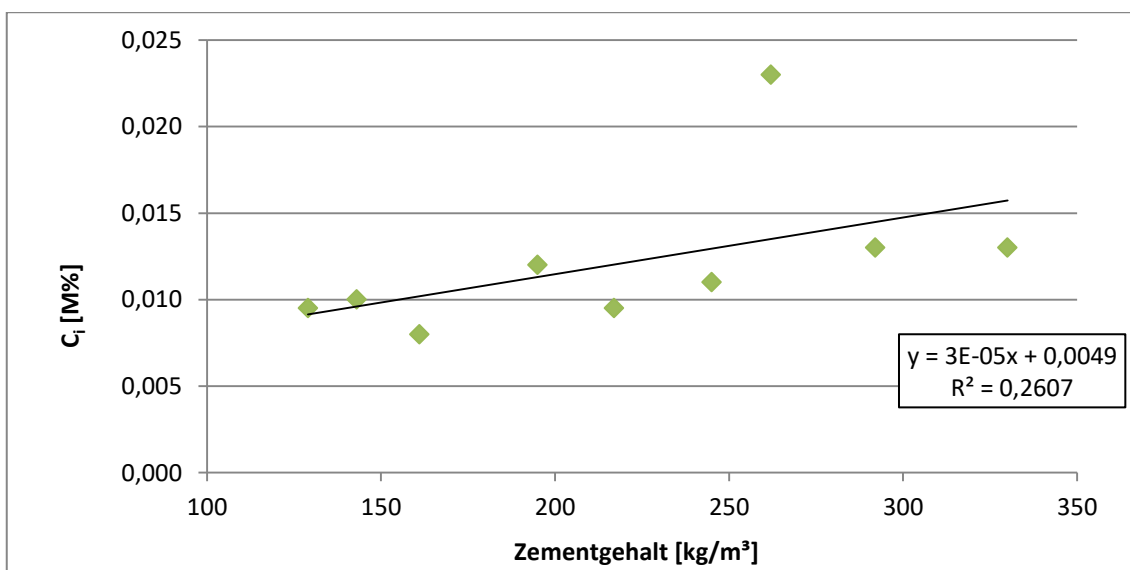


Abbildung 23 Korrelation anfänglicher Chloridgehalt C_i mit dem Zementgehalt

4.2.5 Ergebnisse der Chloridanalysen

In den nachfolgenden Tabellen und Diagrammen steht das „V“ vor der Rezepturbezeichnung für die Lagerung mit vollständig untergetauchten Probekörpern und das „H“ für jene Probekörper, welche nur „halb“ bzw. teilweise eingetaucht wurden. Pro Wasser-/Bindemittelwert wird ein Diagramm mit den Ergebnissen der Chloridanalyse angeführt (Abbildung 24-Abbildung 26), die restlichen grafischen Darstellungen der neun geprüften Betonrezepturen sind im Anhang ersichtlich.

Durch die Regressionsanalysen werden der oberflächliche Chloridgehalt und der Chloriddiffusionskoeffizient ermittelt, wobei der Chloriddiffusionskoeffizient die entscheidende Kenngröße für das Eindringen des Chlorids in den Beton ist. Umso kleiner der ermittelte Diffusionskoeffizient ist, umso geringer ist die Eindringtiefe des Chlorids in den Beton.

In der Tabelle 18 sind die Ergebnisse der nicht-linearen Regressionsanalyse zusammengefasst. Das Bestimmtheitsmaß erfüllt in allen Fällen die Bedingung der ÖNORM EN 12390-11 größer als 0,95 zu sein. Der Chloriddiffusionskoeffizient ist am größten bei der Rezeptur mit einem W/B-Wert von 0,63 und einem AHWZ-Gehalt von 20% ($6,41E-12$ m²/s) und nimmt den geringsten Wert bei der Rezeptur mit einem W/B_G-Wert von 0,53 und einem AHWZ-Gehalt von 60% an ($1,81E-12$ m²/s). Ähnlich gering fällt D_{nss} für die Rezeptur 1.3 ($2,01E-12$ m²/s) und die Rezepturen 3.2 und 3.3 aus ($2,21E-12$ m²/s).

Tabelle 18 Zusammenfassung der Ergebnisse für C_s und D_{nss} mittels der nichtlinearen Regressionsanalyse

	C_i [M%]	C_s [M%]	D_{nss} [m ² /s]	$\sum(C_{m,j} - C_{r,j})^2$	R^2
V1.1	0,023	0,678	6,41E-12	0,0020	0,99
H1.1	0,023	0,729	5,61E-12	0,0013	0,99
V1.2	0,012	0,705	3,21E-12	0,0016	0,99
V1.3	0,010	0,798	2,01E-12	0,0002	1,00
V2.1	0,013	0,587	5,61E-12	0,0024	0,98
H2.1.	0,013	0,606	5,41E-12	0,0006	0,99
V2.2	0,010	0,633	3,61E-12	0,0006	0,99
V2.3	0,010	0,746	1,81E-12	0,0002	1,00
V3.1	0,013	0,609	4,01E-12	0,0004	0,99
H3.1	0,013	0,861	3,61E-12	0,0017	0,99
V3.2	0,011	0,772	2,21E-12	0,0003	0,99
V3.3	0,008	0,515	2,21E-12	0,0002	1,00

Die, in den Diagrammen dargestellten, grünen Quadrate sind die gemessenen Chloridgehalte der zwei untersuchten Probekörper einer Rezeptur (A und B), mittels denen die angenäherte Kurve ermittelt wurde. Die orange Kurve basiert auf den ermittelten Werten für C_s und D_{nss} , sowie dem gemessenen anfänglichen Chloridgehalt und stellt für jede Tiefenstufe x eine zu erwartende Chloridkonzentration dar, welche in Masseprozent des Betons angegeben wird. Die Nullpunkte, also Tiefen bis zu denen das Chlorid eingedrungen ist, der Ergebnisse variieren zwischen ca. 12 mm und 23 mm.

Die gemessenen Werte der ersten Schicht werden in den Diagrammen mit dargestellt. Diese sind jedoch nicht in die Berechnung des Diffusionskoeffizienten und des oberflächigen Chloridgehalts miteinbezogen worden um ein vollständiges Vorgehen nach der Norm zu gewährleisten.

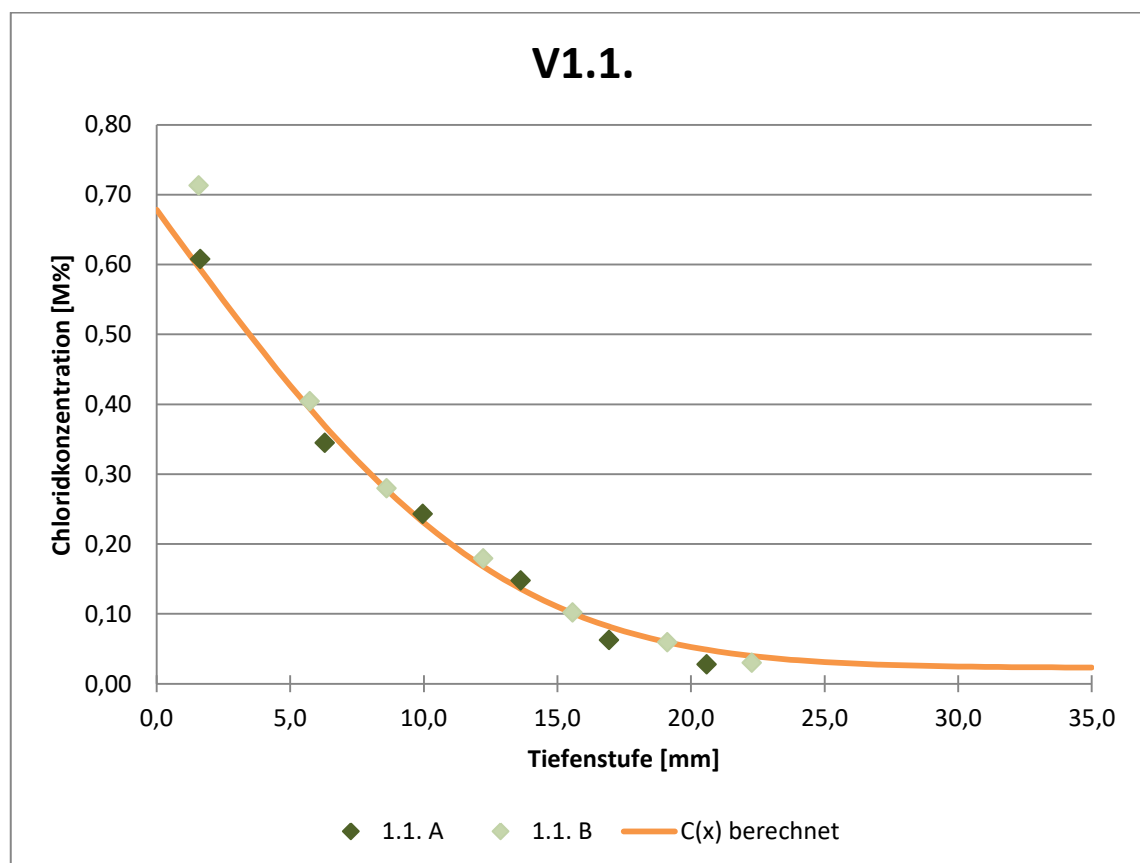


Abbildung 24 Ergebnis der Regressionsanalyse für die Variante V1.1.

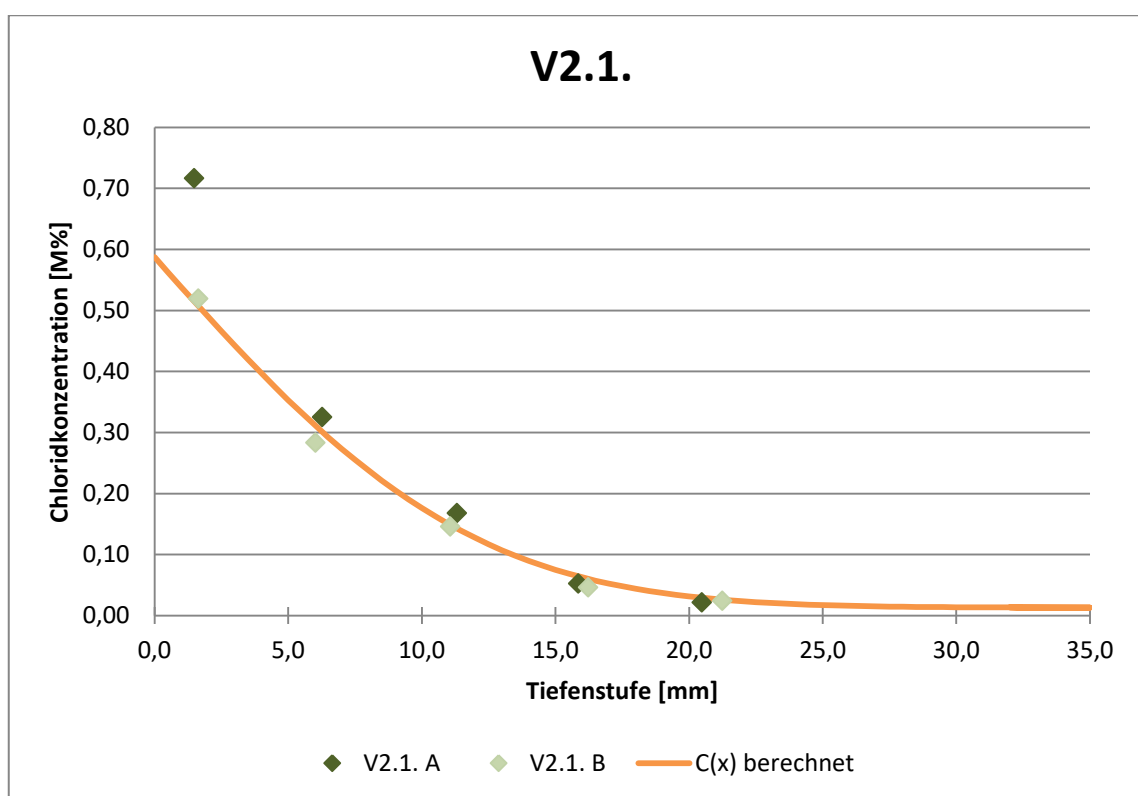


Abbildung 25 Ergebnis der Regressionsanalyse für die Variante V2.1

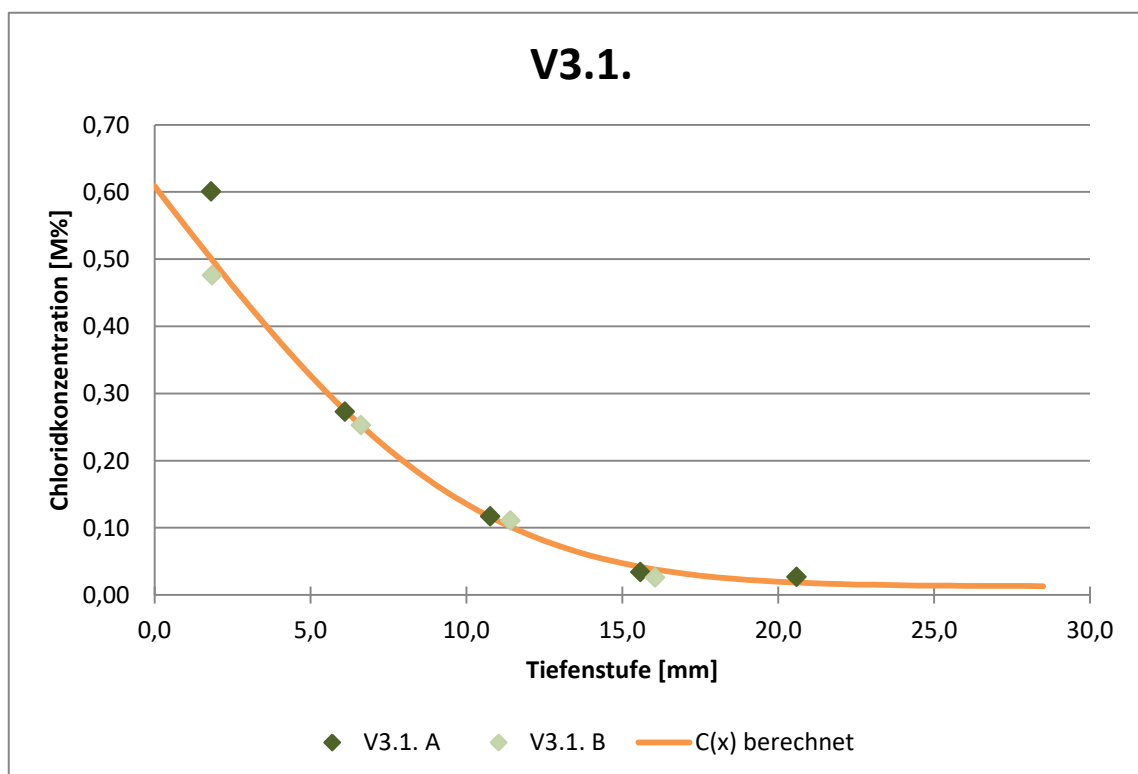


Abbildung 26 Ergebnis der Regressionsanalyse für die Variante V3.1

Die ermittelten Werte für den oberflächigen Chloridgehalt werden in Abbildung 28 dargestellt. Es ist die Tendenz zu erkennen, dass sich mit zunehmendem AHWZ-Gehalt auch der Wert für den Chloridgehalt an der Oberfläche erhöht, was dadurch zu erklären ist, dass die Steigung der Kurve bei einem geringeren Diffusionskoeffizienten zunimmt und somit die Y-Achse, welche in diesem Fall die Betonoberfläche darstellt, weiter oben schneidet.

In der Darstellung der Ergebnisse des Chloriddiffusionskoeffizienten (Abbildung 27) ist eine Abnahme des Koeffizienten mit geringer werdendem Wasser-Bindemittelgehalt zu erkennen. Deutlich signifikanter erscheint jedoch der Einfluss des AHWZ-Gehaltes auf den ermittelten Diffusionskoeffizienten, denn diese Tendenz ist bei jedem der drei untersuchten Wasser-Bindemittelwerte zu erkennen. Die Koeffizienten der Rezepturen V1.2 und V1.3 (jeweils W/B = 0,63) sind sogar geringer, als jener Koeffizient der Rezeptur V3.1 (W/B = 0,43).

Die drei höchsten Werte des Diffusionskoeffizienten ergeben sich bei den Rezepturen mit nur 20% AHWZ-Gehalt und liegen bei einem Wert zwischen $6,41\text{E-}12$ [m^2/s] und $4,01\text{E-}12$ [m^2/s]. Die drei geringsten Werte für D_{nss} werden von der Rezeptur 2.3 mit einem Wert von $1,81\text{E-}12$ [m^2/s] der Rezeptur 1.3 mit einem Wert von $2,01\text{E-}12$ [m^2/s] und den Rezepturen 3.2 und 3.3 mit je $2,21\text{E-}12$ [m^2/s] erreicht.

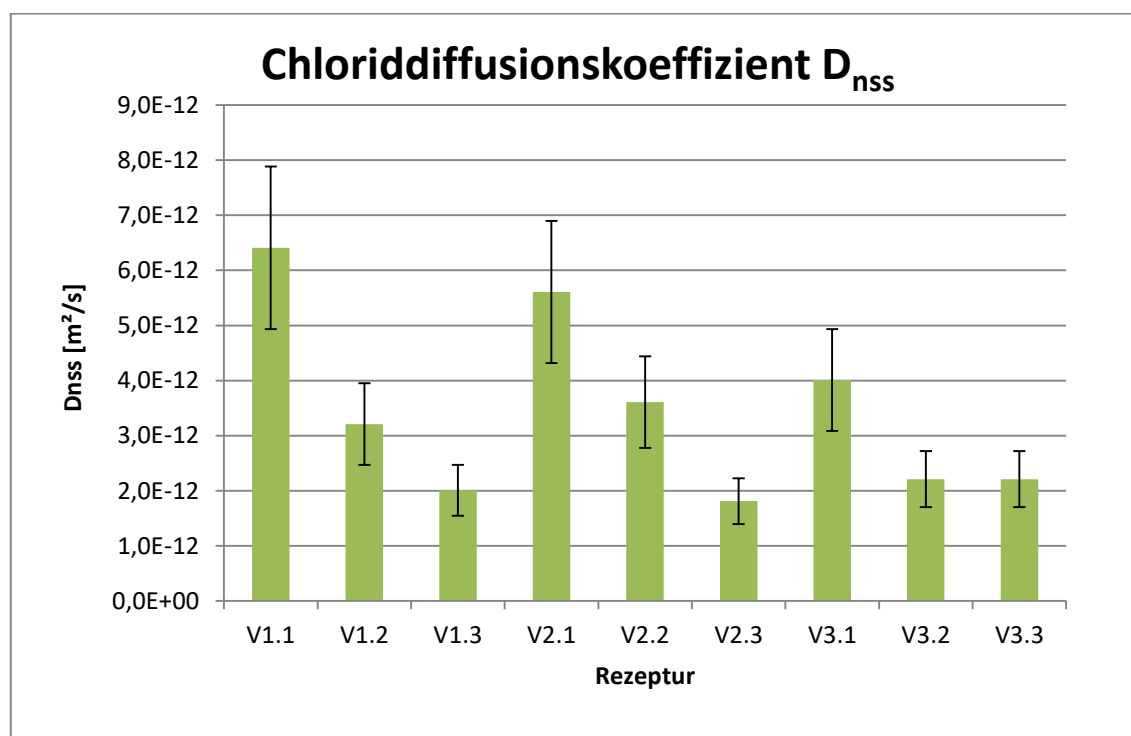


Abbildung 27 Darstellung der ermittelten Diffusionskoeffizienten

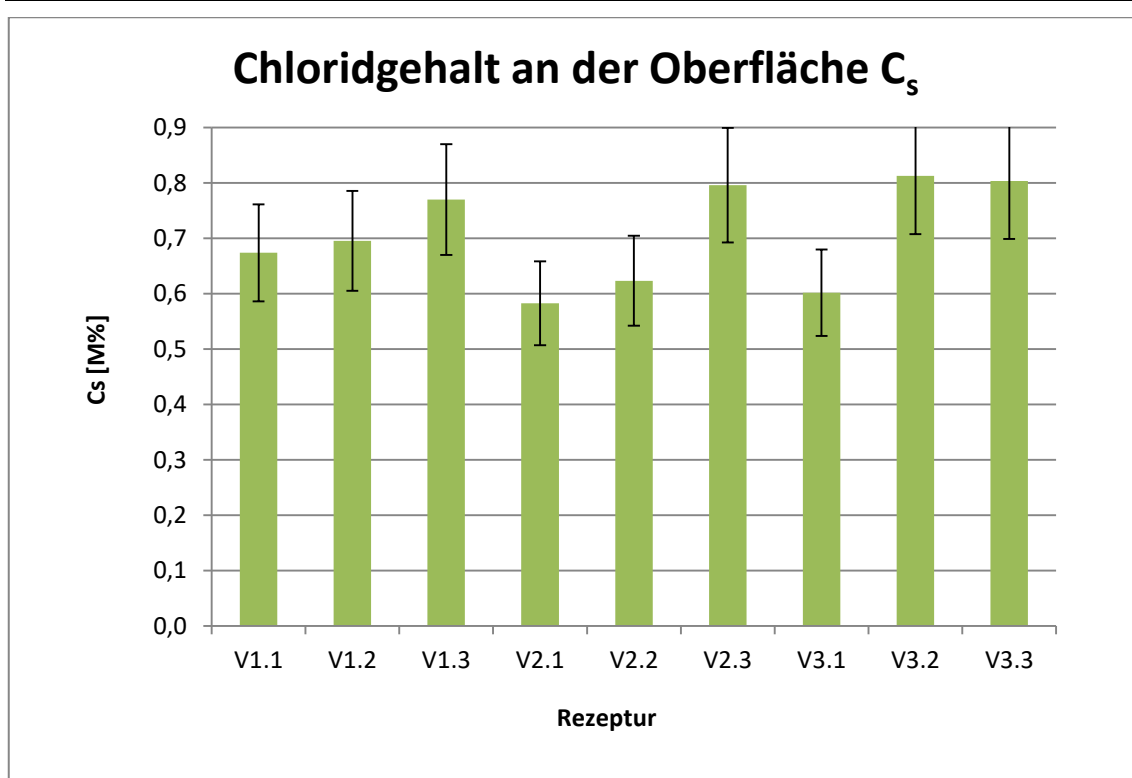


Abbildung 28 Darstellung des ermittelten Chloridgehalts an der Betonoberfläche

5 Diskussion

In diesem Kapitel wird versucht die ermittelten Werte und Ergebnisse der Chloridanalyse zu interpretieren, den Einfluss gewisser Vorgaben und Annahmen zu beurteilen und die Korrelationen der einzelnen Einflussfaktoren zu diskutieren.

5.1 Berücksichtigung des k -Wertes

Eine entscheidende Rolle in den durchgeführten Versuchen spielt das Wasser-/Bindemittel Verhältnis, hierbei kann zwischen einem Gesamtbindemittelgehalt B_G und einem anrechenbaren Bindemittelgehalt B_a unterschieden werden. Durch die gezielte Ersetzung des Zements durch AHWZ ist die Berücksichtigung eines k -Wertes von 0,8 gemäß ÖNORM EN 4710-1:2018 ein entscheidender Faktor, um die tatsächliche Menge an benötigtem AHWZ zu ermitteln. Die abgestufte Anrechnung des AHWZs in der ÖNORM EN 4710-1:2018 beruht darauf, dass die Festigkeitsentwicklung des Betons mit Zusatzstoffen, wie in diesem Fall AHWZ aus Kalkstein, aufbereiteter Flugasche und aufbereitetem Hüttensand (15:15:70 in M-%), nicht der des reinen Zements entspricht. Das spiegeln auch die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung für jeden konstanten W/B_G -Wert, wie in Abbildung 19 ersichtlich, wieder. In den Versuchen ist es jedoch das Ziel, die variierenden Rezepturen bestmöglich bei Chloridbelastung vergleichbar zu machen, deshalb wird bei der Erstellung der Rezepturen das Wasser-Bindemittelverhältnis mit dem Gesamtbindemittelwert B_G berechnet und somit ein k -Wert von 1,0 verwendet (Tabelle 19). Dadurch sind die Werte für das Gesamtbindemittel bzw. das Leimvolumen, welche mit der Luft das Volumen der Zementsteinmatrix ergeben, für eine W/B -Kategorie annähernd konstant. Die mit dem anrechenbaren Bindemittel B_a (k -Wert=0,8) berechneten W/B -Werte liegen damit etwas über dem vorgegebenen Maximalwert für die jeweilige Expositionsklasse der Norm. Trotz des größer werdenden W/B_a -Wertes nimmt der Diffusionskoeffizient ab und somit kann der Einfluss des AHWZs noch etwas positiver angesehen werden, als beim W/B_G -Wert.

Tabelle 19 W/B -Werte Gegenüberstellung

Rezeptur	W/B_G $k=1,0$	W/B_a $k=0,8$
V1.1		0,65
V1.2	0,63	0,68
V1.3		0,71
V2.1		0,55
V2.2	0,53	0,58
V2.3		0,60
V3.1		0,45
V3.2	0,43	0,47
V3.3		0,49

5.2 Einfluss des verwendeten Berechnungsmodells

In der Literatur sind viele Modelle zur Berechnung eines Diffusionskoeffizientens zu finden, wie in etwa das modifizierte Diffusionsmodell von Gehlen [33] oder das Modell von Ungricht [34]. Diese Modelle berücksichtigen nicht konstante Randbedingungen, wie sie bei Infrastrukturbauwerken oft vorhanden sind. Bei Prüfungen im Labor sind die Umgebungsbedingungen jedoch meist konstant oder schwanken in nur sehr geringen Maßen (ist vom verwendeten Prüfverfahren abhängig). Die meisten Modelle basieren auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz, jedoch ist der Diffusionskoeffizient im Fick'schen Diffusionsgesetz vom Alter des Betons bei der Prüfung unabhängig und es wurde bereits in einigen Forschungen festgestellt, dass der Diffusionskoeffizient eine zeitabhängige Größe ist. Kapteina führt zwei Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit an, einen mathematischen und empirischen Ansatz. Der Diffusionskoeffizient wird dabei als ein integraler Mittelwert des momentanen Diffusionskoeffizienten beschrieben. Dabei entsteht jedoch das Problem, dass die Versuchsdauer bei Einlagerungsprüfungen meist zu lange ist um den Verlauf des „momentanen“ Diffusionskoeffizienten zu kennen.[4]

Das in der ÖNORM EN 12390-11 beschriebene Berechnungsmodell zur Ermittlung des Diffusionskoeffizienten beinhaltet die Zeitabhängigkeit nicht. Die Versuchsdauer beträgt definierte 90 Tage. Somit müssten weitere Prüfungen mit zusätzlichen Prüfdauern durchgeführt werden wie es Lality [17] in seiner Diplomarbeit beschreibt. Der Rapid Migration Test im elektrischen Feld wäre eine weitere Möglichkeit, spiegelt jedoch die natürlichen Bedingungen nicht wieder. Dabei werden Faktoren, wie in etwa das Einbinden von Chlorid in unlösliche Verbindungen, nicht genügend erfasst oder es wird eventuell eine zu große Vereinfachung der Bedingungen angenommen. (Kapitel 2.4.1.2)

Grundsätzlich ist darauf zu achten, welcher Diffusionskoeffizient in die Berechnung mit eingeht bzw. ermittelt wird. Nach dem AiF-Modell und dem Modell von Lay [4] wird der zeitabhängige Diffusionskoeffizient als $D_{app}(t)$, scheinbarer Diffusionskoeffizient von Beton, bezeichnet, nach Gehlen [4] als $D_{Eff,C}$, effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t . Dabei ist nicht nur die Bezeichnung unterschiedlich, sondern auch die Berechnung der einzelnen Werte.

In dieser Arbeit wurde der zeitunabhängige instationäre Diffusionskoeffizient D_{nss} , wie in der ÖNORM EN 12390-11 beschrieben verwendet, da die Prüfkörper im Labor hergestellt und geprüft wurden.

5.2.1 Verwendbare Schichten des Chlorid-Profiles

Die ÖNORM EN 12390-11 beschreibt die Vorgehensweise, wie die einzelnen Schichten des Chloridprofils zu Schneiden sind (vgl. Kapitel 3.5.4.4). Dabei wird die Einschränkung vorgenommen, dass die erste Schicht nicht in die Berech-

nung des Diffusionskoeffizienten miteingehen darf. Untersuchungen [33] ergeben tatsächlich abweichende Ergebnisse im Oberflächenbereich der mit Chlorid beaufschlagten Seitenfläche zu jenen der ermittelten Regressionskurve. Um diese Fehlerquelle zu eliminieren schreibt die Norm vor, die erste Schicht von 0-1 mm nicht in die Berechnung miteinfließen zu lassen. Kapteina beschreibt dazu ein Modell der Abweichungen von oberflächennahen Chloridkonzentrationen (Abbildung 29). Dabei wird angenommen, dass es bei Spritzwasserbeanspruchung zu einer Abweichung vom Fick'schen Diffusionsgesetz kommt, die oberflächliche Schicht durch Karbonatisierung beeinflusst wird und Chloride in der Oberflächenzone wieder ausgespült werden können oder verdunsten.

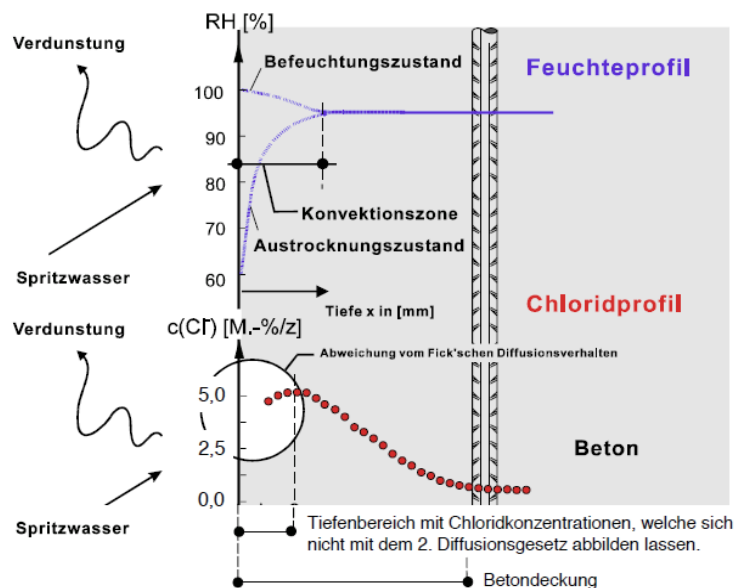


Abbildung 29 Feuchte- und Chloridprofil bei Spritzwasserbeanspruchung [4]

Diese Bedingungen sind jedoch nicht gegeben, wenn der Prüfkörper 90 Tage durchgehend in einer Chloridlösung gelagert wird, da dort keine Austrocknung, Verdunstung und erneute Beaufschlagung mit Wasser gegeben ist. Eine Karbonatisierung und Auslaugung findet hingegen auch unter Wasser in geringem Maße statt, deren genauer Einfluss auf die Oberfläche des Betons ist schwer zu ermitteln. Die Chloridanalyse eines Forschungsprojekt der Technischen Universität Graz, bei welchem Chloridprofile mit sehr geringen Schichtdicken ($<0,5$ mm) angefertigt wurden, zeigten sich keine signifikanten Abweichungen des Chloridgehalts im oberflächennahen Bereich.[35] Die verwendeten Schichten der Prüfkörper sind mit ca. 3 mm dicker als die in der Norm empfohlen 1-2 mm und der erste ermittelte Wert repräsentiert somit eine Tiefenstufe von ca. 4 mm. Deshalb stellt sich hier die Frage, ob es sinnvoll ist, bei im Labor gelagerten Prüfkörpern, den analysierten Wert der obersten Schicht nicht in die Berechnung des Diffusionskoeffizienten miteinzubeziehen, da dieser mehr als nur die erste Schicht laut Norm umfasst. In den angeführten Ergebnissen ist der Wert der ersten Schicht jedoch nicht miteingeflossen, um möglichst konform mit der Norm zu bleiben. Der Vergleich des Diffusionskoeffizienten mit und ohne Berücksichtigung des ersten Wertes wird in Kapitel 5.3.4 beschrieben.

5.2.2 Einfluss der Rand- und Umweltbedingungen

5.2.2.1 Expositionsbedingungen

Die Expositionsbedingungen, welchen ein Bauwerk ausgesetzt ist, sind einerseits der Niederschlag, die Chloridbeaufschlagung, die relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Wind [11]. Diese Umweltbedingungen sind schwer zu erfassen und in Labor-Prüfverfahren nachzubilden, deshalb sind oft Feldversuche notwendig um die realen, natürlichen Bedingungen zu simulieren. Um die jahreszeitlichen Schwankungen der Chloridbelastung auf Betonbauteile erfassen zu können, gibt es Studien [4] mit zyklischen Beaufschlagungsphasen und Trocknungsphasen. Diese Untersuchungen [36][4] kommen zu dem Ergebnis, dass bei der die effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten der zyklisch beaufschlagten Probekörper geringer sind, als jene Prüfkörper mit konstanter Beaufschlagung. Somit können die realen Umgebungsbedingungen, denen ein Betonbauteil ausgesetzt ist, positiv auf den Chloridwiderstand wirken und die Prüfbedingungen im Labor stellen ein ungünstigeres Szenario dar.

5.2.2.2 Konzentration der NaCl-Lösung

Die verwendete Prüflösung laut ÖNORM EN12390-11:2015 ist mit ihrem Gehalt an 3%-NaCl an Meerwasser angelehnt. Die Konzentration des angreifenden Chlorids in Form von Tausalz ist abhängig von der verwendeten Menge und Häufigkeit, welche von den klimatischen Bedingungen abhängig sind und somit variieren können. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Forschungsergebnisse gewährleisten zu können ist es sinnvoll die Prüflösung mit 3%-NaCl zu verwenden.

5.2.2.3 Sättigung des Betons

Die Transportvorgänge im Beton für Chlorid unterscheiden sich, wenn der Beton vollständig oder nur teilweise wassergesättigt ist. Wenn der Prüfkörper nur Wasser teilgesättigt ist, kann die Effektivität des Diffusionsprozesses abnehmen und einen geringeren Diffusionskoeffizienten zur Folge haben [4]. Im angewandten Prüfverfahren wurde der Prüfkörper unter Wasser gelagert und vorge-sättigt, deshalb findet in der Berechnung des Diffusionskoeffizienten keine Betrachtung eines teilgesättigten Betons statt.

5.2.2.4 Einfluss der Karbonatisierung bei Chloridangriff

Wie bereits im Kapitel 2.3.2 erwähnt hat die Karbonatisierung einen negativen Einfluss auf den Chloridwiderstand des Betons. Mit der Reduzierung des pH-Wertes wird der Widerstand herabgesetzt und es kommt zu einer erhöhten Eindringung des Chlorids [9][37]. Der AHWZ-Gehalt im Beton hat keinen signifikanten Einfluss auf den Karbonatisierungswiderstand, deshalb sind hier die Ausgangsbedingungen für alle geprüften Rezepturen annähernd gleich [25].

5.2.3 Anmerkungen zu Schwierigkeiten bei der Analyse

Wegen auftretender Probleme die sehr geringen Dicken zu erreichen würde ich für weitere Analysen empfehlen, die erste Schicht, welche laut Norm nicht in die Berechnung mit einfließen darf, nur abzuschleifen und nicht zu schneiden, da man so die zweite Schicht in einer geringeren Tiefenstufe erhält.

Bei der chemischen Analyse sind Probleme während dem Messen des Chloridgehalts aufgetreten. Der gemessene elektrische Widerstand schwankte in nicht üblichen Bereichen und die Analyse wurde, ohne abgeschlossen zu sein, von dem Gerät selbst abgebrochen. Auch die durchgeführten Doppelbestimmungen stimmten anfangs nicht überein. Auffällig dabei war, dass dies vor allem bei den Proben mit hohem AHWZ-Gehalt der Fall war.

Die Ursache des Problems war das in den Betonproben vorhandene Sulfid, welches im Hüttensand vorkommt und somit in den Beton gelangt. Umso höher der AHWZ-Gehalt ist, desto höher ist somit auch der vorhandene Anteil an Hüttensand. Das vorhandene Sulfid in der Lösung reagiert selbst mit dem Silbernitrat der Titrationslösung und kann somit das Ergebnis des gemessenen Chloridgehalts verfälschen, da das vorhandene Chlorid in der Probe durch die verbrauchte Menge an Silbernitrat berechnet wird [freundliche mündliche Mitteilung von Herrn Prof. Tritthart, Mai 2018].

Das Problem konnte dahingehend gelöst werden, indem die Probe vor dem Titrieren circa 5 min zum Sieden gebracht wurde und das Sulfid entweichen konnte. Hierbei wurde darauf geachtet, dass es zu keinem Verlust der Probe durch spritzen des Gemischs kam. Im Anschluss wurden alle Analysen der Proben, die bis zum Eliminieren des Fehlers analysiert wurden, wiederholt.

5.3 Bewertung der Analysen

Um die ermittelten Werte und Ergebnisse der Chloridanalysen besser bewerten zu können wurden Abhängigkeiten der Ausgangswerte von den Eingangswerten gesucht. Wie in den folgenden Abbildungen dargestellt ist, sind teilweise Korrelationen vorhanden, wobei nicht jede Eingangskomponente einen Einfluss auf den Chloridwiderstand hat.

5.3.1 Korrelationen

Es wurden einfache lineare Korrelationen zwischen dem Diffusionskoeffizienten und folgenden Parametern untersucht:

- AHWZ
- W/B_G bzw. W/B_a
- Wasserundurchlässigkeit
- Druckfestigkeit
- Offene Porosität

In Abbildung 30 und Abbildung 31 werden die ermittelten Korrelationsgeraden zwischen dem Diffusionskoeffizienten und dem AHWZ-Gehalt in kg/m^3 bzw. in Masseprozent Anteilen im Beton dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß ist in beiden Fällen mit den Werten 0,795 und 0,769 sehr hoch und das bedeutet, dass eine große Abhängigkeit des D_{nss} von dem AHWZ, welches in allen Rezepturen zu 70 M-% aus Hüttensand und 15 M-% aus Flugasche besteht, gegeben ist.

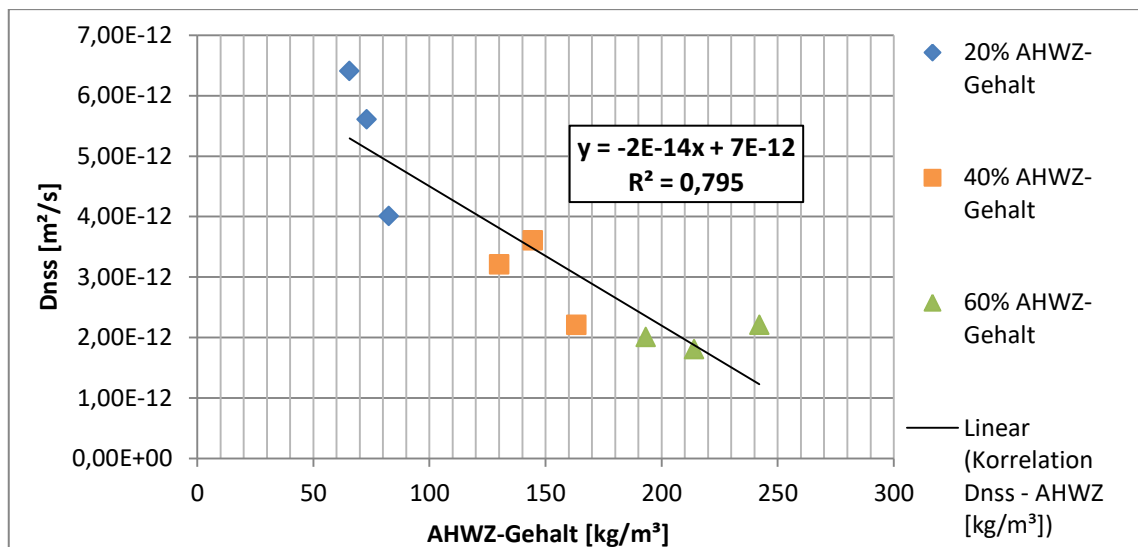


Abbildung 30 Korrelation D_{nss} - AHWZ-Gehalt [kg/m^3]

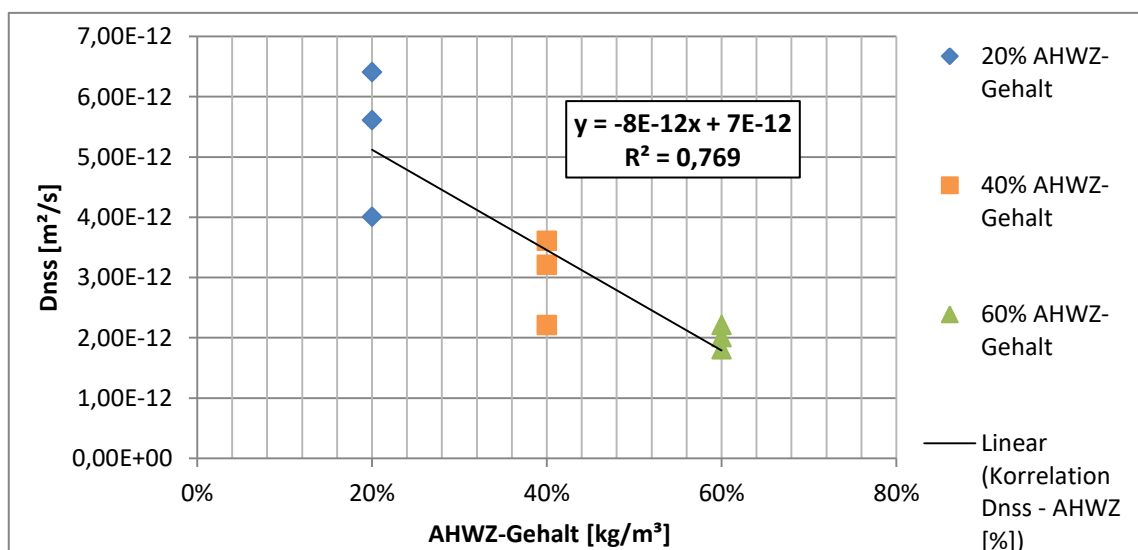


Abbildung 31 Korrelation D_{nss} - AHWZ-Gehalt [M-%]

In Abbildung 31 sind die Diffusionskoeffizienten in Korrelation mit dem AHWZ-Gehalt in M-% dargestellt, und hier zeigt sich, dass der D_{NSS} auch nicht nur vom AHWZ-Gehalt abhängig ist, sondern zusätzlich mit den W/B-Werten zusammenhängt. Der Einfluss des W/B-Wertes scheint bei höheren W/B-Werten größer zu sein als bei einem geringeren.

Grundsätzlich besteht die Erwartungshaltung, dass eine große Korrelation zwischen dem Diffusionskoeffizienten und dem W/B_a -Wert besteht, denn die ÖNORM 4710-1:2018 gliedert die einzelnen Expositionsklassen für Chloridangriff nach dem anrechenbaren Wasser-Bindemittelgehalt. Die Korrelation des W/B_a -wertes bzw. des W/B_G -wertes mit dem D_{NSS} wird in Abbildung 32 dargestellt. Wobei die Werte für den anrechenbaren Bindemittelgehalt (W/B_a) und den Gesamtbindemittelgehalt (W/B_G) getrennt in der Grafik angegeben werden. Ein Bestimmtheitsmaß von 0,005 bzw. 0,079 ist ein sehr geringer Wert.

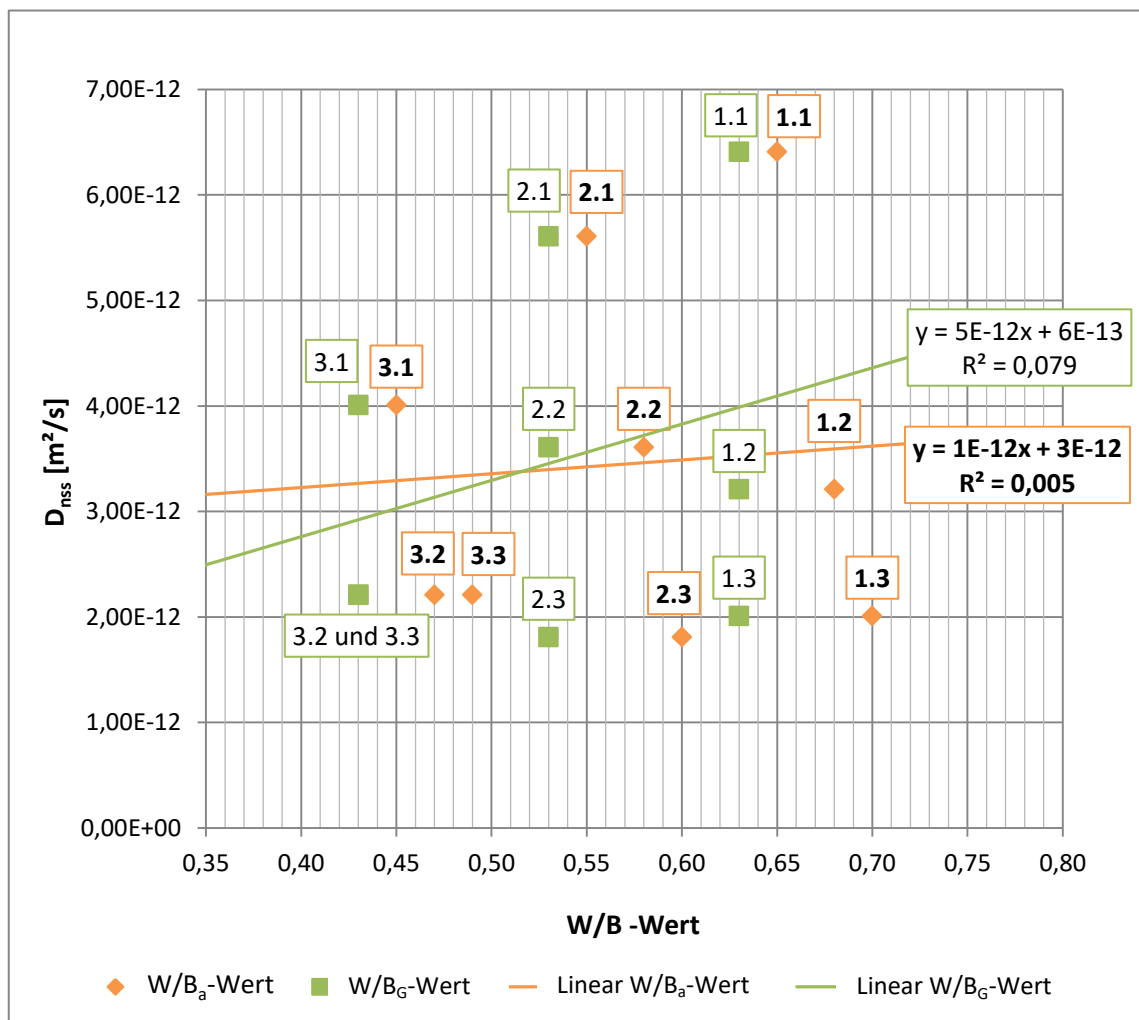


Abbildung 32 Korrelation D_{NSS} - W/B-Wert

Um den gleichzeitigen Einfluss mehrerer Eingangswerte auf das Ergebnis ermitteln zu können wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse (Kapitel 3.7.2.2) durchgeführt. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 ist dabei der vergleichbare Parameter mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 der einfachen linearen Regressionsanalyse, denn es berücksichtigt die Anzahl der einfließenden Variablen. Das ermittelte Bestimmtheitsmaß bei der multiplen linearen Regressionsanalyse ist normalerweise geringer als das Bestimmtheitsmaß der einfachen linearen Regressionsanalyse, da mehrere Parameter in die Berechnung mit eingehen und somit mehrere Komponenten einen Einfluss haben, auch wenn diese Einflüsse relativ gering sind.

Diese Ergebnisse der einfachen linearen Regression zwischen dem Diffusionskoeffizienten mit dem AHWZ-Gehalt ($R^2=0,795$), bzw. den W/B-Werten ($R^2=0,079$ und $0,005$) spiegeln sich auch in den Resultaten der multiplen linearen Regressionsanalyse wieder. Hierbei ist, wie in Tabelle 20 dargestellt, zu erkennen, dass diese, mit einem Wert von $\bar{R}^2 = 0,736$, ein relativ hohes adjustiertes Bestimmtheitsmaß ergibt und deshalb gut angewendet werden kann. Der P-Wert gibt an, ob der Parameter einen tatsächlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, wenn dieser kleiner als 0,05 ist kann auf einen signifikanten Einfluss geschlossen werden. Im Falle des AHWZ-Gehalts ist der P-Wert sehr gering (0,033) und somit korreliert das AHWZ stark mit dem Ergebnis. Im Gegensatz dazu nimmt der P-Wert des W/B_G-Wertes den sehr hohen Wert von 0,664 an und hat deshalb eine geringe Korrelation mit dem Diffusionskoeffizienten.

Das Bestimmtheitsmaß bei der einfachen linearen Regression ($R^2=0,795$) von D_{nss} mit dem AHWZ-Gehalt ist nur etwas größer als das adjustierte Bestimmtheitsmaß bei multipler linearer Korrelation von D_{nss} mit W/B_G-Wert und dem AHWZ-Gehalt ($\bar{R}^2=0,736$). Der Einfluss von W/B_a bzw. W/B_G ist also dem Einfluss des AHWZ-Gehalts deutlich untergeordnet.

Tabelle 20 multiple - lineare Regressionsstatistik D_{nss} -W/B_G-AHWZ [kg/m³]

Regressions-Statistik				
Multipler Korrelationskoeffizient R	0,896			
Bestimmtheitsmaß R^2	0,802			
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2	0,736			
Standardfehler	8,45 E-13			
Beobachtungen	9			
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>P-Wert</i>
Schnittpunkt	5,875 E-12	2,163 E-12	2,716	0,035
W/B_G-Wert	1,616 E-12	3,541 E-12	0,456	0,664
AHWZ- Gehalt des B_G	-2,254 E-12	4,814 E-12	-4,683	0,003

Eine schwache Korrelation der Wasserundurchlässigkeit mit dem Diffusionskoeffizienten ist vorhanden, jedoch nicht in einem signifikanten Ausmaß. Die in der Abbildung 33 dargestellte Punktwolke der Ergebnisse der Wasserundurchlässigkeitsprüfung ergibt eine Korrelation mit dem Diffusionskoeffizient bei einem geringen Bestimmtheitsmaß ($R^2=0,379$).

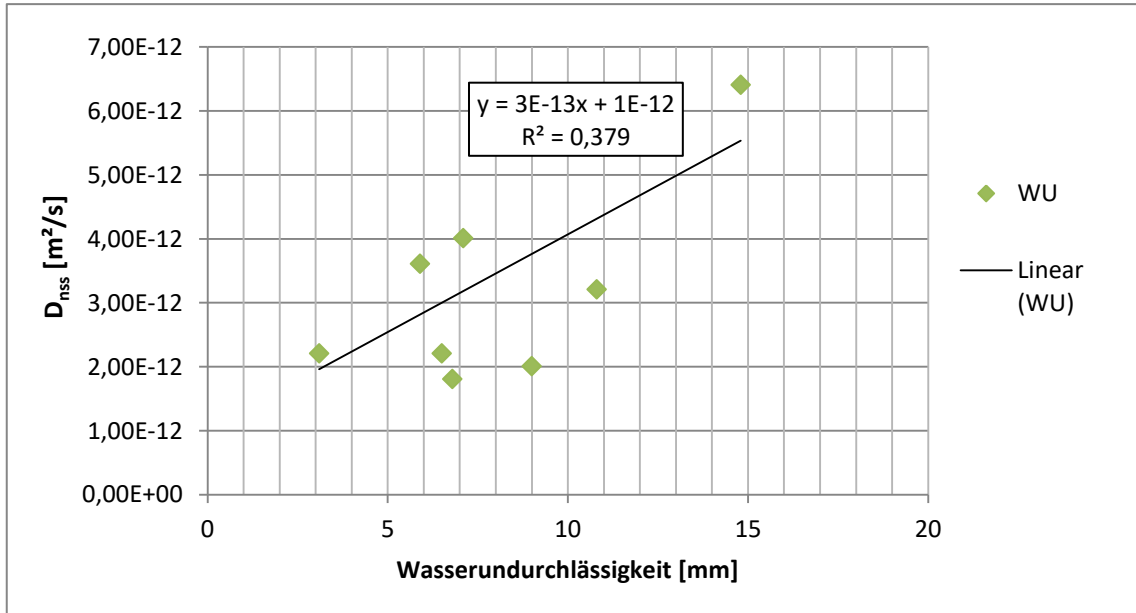


Abbildung 33 Korrelation D_{nss} -WU

Es kann keine Korrelation zwischen der Druckfestigkeit und dem Diffusionskoeffizienten erkannt werden, wie in Abbildung 34 ersichtlich. Die Druckfestigkeit steht meistens in engem Zusammenhang mit dem Wasser-Bindemittelwert und der Porosität, von welchem der Diffusionskoeffizient auch eine sehr schwache Abhängigkeit aufweist.

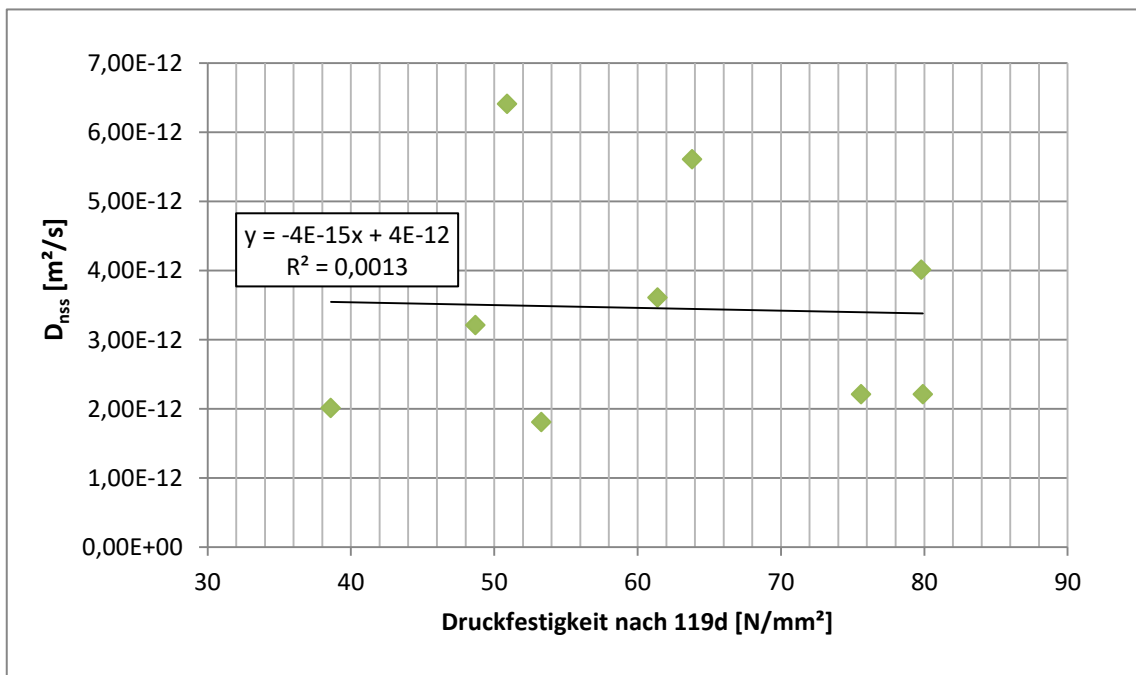


Abbildung 34 Korrelation D_{nss} -Druckfestigkeit

Die Porosität ist ein Indikator für die vorhandenen Poren in einem Gefüge, deshalb erscheint es plausibel, dass eine Korrelation zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der offenen Porosität besteht. Wie in Abbildung 35 dargestellt existiert eine schwache Korrelation ($R^2=0,392$) ähnlich zur Druckfestigkeit.

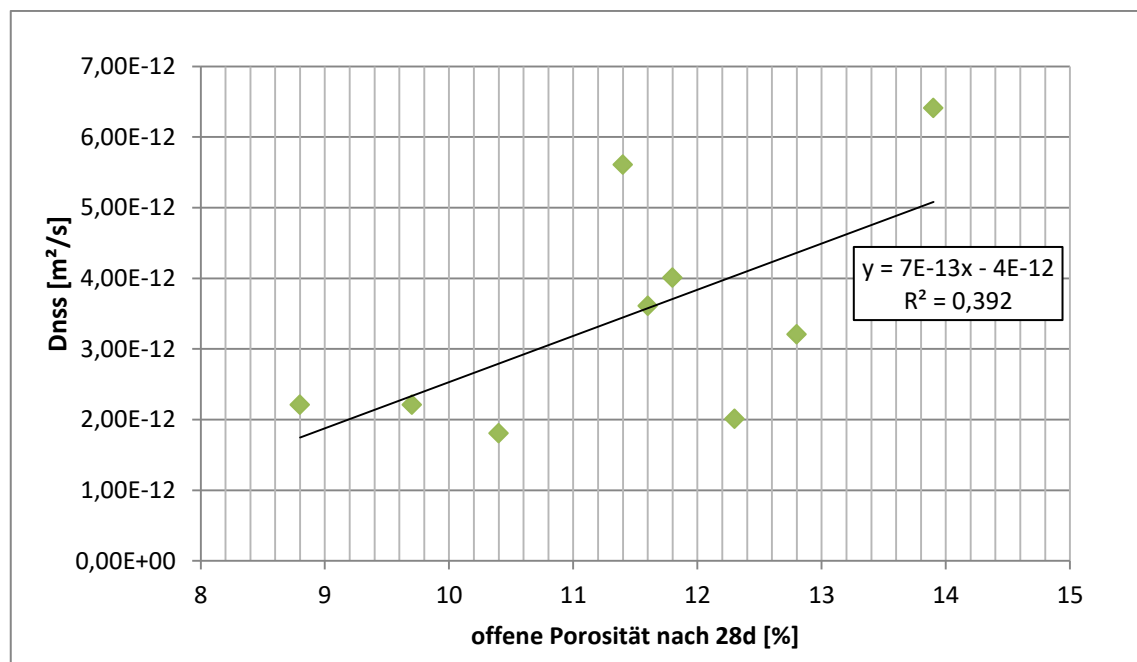


Abbildung 35 Korrelation D_{nss} -Porosität nach 28d

5.3.2 Diskussion der Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen

Durch die ermittelten Korrelationen wird deutlich, dass der AHWZ-Anteil in den geprüften Varianten der Haupteinflussfaktor für den Chloriddiffusionswiderstand ist. Die verminderte Eindringtiefe des Chlorids und der geringere Diffusionskoeffizient bei den Chloridanalysen können die Folge eines dichteren Gefüges oder einer besseren Chlorid Bindekapazität bei höherem AHWZ-Gehalt sein. Durch die Druckfestigkeitsentwicklung wird angenommen, dass es eine Veränderung des Gefüges während der 90 Tage Einlagerungsdauer in Chlorid gegeben ist, da die Druckfestigkeit bei allen Rezepturen gestiegen ist, besonders bei jenen mit 60% AHWZ. Durch die Zusatzstoffe kommt es zu einer Nacherhärtung, jedoch ist die erreichte Endfestigkeit bei jenen Rezepturen mit 20% AHWZ am höchsten. In der Prüfung zur Wassereindringtiefe ergeben die Betonvarianten mit hohem AHWZ-Gehalt die geringeren Eindringtiefen. Dies sind Indikatoren, dass sich das Gefüge der Betone mit höheren AHWZ-Anteilen positiv auf die Chlorideindringung auswirkt. Es gibt bereits Studien, bei denen ein verbesserter Chloridwiderstand bei Betonen mit Flugasche [14][38] oder Kombinationsprodukten, bestehend aus Hüttensand und Flugasche [39], nachgewiesen werden kann. In diesen genannten Studien wird der Widerstand jedoch mit Migrations-testverfahren ermittelt und nicht durch einen Diffusionsversuch. In der Literatur ist es schwierig Forschungsprojekte mit AHWZ zu finden, da die meisten Untersuchungen Flugasche und Hüttensand separat angeben und nicht in einem

Kombinationsprodukt wie das in diesem Fall verwendete AHWZ, bestehend aus 70 M-% Hüttensand, 15 M-% Flugasche und 15 M-% Kalksteinmehl. Eine Untersuchung [38] kommt auch zu dem Schluss, dass die Art und der Gehalt der Betonzusatzstoffe den Chloridgehalt wesentlich bestimmen, und dass Materialparameter wie der W/B-Wert oder die Druckfestigkeit nur grobe Hinweise auf den Chloridwiderstand liefern. Das Kalksteinmehl im AHWZ ist ein inerter Füller und trägt somit nicht zum verbesserten Widerstand bei hohem AHWZ-Anteil bei.

Für die Chlorid Bindekapazität im Beton, in Form des Friedel'schen Salzes wird in der Literatur hauptsächlich die Flugasche mit ihren Anteilen an Aluminat (C_3A) und Aluminatferrit (C_3AF) angeführt [1][40]. Ein Einfluss des Hüttensands auf die Bindekapazität des Chlorids durch Bildung von Friedel'schem Salz wird nicht erwähnt. Hier ist noch weiterer Forschungsbedarf gegeben, um nachzuweisen, inwieweit aufbereiteter Hüttensand den Chloridwiderstand positiv beeinflusst und inwieweit Flugasche. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen vermuten, dass Hüttensand wesentlich zur Erhöhung des Chloridwiderstands beiträgt. Wie weit das auf eine Bindefähigkeit zurückzuführen ist, bleibt fraglich, da in der Literatur nur eine Bindekapazität von Flugasche angibt.

5.3.3 Vergleich der unterschiedlichen Lagerungen

Die Ergebnisse der verwendeten Lagerungsmethoden variieren nicht sehr stark voneinander. Besonders die Betonrezepturen 1.1 und 2.1 ergeben sehr ähnliche Werte, wie in Tabelle 21, Abbildung 36 und Abbildung 37 zu erkennen ist. Bei der Betrachtung der Variante 3.1 (Abbildung 38) ist zu erkennen, dass die ermittelten Werte für C_s leicht differieren, jedoch ist der Unterschied zwischen den Diffusionskoeffizienten nicht signifikant. Hierbei ist anzumerken, dass die Eindringtiefe bei der Rezeptur 3.1 geringer ist und somit weniger Werte in die Berechnung des Diffusionskoeffizientens miteingehen. In Abbildung 39 wird ersichtlich, dass die Korrelation der Lagerungsbedingungen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,94 sehr hoch ist. Daraus kann geschlossen werden, dass es keinen signifikanten Unterschied macht, ob die Probe vollständig untergetaucht (gekennzeichnet mit V) oder kapillar saugend eingetaucht eingelagert (gekennzeichnet mit H) wird.

Tabelle 21 Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Lagerungen

Rezeptur	1.1	2.1	3.1
$D_{nss,V}$	6,41 E-12	5,61 E-12	4,01 E-12
$D_{nss,H}$	5,61 E-12	5,41 E-12	3,61 E-12
$C_{s,V}$	0,678	0,587	0,609
$C_{s,H}$	0,729	0,606	0,861

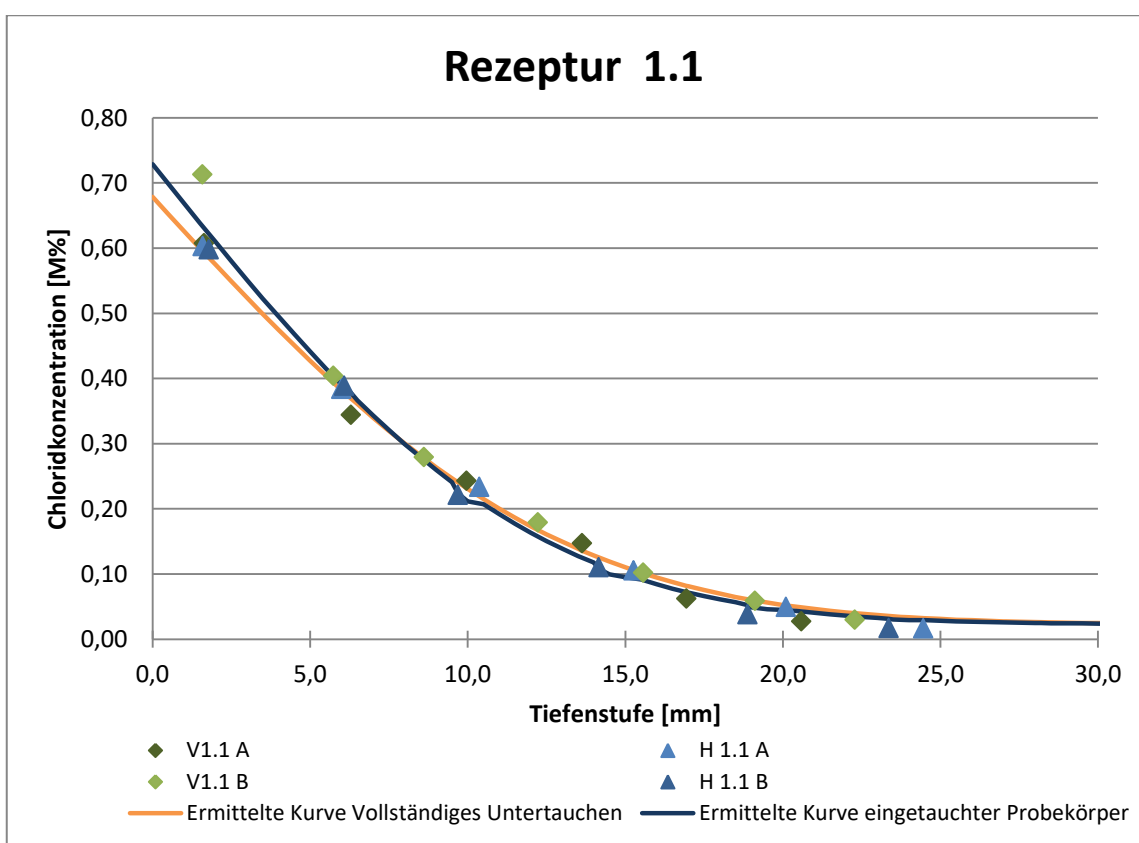


Abbildung 36 Vergleich der Lagerungen 1.1

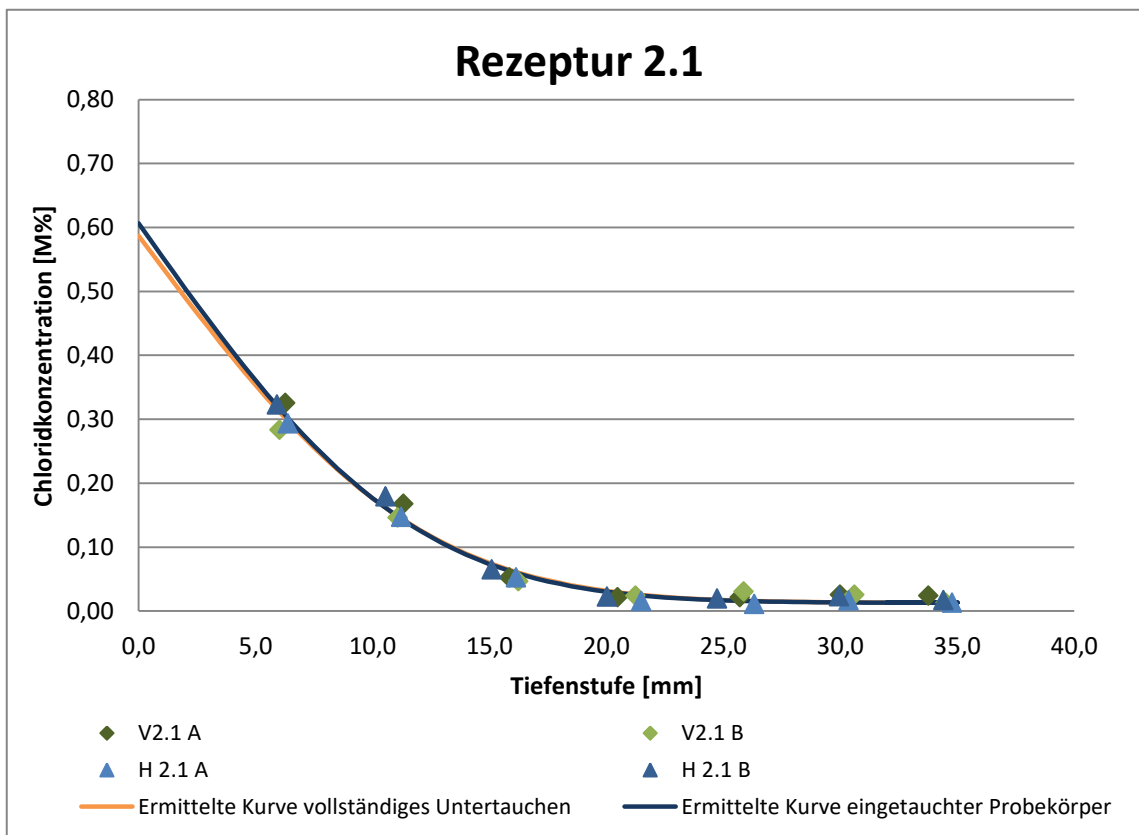


Abbildung 37 Vergleich der Lagerungen 2.1

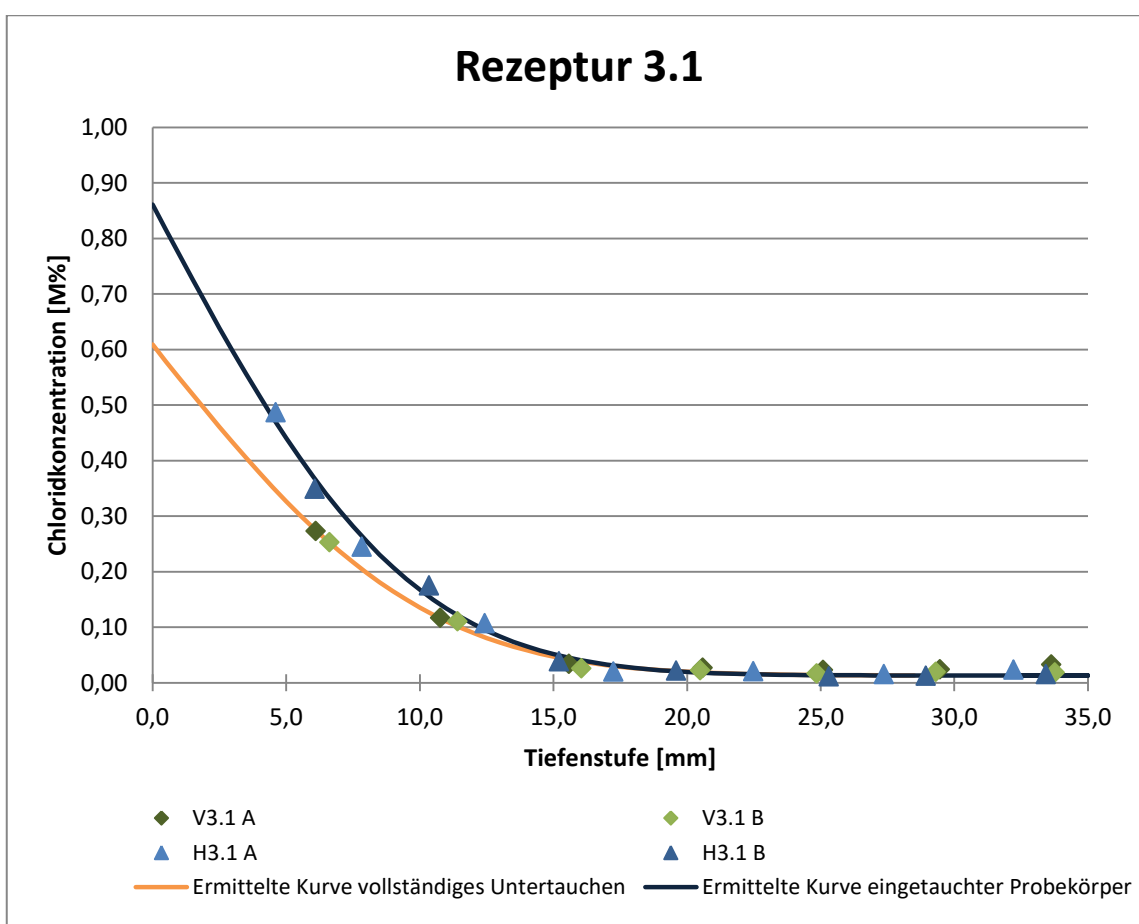


Abbildung 38 Vergleich der Lagerungen 3.1

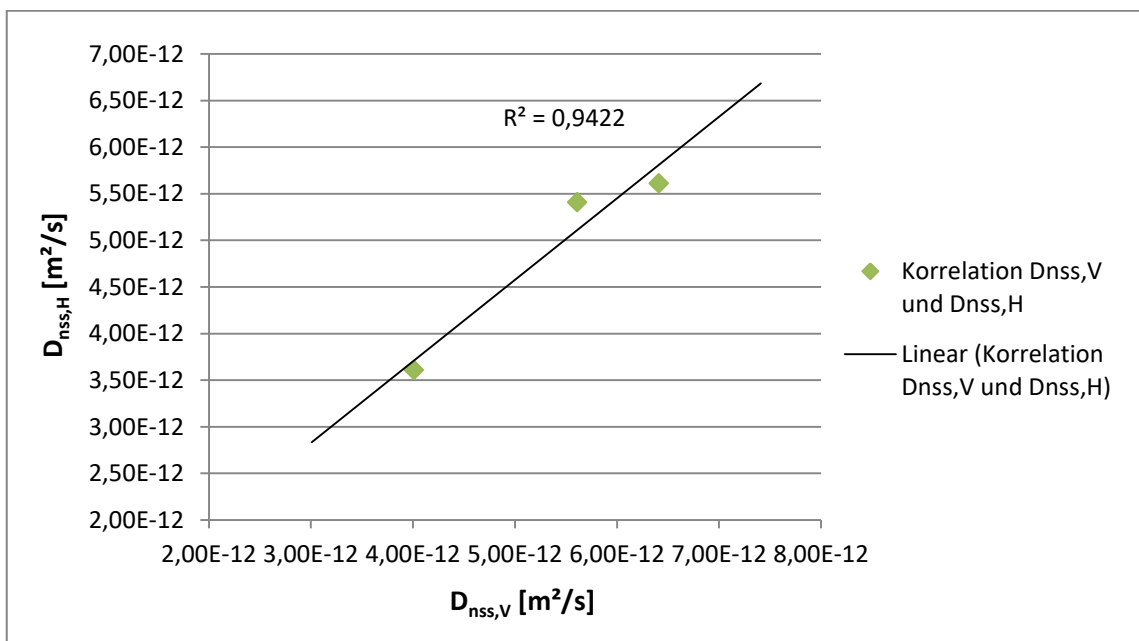


Abbildung 39 Korrelation der unterschiedlichen Lagerungen

5.3.4 Vergleich unterschiedlicher Auswertungen

Die Regressionsanalyse wurde sowohl ohne, als auch mit dem Wert des Chloridgehalts der ersten Schicht durchgeführt, um Übereinstimmungen oder Differenzen zu ermitteln. Die Werte dieser Analyse sind in Tabelle 22 zusammengefasst und werden in

Tabelle 23 verglichen. Die Unterschiede der berechneten Werte für C_s und D_{nss} liegen überwiegend im Bereich der Standardabweichung (siehe Abbildung 40). Nur die Ergebnisse der Rezeptur 2.2 zeigen größere Abweichungen auf. Dieser Wert weicht auch von der Tendenz ab, dass ein höherer Anteil an AHWZ im Beton einen geringeren Diffusionskoeffizienten ergibt und muss als Ausreißer angesehen werden. Der berechnete Diffusionskoeffizient, unter Berücksichtigung der ersten Schicht, nimmt mit zunehmendem AHWZ-Gehalt im Beton ab und weist analog zur Berechnung ohne Berücksichtigung der ersten Schicht höhere Werte mit 20% AHWZ-Anteil im Beton auf. Die Zusammenhänge und Korrelationen, die für den D_{nss} ohne Berücksichtigung der ersten Schicht und den AHWZ-Gehalt und den W/BG-Wert bzw. W/Ba-Wert und den weiteren Betoneigenschaften gefunden wurden, bleiben erhalten. Mit zunehmendem AHWZ-Gehalt sinkt der D_{nss} signifikant, der W/Ba bzw. der W/BG-Wert korreliert nur schwach mit dem D_{nss} .

Die Ergebnisse der Analysen sind ähnlich und stimmen mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,76$ überein (ohne V2.2). In zukünftigen Untersuchungen ist es wichtig, die erste Schicht so dünn wie möglich zu erstellen, um die Berechnung nach Norm durchführen zu können und trotzdem ein vollständiges Chloridprofil darstellen zu können.

Tabelle 22 Zusammenfassung der Ergebnisse für C_s und D_{nss} mit Berücksichtigung der Werte der ersten Schicht j_1

	C_i [M%]	C_s [M%]	D_{nss} [m ² /s]	$\sum(C_{m,j} - C_{r,j})^2$	R^2
V1.1	0,023	0,746	5,69 E-12	0,009	0,98
V1.2	0,012	0,594	4,10 E-12	0,007	0,98
V1.3	0,010	0,513	3,30 E-12	0,003	0,99
V2.1	0,013	0,717	4,30 E-12	0,022	0,96
V2.2	0,010	0,441	5,89 E-12	0,010	0,96
V2.3	0,010	0,431	3,10 E-12	0,003	0,98
V3.1	0,013	0,659	3,70 E-12	0,008	0,98
V3.2	0,011	0,539	3,10 E-12	0,005	0,98
V3.3	0,008	0,520	2,10 E-12	0,001	0,99

Tabelle 23 Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Regressionsanalysen

	C_s [M%] ohne erste Schicht	C_s [M%] mit erster Schicht	D_{ns} [m ² /s] ohne erster Schicht	D_{ns} [m ² /s] mit erster Schicht
V1.1	0,678	0,746	6,41E-12	5,69E-12
V1.2	0,705	0,594	3,21E-12	4,10E-12
V1.3	0,798	0,513	2,01E-12	3,30E-12
V2.1	0,587	0,717	5,61E-12	4,30E-12
V2.2	0,633	0,441	3,61E-12	5,89E-12
V2.3	0,746	0,431	1,81E-12	3,10E-12
V3.1	0,609	0,659	4,01E-12	3,70E-12
V3.2	0,772	0,539	2,21E-12	3,10E-12
V3.3	0,515	0,520	2,21E-12	2,10E-12

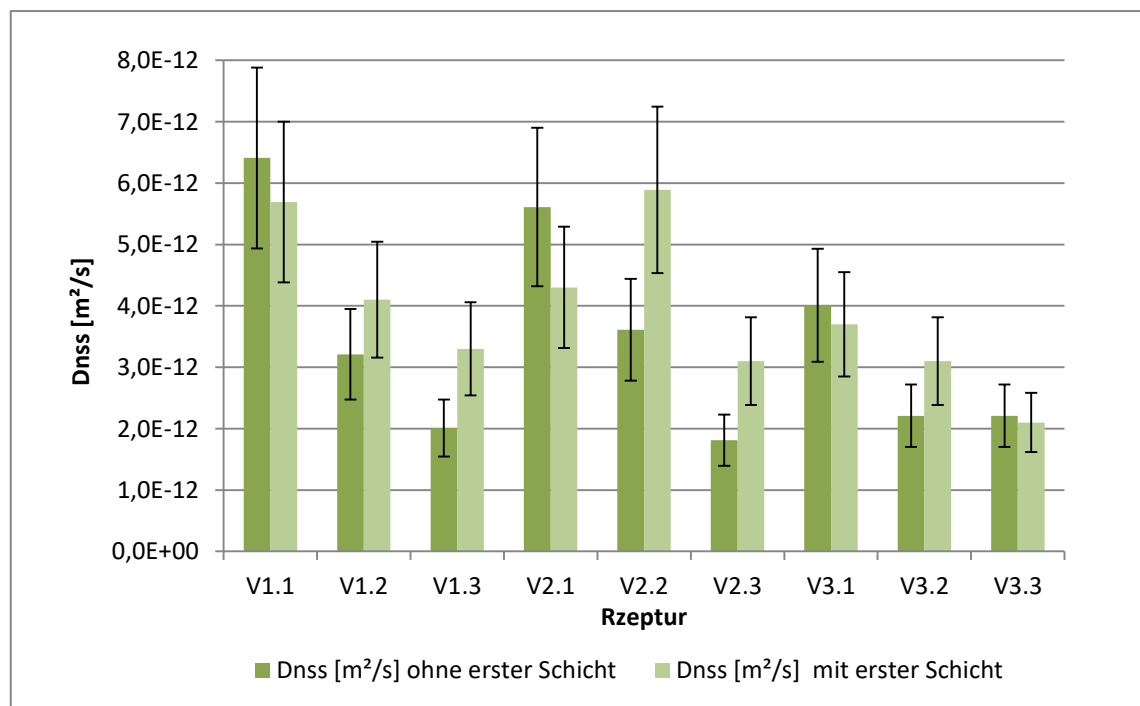


Abbildung 40 Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertungen

6 Schlussfolgerung & Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse der durchgeführten Prüfungen

In dieser Arbeit wurde der Chloriddiffusionswiderstand von neun verschiedenen Betonrezepturen ermittelt. Diese Betone wurden mit CEM I und unterschiedlichen AHWZ-Anteilen (20%, 40%, 60%) hergestellt. Die Mischungen mit 20% AHWZ entsprechen einem CEM II/A, die Mischungen mit 40% AHWZ sind vergleichbar mit der in Österreich üblicherweise verwendeten Kombination CEM II/A+AHWZ bzw. CEM II/B, während Mischungen mit 60% AHWZ mögliche zukünftige Bindemittelvarianten repräsentieren. Die Prüfkörper wurden 90 Tage unter Chlorideinwirkung gelagert und anschließend wurde ein Chloridprofil für jede Rezeptur erstellt. Um den instationären Diffusionskoeffizienten D_{NSS} zu erhalten wurde eine nicht lineare Regressionsanalyse durchgeführt, ausgewertet und mit den Eingangsparametern verglichen.

Die neun geprüften Rezepturen befinden sich nicht vollständig in den derzeit gültigen Normvorschriften. Sie sollen dazu dienen, Grenzen auszuloten und anschauliche Ergebnisse zu erhalten. Hauptziel war es, den Chloridwiderstand von Betonen mit hohen AHWZ-Gehalten auf Basis des instationären Diffusionskoeffizientens D_{NSS} zu beurteilen. Der Vergleich dieser Diffusionskoeffizienten hat gezeigt, dass es tatsächlich einen großen Einfluss auf die Chlorideindringung hat, in welcher Menge das AHWZ im Beton vorhanden ist. In den geprüften Varianten besteht dieses AHWZ, wie in Österreich üblich, zu ca. 70% aus aufbereitetem Hüttensand sowie 15 M-% aufbereiteter Flugasche und 15 M-% Kalksteinmehl. Die Rezepturen mit einem AHWZ-Anteil von 60% ergeben bei allen drei W/B_G -Varianten (0,43/0,53/0,63) den jeweils besten Chloriddiffusionswiderstand. Erstaunlicher Weise besteht bei den untersuchten Betonvarianten kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem W/B_G bzw. W/B_a -Wert selbst und dem D_{NSS} . Die Abhängigkeit des Chloriddiffusionswiderstandes der geprüften Rezepturen ist deutlich stärker vom AHWZ-Gehalt gegeben, als vom W/B -Wert. Diese Erkenntnis zeigt, dass es durchaus möglich ist, einen guten Widerstand bei Chloridbeanspruchung zu erreichen, ohne einen sehr geringen W/B -Wert zu benötigen, welcher besonders beim Transportbeton oft zu schwierigerer Verarbeitbarkeit führt. Die Ergebnisse für die Diffusionskoeffizienten der untersuchten Betone sind der Tabelle 18 auf der Seite 46 zu entnehmen.

6.2 Empfehlungen für weiterführende Versuche

Um noch deutlichere Aussagen treffen zu können wären folgende Punkte für zukünftige Projekte zu empfehlen:

- Zusätzlich zum fertig gemischten AHWZ aus drei Komponenten (Kombinationstyp) sollten Flugasche und Hüttensand als AHWZ separat verwendet und/oder variiert werden. Somit können weitere Einflüsse geklärt werden, zum Beispiel inwieweit die Bindekapazität der einzelnen Stoffe (Flugasche oder Hüttensand) für Chlorid gegeben ist.
- Wenn es sich um Rezepturen handelt, welche als Transportbeton verwendet werden sollen, wäre es sinnvoll Ausbreitmaß bei der Herstellung auch nach 90 min zu prüfen.
- Betrachtung des Zusammenhangs von Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand abhängig vom AHWZ-Gehalt.
- Die einzelnen Schichten des mit Chlorid beaufschlagten Prüfkörpers anstatt zu schneiden durch andere Methoden gewinnen.
- Zusätzliche Versuche zur Betrachtung der Frühfestigkeitsentwicklung bei hohen AHWZ-Werten.

6.3 Ausblick

Um die Performance des AHWZs besser beurteilen zu können, wäre es auch sinnvoll, begleitende Untersuchungen zur Frühfestigkeit (2d, 7d), oder generell Festigkeitsentwicklung, in den Versuchsablauf mit einzubinden. Es wurden bereits in diesem Projekt begleitende Druckfestigkeitsprüfungen durchgeführt, welche wichtig waren, um die Verminderung der Druckfestigkeit gegenüber reinem Zement zu kennen.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit wäre der nächste Schritt, Kombinationen einzelner Beanspruchungen zu untersuchen, da ein Angriff durch nur eine Exposition selten eintritt. Eventuell kann eine Kombination der Prüfverfahren für Karbonatisierung und Chloridangriff durchgeführt werden. Eine Überlegung für zukünftige Projekte wäre der zusätzlich Verwendung des Rapid Chlorid Migrationstests und der Vergleich mit dem nicht beschleunigten Verfahren, um den Unterschied des Chloridmigrationskoeffizienten und des Chloriddiffusionskoeffizienten zur Beurteilung des Chloridwiderstands herauszuarbeiten und damit den Einfluss der Beanspruchungsdauer auf das Ergebnis und die ermittelten Werte der Diffusionskoeffizienten abschätzen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Stark, J. und Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, Springer Verlag, Berlin, 2013
- [2] ÖNORM B 4710:2018 – Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2018
- [3] Schöppl, K., Dorner, H. und Letsch, R.: Nachweis freier Chloridionen auf Betonoberflächen mit dem UV-Verfahren, in: BFT International, Heft11, 1988
- [4] Kapteina, G.: Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken, Technische Universität München, 2011
- [5] Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung, in: Zement-Kalk-Gips 58, Nr.10, 1969, S.447-456
- [6] Tritthart, J.: Chloridinduzierte Betonstahlkorrosion, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung Heft 346, Wien, 1988
- [7] Schöppl, K.: Aussagekraft von Chloridwerten aus Betonbauwerken hinsichtlich der Korrosionsgefährdung, in: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 11, 2010
- [8] Schießl, P., Raupach, M.: Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete, in: Corrosion of Reinforcement in Concrete International Symposium, Elsevier, London, Mai 1990, S.49-58
- [9] Breit, W.: Kritischer Korrosionsauslösender Chloridgehalt – Sachstand der neueren Untersuchungen, in: Betontechnische Berichte, 2001, S.145-168
- [10] Föll, H. (Christian-Albrechts-Universität Kiel): Die Fick'schen Diffusionsgesetze, https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_6/backbone/r6_2_2.html [Datum des Zugriffs: 25.10.2018]
- [11] Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton: Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung, Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2004
- [12] Raupach, M.: Auswirkung von Chloriden im Beton, Abhängigkeiten von Betoneigenschaften, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 2002
- [13] Dauberschmidt, C.: Chloridbelasteter Beton – immer ein Entsorgungsfall?, Hochschule München, 2010
- [14] Hariharan, A.R., Santhi, A.S., Mohan Ganesh, G.: Effect of Ternary Cementitious system on compressive strength and resistance to Chlorid ion penetration, in: International Journal of Civil and Structural Engineering, Nr.4, 2011, S.695-705
- [15] Choi, L., Kim, J., Lee, K.: Corrosion behaviour of steel bar embedded in fly ash concrete, Elsevier, 2005
- [16] Thomas, M.D.A., Bamforth, P.B.: Modelling chlorid diffusion in concrete - Effect of fly ash and slag, in: Cement and Concrete Research 29, 1999, S.487-495
- [17] Lality, R.T.: Kombination von Prüfmethode zum Nachweis des Widerstands gegen Frost- Tausalzbeanspruchung und Chlorideindringung für performance-optimierte Betone, Technische Universität Graz, Masterarbeit, 2016
- [18] NT Build 443: Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration, Espoo: NORDTEST, 1995.
- [19] Spiesz, P., Brouwers, H.J.H.: Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test, in: Cement and Concrete Research, Nr.42, 2012, S.1072-1082

- [20] NT Build 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Espoo: NORDTEST, 1999
- [21] Park, B., Yup, S., Cho, J., Young, J.: A novel short-term immersion test to determine the chloride ion diffusion coefficient of cementitious materials, in: Construction and Building Materials, Nr.57, 2014, S.169-178
- [22] Castellote, M., Andrade, C. et al.: Round-Robin test on methods for determining chloride transport parameters in concrete, in: Materials and Structures, Nr.39, 2006, S.955-990
- [23] Norm SIA 262/1:2013 - Bauwesen, Schweizer Norm, 2013
- [24] Fix, I.: Anwendungen der quantitativen Röntgendiffraktometrie (QXRD) in der pharmazeutischen Analytik, Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation, 2004
- [25] Heinrich, P.: Karbonatisierungswiderstand von österreichischem Transportbetonen, Technische Universität Graz, Masterarbeit, 2018
- [26] ÖNORM EN 12390-11:2015: Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton- Einseitig gerichtete Diffusion, Österreichisches Normungsinstitut, 2015
- [27] ÖNORM EN 14629:2007: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Chloridgehaltes von Festbeton, Österreichisches Normungsinstitut, 2007
- [28] Tritthart, J., Cavlek, C.: Determination of total and free chloride in cement paste and concrete, in: Testing and Modeling the Chloride Ingress into Concrete, RILEM Publications S.A.R.L., 2000
- [29] Crank, J.: The mathematics of diffusion, Oxford University Press, 2. Ausgabe, 1975
- [30] Frost, I.: Einfache lineare Regression – Die Grundlage für komplexe Regressionsmodelle verstehen, Springer Verlag, München, 2018
- [31] Gülden, K.U., Nese, G.: A study on multiple linear regression analysis, in: Procedia – Social and Behavioral Sciences, Nr.106, 2013, S.234-240
- [32] Menditto, A., Patriarca, M., Magnusson, B.: Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision, in: Accreditation and Quality Assurance, Nr.12, 2007, S.45-47
- [33] Gehlen, C.: Pro Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, in: Schriftreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510, Dissertation, Beuth-Verlag, Berlin, 2000
- [34] Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung, Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2004
- [35] Juhart, J., David, A., Balderman, C., Fischer: Ressourcen-optimierter Beton für Fertigteile, Technische Universität Graz, Forschungsprojekt, 2017
- [36] Hong, K., Hooton, R.D.: Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete, in: Cement and Concrete Research, Nr.29, 1999, S.1379-1386
- [37] Ngala, V.T., Page, C.L.: Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement paste, in: Cement and Concrete Research, Nr.27, 1997, S.995-1007

- [38] Hunkeler, F., Merz, C., Ungricht, H.; Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen, Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag, Wildeggen, 2002
- [39] Heinz, D., Heisig, A.: Flugasche und Hüttensand – Zusatzstoffe mit Zukunft, in: Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen: 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruhe, 2018
- [40] Dahme, U.: Chlorid in karbonisierendem Beton, Universität Duisburg Essen, Dissertation, Essen, 2006
- [41] Young, R.A.: The rietveld method, Oxford University, Cambridge, 1993

Glossar

GVTB	Güteverband Transportbeton
CEM I	Portlandzement: Hauptbestandteil ist der Portlandzementklinker, er darf höchstens 5% Masseanteil an Nebenbestandteile beinhalten
CEM II/A	Portlandkompositzement: Hauptbestandteil ist der Portlandzementklinker mit 80-94% Masseanteil, Nebenbestandteile sind Hüttensand, Flugasche und Kalkstein mit 6-20% Masseanteil
AHWZ	aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff, enthält puzzolanische und/oder latent hydraulische Zusatzstoffe und Kalksteinmehl; Zusammensetzung ist Hersteller abhängig
B_G	Gesamatbindemittelgehalt für k -Wert-Konzept; setzt sich zusammen aus Zementgehalt und Zusatzstoffgehalt
B_a	anrechenbarer Bindemittelgehalt unter Berücksichtigung des k -Wertes; setzt sich zusammen aus dem Zementgehalt und Zusatzstoff mal k -Wert
k -Wert	Faktor bei der Anrechnung von Zusatzstoffen auf den Bindemittelgehalt; kann einen Wert von 0,4 bis 2,0 annehmen
GK	Größtkorn der Gesteinskörnung
D_{nss}	Diffusionskoeffizient im instationären Zustand
Präzision	beschreibt, wie gut verschiedene Messungen miteinander übereinstimmen
Genauigkeit	beschreibt, wie weit die Messwerte vom wahren Wert abweichen

Anhang

Anhang A	Produktdatenblätter der Ausgangsstoffe
Anhang B	Herstellungsprotokolle
Anhang C	Programmcode
Anhang D	Gemessene Chloridgehalte
Anhang E	Chloridprofile aller Rezepturen

Anhang A



Glockner Zement

CEM I 52,5 R

Produkt	Portlandzement gemäß ÖNORM EN 197-1, hergestellt im Werk Wietersdorf der w&p Zement GmbH.						
Zusammensetzung	Portlandzementklinker, Gips						
Anwendung	<p>Portlandzement für Betonanwendungen, bei denen hohe Frühfestigkeiten gefordert sind. Besonders geeignet für Betonierarbeiten bei tiefen Temperaturen sowie als Bindemittel für die Herstellung von gebundenen EPS-Ausgleichsschüttungen mit schneller Austrocknung und von hochwertigen Estrichen.</p> <p>GlocknerZement ist nicht geeignet für massige Bauteile. Bei extremen Temperaturen ist Vorsicht geboten. Die Verwendung von GlocknerZement ersetzt nicht die für tiefe Temperaturen erforderlichen Winterbaumaßnahmen.</p>						
Eigenschaften	Gute Verarbeitbarkeit durch günstigen Wasseranspruch und geringe Wasserabsonderung. Rasche Festigkeitsentwicklung sowie schnelle Austrocknung. Für eine optimale Beton-/Produktqualität ist eine gute Verdichtung und Nachbehandlung zu beachten.						
Technische Daten	<p>Druckfestigkeit bei Normenprüfung nach EN 196:</p> <table> <tr> <td>1 Tag</td> <td>ca. 28 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>2 Tage</td> <td>ca. 39 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>28 Tage</td> <td>ca. 62 N/mm²</td> </tr> </table> <p>Erstarrungsbeginn ca. 130 min Mahlfeinheit ca. 4800 cm²/g Dichte ca. 3,12 cm³/g</p> <p>Chromatarm gemäß Verordnung (EG) Nr.1907/2006</p>	1 Tag	ca. 28 N/mm ²	2 Tage	ca. 39 N/mm ²	28 Tage	ca. 62 N/mm ²
1 Tag	ca. 28 N/mm ²						
2 Tage	ca. 39 N/mm ²						
28 Tage	ca. 62 N/mm ²						
Lieferform	Sack 25 kg Lose im Silowagen						
Lagerung	Sackware vor Feuchtigkeit geschützt max. 3 Monate lagerfähig, loses Material maximal 1 Monat lagerfähig.						
Qualitätssicherung	Konformitätsnachweise durch interne Überwachungsprüfungen. Kennnummer der Zertifizierungsstelle 2523-CPR-0087 .						
<small>Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers/Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrungen, entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtung aus dem Kaufvertrag. Sie entbinden den Käufer nicht davon, unsere Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck in eigener Verantwortung selbst zu prüfen.</small>							
Sicherheitsdatenblatt anfordern bzw. beachten							
Stand: Feber 2018							

w&p Zement GmbH

Wietersdorf: Wietersdorf 1, A-9373 Klein St. Paul, T +43 (4264) 3131 0, e-mail: wietersdorf@zement.wup.at
Peggau: Alois-Kern-Str. 1, A-8120 Peggau, T +43 (3127) 201 0, e-mail: peggau@zement.wup.at

www.zement.wup.at





LEISTUNGSERKLÄRUNG Nr. 2523-CPR-0087

1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps: **CEM I 52,5 R**
2. Verwendungszweck(e): **Zur Herstellung von Beton, Mörtel, Einpressmörtel, usw.**
3. Hersteller: **w&p Zement GmbH, Wiefersdorf 1, A-9373 Klein St. Paul**
4. System(e) zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit:
System 1+
5. Harmonisierte Norm: **EN 197-1:2011**
6. Notifizierte Stelle: **VÖZ-ZERT No.2523**
7. Erklärte Leistung:

Wesentliche Merkmale	Leistung
Normalzemente (Unterfamilien) Bestandteile und Zusammensetzung	CEM I
Druckfestigkeit (Anfangs- und Normfestigkeit)	52,5 R
Erstarrungsbeginn	Bestanden
Unlöslicher Rückstand	Bestanden
Glühverlust	Bestanden
Raumbeständigkeit - Dehnungsmaß - SO ₃ -Gehalt	Bestanden Bestanden
Chloridgehalt	Bestanden

Die Leistung des vorstehenden Produkts entspricht der erklärten Leistung/den erklärten Leistungen. Für die Erstellung der Leistungserklärung im Einklang mit der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 ist allein der obengenannte Hersteller verantwortlich.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:



Dipl.-Ing. Walter Steinwender
Leitung Entwicklung/Qualitätssicherung



Wiefersdorf, 10.01.2017



Berndt Schafflechner
Prokurist



w&p Zement GmbH

Werk Wiefersdorf
Wiefersdorf 1
A-9373 Klein St. Paul
Tel. +43(0)4264/3333 0
Fax +43(0)4264/3131 1204
e-mail: wiefersdorf@zement.wsp.at

Werk Poggau
Alois-Kern Straße 1
A-8120 Poggau
Tel. +43 (0)3127/201 0
Fax +43 (0)3127/201 2204
e-mail: poggau@zement.wsp.at

Büro Klagenfurt
Ferdinand-Jörgltsch Straße 15
A-9020 Klagenfurt
Tel. +43(0)463/56676 0
Fax +43(0)463/596676 1783
e-mail: office@zement.euip.at

Firmensitz: Klein St. Paul, LG Klagenfurt, FN 100805 v. ARA, Lizenz-Nr. 18170, DVR 0063037, UID: ATU36875903
BKS Bank AG, Klagenfurt, Konto Nr. 100 119005, BLZ 17000, IBAN AT72 1700 0001 0011 9005, BIC BFKKAT2K





SuperMix[®]C

Produkt	Betonzusatzstoff Kombinationsprodukt GC-HS gemäß ÖNORM B 3309-1.
Zusammensetzung	Hüttensand, Kalkstein, Flugasche.
Anwendung	Supermix C wird als Betonzusatzstoff bei der Betonherstellung an der Mischanlage angewendet. Die maximal erlaubte Zugabemenge ist nach ÖNORM B 4710-1 festzulegen. Bei der Rezepturerstellung wird Supermix C nach dem k-Wert-Konzept mit $k = 0,8$ als Bindemittel angerechnet. Vor der Anwendung von Supermix C ist eine Beton-Erstprüfung nach ÖNORM B 4710-1 bzw. anderen anzuwendenden Vorschriften durchzuführen.
Eigenschaften	Betonzusatzstoff AHWZ ist ein aufbereiteter hydraulisch wirksamer Betonzusatzstoff, der alle Anforderungen der ÖNORM B 3309-1 erfüllt. Nachweis der Sulfatbeständigkeit liegt vor. Supermix C verbessert die Betoneigenschaften hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Dichtigkeit des Porengefüges, Wasserundurchlässigkeit und Temperaturentwicklung.
Technische Daten	Mahlfeinheit: ca. 5.000 +/- 250 cm ² /g nach Blaine Aktivitätsindex 28d: ≥ 90 % Kornrohddichte: ca. 2,75 +/- 0,15 kg/dm ³
Lieferform/Lagerung	Lose im Silowagen/vor Feuchtigkeit geschützt in geeigneten Silos.
Hinweise und Sicherheitsratschläge	Supermix C ist im Sinne des gültigen Chemikaliengesetzes nicht kennzeichnungspflichtig, d.h. nicht gefährlich oder giftig. Schutzmaßnahmen sind nur bei Staubentwicklung beim Verarbeiten erforderlich, sofern der allgemeine Expositionsgrenzwert für Staub von 10 mg/m ³ überschritten wird. In diesem Fall ist eine partikelfiltrierende Halbmaske FFP2 zu verwenden. Bei sachgemäßer Anwendung sind Gefahren und Schädigungen auszuschließen. Für den Umgang mit Supermix C in Kombination mit Zement sind die entsprechenden Hinweise für Zement zu beachten. Über den richtigen Gebrauch und über die Eigenschaften von aufbereiteten hydraulisch wirksamen Betonzusatzstoffen informiert Sie die Bauberatungsstelle der Vereinigung Österreichischer Zementindustrie, 1030 Wien, Franz-Grill-Straße 9, 1030 Wien, Tel.: 01/7146681-0, e-mail: office@voezfi.at und unter www.zement.at .
Qualitätssicherung	Konformitätsnachweise durch interne Überwachungsprüfungen und Fremdüberwachung nach ÖNORM B 3309-1. Werk Wietersdorf – Übereinstimmungszeugnis Nr.: Z-1.3.4-13-13401 Werk Peggau – Registrierungsbescheinigung Nr.: R-1.3.4-15-10968
Einstufung lt. Chemikaliengesetz	Nicht kennzeichnungspflichtig.
Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers/Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrungen, entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtung aus dem Kaufvertrag. Sie entbinden den Käufer nicht davon, unsere Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck in eigener Verantwortung selbst zu prüfen.	
Sicherheitsdatenblatt anfordern bzw. beachten Stand: Jänner 2017	

w&p Zement GmbH

Wietersdorf: Wietersdorf 1, A-9373 Klein St. Paul, T +43 (4264) 3131 0, e-mail: wietersdorf@zement.wup.at

Peggau: Alois-Kern-Str. 1, A-8120 Peggau, T +43 (3127) 201 0, e-mail: peggau@zement.wup.at

www.zement.wup.at





Dynamon RC 650



Fließmittel auf Basis Polycarboxylatether

ANWENDUNGSBEREICH

Dynamon RC 650 ist ein universell einsetzbares Fließmittel für Transportbeton auf Basis Polycarboxylatether mit ausgezeichneter Verflüssigung, anhaltender Konsistenz sowie guter Festigkeitsentwicklung.

EINIGE ANWENDUNGSBEISPIELE

- Fließbeton.
- Selbstverdichtender Beton (SCC-Beton).
- Sichtbeton.
- Betone die hohe Wassereinsparung erfordern.
- Hochleistungsbeton (HL-Beton).

TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN

Dynamon RC 650 wird zur Wasserreduzierung bei gleicher Verarbeitbarkeit des Betons eingesetzt. Daraus resultieren eine höhere Festigkeit, eine geringere Durchlässigkeit sowie eine erhöhte Dauerhaftigkeit des Bauteils.

ANWENDUNGSRICHTLINIEN

Folgende Prüfberichte und Zertifikate liegen vor und können bei Bedarf angefordert werden:

- Verträglichkeit von **Dynamon RC 650** mit Luftporenbildnern;
- CE-Zertifikat: CE-Zeichen und Leistungserklärung gemäß EN 934-2:2009+A1:2012, Tab. 3.1/3.2.

VERARBEITUNG

Die Dosierung von **Dynamon RC 650** ist im Zuge der Erstprüfung je nach gewünschtem Verflüssigungseffekt oder gewünschter Wassereinsparung festzulegen.

Dynamon RC 650 entfaltet die höchste dispergierende Wirkung, wenn es nach den anderen Mischungskomponenten (Zement, Zusatzstoffe, Mineralzusätze oder Füllstoffe und mind. 80% des Wasseranteils) zugesetzt wird.

Es sind die geltenden Regelwerke für die Betonherstellung einzuhalten.

VERBRAUCH

Empfohlene Dosierung:

0,2% bis 1,5% bezogen auf das Zementgewicht.

Zulässige Höchstdosierung:

2,0% bezogen auf das Zementgewicht.

LIEFERFORM

25 kg, 220 kg, 1000 kg, lose.

LAGERUNG

Lagerdauer: 1 Jahr.

Lagerbedingung: trocken, frostfrei und geschützt vor Sonneneinstrahlung.

VORSICHTS- UND SICHERHEITSHINWEISE

Hinweise zur sicheren Anwendung unserer Produkte können der letzten Version des Sicherheitsdatenblattes auf www.mapei.com entnommen werden.



Dynamon RC 650

TECHNISCHE DATEN	
KENNDATEN DES PRODUKTS	
Konsistenz:	flüssig
Geruch:	charakteristisch
Farbe:	braun
Dichte (g/cm ³):	1,05-1,09
pH-Wert:	4-6
Chloridgehalt (%):	≤ 0,10
Alkaligehalt (%):	≤ 3,5
Kennzeichnung nach - GISCODE:	BZM30 - Betonzusatzmittel, reizwirkend Weitere Hinweise können dem Sicherheitsdatenblatt entnommen werden

ENTSORGUNG

Gebinde tropffrei entleeren. Gebinde und Produktreste sind gemäß den örtlichen Richtlinien zu entsorgen.

PRODUKT FÜR DEN BERUFSMÄSSIGEN GEBRAUCH.

N.B.

Obige Angaben können nur allgemeine Hinweise sein. Die außerhalb unseres Einflusses stehenden Arbeitsbedingungen und die Vielzahl der unterschiedlichen Materialien schließen einen Anspruch aus diesen Angaben aus. Im Zweifelsfalle empfehlen wir, ausreichende Eigenversuche durchzuführen. Eine Gewährleistung kann nur für die stets gleich bleibende Qualität unserer Produkte übernommen werden.

Die aktuellste Version des technischen Merkblatts erhalten Sie auf unserer Homepage unter www.mapei.com. Die vergangenen Versionen verlieren ihre Gültigkeit.

RECHTLICHER HINWEIS

Der Inhalt aus diesem technischen Merkblatt darf in andere projektbezogene Dokumente kopiert werden, aber durch das hieraus entstehende neue Dokument werden die Anforderungen des technischen Merkblattes, welches zum Zeitpunkt der Verarbeitung des MAPEI-Produktes gültig ist, weder abgeändert noch ersetzt.

Die aktuellste Version des technischen Merkblattes können Sie von unserer Homepage unter www.mapei.com herunterladen.

JEDE ABÄNDERUNGEN DES TEXTES ODER DER ANFORDERUNGEN, DIE IN DEM TECHNISCHEM MERKBLATT ENTHALTEN SIND ODER AUS DIESEM ABGELEITET WERDEN, FÜHREN ZUM AUSSCHLUSS DER VERANTWORTUNG VON MAPEI.

Alle relevanten Referenzen zum Produkt sind auf Anfrage oder im Internet unter www.mapei.com erhältlich

Die Visualisierung der hier veröffentlichten Texte, Fotos und Illustrationen ist Eigentum der MAPEI S.p.A. und darf nicht ohne schriftliche Genehmigung der MAPEI S.p.A. verwendet werden.

10834-5-2017 (DxA)

Anhang B

Mischung 1.1

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 21.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,49

Wassermenge: 174

Rezeptur: V 3.3

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	12:50	
Mischbeginn:	13:02	Mischbeginn I
Zugabe Wasser:	13:03	
Überprüfung Konsistenz:	13:04	
Zugabe FM	13:04	+200g FM
Zugabe Entsch	13:04	+10g Entsch
Mischende:	13:08	Mischende I
Frischbetonprüfung:	13:09	
Ausbreitmaß:		47cm und 50cm
Mischbeginn:	13:11	Mischbeginn II
Überprüfung Konsistenz:	13:12	
Zugabe FM	13:12	+34g FM
Mischende:	13:15	Mischende II
Frischbetonprüfung:	13:16	
Ausbreitmaß:		49cm und 51cm
Betontemperatur		19,7°C
LP-Gehalt		0,80%
		Anm.: Beton kann als "selbstnivellierend" und sehr zäh beschrieben werden
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde

	Bautech Labor GmbH 7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379 zentrallabor@bautechlabor.at	Niederlassung Steiermark Thalerhofstraße 86, 8141 Unterpennstätten Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453 office.btup@bautechlabor.at

Auftraggeber:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT-Nr.:	VNr. 1.1
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,63/20	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr.:	Werk: W&P Wietersdf. 100
Zementsorte2:		Nr.:	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,63	W/B - Wert =	206 kg/m ³ / 315 kg/m ³ = 0,65
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr.:	k = 0,8 Anteil in %v.B: 20

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:				Leim- gehalt: 314
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum	
0,785	kg/m ³	kg / Liter	Liter	
Wasser	206	/ 1,00	→ 206	
Zement 1	263	/ 3,14	→ 84	
Zement 2		/ 2,99	→	
Zusatzstoff	66	/ 2,74	→ 24	
Luftporen	1,5	% -	→ 15	
Zuschlag	1826	← 2,72	x 671	
Summe	2360	= Frischbetonrohddichte	1000	

Einwaage: Bestandteile:	EW tr.		Eigen- feuchte		EW f. kg/m ³	Misch- größe (l)	EW in kg je Mische	+/-
	%	kg/m ³	%	kg				
Zement 1	80	263			263	55	14,438	
Zement 2								
Zusatzstoff	20	66	%	kg	66		3,609	
SW Gradenberg	KK 0/2e	52	950		950	Nr.	52,233	
	KK 4/16	48	877		877	Nr.	48,216	
						Nr.		
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1826			1826		100,449	
Wasser		206	-		206		11,330	
ZM-Nr.	RC650	%ZM	0,345	Dichte:	1,02	0,91	0,89	0,050
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,07	Dichte:	1,00	0,18	0,18	0,010
ZM-Nr.		%ZM		Dichte:	1,00			
Sum ohne / mit ZSM:		2360	/	2362	kg/m³		129,886	

Ergebnisse: UP..	Datum: 7.12.17	Zeit: 8:45	Prüfer:	RüRö:
Temp. L : 20	Wü1: 8,160	w: 11,33	W: 209	Festbeton:
Temp. B : 20	Wü2: 8,165	z: 14,44	Z: 266	
Kons. 1 : 52	Wü3: 8,165	zu: 3,61	ZU: 67	
Kons. 2 :	Wü4: 8,175	k: 100,51	K: 1853	r1:
Kons. 3 :	Wü5: 8,145	W/Z: 0,78	W/B: 0,65	d1:
m LPTopf: 19,161	Wü6: 8,130	Probenlagerung: Norm		d2:
LP 1 : 0,6	Wü7: 8,147	anr. Kernfeuchte	kg/m ³	r7:
LP 2 :	Wü8: 8,109	Pr.-Bezeichng:		d7:
LP 3 :	Wü9: 8,069	Prüfdatum d28:		r28:
ρLP (kg/m ³): 2395	ρ WÜ: 2412			d28:
				d56:

Weitere Proben / Bemerkungen:

10 x W15, 2 x WU

+1 W15 für BTUP

2,74

Mischung 1.2

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 07.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,68

Wassermenge: 203

Rezeptur: V 1.2

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	09:40	
Mischbeginn:	09:50	
Zugabe Wasser:	09:51	
Überprüfung Konsistenz:	09:52	
Zugabe FM	09:52	+52,4g FM
Zugabe Entsch	09:52	+10g Entsch
Überprüfung Konsistenz:	09:56	+6,6g FM
Mischende:	09:58	
Frischbetonprüfung:	10:00	
Ausbreitmaß:		50cm und 50cm
Betontemperatur		19,9°C
LP-Gehalt		0,50%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde



Bautech Labor GmbH
 7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien
 Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379
 zentrallabor@bautechlabor.at

Niederlassung Steiermark
 Thalerhofstraße 86, 8141 Unterpörschnitz
 Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453
 office.blup@bautechlabor.at

Auftrageber:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 1.2
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,63/40	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wietersdorf 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,63	W/B - Wert =	203 kg/m ³ / 299 kg/m ³ = 0,68
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in %v.B. 40

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:			
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum
1,041	kg/m ³	kg / Liter	Liter
Wasser	203	/ 1,00	→ 203
Zement 1	195	/ 3,14	→ 62
Zement 2		/ 2,99	→
Zusatzstoff	130	/ 2,74	→ 47
Luftporen	0,6	% -	→ 6
Zuschlag	1854	← 2,72	x 681
Summe	2382	= Frischbetonrohddichte	1000

Leimgehalt: 313

Einwaage:	EW tr.		Eigenfeuchte		EW f.	Mischgröße (l)	EW in kg	+/-
Bestandteile:	%	kg/m ³			kg/m ³		je Mische	
Zement 1	60	195			195	60	11,700	
Zement 2								
Zusatzstoff	40	130	%	kg	130		7,800	
SW Gradenberg KK 0/2e	52	964			964	Nr.	57,831	
KK 4/16	48	890			890	Nr.	53,382	
						Nr.		
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1854			1854		111,213	
Wasser		203			203		12,180	
ZM-Nr. 3613 RC650	%ZM	0,50	Dichte:	1,02	0,98	0,96	0,059	
ZM-Nr. Entsch	%ZM	0,09	Dichte:	1,00	0,17	0,17	0,010	
ZM-Nr.	%ZM		Dichte:	1,00				
Sum ohne / mit ZSM:		2382	/	2383	kg/m³		142,962	

Ergebnisse: UP..	Datum:	7.12.17	Zeit:	9:55	Prüfer:	RüRö:
Temp. L :	19,2	Wü1: 8,120	w: 12,18	W: 204	Festbeton:	
Temp. B :	19,9	Wü2: 8,142	z: 11,70	Z: 196	r1:	
Kons. 1 :	50	Wü3: 8,159	zu: 7,80	ZU: 131	d1:	
Kons. 2 :		Wü4: 8,176	k: 111,28	K: 1866	r2:	
Kons. 3 :		Wü5: 8,144	W/Z: 1,04	W/B: 0,68	d2:	Leim:
m LPTopf:	19,176	Wü6: 8,183	Probenlagerung: Norm		r7:	314,42
LP 1 :	0,5	Wü7: 8,169	anr. Kernfeuchte	kg/m ³	d7:	Pr.Serie:
LP 2 :		Wü8: 8,111	Pr.-Bezeichng:		r28:	VNr. 1.2
LP 3 :		Wü9: 8,129			d28:	Verd.Zeit:
ρLP (kg/m ³):	2397	ρ Wü: 2414	Prüfdatum d28:		d56:	30

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 3 x WU	+1 W15 für BTUP
	2,74

Mischung 1.3

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 07.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,71

Wassermenge: 201

Rezeptur: V 1.3

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	10:45	
Mischbeginn:	10:56	
Zugabe Wasser:	10:57	
Überprüfung Konsistenz:	10:59	
Zugabe FM	10:59	+66,9g FM
Zugabe Entsch	10:59	+10g Entsch
Überprüfung Konsistenz:	11:00	
Mischende:	11:01	
Frischbetonprüfung:	11:03	
Ausbreitmaß:		51cm und 52 cm
Betontemperatur		20,4°C
LP-Gehalt		0,50%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde



Bautech Labor GmbH
7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien
Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379
zentrallabor@bautechlabor.at

Niederlassung Steiermark
Thalerhofstraße 88, 8141 Unterpremstätten
Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453
office.blup@bautechlabor.at

Auftragneher:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT-Nr.:	VNr. 1.3
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,63/60	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wietersdorf. 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,63	W/B - Wert =	201 kg/m ³ / 283 kg/m ³ = 0,71
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in % v.B. 60

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:			
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum
1,563	kg/m ³	kg / Liter	Liter
Wasser	201	/ 1,00	201
Zement 1	129	/ 3,14	41
Zement 2		/ 2,99	
Zusatzstoff	193	/ 2,74	70
Luftporen	0,6	% -	6
Zuschlag	1854	← 2,72	x 682
Summe	2377	= Frischbetonrohddichte	1000

Leimgehalt: 312

Einwaage:	EW tr.		Eigenfeuchte		EW f.	Mischgröße (l)	EW in kg	+/-
Bestandteile:	%	kg/m ³	%	kg	kg/m ³		je Mische	
Zement 1	40	129			129	60	7,718	
Zement 2								
Zusatzstoff	60	193			193		11,577	
SW Gradenberg	KK 0/2e	52	964		964	Nr.	57,844	
	KK 4/16	48	890		890	Nr.	53,395	
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1854			1854		111,239	
Wasser		201	-		201		12,060	
ZM-Nr. 3613	RC650	%ZM	0,87	Dichte:	1,02	1,12	1,10	0,067
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,13	Dichte:	1,00	0,17	0,17	0,010
ZM-Nr.		%ZM		Dichte:	1,00			
Sum ohne / mit ZSM:		2377	/	2378 kg/m³			142,672	

Ergebnisse: UP..	Datum: 7.12.17	Zeit: 11:00	Prüfer:	RüRö:
Temp. L: 19,7	WÜ1: 8,088	w: 12,06	W: 202	Festbeton:
Temp. B: 20,4	WÜ2: 8,120	z: 7,72	Z: 129	
Kons. 1: 52	WÜ3: 8,136	zu: 11,58	ZU: 194	
Kons. 2:	WÜ4: 8,091	k: 111,32	K: 1864	r1:
Kons. 3:	WÜ5: 8,146	W/Z: 1,56	W/B: 0,71	d1:
m LPTopf: 19,108	WÜ6: 8,089	Probenlagerung: Norm		r2:
LP 1: 0,5	WÜ7: 8,137	anr. Kernfeuchte	kg/m ³	d2:
LP 2:	WÜ8: 8,080	Pr.-Bezeichnung:		r7:
LP 3:	WÜ9: 8,101			d7:
pLP (kg/m ³): 2389	p WÜ: 2403	Prüfdatum d28:		r28:
				d28:
				d58:

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 3 x WU	+1 W15 für BTUP
	2,74

Mischung 2.1

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 07.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,53

Wassermenge: 194

Rezeptur: V 2.1

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	12:15	
Mischbeginn:	12:28	
Zugabe Wasser:	12:29	
Überprüfung Konsistenz:	12:29	
Zugabe FM	12:29	+68g FM
Zugabe Entsch	12:29	+10g Entsch
Überprüfung Konsistenz:	12:32	
Zugabe FM	12:32	+32,4g FM
Mischende:	12:35	
Frischbetonprüfung:	12:38	
Ausbreitmaß:		51cm und 48cm
Betontemperatur		21,4°C
LP-Gehalt		0,50%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	2	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde

	Bautech Labor GmbH 7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien Tel: +43-50826-2341 Fax DW 2379 zentrallabor@bautechlabor.at	Niederlassung Steiermark Thalerhofstraße 86, 8141 Unterpennstätten Tel: +43-50826-6453 Fax DW 996453 office.btup@bautechlabor.at

Auftragneher:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 2.1
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,53/20	Sortennr.:	
Zementart 1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wienersdorf 100
Zementart 2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,53	W/B - Wert =	194 kg/m ³ / 350 kg/m ³ = 0,55
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in %v.B: 20

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:				Leim- gehalt: 313
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum	
0,665	kg/m ³	kg / Liter	Liter	
Wasser	194	/ 1,00	→ 194	
Zement 1	292	/ 3,14	→ 93	
Zement 2		/ 2,99	→	
Zusatzstoff	73	/ 2,74	→ 27	
Luftporen	0,6	% -	→ 6	
Zuschlag	1851	← 2,72	x 681	
Summe	2410	= Frischbetonrohddichte	1000	

Einwaage: Bestandteile:	EW tr.		Eigen- feuchte		EW f. kg/m ³	Misch- größe (l)	EW in kg je Mische	+/-
	%	kg/m ³	%	kg				
Zement 1	80	292			292	55	16,042	
Zement 2								
Zusatzstoff	20	73	%	kg	73		4,010	
SW Gradenberg	KK 0/2e	49	907		907	Nr.	49,883	
	KK 4/16	51	944		944	Nr.	51,919	
						Nr.		
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1851			1851		101,803	
Wasser		194	-		194		10,670	
ZM-Nr. 3613	RC65D	%ZM	0,63	Dichte: 1,02	1,82	1,79	0,100	
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,06	Dichte: 1,00	0,18	0,18	0,010	
ZM-Nr.		%ZM		Dichte: 1,00				
Sum ohne / mit ZSM:		2410		/ 2412 kg/m³			132,635	

Ergebnisse: UP..	Datum: 7.12.17	Zeit: 12:35	Prüfer:	RüRö:
Temp. L : 20,7	Wü1: 8,145	w: 10,67	W: 194	Festbeton: r1: d1: r2: d2: r7: d7: r28: d28: d56:
Temp. B : 21,4	Wü2: 8,190	z: 16,04	Z: 291	
Kons. 1 : 50	Wü3: 8,215	zu: 4,01	ZU: 73	
Kons. 2 :	Wü4: 8,202	k: 101,91	K: 1850	
Kons. 3 :	Wü5: 8,192	W/Z: 0,67	W/B: 0,55	
m LPTopf: 19,260	Wü6: 8,217	Probenlagerung: Norm		
LP 1 : 0,5	Wü7: 8,194	anr. Kernfeuchte	kg/m ³	
LP 2 :	Wü8: 8,203	Pr.-Bezeichnung:		
LP 3 :	Wü9: 8,225			
ρLP (kg/m ³): 2408	ρ Wü: 2429	Prüfdatum d28:		Leim: 312,97 Pr.Serie: VNr. 2.1 Verd.Zeit: 30

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 2 x WU	+1 W15 für BTUP 2,71

Mischung 2.2

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 21.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,58

Wassermenge: 192

Rezeptur: V 2.2

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	08:00	
Mischbeginn:	08:29	
Zugabe Wasser:	08:31	
Überprüfung Konsistenz:	08:33	
Zugabe FM	08:34	+41,3g FM
Zugabe Entsch	08:34	+10g Entsch
Mischende:	08:37	Mischende I
Frischbetonprüfung:	08:40	
Ausbreitmaß:		65cm und 62cm zu weich, deshalb werden 3% der Eingangsbestandteile hinzugegeben
Mischbeginn II:	08:52	Zugabe der 3%
Überprüfung Konsistenz	08:54	Visuelle Beurteilung: noch zu weich --> Zugabe von weiteren 5% der Eingangsbestandteilen
Mischende:	09:01	Zugabe der 5%
	09:03	Mischende II
Frischbetonprüfung:	09:05	
Ausbreitmaß:		53cm und 53cm
Betontemperatur		19,8°C
LP-Gehalt		0,50%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde



Bautech Labor GmbH
7. Haldequerstraße 5b, 1110 Wien
Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379
zentrallabor@bautechlabor.at

Niederlassung Steiermark
Thalerhofstraße 86, 8141 Unterpremstätten
Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453
office.btup@bautechlabor.at

Auftragneher:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 2.2
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfort:	BT UP
Betonsorte:	0,53/40	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wietersdorf 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,53	W/B - Wert =	192 kg/m ³ / 332 kg/m ³ = 0,58
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in %v.B: 40

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:				Leim- gehalt:
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum	
0,887	kg/m ³	kg / Liter	Liter	
Wasser	192	/ 1,00	→ 192	314
Zement 1	217	/ 3,14	→ 69	
Zement 2		/ 2,99	→	
Zusatzstoff	144	/ 2,74	→ 53	
Luftporen	0,6	% -	→ 6	
Zuschlag	1851	← 2,72	x 680	
Summe	2403	= Frischbetonrohndichte	1000	

Einwaage:	EW tr.		Eigen- feuchte		EW f.	Misch- größe (l)	EW in kg	+/-
Bestandteile:	%	kg/m ³			kg/m ³		je Mische	
Zement 1	60	217			217	60	12,991	1,04
Zement 2								
Zusatzstoff	40	144	%	kg	144		8,661	0,693
SW Gradenberg	KK 0/2e	49	907		907	Nr.	54,407	4,352
	KK 4/16	51	944		944	Nr.	56,628	4,53
						Nr.		
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1851			1851		111,035	8,882
Wasser		192	-		192		11,520	0,922
ZM-Nr. 3613	RC650	%ZM	1,17	Dichte:	1,02	2,52	2,47	0,1513
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,08	Dichte:	1,00	0,17	0,17	0,010
ZM-Nr.		%ZM		Dichte:	1,00			
Sum ohne / mit ZSM:		2403	/	2406	kg/m ³		155,906	

Ergebnisse: UP..	Datum:	Zeit:	Prüfer:	RüRö:
Temp. L : 20	21.12.17	9:00		
Temp. B : 19,8	Wü1: 8,228	w: 12,44	W: 192	Festbeton:
Kons. 1 : 53	Wü2: 8,214	z: 14,03	Z: 217	
Kons. 2 :	Wü3: 8,218	zu: 9,35	ZU: 144	r1:
Kons. 3 :	Wü4: 8,254	k: 120,08	K: 1855	d1:
m LPTopf: 19,266	Wü5: 8,293	W/Z: 0,89	W/B: 0,58	r2:
LP 1 : 0,5	Wü6: 8,220	Probenlagerung: Norm		r7:
LP 2 :	Wü7: 8,313	anr. Kernfeuchte	kg/m ³	d7:
LP 3 :	Wü8: 8,240	Pr.-Bezeichng:		r28:
ρLP (kg/m ³): 2408	Wü9: 8,248	Prüfdatum d28:		d28:
	ρ Wü: 2444			d56:

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 3 x WU	+1 W15 für BTUP
	2,72

Mischung 2.3

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 21.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,60

Wassermenge: 189

Rezeptur: V 2.3

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	09:50	
Mischbeginn:	10:06	
Zugabe Wasser:	10:07	
Überprüfung Konsistenz:	10:08	
Zugabe FM	10:08	+130g FM
Zugabe Entsch	10:08	+10g Entsch
Mischende:	10:11	Mischende
Frischbetonprüfung:	10:12	
Ausbreitmaß:		55cm und 54cm
Betontemperatur		18,9°C
LP-Gehalt		0,40%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde



Bautech Labor GmbH
7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien
Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379
zentrallabor@bautechlabor.at

Niederlassung Steiermark
Thalerhofstraße 66, 8141 Unterpennstätten
Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453
office.btup@bautechlabor.at

Auftragneher:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 2.3
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,53/60	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wiersdorf 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,53	W/B - Wert =	189 kg/m ³ / 314 kg/m ³ = 0,60
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in % v.B.: 60
Stoffbedarf für 1m³ verdichteten Beton:			
W/Z - Wert	1,324	Masse	kg/m ³
		Reindichte	kg / Liter
			Stoffraum
			Liter
Wasser		189	189
Zement 1		143	45
Zement 2			
Zusatzstoff		214	78
Luftporen		0,6	6
Zuschlag		1853	681
Summe		2399	1000
		= Frischbetonrohddichte	
			Leimgehalt: 313
Einwaage:	EW tr.	Eigen-	EW f.
Bestandteile:	% kg/m ³	feuchte	kg/m ³
Zement 1	40 143		143
Zement 2			
Zusatzstoff	60 214	% kg	214
SW Gradenberg KK 0/2e	49 908		908
KK 4/16	51 945		945
Summe K	100 1853		1853
Wasser			189
ZM-Nr. 3613 RC650	%ZM 1,52	Dichte: 1,02	2,17
ZM-Nr. Entsch	%ZM 0,12	Dichte: 1,00	0,17
ZM-Nr.	%ZM	Dichte: 1,00	
Sum ohne / mit ZSM:	2399 /	2402 kg/m ³	144,096
Ergebnisse: UP..	Datum: 21.12.17	Zeit: 10:06	Prüfer:
Temp. L : 18,5	Wü1: 8,202	w: 11,34	W: 190
Temp. B : 18,9	Wü2: 8,249	z: 8,56	Z: 143
Kons. 1 : 55	Wü3: 8,180	zu: 12,85	ZU: 215
Kons. 2 :	Wü4: 8,174	k: 111,35	K: 1862
Kons. 3 :	Wü5: 8,218	W/Z: 1,32	W/B: 0,60
m LPTopf: 19,281	Wü6: 8,173	Probenlagerung: Norm	
LP 1 : 0,4	Wü7: 8,182	anr. Kernfeuchte	kg/m ³
LP 2 :	Wü8: 8,206	Pr.-Bezeichnung:	
LP 3 :	Wü9: 8,204	Prüfdatum d28:	
ρLP (kg/m ³): 2410	ρ Wü: 2429		
Weitere Proben / Bemerkungen:			RÜRö:
10 x W15, 3 x WU		+1 W15 für BTUP	Festbeton:
			r1:
			d1:
			r2:
			d2:
			r7:
			d7:
			r28:
			d28:
			d56:
			Leim: 313,70
			Pr.Serie: VNr. 2.3
			Verd.Zeit: 30
			6000
			2,73

Mischung 3.1

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 07.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,43

Wassermenge: 178

Rezeptur: V 3.1

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	13:15	
Mischbeginn:	13:41	
Zugabe Wasser:	13:42	
Überprüfung Konsistenz:	13:43	
Zugabe FM	13:43	+137,9g FM
Zugabe Entsch	13:43	+10g Entsch
Überprüfung Konsistenz:	13:48	
Zugabe FM	13:48	+50g +50,1g +50g FM
Mischende:	13:52	
Ausbreitmaß:	13:56	ca. 42cm --> zu gering, noch einmal mischen
erneut Mischen	13:57	+52g FM
Mischende	13:59	
Ausbreitmaß:	14:00	48cm -> erneut zu gering, noch einmal mischen
erneut Mischen	14:06	+44,6g FM
Mischende	14:08	
Frischbetonprüfung:		
Ausbreitmaß	14:09	50cm und 53 cm
Betontemperatur		27.3°C
LP-Gehalt		0,80%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	2	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde



Bautech Labor GmbH
7. Haldequerstraße 5b, 1110 Wien
Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379
zentrallabor@bautechlabor.at

Niederlassung Steiermark
Thalerhofstraße 85, 8141 Unterpennstätten
Tel: +43-50626-8453 Fax DW 996453
office.blup@bautechlabor.at

Auftraggeber:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 3.1
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,43/20	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wietersdf. 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,43	W/B - Wert =	178 kg/m ³ / 396 kg/m ³ = 0,45
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in %v.B: 20

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:				Leim- gehalt:
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum	
0,539	kg/m ³	kg / Liter	Liter	
Wasser	178	/ 1,00	→ 178	313
Zement 1	330	/ 3,14	→ 105	
Zement 2		/ 2,99	→	
Zusatzstoff	83	/ 2,74	→ 30	
Luftporen	0,6	% -	→ 6	
Zuschlag	1852	← 2,72	x 681	
Summe	2442	= Frischbetonrohddichte	1000	

Einwaage:	EW tr.		Eigen- feuchte		EW f.	Misch- größe (l)	EW in kg je Mische	+/-
	%	kg/m ³	%	kg				
Zement 1	80	330			330	55	18,150	
Zement 2								
Zusatzstoff	20	83			83		4,538	
SW Gradenberg	KK 0/2e	49	907		907	Nr.	49,905	
	KK 4/16	51	944		944	Nr.	51,942	
						Nr.		
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1852			1852		101,847	
Wasser		178	-	7 =	171		9,413	
ZM-Nr. 3613	RC650	%ZM	2,12	Dichte:	1,02	7,00	6,86 l	0,385
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,06	Dichte:	1,00	0,18	0,18 l	0,010
ZM-Nr.		%ZM		Dichte:	1,00		l	
Sum ohne / mit ZSM:		2442	/	2449 kg/m ³			134,342	

Ergebnisse: UP..	Datum:	Zeit:	Prüfer:	RüRö:
Temp. L: 21,6	7.12.17	14:09		
Temp. B: 27,3	Wü1: 8,198	w: 9,81	W: 178	Festbeton:
Kons. 1: 52	Wü2: 8,286	z: 18,15	Z: 330	
Kons. 2:	Wü3: 8,295	zu: 4,54	ZU: 83	r1:
Kons. 3:	Wü4: 8,281	k: 101,85	K: 1853	d1:
m LPTopf: 19,553	Wü5: 8,277	W/Z: 0,54	W/B: 0,45	d2:
LP 1: 0,8	Wü6: 8,237	Probenlagerung: Norm		r7:
LP 2:	Wü7: 8,256	anr. Kernfeuchte kg/m ³		d7:
LP 3:	Wü8: 8,308	Pr.-Bezeichnung:		r28:
ρLP (kg/m ³): 2444	Wü9: 8,328	Prüfdatum d28:		d28:
	ρ Wü: 2451			d56:

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 2 x WU	+1 W15 für BTUP
	2,73

Mischung 3.2

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 21.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,47

Wassermenge: 176

Rezeptur: V 3.2

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	10:50	
Mischbeginn:	11:02	
Zugabe Wasser:	11:02	
Überprüfung Konsistenz:	11:03	
Zugabe FM	11:03	+170,2g FM
Zugabe Entsch	11:03	+10g Entsch
Zugabe FM	11:04	+143,1g FM
Mischende:	11:07	Mischende I
Frischbetonprüfung:	11:09	
Ausbreitmaß:		62cm und 62cm
		zu weich, deshalb werden 4% der Eingangsbestandteile hinzugegeben
Mischbeginn II:	11:20	Zugabe der 4%
Überprüfung Konsistenz	11:22	Visuelle Beurteilung: noch zu weich -->
		Zugabe von weiteren 8% der Eingangsbestandteilen
	11:28	Zugabe der 8%
Mischende:	11:30	Mischende II
Frischbetonprüfung:	11:32	
Ausbreitmaß:		47cm und 50cm
Betontemperatur		20,6°C
LP-Gehalt		0,90%
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde



Bautech Labor GmbH
7. Haldequerstraße 5b, 1110 Wien
Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379
zentrallabor@bautechlabor.at

Niederlassung Steiermark
Thalerhofstraße 86, 8141 Unterpremstätten
Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453
office.blup@bautechlabor.at

Auftragegeber:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 3.2
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,43/40	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wietersdöf. 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,43	W/B - Wert =	$176 \text{ kg/m}^3 / 375 \text{ kg/m}^3 = 0,47$
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in %v.B. 40

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:				Stoffraum Liter	Leim- gehalt: 313
W/Z - Wert 0,720	Masse kg/m ³	Reindichte kg / Liter			
Wasser	176	/ 1,00	→	176	
Zement 1	245	/ 3,14	→	78	
Zement 2		/ 2,99	→		
Zusatzstoff	163	/ 2,74	→	60	
Luftporen	0,6	% -	→	6	
Zuschlag	1851	← 2,72	x	681	
Summe	2435	= Frischbetonrohndichte		1000	

Einwaage: Bestandteile:	EW tr.		Eigen- feuchte		EW f. kg/m ³	Misch- größe (l)	EW in kg je Mische	+/-
	%	kg/m ³	%	kg				
Zement 1	60	245			245	60	14,674	1,761
Zement 2								
Zusatzstoff	40	163	%	kg	163		9,783	1,174
SW Gradenberg	KK 0/2e	49	907		907	Nr.	54,427	6,531
	KK 4/16	51	944		944	Nr.	56,648	6,798
						Nr.		
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1851			1851		111,075	13,329
Wasser		176	-	5 =	171		10,254	1,229
ZM-Nr. 3613	RC650	%ZM	2,13	Dichte:	1,02	5,21	5,11	0,313
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,08	Dichte:	1,00	0,19	0,19	0,011
ZM-Nr.		%ZM		Dichte:	1,00			
Sum ohne / mit ZSM:		2435	/	2440 kg/m³			163,602	

Ergebnisse: UP..		Datum: 21.12.17	Zeit: 11:28	Prüfer:		RüRö:
Temp. L :	19,5	Wü1: 8,268	w: 11,81	W: 175	Festbeton:	
Temp. B :	20,6	Wü2: 8,284	z: 16,43	Z: 244		
Kons. 1 :	49	Wü3: 8,286	zu: 10,96	ZU: 163	r1:	
Kons. 2 :		Wü4: 8,306	k: 124,40	K: 1847	d1:	
Kons. 3 :		Wü5: 8,297	W/Z: 0,72	W/B: 0,47	d2:	Leim:
m LPTopf:	19,430	Wü6: 8,279	Probenlagerung: Norm		r7:	312,34
LP 1 :	0,9	Wü7: 8,341	anr. Kernfeuchte	kg/m ³	d7:	Pr.Serie:
LP 2 :		Wü8: 8,285	Pr.-Bezeichnung:		r28:	VNr. 3.2
LP 3 :		Wü9: 8,308	Prüfdatum d28:		d28:	Verd.Zeit:
ρLP (kg/m ³):	2429	ρ Wü: 2458			d56:	30

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 3 x WU	+1 W15 für BTUP
	2,72

Mischung 3.3

Dokumentation der Herstellung der Probekörper für
GVTB II Chloriddiffusionswiderstand bei Transportbeton

F52 GK 16 XD

Datum: 21.12.2017

Leimvolumen konstant

W/B= 0,49

Wassermenge: 174

Rezeptur: V 3.3

[!]

	Uhrzeit	Anmerkungen
Kontrolle der Rezepte und Einwaagen:	12:50	
Mischbeginn:	13:02	Mischbeginn I
Zugabe Wasser:	13:03	
Überprüfung Konsistenz:	13:04	
Zugabe FM	13:04	+200g FM
Zugabe Entsch	13:04	+10g Entsch
Mischende:	13:08	Mischende I
Frischbetonprüfung:	13:09	
Ausbreitmaß:		47cm und 50cm
Mischbeginn:	13:11	Mischbeginn II
Überprüfung Konsistenz:	13:12	
Zugabe FM	13:12	+34g FM
Mischende:	13:15	Mischende II
Frischbetonprüfung:	13:16	
Ausbreitmaß:		49cm und 51cm
Betontemperatur		19,7°C
LP-Gehalt		0,80%
		Anm.: Beton kann als "selbstnivellierend" und sehr zäh beschrieben werden
Herstellung Probekörper	Anzahl:	Würfelnummer:
WU	3	Anm.: Prüfung der WU an der Stahl-Seite!
Druckfestigkeit	3+3	
Porosität	1	
Chloridwiderstand	2	
Nachbehandeln		abdecken nach ca. einer halben Stunde

	Bautech Labor GmbH 7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379 zentrallabor@bautechlabor.at	Niederlassung Steiermark Thalerhofstraße 86, 8141 Unterpennstätten Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453 office.btup@bautechlabor.at

Auftragegeber:	TU Graz Projekt CI-Eindringung	AT.-Nr.:	VNr. 3.3
Baustelle:	Vergleichsversuche	Prüfart:	BT UP
Betonsorte:	0,43/60	Sortennr.:	
Zementsorte1:	CEM I 52,5N	Nr. 406	Werk: W&P Wietersdorf 100
Zementsorte2:		Nr.	Werk:
Soll-W/B-Wert:	0,43	W/B - Wert =	174 kg/m ³ / 355 kg/m ³ = 0,49
Zusatzstoff:	Supermix C W&P Peggau	Nr. 2201	k = 0,8 Anteil in %v.B.: 60

Stoffbedarf für 1m ³ verdichteten Beton:			
W/Z - Wert	Masse	Reindichte	Stoffraum
1,078	kg/m ³	kg / Liter	Liter
Wasser	174	/ 1,00	174
Zement 1	161	/ 3,14	51
Zement 2		/ 2,99	
Zusatzstoff	242	/ 2,74	88
Luftporen	0,6	% -	6
Zuschlag	1850	← 2,72	x 680
Summe	2428	= Frischbetonrohddichte	1000

Leimgehalt: 314

Einwaage:	EW tr.		Eigenfeuchte		EW f.	Mischgröße (l)	EW in kg	+/-
Bestandteile:	%	kg/m ³			kg/m ³		je Mische	
Zement 1	40	161			161	60	9,682	
Zement 2								
Zusatzstoff	60	242	%	kg	242		14,523	
SW Gradenberg	KK 0/2e	49	907		907	Nr.	54,400	
	KK 4/16	51	944		944	Nr.	56,620	
						Nr.		
						Nr.		
Summe K	100	1850			1850		111,020	
Wasser		174	-	4 =	170		10,210	
ZM-Nr. 3613	RC650	%ZM	2,42	Dichte:	1,02	3,83	l	0,234
ZM-Nr.	Entsch	%ZM	0,10	Dichte:	1,00	0,16	l	0,010
ZM-Nr.		%ZM		Dichte:	1,00		l	
Sum ohne / mit ZSM:		2428	/	2432 kg/m³				145,679

Ergebnisse: UP..	Datum: 21.12.17	Zeit: 13:12	Prüfer:	RüRö:
Temp. L :	20,3	Wü1: 8,223	w: 10,45	W: 174
Temp. B :	19,7	Wü2: 8,200	z: 9,68	Z: 161
Kons. 1 :	50	Wü3: 8,252	zu: 14,52	ZU: 242
Kons. 2 :		Wü4: 8,322	k: 111,02	K: 1847
Kons. 3 :		Wü5: 8,272	W/Z: 1,08	W/B: 0,49
m LPTopf:	19,389	Wü6: 8,291	Probenlagerung: Norm	
LP 1 :	0,8	Wü7: 8,281	anr. Kernfeuchte	kg/m ³
LP 2 :		Wü8: 8,245	Pr.-Bezeichnung:	
LP 3 :		Wü9: 8,297		
pLP (kg/m ³):	2424	p Wü: 2449	Prüfdatum d28:	

Weitere Proben / Bemerkungen:	6000
10 x W15, 3 x WU	+1 W15 für BTUP
	2,72

	Bautech Labor GmbH 7. Haidequerstraße 5b, 1110 Wien Tel: +43-50626-2341 Fax DW 2379 zentrallabor@bautechlabor.at	Niederlassung Steiermark Thalerhofstraße 66, 8141 Unterpremstätten Tel: +43-50626-6453 Fax DW 996453 office_btup@bautechlabor.at

Frisch- u. Festbetonprüfungen - Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Zusammengestellt von: **POD** Datum: **7.12.17** WL:

Auftraggeber: **TU Graz**
 Vergleichsversuche 2 CI-Eindringung

Angaben:	Beilage:	zu Auftragsnr.:
ZEMENT (Z):	Z1 CEM I 52,5N W&P Wietersdorf	Eingelangt am:
	Z2	Eingelangt am:
ZUSCHLAG (K):	K1 KK 0/2e SWG	Eingelangt am:
	K2 KK 4/16 SWG	Eingelangt am:
	K3	Eingelangt am:
	K4	Eingelangt am:
	K5	Eingelangt am:
ZUSATZSTOFFE (ZST):	ZU1 AHWZ Supermix C W&P Peggau	Eingelangt am:
	ZU2	Eingelangt am:
ZUSATZMITTEL (ZSM):	ZS1 RC650 Mapei	Eingelangt am:
	ZS2 Entschäumer	Eingelangt am:
	ZS3	Eingelangt am:

Versuchsergebnisse:						
Rezeptur		VNr. 1.1	VNr. 1.2	VNr. 1.3	VNr. 2.1	VNr. 3.1
Bezeichnung		0,63/20	0,63/40	0,63/60	0,53/20	0,43/20
Zementsorte1		CEM I 52,5N	CEM I 52,5N	CEM I 52,5N	CEM I 52,5N	CEM I 52,5N
Zementsorte2						
Herstellungsdatum		7.12.17	7.12.17	7.12.17	7.12.17	7.12.17
Zementgehalt	kg/m ³	266	196	129	291	330
Zusatzstoffgehalt	kg/m ³	67	131	194	73	83
Wassergehalt	kg/m ³	209	204	202	194	178
W/B- Wert		0,65	0,68	0,71	0,55	0,45
W/Z- Wert		0,78	1,04	1,56	0,67	0,54
k-Wert lt ON B4710-1		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Zuschlaggehalt	kg/m ³	1853	1866	1864	1850	1853
Kornanteile in %	K1	52	52	52	49	49
	K2	48	48	48	51	51
	K3					
hydr.Zusatzstoff	%	20	40	60	20	20
Zusatz 1	kg/m ³	0,92	0,98	1,12	1,82	7,00
Zusatz 2	kg/m ³	0,19	0,17	0,17	0,17	0,18
Lufttemperatur	°C	20	19	20	21	22
Betontemperatur	°C	20	20	20	21	27
Ausbreitmaß (Prüfalter)	cm	52	50	52	50	52
	cm					
	cm					
LP-Gehalt (Prüfalter)	%	0,6	0,5	0,5	0,5	0,8
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	2395	2397	2389	2408	2444
Verdichtungszeit	sec.	30	30	30	30	30
Probenbezeichnung						
Festbetonrohddichte (MW)						
Prüfalter 1	kg/m ³	r1:	r1:	r1:	r1:	r1:
Prüfalter 2	kg/m ³	r2:	r2:	r2:	r2:	r2:
Prüfalter 3	kg/m ³	r7:	r7:	r7:	r7:	r7:
Prüfalter 4	kg/m ³	r28:	r28:	r28:	r28:	r28:
Betondruckfestigkeit (MW)						
Prüfalter 1	N/mm ²	d1:	d1:	d1:	d1:	d1:
Prüfalter 2	N/mm ²	d2:	d2:	d2:	d2:	d2:
Prüfalter 3	N/mm ²	d7:	d7:	d7:	d7:	d7:
Prüfalter 4	N/mm ²	d28:	d28:	d28:	d28:	d28:
Prüfalter 5	N/mm ²	d56:	d56:	d56:	d56:	d56:
KRD	kg/dm ³	2,74	2,74	2,74	2,71	2,73

Fotos der Betonherstellung



Anhang C

```

import numpy as np
from numpy import sqrt
from scipy.special import erf
from pandas import read_csv, DataFrame
from os import listdir
from os.path import join as path_join
from os.path import dirname

from sklearn.metrics import r2_score

C_i = 0.018 # M%
t = 77760000 # s

# der Einfachheit halber, definiere ich die Funktion vor.
def c_x(C_s_i, D_nss_i, xi):
    return C_i + (C_s_i - C_i) * (1 - erf(xi / (2 * sqrt(D_nss_i * t))))

# Anzahl an Iterationsschritten
# = Zwischenschritte zwischen den nachfolgenden Bereichsgrenzen
steps = 500

# Die Bereiche in denen das kleinste R2 gesucht wird

# Bereich für C s
C_s_min = 0.3
C_s_max = 1.7

# Bereich für D_nss
D_nss_min = 10 * 10 ** -14
D_nss_max = 10 * 10 ** -11

# der Dateipfad für die csv Dateien
# bei mir war er des selbe wie das Skript
path = dirname( file )

# ich lasse alle dateien in diesem pfad durchlaufen
for file in listdir(path):
    # wenn es keine csv datei ist oder
    # ein '-' darin enthält (bei mir die ergebnis csv tabellen)
    # überspringe ich die datei
    if not file.endswith('.csv') or '-' in file:
        continue

    print(file)

    # csv dateien einlesen
    input_file = read_csv(path_join(path, file), sep=';', decimal=',',
skip_blank_lines=True, comment='#')
    input_file = input_file.dropna(0, how='all')
    input_file = input_file.dropna(1, how='all')

    # die beiden variablen
    x = input_file['x'].values.copy()
    C_gemessen = input_file['Cgemessen'].values.copy()

    # startwerte für die ergebnisse
    # r2 extra hoch angesetzt, die beiden anderen sind egal
    r2_res = 100000
    C_s_res = 0
    D_nss_res = 0

    # iteration über die möglichen grenzen
    for C_s in np.arange(C_s_min, C_s_max, (C_s_max - C_s_min) / steps):
        for D_nss in np.arange(D_nss_min, D_nss_max, (D_nss_max - D_nss_min) / steps):
            r2 = np.sum(np.square(C_gemessen - c_x(C_s, D_nss, x)))

            # wenn die fehler quadrate kleiner sind übernehme ich die aktuellen werte
            als zwischenergebnisse
            if r2 < r2_res:
                r2_res = r2
                C_s_res = C_s

```



```
D_nss_res = D_nss

# vorgefertigte funktion um das R2 zu rechnen
R2 = r2_score(C_gemessen, c_x(C_s_res, D_nss_res, x))

# ich habe die dateien so umbenannt, dass keine '.' mehr im dateinamen enthalten
sind (einfach so)
new_file = file.replace('.', '-').replace('-csv', '.csv')

# erstellen der ergebniss datei
f = open(path_join(path, new_file), 'w')

# die kopfzeilen der ergebnissdatei
string = ';\n'.join([
    '# ;Summe der Fehlerquadrate =;{:0.6f}'.format(r2_res),
    '# ;R2 =;{:0.6f}'.format(R2),
    '# ;C_s =;{:0.5f}'.format(C_s_res),
    '# ;D_nss =;{:0.4e}'.format(D_nss_res),
    '# ;;')
]) + ';\n'
f.write(string)
print(string)

# die ergebniss tabelle
df = DataFrame()
df['x [m]'] = x
df['C_gemessen'] = C_gemessen
df['C_x'] = c_x(C_s_res, D_nss_res, x)
df['Fehlerquadrat'] = np.square(df['C_gemessen'] - df['C_x'])
print(df)

# hinzufügen der ergebniss tabelle in die datei
df.to_csv(f, float_format='%0.6f', index=False, sep=';', decimal=',')

# speichern und schließen
f.close()
```

Anhang D

Identification	Amount [g]	EQ ml	EQ ml DB	Chloid mg	Chlorid mg DB	Chlorid %	Chlorid % DB
1.1. A1	1	17,048	17,237	6,0	6,1	0,604	0,611
1.1. A2	1	9,746	9,690	3,5	3,4	0,345	0,344
1.1. A3	1	6,922	6,795	2,5	2,4	0,245	0,241
1.1. A4	1	4,147	4,175	1,5	1,5	0,147	0,148
1.1. A5	1	1,709	1,824	0,6	0,6	0,061	0,065
1.1. A6 +5ml HCL	1	5,776		0,3		0,028	
1.1. A7 +5ml HCL	1	5,428		0,2		0,015	
1.1. A8 +5ml HCL	1	5,508		0,2		0,018	
1.1. B1	1	20,108	20,124	7,1	7,1	0,713	0,713
1.1. B2	1	11,353	11,449	4,0	4,1	0,402	0,406
1.1. B3	1	7,803	7,974	2,8	2,8	0,277	0,283
1.1. B4	1	4,978	5,130	1,8	1,8	0,176	0,182
1.1. B5	1	2,882	2,875	1,0	1,0	0,102	0,102
1.1. B6	1	1,677	1,664	0,6	0,6	0,059	0,059
1.1. B7 +5ml HCL	1	5,856		0,3		0,030	
1.1. B8 +5ml HCL	1	5,734		0,3		0,026	
1.2. A1	1	13,222	13,008	4,7	4,6	0,469	0,461
1.2. A2	1	9,501	9,571	3,4	3,4	0,337	0,339
1.2. A3	1	4,862	5,187	1,7	1,8	0,172	0,184
1.2. A4	1	2,810	2,774	1,0	1,0	0,100	0,098
1.2. A5 +5ml HCL	1	5,782	5,871	0,3	0,3	0,028	0,031
1.2. A6 +5ml HCL	1	5,754		0,3		0,027	
1.2. A7 +5ml HCL	1	5,690		0,2		0,024	
1.2. A8 +5ml HCL	1	5,554		0,2		0,020	
1.2. B1	1	14,674	15,046	5,2	5,3	0,520	0,533
1.2. B2	1	11,927	12,085	4,2	4,3	0,423	0,428
1.2. B3	1	7,333	7,600	2,6	2,7	0,260	0,269
1.2. B4	1	3,930	3,971	1,4	1,4	0,139	0,141
1.2. B5	1	1,370	1,318	0,5	0,5	0,049	0,047
1.2. B6 +5ml HCL	1	5,628		0,2		0,022	
1.2. B7 +5ml HCL	1	5,536		0,2		0,019	
1.2. B8 +5ml HCL	1	5,321		0,1		0,011	
1.3. A1	1	11,361	11,604	4,0	4,1	0,403	0,411
1.3. A2	1	6,861	6,961	2,4	2,5	0,243	0,247
1.3. A3	1	1,800	1,866	0,6	0,7	0,064	0,066
1.3. A4	1	0,436	0,421	0,2	0,1	0,015	0,015
1.3. A5 +5ml HCL	1	5,500		0,2		0,018	
1.3. A6 +5ml HCL	1	5,540		0,2		0,019	
1.3. A7 +5ml HCL	1	5,417		0,1		0,015	
1.3. A8 +5ml HCL	1	5,316		0,1		0,011	
1.3. B1	1	11,960	12,167	4,2	4,3	0,424	0,431
1.3. B2	1	6,446	6,473	2,3	2,3	0,229	0,229

Anhang D

1.3. B3	1	1,626	1,740	0,6	0,6	0,058	0,062
1.3. B4	1	5,393	5,399	0,1	0,1	0,014	0,014
1.3. B5 +5ml HCl	1	5,350	5,313	0,1	0,1	0,012	0,011
1.3. B6 +5ml HCl	1	5,394	5,540	0,1	0,2	0,014	0,019
1.3. B7 +5ml HCl	1	5,382		0,1		0,014	
1.3. B8 +5ml HCl	1	5,344		0,1		0,012	
H1.1. A1 0,5g Probe	0,5	8,581	8,429	6,1	6,0	0,608	0,598
H1.1. A2	1	10,899	10,774	3,9	3,8	0,386	0,382
H1.1. A3	1	6,609	6,583	2,3	2,3	0,234	0,233
H1.1. A4	1	2,920	2,848	1,1	1,0	0,110	0,101
H1.1. A5	1	1,387	1,426	0,5	0,5	0,049	0,051
H1.1. A6 +5ml HCl	1	5,473		0,2		0,017	
H1.1. A7 +5ml HCl	1	5,289		0,1		0,010	
H1.1. A8 +5ml HCl	1	5,485		0,2		0,017	
H1.1. B1 0,5g Probe	0,5	8,431	8,449	6,0	6,0	0,598	0,599
H1.1. B2	1	10,962	10,983	3,9	3,9	0,389	0,389
H1.1. B3	1	6,258	6,229	2,2	2,2	0,222	0,221
H1.1. B4	1	3,097	3,149	1,1	1,1	0,110	0,112
H1.1. B5	1	1,083	1,088	0,4	0,4	0,038	0,039
H1.1. B6 +5ml HCl	1	5,481		0,2		0,017	
H1.1. B7 +5ml HCl	1	5,420		0,1		0,015	
H1.1. B8 +5ml HCl	1	5,311		0,1		0,011	

Identification	Amount [g]	EQ ml	EQ ml DB	Chloid mg	Chlorid mg DB	Chlorid %	Chlorid % DB
2.1. A1	1	20,408	20,038	7,2	7,1	0,723	0,710
2.1. A2	1	9,158	9,203	3,2	3,3	0,325	0,326
2.1. A3	1	4,795	4,672	1,7	1,7	0,170	0,166
2.1. A4	1	1,483	1,479	0,5	0,5	0,053	0,052
2.1. A5 +5ml HCl	1	5,609		0,2		0,022	
2.1. A6 +5ml HCl	1	5,610		0,2		0,022	
2.1. A7 +5ml HCl	1	5,718		0,3		0,025	
2.1. A8 +5ml HCl	1	5,682		0,2		0,024	
2.1. B1 0,5g Probe	0,5	7,366	7,29	5,2	5,2	0,522	0,517
2.1. B2	1	8,054	7,935	2,9	2,8	0,286	0,281
2.1. B3	1	4,160	4,078	1,5	1,4	0,147	0,145
2.1. B4	1	1,328	1,288	0,5	0,5	0,047	0,046
2.1. B5 +5ml HCl	1	5,680		0,2		0,024	
2.1. B6 +5ml HCl	1	5,853		0,3		0,030	
2.1. B7 +5ml HCl	1	5,715		0,3		0,025	
2.1. B8 +5ml HCl	1	5,360		0,1		0,013	
H2.1. A1 0,5g Probe	0,5	7,952	8,028	5,6	5,7	0,564	0,569
H2.1. A2	1	8,301	8,26	2,9	2,9	0,294	0,293
H2.1. A3	1	4,198	4,108	1,5	1,5	0,149	0,146
H2.1. A4	1	1,509	1,455	0,5	0,5	0,053	0,052
H2.1. A5	1	0,438		0,2		0,016	
H2.1. A6 +5ml HCl	1	5,315		0,1		0,011	
H2.1. A7 +5ml HCl	1	5,466		0,2		0,017	
H2.1. A8 +5ml HCl	1	5,368		0,1		0,013	
H2.1. B1 0,5g Probe	0,5	8,153	8,102	5,8	5,7	0,578	0,574
H2.1. B2	1	9,087	9,134	3,2	3,2	0,322	0,324
H2.1. B3	1	5,137	4,968	1,8	1,8	0,182	0,176
H2.1. B4	1	1,851	1,826	0,7	0,6	0,066	0,065
H2.1. B5 +5ml HCl	1	5,638		0,2		0,023	
H2.1. B6 +5ml HCl	1	5,545		0,2		0,019	
H2.1. B7 +5ml HCl	1	5,647		0,2		0,023	
H2.1. B8 +5ml HCl	1	5,478		0,2		0,017	
2.2. A1 0,5g Probe	0,5	5,199	5,377	3,7	3,8	0,369	0,381
2.2. A2	1	7,044	6,871	2,5	2,4	0,250	0,244
2.2. A3	1	2,378	2,474	0,8	0,9	0,084	0,088
2.2. A4	1	5,817	5,768	0,3	0,3	0,029	0,027
2.2. A5 +5ml HCl	1	5,695		0,2		0,025	
2.2. A6 +5ml HCl	1	5,862		0,3		0,031	
2.2. A7 +5ml HCl	1	5,678		0,2		0,024	
2.2. A8 +5ml HCl	1	5,654		0,2		0,023	
2.2. B1 0,5g Probe	0,5	4,862	4,844	3,4	3,4	0,345	0,343
2.2. B2	1	9,998	10,019	3,5	3,6	0,354	0,355

Anhang D

2.2. B3	1	5,673	5,435	2,0	1,9	0,201	0,193
2.2. B4	1	2,127	2,143	0,8	0,8	0,075	0,076
2.2. B5 +5ml HCl	1	5,766		0,3		0,027	
2.2. B6 +5ml HCl	1	5,710		0,3		0,025	
2.2. B7 +5ml HCl	1	5,820		0,3		0,029	
2.2. B8 +5ml HCl	1	5,429		0,2		0,015	
2.3. A1 0,5g Probe	0,5	4,944	4,913	3,5	3,5	0,351	0,348
2.3. A2	1	5,247	5,173	1,9	1,8	0,186	0,183
2.3. A3	1	1,145	1,153	0,4	0,4	0,041	0,041
2.3. A4	1	5,349	5,313	0,1	0,1	0,012	0,011
2.3. A5 +5ml HCl	1	5,497		0,2		0,018	
2.3. A6 +5ml HCl	1	5,738		0,3		0,026	
2.3. A7 +5ml HCl	1	5,626		0,2		0,022	
2.3. A8 +5ml HCl	1	5,574		0,2		0,020	
2.3. B1 0,5g Probe	0,5	4,799	4,915	3,4	3,5	0,340	0,348
2.3. B2	1	5,072	5,167	1,8	1,8	0,180	0,183
2.3. B3	1	0,724	0,782	0,3	0,3	0,026	0,028
2.3. B4 +5ml HCl	1	5,259	5,360	0,1	0,1	0,009	0,013
2.3. B5 +5ml HCl	1	5,706		0,3		0,025	
2.3. B6 +5ml HCl	1	5,750		0,3		0,027	
2.3. B7 +5ml HCl	1	5,469		0,2		0,017	
2.3. B8 +5ml HCl	1	5,434		0,2		0,015	

Anhang D

Identification	Amount [g]	EQ ml	EQ ml DB	Chloid mg	Chlorid mg DB	Chlorid %	Chlorid % DB
V3.1. A1	1	16,781	17,116	5,949	6,068	0,595	0,607
V3.1. A2	1	7,560	7,849	2,680	2,782	0,268	0,278
V3.1. A3	1	3,393	3,209	1,203	1,138	0,120	0,114
V3.1. A4	1	0,974	0,944	0,345	0,335	0,035	0,033
V3.1. A5 +5ml HCl	1	5,766		0,272		0,027	
V3.1. A6 +5ml HCl	1	5,656		0,233		0,023	
V3.1. A7 +5ml HCl	1	5,686		0,243		0,024	
V3.1. A8 +5ml HCl	1	5,922		0,327		0,033	
V3.1. B1 0,5g Probe	0,5	6,779	6,652	4,806	4,716	0,481	0,472
V3.1. B2	1	7,144	7,127	2,533	2,527	0,253	0,253
V3.1. B3	1	3,152	3,100	1,117	1,099	0,112	0,110
V3.1. B4	1	0,734	0,729	0,260	0,258	0,026	0,026
V3.1. B5 +5ml HCl	1	5,644		0,228		0,023	
V3.1. B6 +5ml HCl	1	5,481		0,171		0,017	
V3.1. B7 +5ml HCl	1	5,562		0,199		0,020	
V3.1. B8 +5ml HCl	1	5,518		0,184		0,018	
H3.1. A1 0,5g Probe	0,5	9,101	8,926	6,453	6,329	0,645	0,633
H3.1. A2	1	13,971	13,509	4,953	4,789	0,495	0,479
H3.1. A3	1	6,892	6,937	2,443	2,459	0,244	0,246
H3.1. A4	1	3,024	3,035	1,072	1,076	0,107	0,108
H3.1. A5	1	0,579		0,205		0,021	
H3.1. A6 +5ml HCl	1	5,593		0,210		0,021	
H3.1. A7 +5ml HCl	1	5,446		0,158		0,016	
H3.1. A8 +5ml HCl	1	5,666		0,236		0,024	
H3.1. B1 0,5g Probe	0,5	9,570	9,235	6,785	6,548	0,679	0,655
H3.1. B2	1	10,004	9,698	3,546	3,438	0,355	0,344
H3.1. B3	1	5,065	4,826	1,796	1,711	0,180	0,171
H3.1. B4	1	1,092	1,104	0,387	0,391	0,039	0,039
H3.1. B5 +5ml HCl	1	5,619		0,219		0,022	
H3.1. B6 +5ml HCl	1	5,321		0,114		0,011	
H3.1. B7 +5ml HCl	1	5,359		0,127		0,013	
H3.1. B8 +5ml HCl	1	5,448		0,159		0,016	
3.2. A1 0,5g Probe	0,5	5,361	5,212	3,801	3,695	0,380	0,370
3.2. A2	1	4,860	4,981	1,723	1,766	0,172	0,177
3.2. A3	1	0,778	0,783	0,276	0,278	0,028	0,028
3.2. A4 +5ml HCl	1	5,464	5,493	0,164	0,175	0,016	0,017
3.2. A5 +5ml HCl	1	5,526		0,186		0,019	
3.2. A6 +5ml HCl	1	5,548		0,194		0,019	
3.2. A7 +5ml HCl	1	5,681		0,241		0,024	
3.2. A8 +5ml HCl	1	5,560		0,199		0,020	
3.2. B1 1g Probe	1	12,924	13,240	4,582	4,694	0,458	0,469
3.2. B2	1	6,448	6,299	2,286	2,233	0,229	0,223

Anhang D

3.2. B3	1	1,630	1,648	0,578	0,584	0,058	0,058
3.2. B4 +5ml HCl	1	5,680	5,718	0,241	0,255	0,024	0,025
3.2. B5 +5ml HCl	1	5,842	5,818	0,298		0,030	
3.2. B6 +5ml HCl	1	5,898	6,023	0,318		0,032	
3.2. B7 +5ml HCl	1	6,465	6,418	0,519		0,052	
3.2. B8 +5ml HCl	1	6,365	6,275	0,484		0,048	
3.3. A1 0,5g Probe	0,5	5,601	5,458	3,971	3,870	0,397	0,387
3.3. A2	1	3,829	3,899	1,357	1,382	0,136	0,138
3.3. A3	1	0,588	0,585	0,208	0,207	0,021	0,021
3.3. A4 +5ml HCl	1	5,548		0,194		0,019	
3.3. A5 +5ml HCl	1	5,628		0,223		0,022	
3.3. A6 +5ml HCl	1	5,515		0,183		0,018	
3.3. A7 +5ml HCl	1	5,637		0,226		0,023	
3.3. A8 +5ml HCl	1	5,726		0,257		0,026	
3.3. B1 1g Probe	1	10,721	10,660	3,801	3,779	0,380	0,378
3.3. B2	1	3,846	4,056	1,363	1,438	0,136	0,144
3.3. B3	1	5,448	5,494	0,159	0,175	0,016	0,018
3.3. B4 +5ml HCl	1	5,529		0,188		0,019	
3.3. B5 +5 ml HCl	1	5,539		0,191		0,019	
3.3. B6 +5ml HCl	1	5,524		0,186		0,019	
3.3. B7 +5ml HCl	1	5,576		0,204		0,020	
3.3. B8 +5ml HCl	1	5,542		0,192		0,019	

Anhang E

