Vereinigung Akkreditierter Baustoffprüflabors
Association des laboratoires accrédités d'essais des matériaux de construction

VAB-Ringversuch Karbonatisierungswiderstand von Beton nach SIA 262/1, Anhang I, Schlussbericht

Dokument-Nr.	**2-1-040-02.15a**

Ringversuch

Prüfung	Karbonatisierungswiderstand von Beton nach SIA 262/1, Anhang I
Zielsetzung	Ermittlung der Messunsicherheit
Initiant	VAB
Leitung	EMPA, Roman Loser

Messverfahren

Norm	SIA 262/1, Anhang I, Karbonatisierungswiderstand
Beschreibung/Arbeitsanweisung	Versuchsprogramm vom 02.09.2014
Präzisierungen	Versuchsprogramm (im Bericht enthalten) mit Vorgehen, Terminen und abzugebenden Dokumenten
Merkmalniveaus q	4 (KW1, KW2, KW3, KW4), je zwei Serien pro Niveau

Teilnehmer

Anzahl p	Gemeldete Teilnehmer: 19 Prüfkörper abgeholt: 19 Resultate abgeliefert: 18
Laboratorien	Liste der teilnehmenden Laboratorien auf Seite 7

Prüfkörper

Beschreibung (Form, etc.)	Prismen 120 x 120 x 360 mm^3, Verdichtung mit Innenvibrator
Herstellung durch	EMPA
Anzahl Prüfkörper n	Pro Serie 1 Prisma 120 x 120 x 360 mm^3 pro Labor
Transport	Durch teilnehmende Laboratorien
Versand-Datum	Die Prüfkörper wurden durch die Laboratorien am 16.10.2014 bei der EMPA abgeholt
Referenzproben	Keine
Rückstellproben	Keine

Bericht

Verfasser	Empa, Roman Loser
Datum	16.02.2015 / rev.
Beilagen	Bericht über die Prüfkörperherstellung, EMPA
Verteiler	Teilnehmende Labors
Archivierung	TFB AG, VAB c/o TFB AG

Auswertung

Beschreibung	Statistisch ausgewertet wurde nur der Karbonatisierungskoeffizient K_N. Dazu wurde den Labors eine Excel-Vorlage zur Verfügung gestellt, in welche die Werte von K_N pro Serie sowie weitere Daten (gemessene Eindringtiefen, Massenänderungen während der Prüfung) eingetragen werden konnten. Die daraus übernommenen Werte für K_N wurden mit der Auswertesoftware rr-ISO 5725 V1.7 ausgewertet. Als Zusatzinformation erfolgte eine grafische Darstellung der Massenänderungen während der Vorlagerung und der Lagerung in der Karbonatisierungskammer.
Bemerkung	Ein Labor (Labor 19) hat die Prüfkörper abgeholt und die Prüfung begonnen. Aufgrund eines Problems mit der Karbonatisierungskammer im Laufe der Prüfung wurden jedoch keine Resultate abgeliefert. Labor 14 hat die Resultate ordnungsgemäss abgeliefert. Nach Abgabe der Resultate wurde jedoch festgestellt, dass aufgrund eines technischen Defektes die Versuche bei einem CO_2-Gehalt von > 6 % durchgeführt wurden und somit nicht der Norm entsprechen. Entsprechend gilt dieses Labor bei 3 von 4 Betonen als Ausreisser und ist in der Auswertung nicht berücksichtigt. Da jedoch der Einfluss eines zu hohen CO_2-Gehaltes in der Kammer auf die Massenänderungen, Eindringtiefen und Karbonatisierungskoeffizienten K_N deutlich erkennbar ist und zudem aus den Resultaten eine wichtige Schlussfolgerung für die Qualitätssicherung gezogen werden kann, sind die Resultate trotzdem im Bericht enthalten. Bei einem weiteren Labor (Labor 12) betrug die relative Feuchte während der Vorlagerung aufgrund eines technischen Problems im Mittel 52% anstelle der nach Norm geforderten 57%. Bei den übrigen Labors wurden keine technischen Probleme oder Besonderheiten während der Prüfung angegeben.

Ergebnisse

Karbonatisierungskoeffizient K_N: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten (= prozentualer Anteil der Standardabweichung vom Mittelwert):

Mischung	**KW1**	**KW2**	**KW3**	**KW4**
Anzahl Labors berücksichtigt	18	17	17	16
Gesamtmittelwert m von K_N [mm/Jahr$^{0.5}$]	**1.49**	**6.70**	**3.88**	**4.08**
Wiederholstandardabweichung S_r [mm/Jahr$^{0.5}$]	0.150	0.230	0.191	0.089
Vergleichsstandardabweichung S_R [mm/Jahr$^{0.5}$]	0.291	0.588	0.304	0.359
Wiederholgrenze r [mm/Jahr$^{0.5}$]	0.415	0.637	0.529	0.245
Vergleichsgrenze R [mm/Jahr$^{0.5}$]	0.807	1.630	0.842	0.994
Wiederholvariationskoeffizient [%]	10.1	3.4	4.9	2.2
Vergleichsvariationskoeffizient [%]	19.5	8.8	7.8	8.8

Kommentar

Zielerreichung	Ja
Erkenntnisse	Siehe Bericht, Kap. 6 „Beurteilung“
Massnahmen	Siehe Empfehlung Kap. 6

1. Informationen zum Versuchsprogramm

Nachfolgend ist das Versuchsprogramm beschrieben, welches allen Teilnehmern vorgängig abgegeben wurde.

1.1 Allgemeines

Für den Ringversuch werden aus 4 verschiedenen Mischungen für jedes Prüflabor je 2 Prismen 120 x 120 x 360 mm^3 für die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes hergestellt. Die Verdichtung erfolgt mit einem Innenvibrator. Bei jeder Mischung wird eine Doppelbestimmung durchgeführt. Insgesamt sind somit 4 x 2 = 8 Serien zu prüfen.

1.2 Zuständigkeiten

Organisator: VAB / ALA, Vereinigung Akkreditierter Baustoffprüflabors

Projektleitung Ringversuch: Empa, Roman Loser (roman.loser@empa.ch, 058 765 42 35)

Prüfkörperherstellung: Empa

Auswertung: Roman Loser, Empa

1.3 Prüfvariabeln

Es werden vier verschiedene Betonmischungen geprüft, wobei 3 verschiedene Prüfniveaus angestrebt werden:

Deutlich unterhalb Grenzwert:	- Normalbeton mit CEM I als Bindemittel, Grösstkorn 32 mm
Im Bereich des Grenzwertes:	- Normalbeton mit CEM II/B-M als Bindemittel, Grösstkorn 32 mm
	- Beton mit CEM II/B-M als Bindemittel, Grösstkorn 8 mm
Deutlich über dem Grenzwert:	- Normalbeton mit CEM III/B als Bindemittel, Grösstkorn 32 mm

Für jede Mischung ist eine Doppelbestimmung vorgesehen.

1.4 Schalung für Prüfkörper

Jedes Labor hat für den Ringversuch 8 Prismenschalungen 120 x 120 x 360 mm^3 aus Kunststoff oder Stahl zur Verfügung zu stellen. Es dürfen keine Vertikalschalungen verwendet werden (nur liegende Prismen). Die Schalungen sind zu beschriften und **spätestens bis am Freitag, 10.10.2014** an die Empa zu liefern (Kontakt Empa: Walter Trindler, walter.trindler@empa.ch, 058 / 765 44 15). Die Prüfkörper werden durch die Empa ausgeschalt, die Schalungen werden jedoch aufgrund des engen Zeitplanes nicht gereinigt. Die Schalungen können gleichzeitig mit den Prüfkörpern wieder abgeholt werden.

1.5 Prüfkörperproduktion und Abholen der Prüfkörper

Die Betone werden an zwei unterschiedlichen Tagen hergestellt (vgl. Tab. 1). Die Prismen werden mit dem Innenvibrator verdichtet. Zusätzlich werden eine Frischbetonkontrolle durchgeführt und Würfel für die Druckfestigkeitsbestimmung hergestellt. Die Prüfkörper werden jeweils am Tag nach der Herstellung durch die Empa ausgeschalt, beschriftet und bis zum Abholen am 16.10.2014 durch die Labors im Wasser gelagert.

Nach der VAB-Sitzung vom **16.10.2014** nehmen die teilnehmenden Labors die insgesamt 8 Prismen mit (gilt auch für die Schalungen). Die Prüfkörper haben zum Zeitpunkt des Transportes ein Alter von 2 resp. 3 Tagen. Bitte für den Probentransport **geeignete Materialien** mitbringen, um die Wasserlagerung nach Norm bis ins Prüflabor gewährleisten zu können **(z.B. einwickeln in feuchte Tücher + Plastik)**.

Kann ein Labor nicht an der VAB-Sitzung teilnehmen, ist es selber dafür verantwortlich, dass die Proben rechtzeitig im eigenen Labor eintreffen. Falls die Prüfkörper nicht anlässlich der VAB-Sitzung abgeholt werden, ist der Abholtermin direkt mit Walter Trindler (walter.trindler@empa.ch, 058 / 765 44 15) abzusprechen. Wichtig: **der Probentransport muss zwingend am 16.10.2014 stattfinden**, da gemäss Beschluss an der VAB-Sitzung vom 03.07.2014 festgelegt wurde, dass die Vorlagerung bei 20°C / 57% r.F. vollständig in den einzelnen Labors zu erfolgen hat!

1.6 Prüfablauf

Bei zwei Mischungen (KW1 und KW2, Alter 3 Tage) beginnt am 16.10.2014 nach dem Transport in die Labors unmittelbar die Vorlagerung bei 20°C/57% r.F. bis zum Alter von 28 Tagen. Bei den weiteren beiden Mischungen (KW3 und KW4, Alter 2 Tage) beginnt diese einen Tag später und die Prismen sind nach dem Probentransport entsprechend im Wasser weiter zu lagern. Die Vorlagerung erfolgt somit für alle Prismen im Alter zwischen 72 +/- 4h und 28 Tagen bei 20°C / 57%r.F. im jeweiligen Labor. Die Entnahme aus dem Wasser sollte nach möglichst genau 72 Stunden erfolgen.

Anschliessend erfolgt die Prüfung gemäss den Angaben in der Norm SIA 262/1, Anhang I, Kap. I.7.1. Zusätzlich zu den Angaben in der Norm sind für den Ringversuch folgende ergänzende Spezifikationen einzuhalten:

- Die CO_2-Sensoren sind vor dem Ringversuch zu kalibrieren.
- Die Massenänderung der Prismen während der Vorlagerung ist aufzunehmen. Dazu ist das Prisma nach der Entnahme aus dem Wasser mit einem feuchten Lappen abzutrocknen und

zu wägen (auf 1g). Weitere Wägungen werden im Alter von 7, 14 und 28 Tagen vorgenommen. Die Massen sind in der Excel-Vorlage einzutragen.

- Die Massenänderung der Prismen während der Lagerung in der Karbonatisierungskammer ist aufzunehmen. Dazu ist das Prisma zu jedem Messzeitpunkt unmittelbar nach der Entnahme aus der Kammer sowie zusätzlich nach dem Abspalten der Scheibe zu wägen (auf 0.1g). Die Massen sind in der Excel-Vorlage einzutragen.
- Angabe der Koeffizienten K_S und K_N auf zwei Nachkommastellen (anstatt nur auf eine wie gemäss Norm gefordert). Dies gilt nur für die Eintragungen in der Excel-Vorlage.

1.7 Berichterstattung

Es wird eine **Excel-Vorlage** mitgeliefert, in welche die Prüfresultate eingetragen werden müssen.

Gleichzeitig sind die üblichen Prüfprotokolle des Labors mit den geforderten Angaben nach Punkt I.9.1 der Norm abzugeben. Zusätzlich müssen für den Ringversuch folgende Resultate mitgeliefert werden:

- Angabe, ob das Labor zum Zeitpunkt des Ringversuches für die Prüfung akkreditiert ist.
- Angabe, ob im Labor bereits Erfahrung mit der Prüfung besteht (Labor mit oder ohne Erfahrung).
- Aufzeichnung von Temperatur und relativer Feuchte während der Vorlagerung.
- Aufzeichnung von Temperatur, relativer Feuchte und CO_2-Gehalt während der Lagerung in der Karbonatisierungskammer.
- Massenänderung der Prismen während der Vorlagerung (vgl. Kap. Prüfablauf).
- Masse der Prismen vor und nach dem Abspalten der Scheiben (vgl. Kap. Prüfablauf)
- Abgabe aller fotografischen Aufnahmen der Karbonatisierungstiefe in digitaler Form mit eindeutiger Beschriftung der Bilder. Auf jeder Aufnahme muss ein Massstab / eine Referenz vorhanden sein (horizontale Lage in der Ebene der Spaltfläche), so dass die Karbonatisierungstiefen auch im Nachhinein noch nachgemessen werden können.
- Angabe Produzent / Produkt Karbonatisierungskammer
- Fotografische Aufnahme der Karbonatisierungskammer (Innenansicht, 1x mit und 1x ohne Prismen)
- Sämtliche Abweichungen von der Norm sowie den obenstehenden Prüfspezifikationen.
- Bemerkungen und Besonderheiten während der Prüfung.

Die vollständigen Unterlagen sind bis spätestens 30.01.2015 per Post oder per E-Mail an folgende Adresse zu senden:

Empa
Herr Roman Loser, Abt. 308
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
roman.loser@empa.ch
Tel. 058 / 765 42 35

1.8 Termine

Bezeichnung Betonmischung	KW1, KW2	KW3, KW4
Prüfkörperherstellung Empa	Mo 13.10.2014	Di 14.10.2014
Abholen der Prüfkörper an der Empa durch die Teilnehmer	Do 16.10.2014	Do 16.10.2014
Entnahme aus dem Wasser und Beginn Vorlagerung bei 20°C / 57%r.F. (Alter 72 h +/- 4 h)	Do 16.10.2014	Fr 17.10.2014
Beginn Prüfung: Nullmessung und Umlagerung in Karbonatisierungskammer	Mo 10.11.2014	Di 11.11.2014
2. Messung Karbonatisierungstiefe (7d)	Mo 17.11.2014	Di 18.11.2014
3. Messung Karbonatisierungstiefe (28d)	Mo 08.12.2014	Di 09.12.2014
4. Messung Karbonatisierungstiefe (63d) = Prüfende	Mo 12.01.2015	Di 13.01.2015
Späteste Abgabe der Prüfresultate	Fr 30.01.2015	Fr 30.01.2015

Tab. 1: Termine Ringversuch Karbonatisierungswiderstand.

1.9 Diverses

Sämtliche Prüfkörper sind mindestens bis zum Abschluss der Auswertung im Prüflabor zu lagern und dürfen nicht entsorgt werden!

1.10 Rezepturen der Betonmischungen

Folgende Betonmischungen wurden für den Ringversuch verwendet:

Bezeichnung	KW1	KW2	KW3	KW4
Herstelldatum	13.10.2014	13.10.2014	14.10.2014	14.10.2014
Zementart	CEM I 42.5 N	CEM III/B 42.5 N	CEM II/B-M (T-LL) 42.5 N	CEM II/B-M (T-LL) 42.5 N
Zementgehalt [kg/m^3]	360	280	300	380
w/z-Wert	0.40	0.63	0.54	0.57
Grösstkorn [mm]	32	32	32	8

Tab. 2: Betonmischungen.

Die detaillierten Rezepturen können dem beiliegenden Bericht über die Prüfkörperherstellung entnommen werden.

2. Liste der teilnehmenden Prüflaboratorien

BSL Baustofflabor AG		3661	Uetendorf
Empa *	Abt. Beton/Bauchemie	8600	Dübendorf
Geo-Bau-Laobr AG	Baugeologie und Geo-Bau-Labor AG	7000	Chur
Holcim (Schweiz) AG *	Bau- und Anwendungstechnik	5303	Würenlingen
Holcim (Suisse) SA *	Laboratoire des matériaux	1312	Eclépens
Holcim Technology Ltd – HTEC *	Concrete Laboratory	5113	Holderbank
HRS Hochschule für Technik Rapp.	IBU Institut für Bau und Umwelt	8640	Rapperswil
IMM SA	Istituto Meccanica die Materiali SA	6916	Grancia-Lugano
IMP Bautest AG	Institut für Materialprüfung	4625	Oberbuchsiten
LPM AG	Baustoffprüfinstitut	5712	Beinwil am See
Sika Technology AG	Materialprüflabor CC&M	8048	Zürich
TCC Labor Cornaux	Betonlabor Cornaux	5103	Wildegg
TCC Labor Wildegg	Betonlabor Wildegg	5103	Wildegg
Tecnotest AG		8803	Rüschlikon
TFB AG *	Labor Wildegg	5103	Wildegg
TFB AG *	Labor Biel	5103	Wildegg
Toggenburger AG	Baustofflabor	8404	Winterthur
Transgeo AG	Baustoffprüflabor	3073	Gümligen
VersuchsStollen Hagerbach AG	Labor Flums	8893	Flums Hochwiese

* zum Zeitpunkt der Durchführung des Ringversuches akkreditiert.

Tab. 3: Alphabetische Liste der teilnehmenden Prüflaboratorien.

Aus der alphabetischen Reihenfolge in der Liste können keine Rückschlüsse auf die Nummern im Bericht gezogen werden.

Insgesamt haben sich 19 Labors angemeldet.

Ein Labor (Labor 19) hat die Prüfkörper abgeholt und die Prüfung begonnen. Aufgrund eines Problems mit der Karbonatisierungskammer im Laufe der Prüfung wurden jedoch keine Resultate abgeliefert. Dieses Labor ist deshalb in der Auswertung nicht enthalten und es wurden insgesamt Resultate von 18 Labors ausgewertet.

Labor 14 hat die Resultate ordnungsgemäss abgeliefert. Nach Abgabe der Resultate wurde jedoch festgestellt, dass aufgrund eines technischen Defektes die Versuche bei einem CO_2-Gehalt von > 6 % durchgeführt wurden und somit nicht der Norm entsprechen. Entsprechend gilt dieses Labor bei 3 von 4 Betonen als Ausreisser und ist in der Auswertung nicht berücksichtigt. Da jedoch der Einfluss eines zu hohen CO_2-Gehaltes in der Kammer auf die Massenänderungen, Eindringtiefen und Karbonatisierungskoeffizienten K_N deutlich erkennbar ist und zudem aus den Resultaten eine wichtige Schlussfolgerung für die Qualitätssicherung gezogen werden kann, sind die Resultate trotzdem im Bericht enthalten.

Bei einem weiteren Labor (Labor 12) betrug die relative Feuchte während der Vorlagerung aufgrund eines technischen Problems im Mittel 52% anstelle der nach Norm geforderten 57%. Da dieses Labor bei der Auswertung nicht auffällig war (kein Ausreisser, keine aussergewöhnliche Streuung), wurde es bei der Berechnung der Präzision mit berücksichtigt.

Bei den übrigen Labors wurden keine technischen Probleme oder Besonderheiten während der Prüfung angegeben.

3. Statistische Verfahren nach ISO 5725

Die Auswertung erfolgt gemäss der Norm 5725 "Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen". Diese Norm verwendet zur Überprüfung der Wiederhol- und Vergleichsbedingungen ein grafisches Verfahren nach Mandel und zwei numerische Verfahren, den Cochran's und den Grubb's Test.

Als Mass für die Präzision eines standardisierten Messverfahren können sowohl die Standardabweichung unter Wiederholbedingungen s_r und die Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen s_R, als auch die Wiederholgrenze r und die Vergleichsgenze R aus den gesammelten Messwerten bestimmt werden. Dabei geben die Grenzwerte r und R die kritischen Differenzbeträge an, unter denen oder höchstens gleich denen der Betrag der Differenz zweier Einzelmessungen mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit von 95% erwartet werden kann. Die Norm lässt es dem Anwender frei, welche Präzisionsmasse er verwenden möchte.

Empfohlen wird aber die Verwendung der Standardabweichungen.

Das vorliegende Auswertungsprogramm ermittelt nur die Wiederholpräzision als Minimum und die Vergleichspräzision als Maximum der Ergebnisstreuung. Die Richtigkeit eines Messverfahrens wird durch das Programm nicht geprüft, da in der Regel ein wahrer Wert oder ein Bezugswert eines Merkmales nicht bekannt ist.

Die statistische Auswertung der Messergebnisse beinhaltet in der Regel folgende 3 Stufen:

1. Kritische Prüfung der Daten, um Ausreisser und Unregelmässigkeiten bei der Anwendung des Messverfahrens festzustellen und auszuschliessen. Dabei werden die Verfahren nach Mandel, Cochran und Grubb eingesetzt.
2. Separate Berechnung der Präzisionsmasse und der Mittelwerte für jedes Messniveau
3. Berechnung der Gesamtpräzision, des generellen Mittels und sofern vorhanden die Bestimmung der Abhängigkeit der Präzision vom Messniveau.

3.1 Mandel’s k Test

Dieser Test beurteilt die Konsistenz der Messungen innerhalb eines Labors. Dabei wird für jedes Labor und für jedes Messniveau die Vereinbarkeitsprüfgrösse k als Verhältnis der Standardabweichung der Messungen eines Labors zu einem Messniveau und der daraus gemittelten Standardabweichung aller Laboratorien berechnet. Diese Vereinbarkeits-prüfgrössen werden zusammen mit den kritischen Werten bei 95% und 99% Wahrscheinlichkeit als Balken in eine Grafik gezeichnet. Werte die eindeutig über den kritischen Werten liegen, sind genauer zu untersuchen und eventuell auszuschliessen.

Beurteilungskriterien:

- Sind die Werte eines Labors gegenüber den Werten der übrigen Labors extrem hoch, so ist der Grund dafür zu untersuchen. In einem solchen Labor sind die Wiederholmessungen zu ungenau.
- Sind die Werte eines Labors alle sehr klein, so können Rundungsfehler oder eine ungeeignete Messskala dafür verantwortlich sein.

3.2 Mandel’s h Test

Dieser Test beurteilt die Konsistenz der Messungen zwischen den Labors. Dabei wird für jedes Labor und jedes Messniveau die Vereinbarkeitsprüfgrösse h aus dem Verhältnis der Abweichung

der Labormittelwerte und der Standardabweichung der Mittelwerte berechnet. Diese Vereinbarkeitsprüfgrössen h werden zusammen mit den kritischen Werten bei 95% und 99% Wahrscheinlichkeit als Balken in ein Diagramm gezeichnet. Werte die eindeutig über den kritischen Werten liegen, sind genauer zu untersuchen und eventuell auszuschliessen.

Beurteilungskriterien:
- Sind die Werte eines Labors positiv und negativ, so deutet das auf eine grosse Streuung hin.
- Haben die Werte eines Labors ein anderes Vorzeichen als alle übrigen, so ist der Grund dafür zu untersuchen.
- Sind die Werte eines Labors extrem und zeigen eine gewisse Abhängigkeit vom Messniveau, so ist der Grund dafür zu untersuchen.

3.3 Cochran's Test

Die Norm ISO 5725 setzt voraus, dass die Messungen innerhalb eines Labors möglichst kleine Streuungen aufweisen. Diese Voraussetzung wird mit dem Cochran's Test überprüft.
Die Testgrösse C wird berechnet aus dem Quotient der grössten Standardabweichung im Quadrat und der Summe aller Standardabweichungen im Quadrat. Der Cochran Test setzt voraus, dass in allen Labors für ein Messniveau die gleiche Anzahl Wiederholungs-messungen durchgeführt worden sind. Die so berechnete Testgrösse C wird nun mit den kritischen Werten bei 95% und 99% Wahrscheinlichkeit verglichen.

Aus dem Vergleich können folgende Beurteilungen vorgenommen werden:
- Ist die Testgrösse C kleiner oder gleich des kritischen Wertes bei 95% Wahrscheinlichkeit, dann liegen keine Ausreisser vor. Es können alle Messwerte für die Auswertung verwendet werden.
- Liegt die Testgrösse C zwischen den kritschen Werten bei 95% und 99% Wahrscheinlichkeit, so scheinen die Messungen des Labors nicht korrekt zu sein, bzw. weisen im Vergleich zu den Messungen der anderen Labors eine zu grosse Streuung unter Wiederholbedingungen auf. Diese Werte können unter Vorbehalt für die weitere Auswertung verwendet werden. Es sollte aber der Grund dafür ermittelt werden.
- Die Messungen eines Labors sind als Ausreisser zu bezeichnen, wenn die Testgrösse C grösser als der kritische Wert bei 99% Wahrscheinlichkeit ist. Diese Messwerte sind für die weitere Auswertung auszuschliessen, und der Test ist mit den restlichen Messwerten zu wiederholen.

Auch Messungen mit sehr kleinen Standardabweichungen sollten geprüft werden. Zu kleine Abweichungen können auch durch eine falsche Ausführung des Messverfahrens verursacht werden.

Wenn sich aus der wiederholten Durchführung des Cochran's Test mehrere Ausreisser ergeben, und diese bei einem gewissen Niveau auftreten, so muss das Ausschliessen nochmals beurteilt werden. Die auftretenden grossen Streuungen könnten in diesem Fall auch durch das Messverfahren selbst verursacht werden.

3.4 Grubb's Test

Mit dem Grubbs' Test werden die Messungen (Mittelwerte) der Labors untereinander verglichen. Wobei der Test sowohl für die Maximal- als auch für die Minimalwerte durchzuführen ist. Die Testgrössen G werden mit den kritischen Werten bei 95% und 99% Wahrscheinlichkeit verglichen. Die Kriterien für zu grosse Abweichung und für Ausreisser sind die gleichen wie beim Cochran's Test.

Der Grubb's Test wird zuerst auf den grössten Mittelwert angesetzt. Ist dieser ein Ausreisser, so werden die Messwerte ausgeschlossen und der Test für den kleinsten Mittelwert durchgeführt. Wird dabei ein Ausreisser festgestellt, so sind diese Messwerte ebenfalls auszuschliessen. Der Grubb's Test muss dann für den gegenüberliegenden Extremwert (Maximal- oder Minimalwert) ausgeführt werden. Sobald keine Ausreisser mehr auftreten, so ist das Grubb'sche Testverfahren beendet.

Sind gemäss Grubb's Test der Maximal- und der Minimalwert keine Ausreisser, so wird der Grubb's Test auf die zwei grössten Extremwerte und anschliessend auf die zwei kleinsten Extremwerte angesetzt.

4. Messresultate

4.1 Eindringtiefe Karbonatisierungsfront und Karbonatisierungskoeffizient K_N

4.1.1 Eindringtiefe Karbonatisierungsfront

In den folgenden Diagrammen sind die gemessenen Eindringtiefen der Karbonatisierungsfront in Funktion von √Zeit für die vier verschiedenen Betone aufgetragen. Pro Labor sind jeweils zwei Kurven (entsprechend den zwei Serien) aufgetragen.

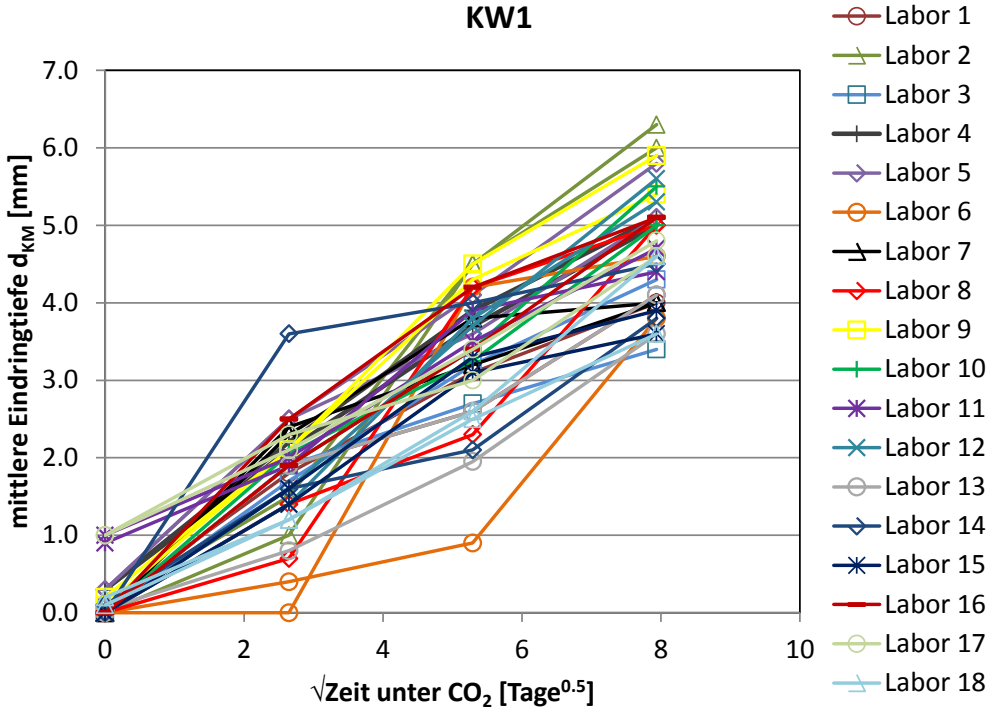

Abb. 1: Mittlere Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront des Betons KW1 in Funktion von √Zeit. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

Bei KW1 werden generell kleine Eindringtiefen gemessen. Die durchschnittliche Eindringtiefe am Versuchsende liegt im Bereich von knapp 5 mm. Bei einer Ablesegenauigkeit von 1 mm ergibt sich in diesem Fall ein grosser Einfluss der Ablesung auf das Prüfresultat.

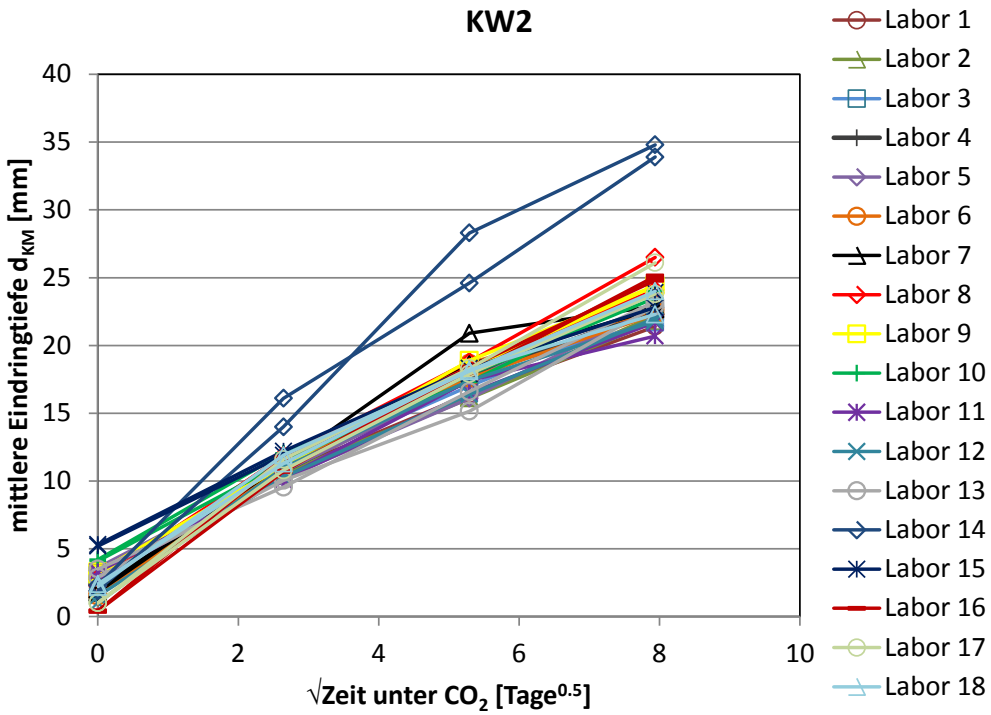

Abb. 2: Mittlere Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront des Betons KW2 in Funktion von √Zeit. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

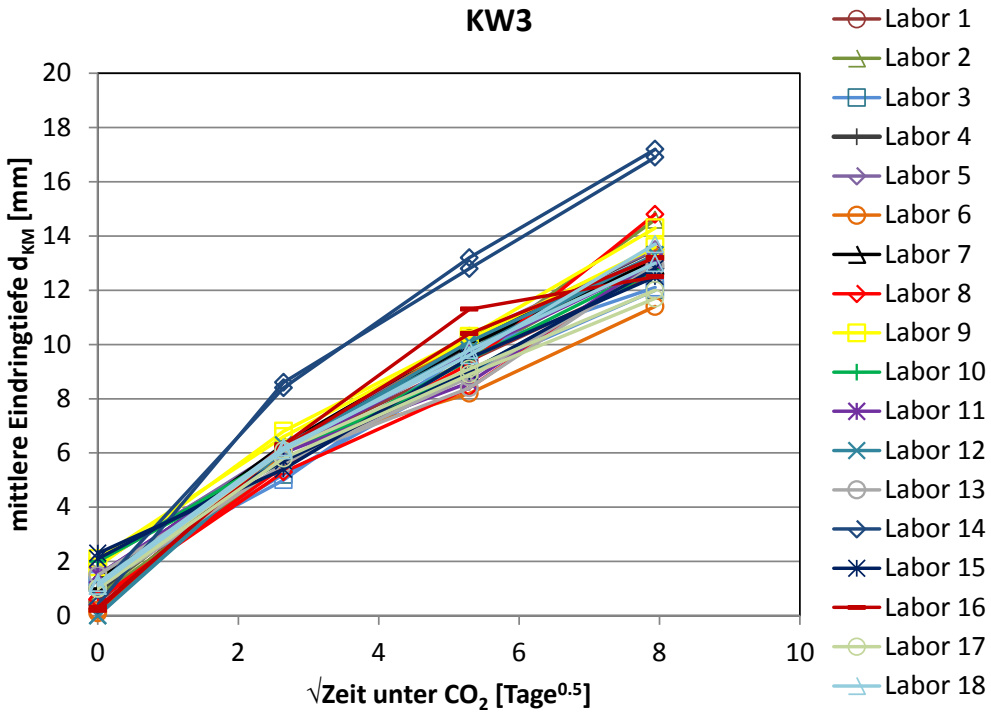

Abb. 3: Mittlere Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront des Betons KW3 in Funktion von √Zeit. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

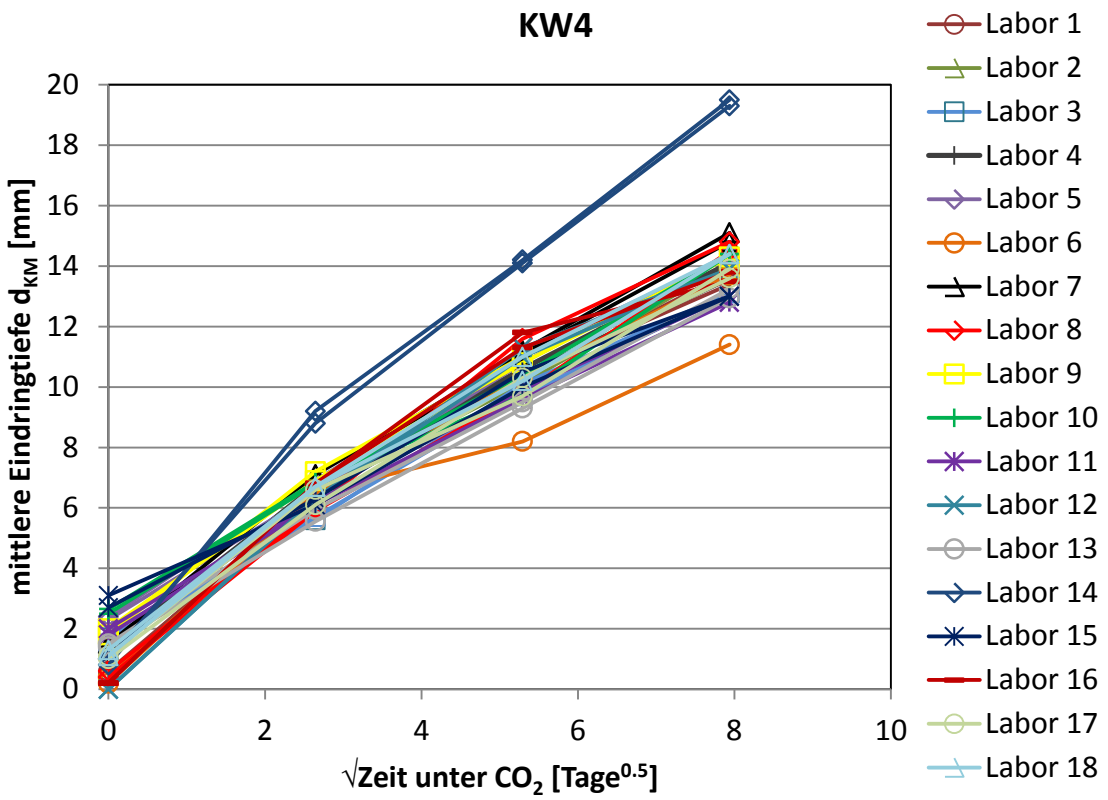

Abb. 4: Mittlere Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront des Betons KW4 in Funktion von √Zeit. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

4.1.2 Einzelwerte Karbonatisierungskoeffizient

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Einzelwerte der Karbonatisierungskoeffizienten K_N pro Labor und pro Betonsorte zusammengefasst. In der Abbildung 5 sind diese Werte zusätzlich grafisch dargestellt.

Labor	KW1 KN [mm/Jahr^0.5]	KW2 KN [mm/Jahr^0.5]	KW3 KN [mm/Jahr^0.5]	KW4 KN [mm/Jahr^0.5]
1	1.28	6.18	4.15	4.16
1	1.28	6.62	3.86	4.26
2	2.20	6.11	4.42	4.07
2	2.02	6.19	4.09	4.26
3	1.10	6.36	3.56	3.80
3	1.40	6.13	3.67	3.79
4	1.59	6.49	4.11	4.11
4	1.53	6.65	4.00	4.01
5	1.77	6.64	3.82	4.00
5	1.52	6.31	3.70	3.91
6	1.77	6.78	4.27	3.40
6	1.17	6.94	3.52	4.35
7	1.25	6.77	3.83	4.35
7	1.32	7.14	3.88	4.53
8	1.60	7.70	4.50	4.80
8	1.80	7.10	4.00	4.50
9	1.78	6.97	4.05	3.93
9	1.93	6.98	3.76	4.01
10	1.59	6.35	3.58	3.75
10	1.77	6.35	3.46	3.87
11	1.24	6.05	3.75	3.57
11	1.25	5.98	3.68	3.62
12	1.85	6.64	4.25	4.58
12	1.78	6.77	4.32	4.56
13	1.28	6.51	3.63	3.77
13	1.17	6.39	3.81	3.81
14	1.37	11.11	5.24	5.93
14	1.15	10.15	5.30	6.01
15	1.24	6.11	3.47	3.45
15	1.32	5.76	3.42	3.31
16	1.66	7.89	4.23	4.45
16	1.65	7.96	4.13	4.42
17	1.25	8.07	3.46	4.09
17	1.14	7.37	3.54	4.13
18	1.17	6.54	3.85	4.20
18	1.44	7.02	4.03	4.33

Tab. 4: Einzelwerte des Karbonatisierungskoeffizienten K_N pro Labor und pro Betonsorte. Pro Labor sind jeweils zwei Werte vorhanden (Doppelbestimmung).

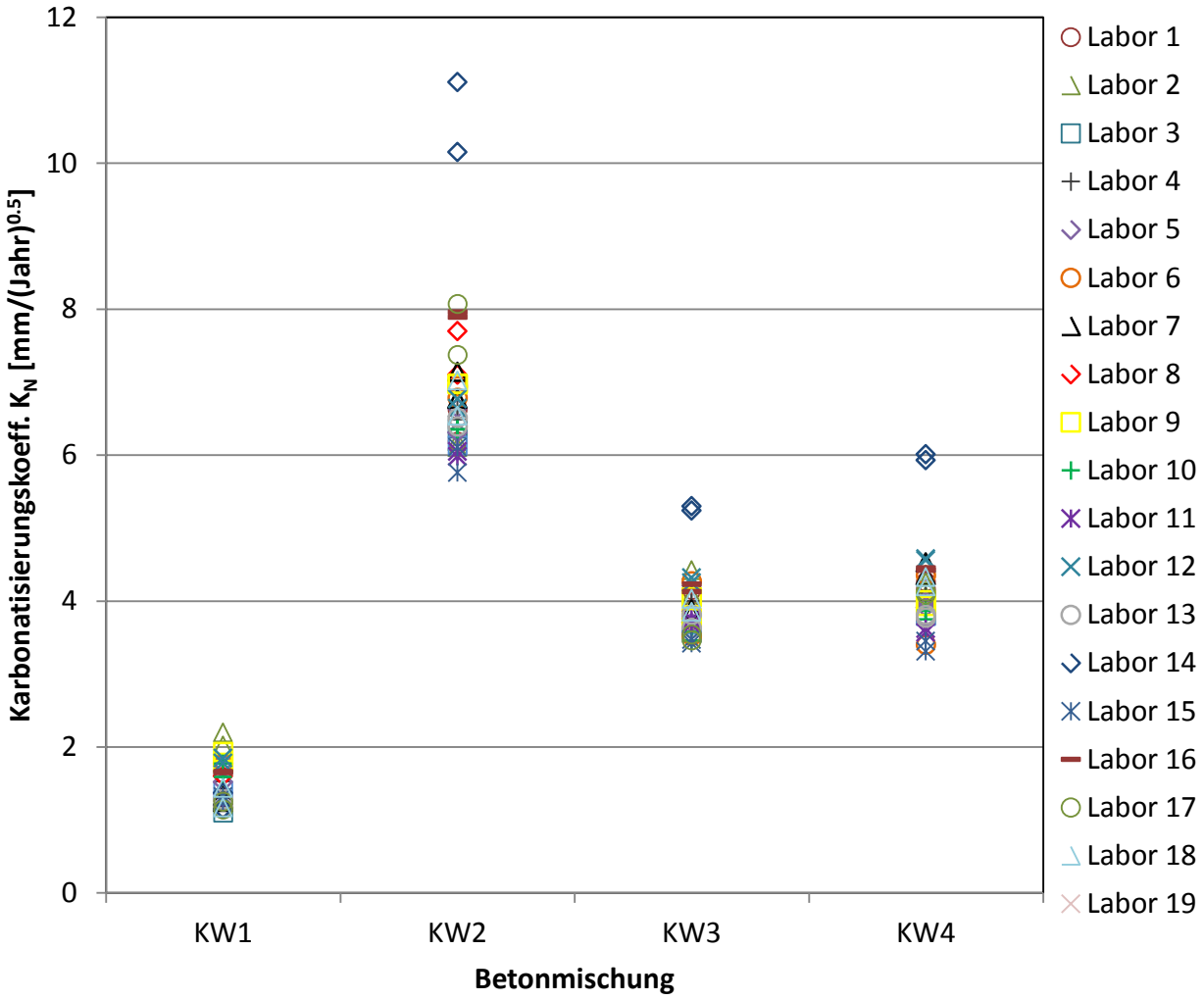

Abb. 5: Karbonatisierungskoeffizienten K_N für alle Betonsorten und alle Labors. Pro Labor sind jeweils zwei Werte dargestellt (Doppelbestimmung).

Die drei angestrebten Niveaus sind gut zu erkennen. KW3 und KW4 sind vergleichbar gross und wie angestrebt im Bereich des Grenzwertes.

4.1.3 Mittelwerte

Labor	KW1 KN [mm/Jahr^0.5]	KW2 KN [mm/Jahr^0.5]	KW3 KN [mm/Jahr^0.5]	KW4 KN [mm/Jahr^0.5]
1	1.28	6.40	4.00	4.21
2	2.11	6.15	4.25	4.17
3	1.25	6.25	3.62	3.79
4	1.56	6.57	4.05	4.06
5	1.65	6.47	3.76	3.96
6	1.47	6.86	3.89	3.88
7	1.29	6.96	3.85	4.44
8	1.70	7.40	4.25	4.65
9	1.85	6.97	3.90	3.97
10	1.68	6.35	3.52	3.81
11	1.25	6.02	3.71	3.59
12	1.81	6.71	4.29	4.57
13	1.23	6.45	3.72	3.79
14	1.26	10.63	5.27	5.97
15	1.28	5.94	3.45	3.38
16	1.65	7.92	4.18	4.44
17	1.19	7.72	3.50	4.11
18	1.30	6.78	3.94	4.27

Tab. 5: Mittelwerte des Karbonatisierungskoeffizienten K_N pro Labor und pro Betonsorte.

4.1.4 Standardabweichungen

Labor	KW1 KN [mm/Jahr^0.5]	KW2 KN [mm/Jahr^0.5]	KW3 KN [mm/Jahr^0.5]	KW4 KN [mm/Jahr^0.5]
1	0.00	0.31	0.21	0.07
2	0.13	0.06	0.23	0.13
3	0.21	0.16	0.08	0.01
4	0.04	0.11	0.08	0.07
5	0.18	0.23	0.08	0.06
6	0.42	0.11	0.53	0.67
7	0.05	0.26	0.04	0.13
8	0.14	0.42	0.35	0.21
9	0.11	0.01	0.21	0.06
10	0.13	0.00	0.08	0.08
11	0.01	0.05	0.05	0.04
12	0.05	0.09	0.05	0.01
13	0.08	0.08	0.13	0.03
14	0.16	0.68	0.04	0.06
15	0.06	0.25	0.04	0.10
16	0.01	0.05	0.07	0.02
17	0.08	0.49	0.06	0.03
18	0.19	0.34	0.13	0.09

Tab. 6: Standardabweichung des Karbonatisierungskoeffizienten K_N pro Labor und pro Betonsorte.

4.2 Massenänderungen

4.2.1 Massenänderung während Vorlagerung

In den folgenden Diagrammen ist der Verlauf der Massenänderung während der Vorlagerung pro Betonmischung aufgetragen. Nicht alle Labors haben diese Messungen ausgeführt, weshalb gewisse Kurven fehlen.

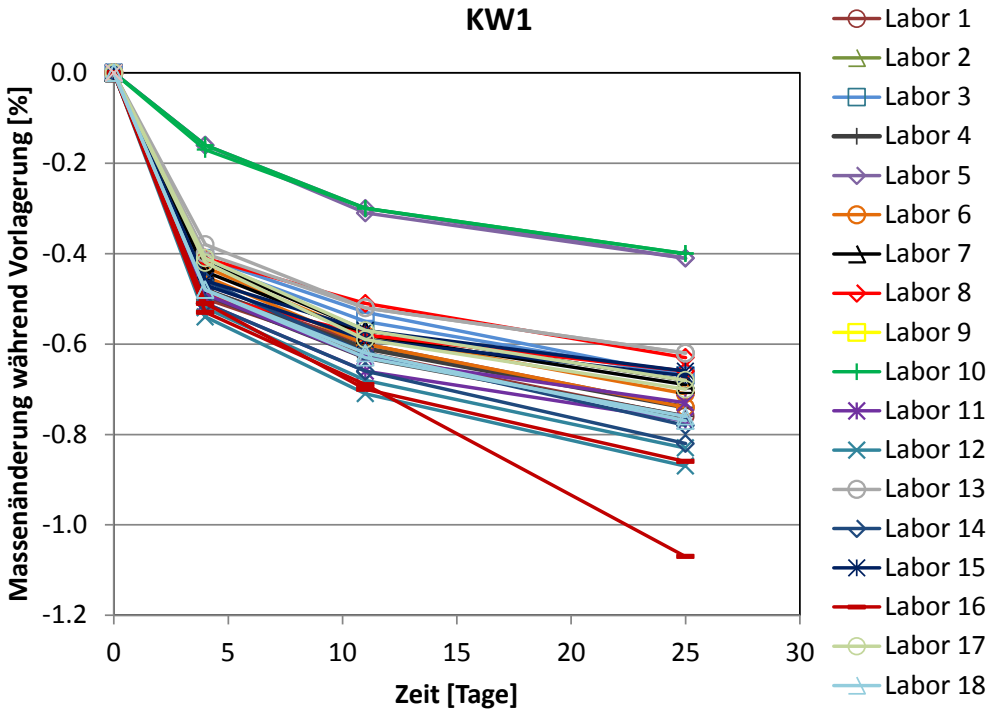

Abb. 6: Massenänderung der Prismen KW1 während der Vorlagerung. Nullpunkt = Ende Wasserlagerung im Alter von 3 Tagen. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

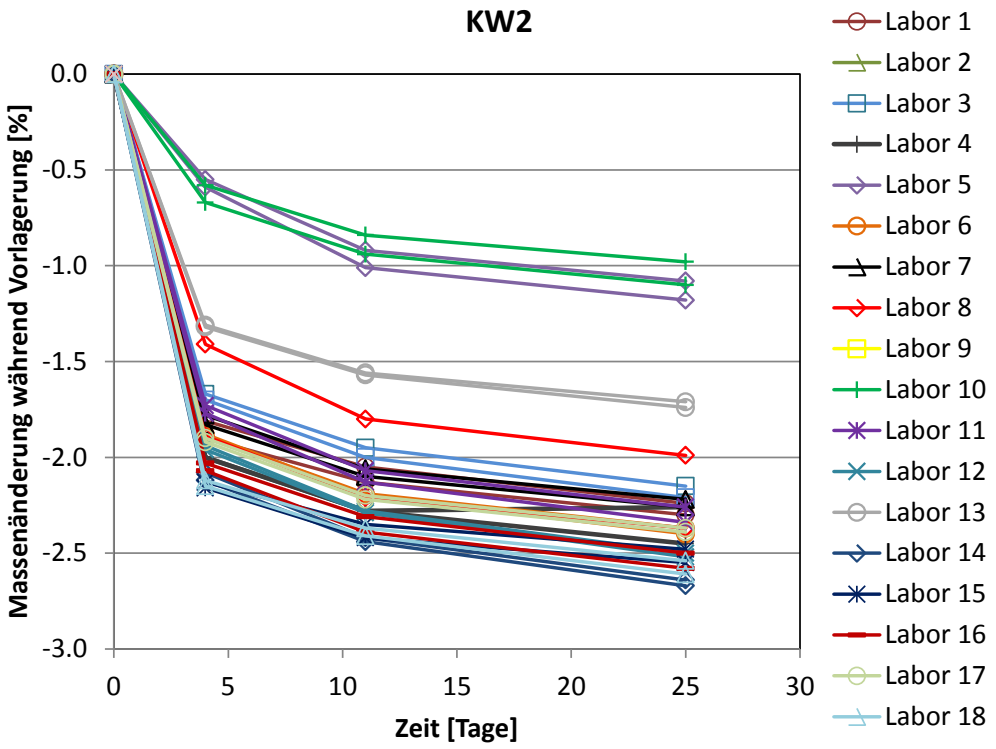

Abb. 7: Massenänderung der Prismen KW2 während der Vorlagerung. Nullpunkt = Ende Wasserlagerung im Alter von 3 Tagen. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

Das Labor 5 hat die Nullmessung bei KW1 und KW2 erst ca. 20 Stunden nach der Entnahme aus dem Wasser durchgeführt. Entsprechend weisen die Prismen dieses Labors insgesamt eine kleinere Massenänderung auf. Beim Labor 10 ist die Massenänderung vergleichbar mit Labor 5, obwohl Labor 10 keine Angaben über Besonderheiten bei der Wägung gemacht hat.

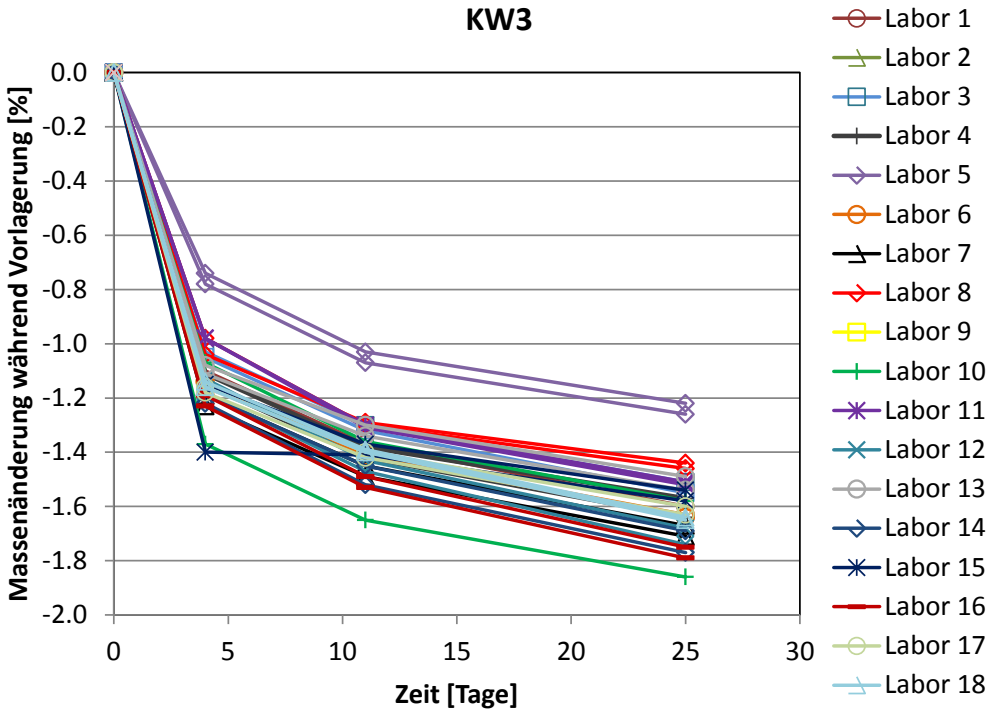

Abb. 8: Massenänderung der Prismen KW3 während der Vorlagerung. Nullpunkt = Ende Wasserlagerung im Alter von 3 Tagen. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

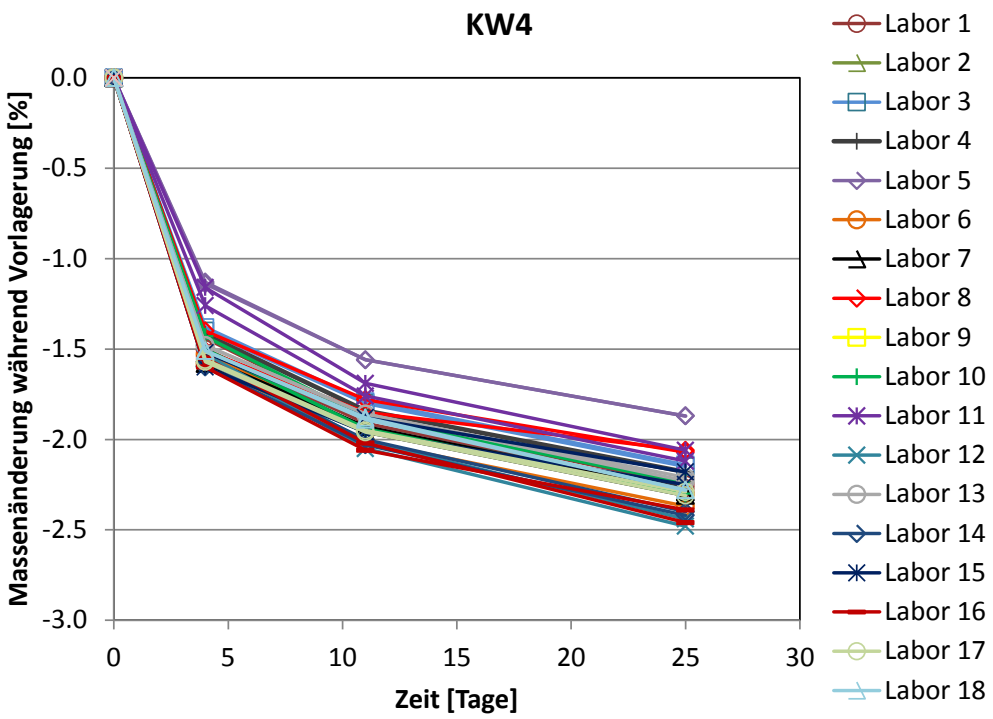

Abb. 9: Massenänderung der Prismen KW4 während der Vorlagerung. Nullpunkt = Ende Wasserlagerung im Alter von 3 Tagen. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

Das Labor 5 hat die Nullmessung bei KW3 und KW4 erst ca. 4 Stunden nach der Entnahme aus dem Wasser durchgeführt. Entsprechend weisen die Prismen dieses Labors insgesamt eine geringfügig kleinere Massenänderung auf.

4.2.1 Massenänderung in der Karbonatisierungskammer

In den folgenden Diagrammen ist jeweils die Massenänderung des Prismas (resp. des Reststückes) in der Karbonatisierungskammer von einer Messung zur nächsten aufgetragen. Es handelt sich somit nicht um die gesamte prozentuale Massenänderung während der Lagerung in der Kammer sondern nur um die inkrementellen Anteile zwischen den jeweiligen Messterminen.

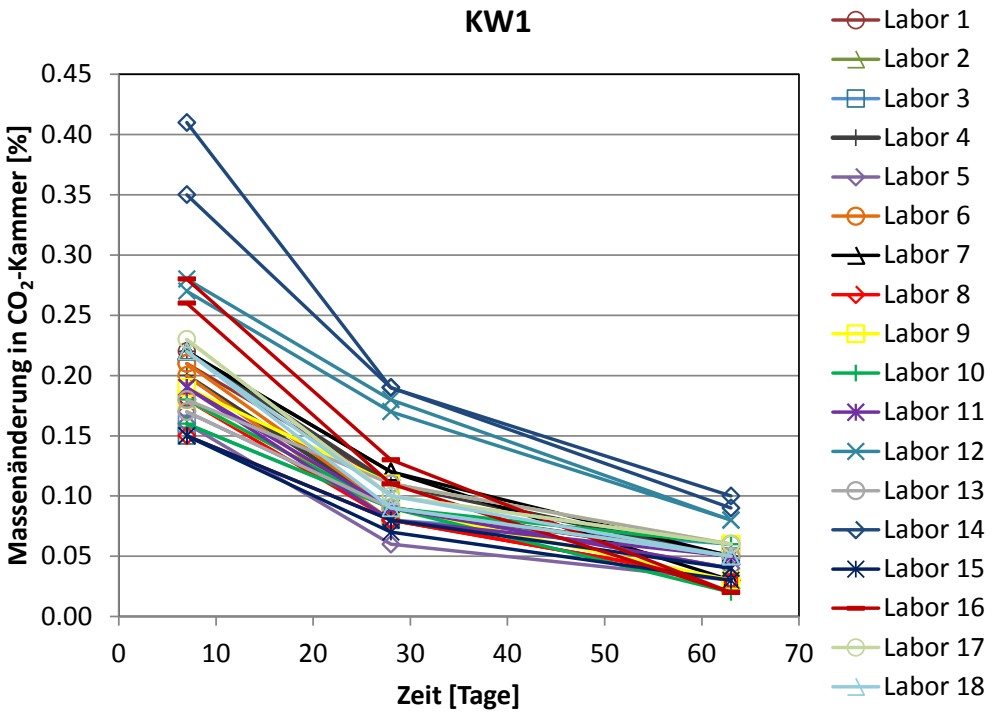

Abb. 10: Massenänderung von KW1 in der Karbonatisierungskammer zwischen zwei Messzeitpunkten. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

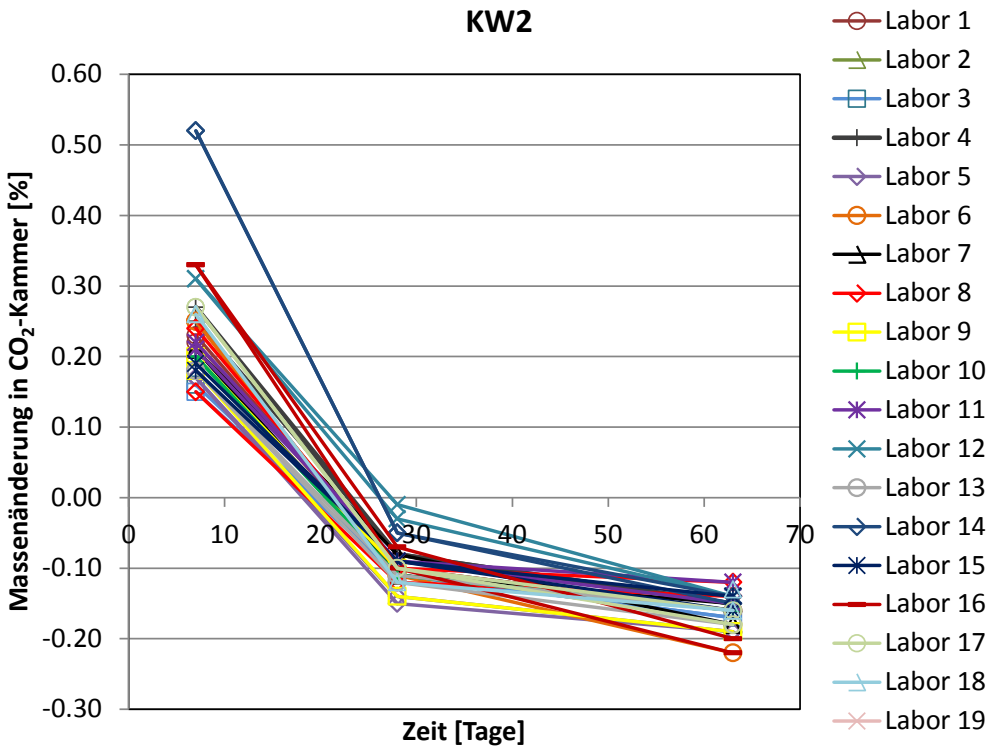

Abb. 11: Massenänderung von KW2 in der Karbonatisierungskammer zwischen zwei Messzeitpunkten. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

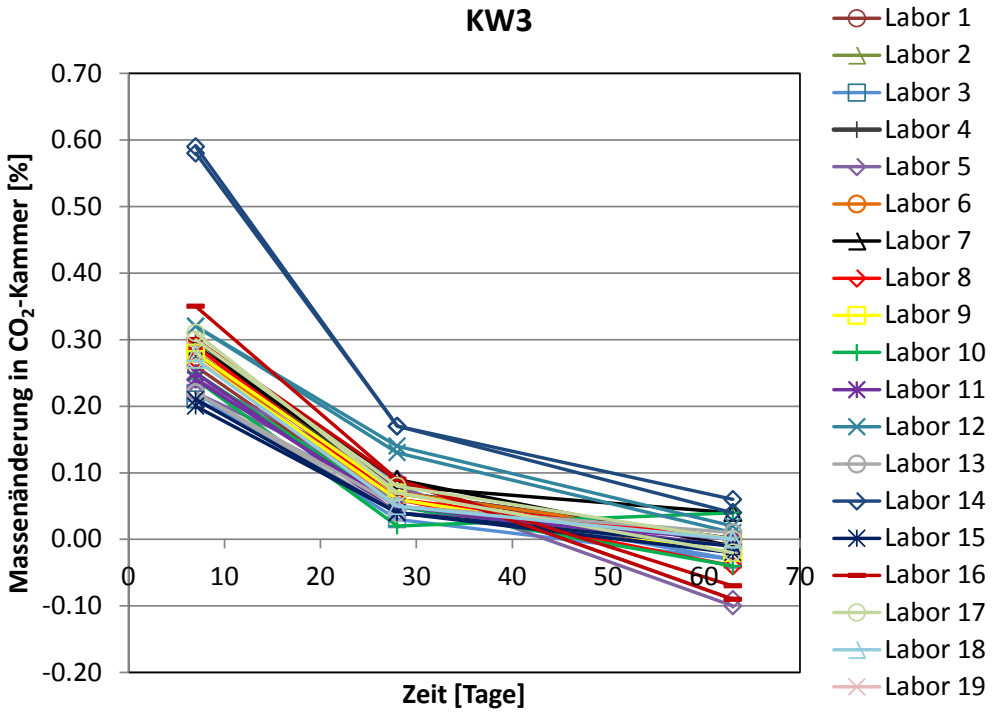

Abb. 12: Massenänderung von KW3 in der Karbonatisierungskammer zwischen zwei Messzeitpunkten. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

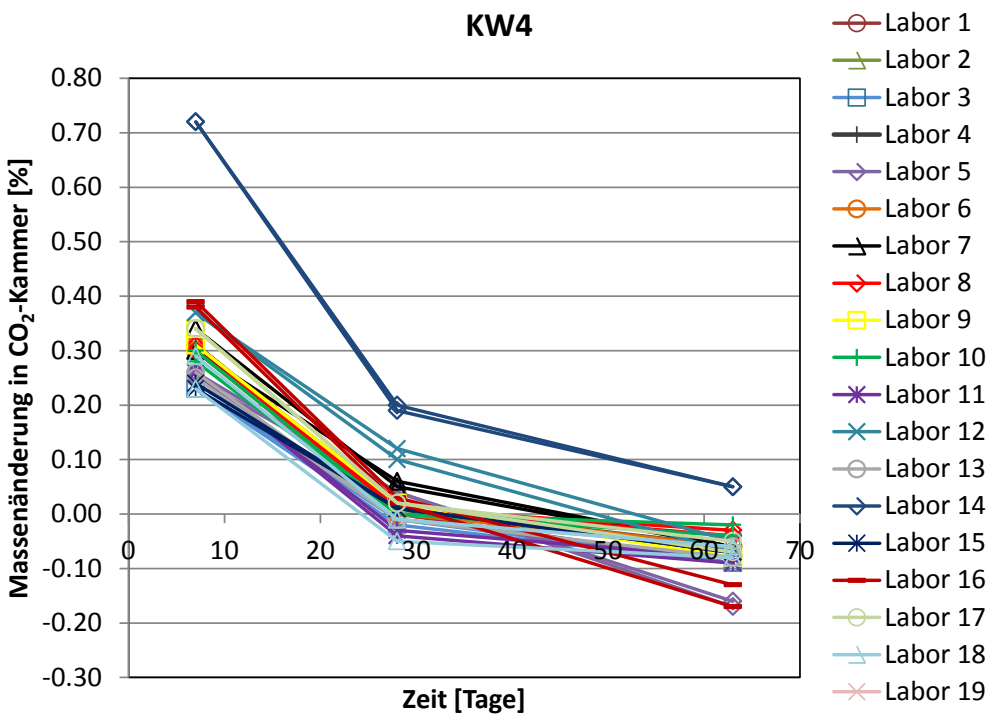

Abb. 13: Massenänderung von KW4 in der Karbonatisierungskammer zwischen zwei Messzeitpunkten. Zwei Kurven pro Labor = Doppelbestimmung.

Das Labor 14 weist im Vergleich mit den übrigen Labors insbesondere in den ersten 7 Tagen bei allen vier Betonen eine deutlich grössere Massenzunahme auf. Dies ist auf den zu hohen CO_2-Gehalt in der Kammer zurückzuführen (vgl. Bemerkung Kap. 2), welcher sich offensichtlich vor allem zu Beginn der Lagerung in der Kammer einen grossen Einfluss hat.

5. Auswertung

5.1 Statistik nach Mandel

Die Vereinbarkeitsprüfgrösse k dient zur Überprüfung der Konsistenz der Messungen innerhalb der Labors.
Die Vereinbarkeitsprüfgrösse h dient zur Überprüfung der Konsistenz der Messungen zwischen den Labors.

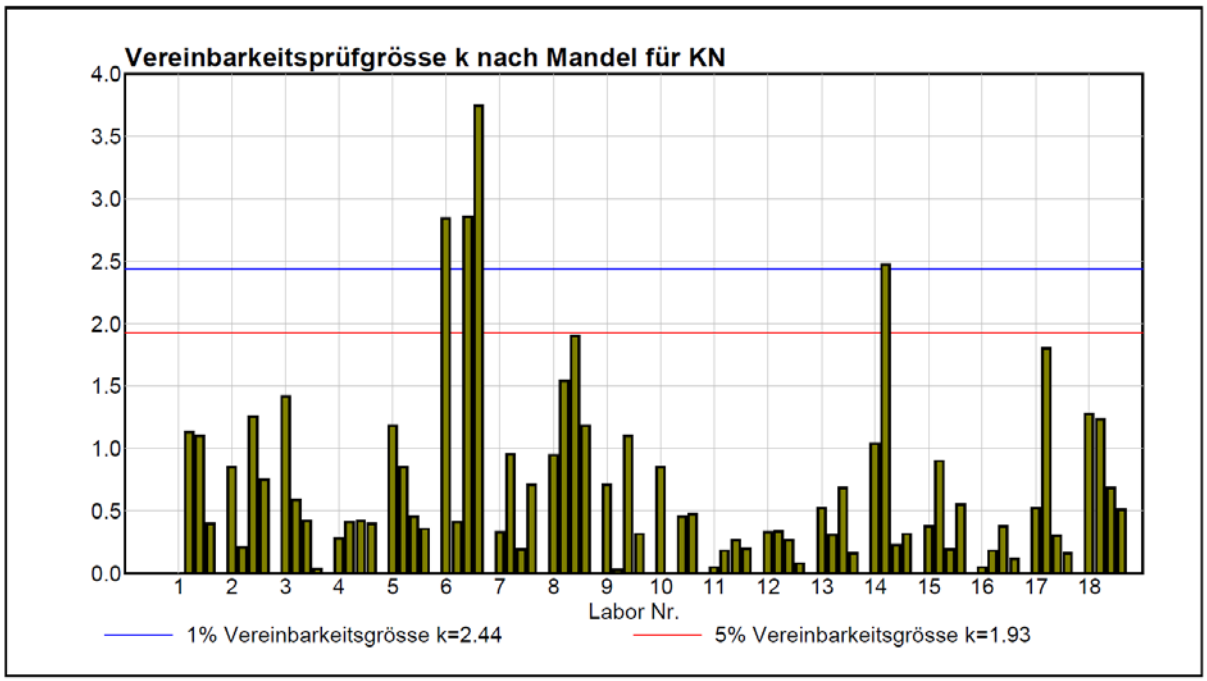

Abb. 14: Veinbarkeitsprüfgrösse k nach Mandel für K_N.

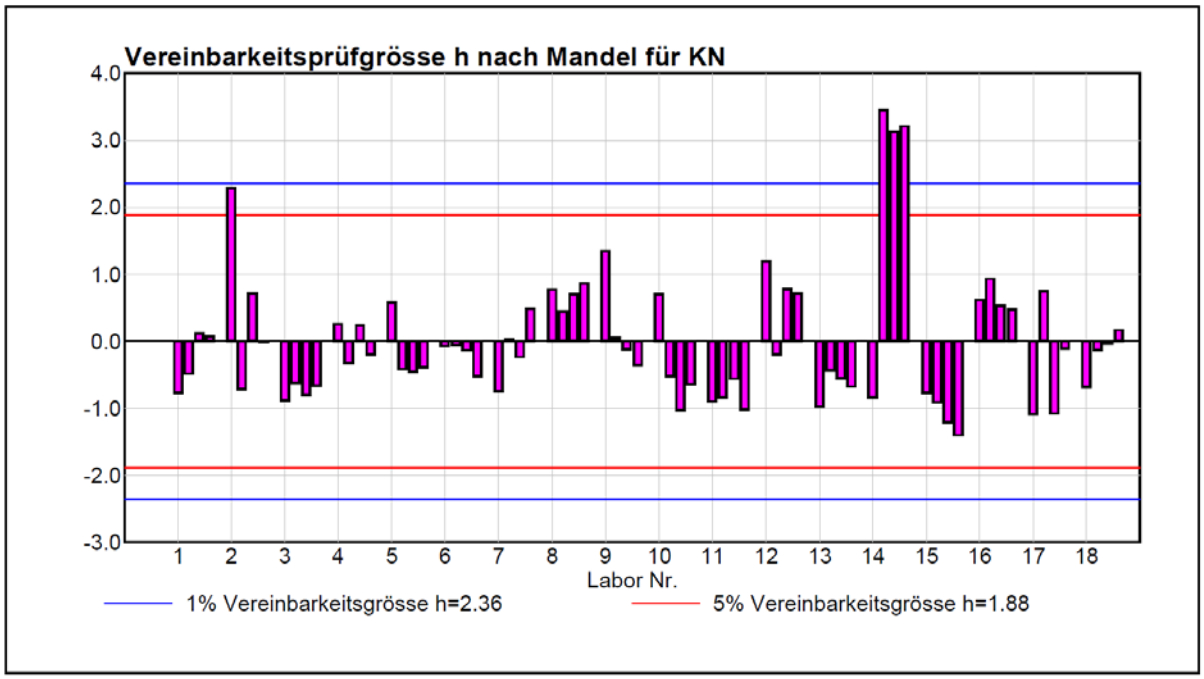

Abb. 15: Veinbarkeitsprüfgrösse h nach Mandel für K_N.

5.2 Cochran Test

Bestimmung der Ausreisser bezüglich Wiederholungsmessungen für den Messwert K_N.

Labor	KW1	KW2	KW3	KW4
1				
2				
3				
4				
5				
6	0.447 *		0.453 *	0.778 **
7				
8				0.350
9				
10				
11				
12				
13				
14		0.339		
15				
16				
17				
18				

(* grosse Streuung ** Ausreisser @ Resultate verworfen)

Zelle 6 / KW1 besitzt eine grosse Streuung! Abklärung empfohlen
Cochran Testgrösse C = 0.44704 > 0.41800 (95% Vertrauensgrenze)
Cochran Testgrösse C = 0.44704 <= 0.51400 (99% Vertrauensgrenze)
Test für KW1 ausgeführt! Keine weiteren Ausreisser festgestellt!
Test für KW2 ausgeführt! Keine weiteren Ausreisser festgestellt!
Zelle 6 / KW3 besitzt eine grosse Streuung! Abklärung empfohlen
Cochran Testgrösse C = 0.45283 > 0.41800 (95% Vertrauensgrenze)
Cochran Testgrösse C = 0.45283 <= 0.51400 (99% Vertrauensgrenze)
Test für KW3 ausgeführt! Keine weiteren Ausreisser festgestellt!
Zelle 6 / KW4 ist ein Ausreisser
Cochran Testgrösse C = 0.77808 > 0.51400 (99% Vertrauensgrenze)

Tab. 7: Resultate des Cochran Test.

Das Labor 6 ist beim Beton KW4 bezüglich Wiederholbarkeit ein Ausreisser und wird deshalb in der Auswertung für den Beton KW4 nicht berücksichtigt.

5.3 Grubbs Test

Bestimmung der Ausreisser bezüglich Vergleichsmessungen für den Messwert K_N.

Labor	KW1	KW2	KW3	KW4
1				
2	0.538			
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9	0.538			
10				
11				
12				
13	0.859			
14		3.448 **	3.124 **	3.113 **
15		0.914	1.208	1.408
16				
17	0.859			
18				

(* grosse Streuung ** Ausreisser @ Resultate verworfen)

Test für KW1 ausgeführt! Keine weiteren Ausreisser festgestellt!
Gemäss Grubbs Test für den grössten Wert ist die Zelle 14 / KW2 ist ein Ausreisser
Grubbs Testgrösse Gp = 3.44807 > 2.93200 (99% Vertrauensgrenze)
Gemäss Grubbs Test für den grössten Wert ist die Zelle 14 / KW3 ist ein Ausreisser
Grubbs Testgrösse Gp = 3.12394 > 2.93200 (99% Vertrauensgrenze)
Gemäss Grubbs Test für den grössten Wert ist die Zelle 14 / KW4 ist ein Ausreisser
Grubbs Testgrösse Gp = 3.11334 > 2.89400 (99% Vertrauensgrenze)

Tab. 8: Resultate des Grubbs Test.

Das Labor 14 (Labor mit einem zu hohen CO2-Gehalt in der Kammer) ist bei den Betonen KW2, KW3 und KW4 bezüglich Vergleichbarkeit ein Ausreisser und wird deshalb in der Auswertung dieser Betone nicht berücksichtigt.

5.4 Präzision bezüglich Messniveau

Präzision für den Messwert K_N [mm/Jahr$^{0.5}$].

Probe	Anzahl Labors	Generelles Mittel	Wiederholgrenze r	Vergleichsgrenze R
KW1	18	1.49	0.415	0.807
KW2	17	6.70	0.637	1.630
KW3	17	3.88	0.529	0.842
KW4	16	4.08	0.245	0.994

Tab. 9: Mittelwerte, Wiederholgrenze und Vergleichsgrenze für den Karbonatisierungskoeffizient K_N.

5.5 Auswertungsgrafiken

Aufgrund eines Fehlers in der Auswertungssoftware werden Ausreisser bezüglich Vergleichbarkeit nicht automatisch verworfen. Aus diesem Grund muss eine zweite Auswertung durchgeführt werden, bei welcher die Ausreisser manuell verworfen werden. In den Abb. 17 bis 19 ist deshalb das Labor 14, welches bei KW2, KW3 und KW4 als Ausreisser gilt (vgl. Tab. 8), nicht dargestellt.

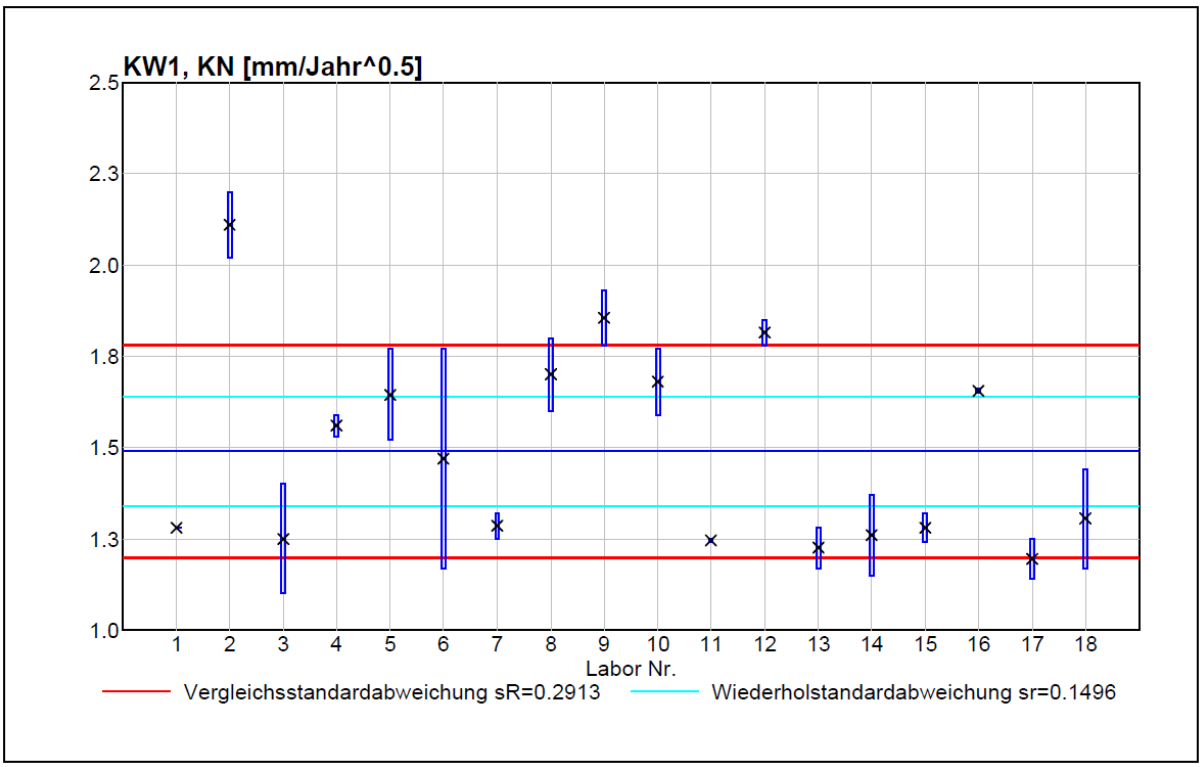

Abb. 16: Auswertungsgrafik für die Betonmischung KW1 mit Mittelwerten und Einzelwerten pro Labor sowie Gesamtmittelwert, Vergleichs- und Wiederholstandardabweichung von K_N. **Achtung:** Bei der Vertikalachse rundet die Auswertungssoftware die Zahlen auf 1 Nachkommastelle, weshalb die Achsenwerte nicht korrekt dargestellt werden (z.B. müsste anstatt 1.3 korrekterweise 1.25 stehen).

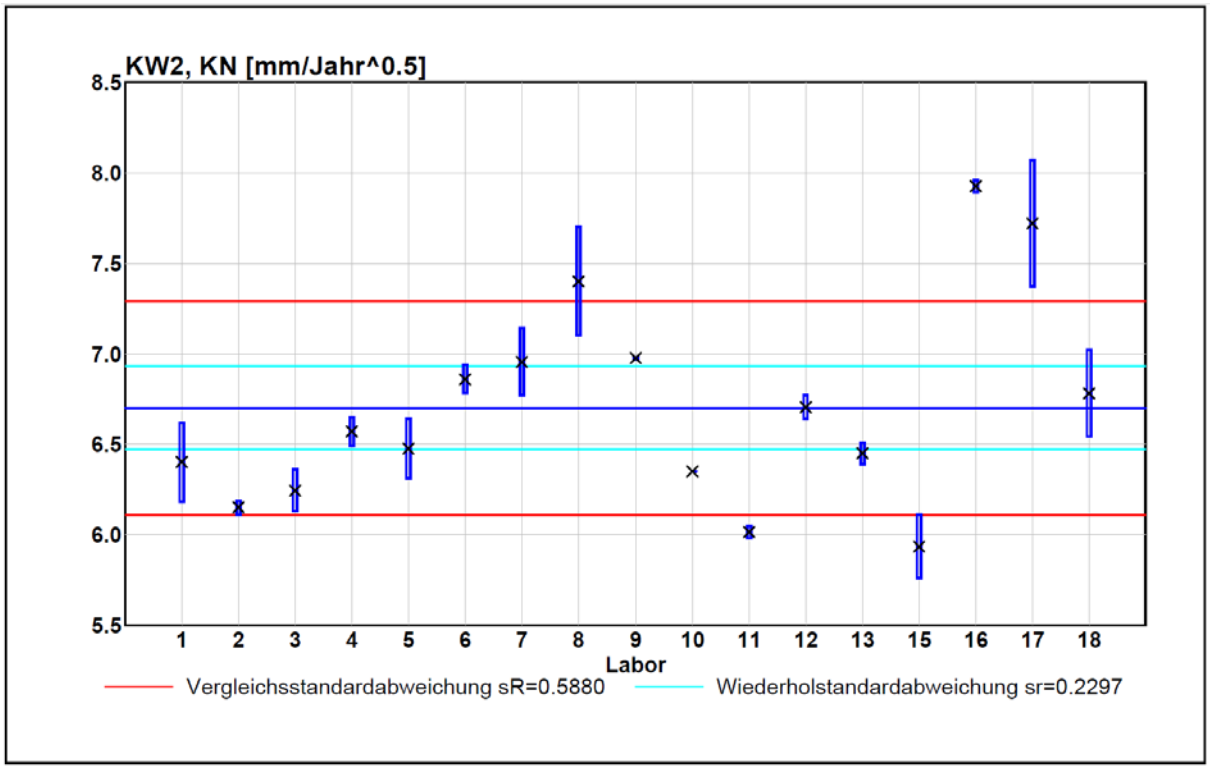

Abb. 17: Auswertungsgrafik für die Betonmischung KW2 mit Mittelwerten und Einzelwerten pro Labor sowie Gesamtmittelwert, Vergleichs- und Wiederholstandardabweichung von K_N.

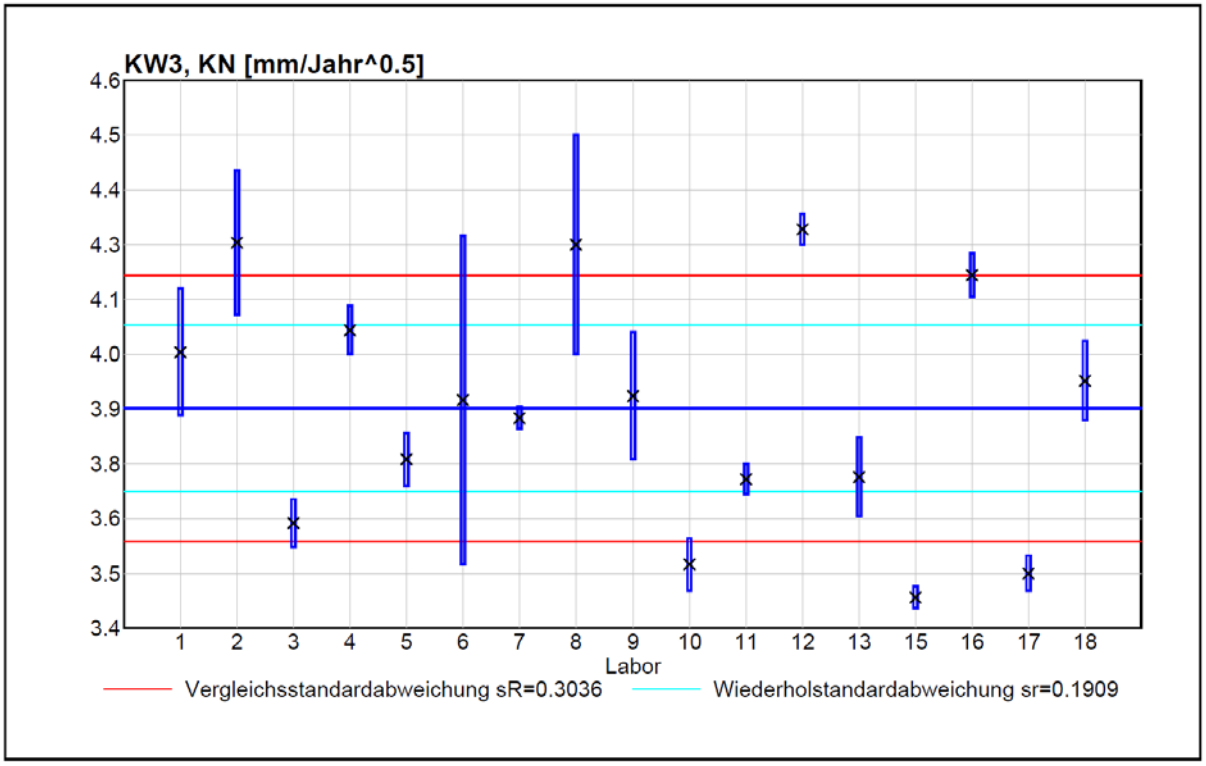

Abb. 18: Auswertungsgrafik für die Betonmischung KW3 mit Mittelwerten und Einzelwerten pro Labor sowie Gesamtmittelwert, Vergleichs- und Wiederholstandardabweichung von K_N. **Achtung:** Bei der Vertikalachse rundet die Auswertungssoftware die Zahlen auf 1 Nachkommastelle, weshalb die Achsenwerte nicht korrekt dargestellt werden.

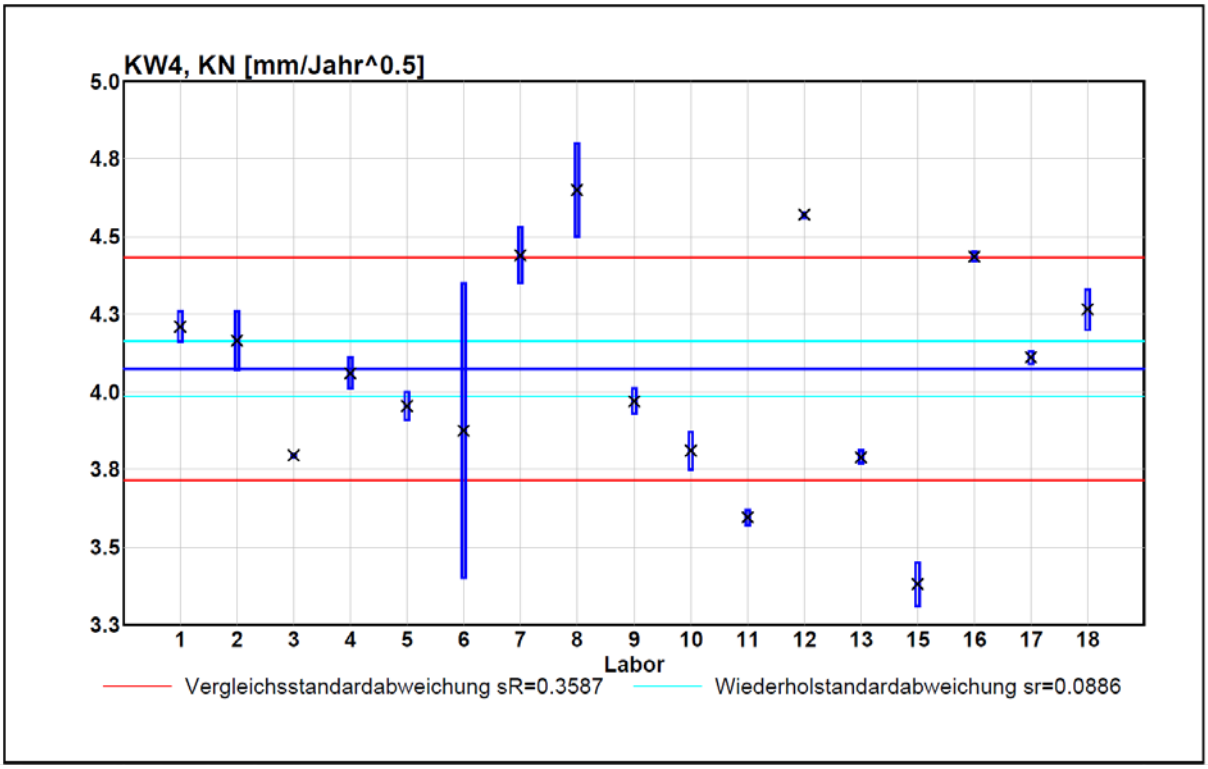

Abb. 19: Auswertungsgrafik für die Betonmischung KW4 mit Mittelwerten und Einzelwerten pro Labor sowie Gesamtmittelwert, Vergleichs- und Wiederholstandardabweichung von K_N. **Achtung:** Bei der Vertikalachse rundet die Auswertungssoftware die Zahlen auf 1 Nachkommastelle, weshalb die Achsenwerte nicht korrekt dargestellt werden (z.B. müsste anstatt 4.3 korrekterweise 4.25 stehen).

6. Beurteilung

Die vier Betonmischungen repräsentieren wie angestrebt drei verschiedene Niveaus bezüglich Karbonatisierungskoeffizient K_N, wobei das mittlere Messniveau (Mischungen KW3 und KW4) im unteren Bereich der Grenzwerte gemäss SIA 262/1 liegt.

Der **Wiederholvariationskoeffizient** ist bei den Mischungen KW2, KW3 und KW4 mit **2 - 5 %** vom Messwert für eine Dauerhaftigkeitsprüfung **sehr klein**. Bei der Mischung KW1 liegt dieser mit 10% im Bereich anderer Dauerhaftigkeitsprüfungen. Der grössere Variationskoeffizient von KW1 ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass bei den geringen Eindringtiefen und dem entsprechend geringen Karbonatisierungskoeffizient das Ausmessen der Eindringtiefe mit einer Genauigkeit von 1 mm einen verhältnismässig grossen Einfluss auf das Messresultat hat.

Der **Vergleichsvariationskoeffizient** liegt bei den Mischungen KW2, KW3 und KW4 mit **8 – 9%** vom Messwert sehr nahe beisammen. Generell handelt es sich im Vergleich mit anderen Dauerhaftigkeitsprüfungen an Beton um **kleine Variationskoeffizienten**. Auch hier ist der Vergleichsvariationskoeffizient für die Mischung KW1 wieder deutlich grösser, was ebenfalls auf den generell kleinen Messwert für K_N zurückgeführt werden kann. Entsprechend ist der Absolutwert der Vergleichsstandardabweichung mit 0.29 mm/Jahr$^{0.5}$ ähnlich gross oder sogar kleiner wie bei den anderen drei Betonmischungen.

Der Vergleichsvariationskoeffizient von KW4 mit Grösstkorn 8 mm ist vergleichbar mit den Koeffizienten von KW2 und KW3. Daraus lässt sich schliessen, dass das kleinere Grösstkorn im Rahmen der hier verwendeten Betonsorten keinen Einfluss auf die Vergleichbarkeit hat. Bei der Wiederholbarkeit ist innerhalb der verwendeten Betone eine Tendenz zu einer geringeren Streuung bei kleinerem Grösstkorn zu erkennen, wenn man davon ausgeht, dass der Wiederholvariationskoeffizient eine Funktion des Karbonatisierungskoeffizienten ist (Abb. 20). Es kann also davon ausgegangen werden, dass **ein kleineres Grösstkorn zu tendenziell kleineren Streuungen** unter Wiederholbedingungen führt, jedoch keinen signifikanten Einfluss bei Vergleichsbedingungen hat.

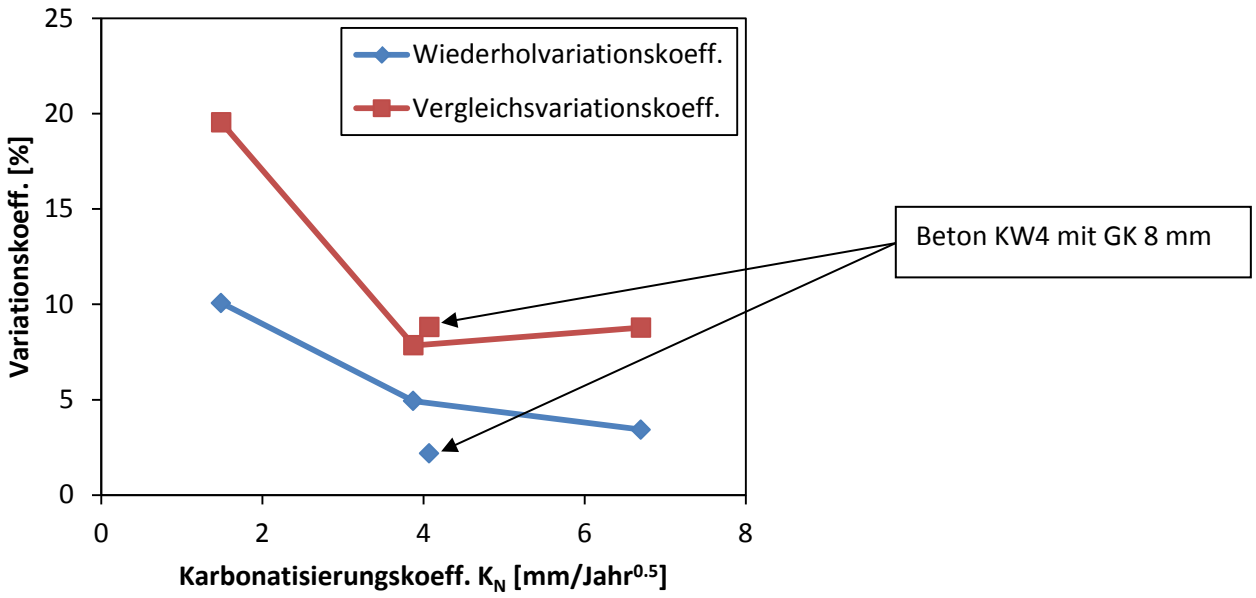

Abb. 20: Wiederhol- und Vergleichsvariationskoeffizient in Abhängigkeit des Karbonatisierungkoeffizienten K_N für die vier Betonmischungen KW1 – KW4. Mit Linie verbundene Betone: Betone mit Grösstkorn 32 mm.

Es besteht innerhalb einer Betonsorte kein direkter Zusammenhang zwischen der Massenabnahme während der Vorlagerung und dem Karbonatisierungskoeffizient (Abb. 21, links). Hingegen ist ein gewisser Zusammenhang zwischen der Massenzunahme in der Karbonatisierungskammer von der Nullmessung bis zur 1. Messung und dem Karbonatisierungskoeffizent erkennbar, wobei dieser Zusammenhang bei Betonen mit höherem Karbonatisierungskoeffizient ausgeprägter ist (Abb. 21, rechts).

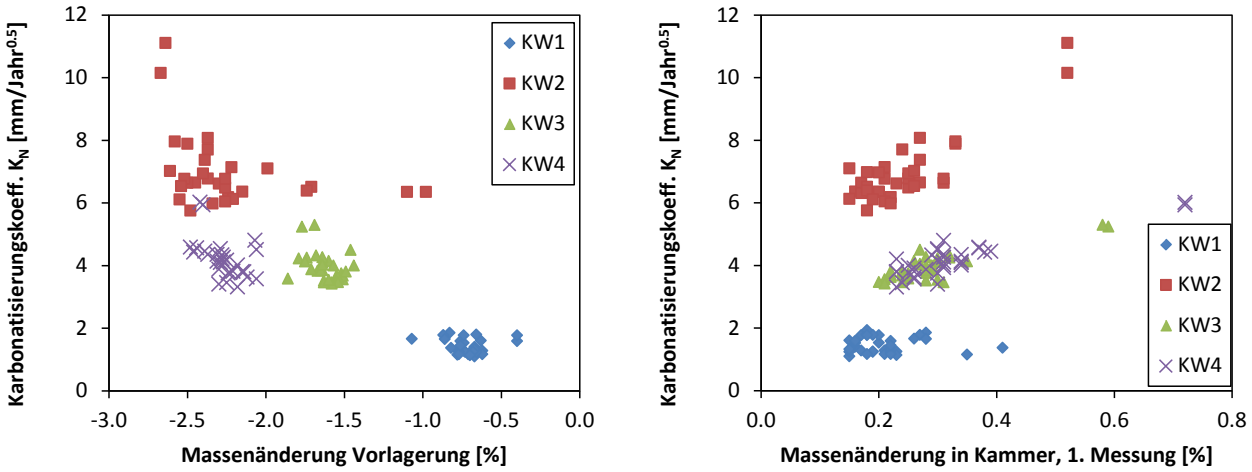

Abb. 21: Karbonatisierungskoeffizient K_N in Funktion der Massenänderung der Prismen während der Vorlagerung (links) und während der Lagerung in der Kammer von der Nullmessung bis zur 1. Messung (rechts).

Diese unterschiedlichen Massenänderungen in der Karbonatisierungskammer können nur durch unterschiedliche Umgebungsdedingungen in der Kammer erklärt werden (insbesondere Feuchte und CO_2-Gehalt). Allerdings befinden sich z.B. beim Labor 14, welches bei 3 von 4 Betonmischungen als Ausreisser gilt, sämtliche abgelieferten Klimadaten sehr genau im Bereich der Normvorgaben. Erst bei einer nachträglichen Kontrolle wurde festgestellt, dass während des Versuchs effektiv ein viel höherer CO_2-Gehalt (> 6 %) vorhanden war. Daraus lässt sich ableiten, dass in der Kammer andere Bedingungen geherrscht haben, als dies durch die Messgeräte der Kammer angezeigt wurde, resp. die Sensoren zwar sehr genau aber falsch geregelt haben. **Aus diesem Grund scheint es notwendig, dass die relevanten Umgebungsparameter (Temperatur, relative Feuchte, CO_2-Gehalt) im Prüfraum sowohl während der Vorlagerung als auch während des Versuches regelmässig durch ein externes Drittgerät kontrolliert werden!** Nur so ist es möglich, Regelfehler der Sensoren zu erkennen.

Obwohl in diesem Ringversuch kein direkter Zusammenhang zwischen Massenänderung in der Vorlagerung und dem Karbonatisierungskoeffizient festgestellt werden kann, haben verschiedene Untersuchungen gezeigt, dass die Feuchtigkeit während der Vorlagerung (vor allem in den ersten Tagen) einen sehr grossen Einfluss auf das Prüfresultat hat. Eine genaue Überwachung und Einhaltung der Umgebungsbedingungen während der Vorlagerung ist deshalb ebenfalls notwendig.

Die Vergleichsstandardabweichung der zum Zeitpunkt des Ringversuches akkreditierten Labors ist nicht wesentlich geringer als die Vergleichsstandardabweichung sämtlicher Labors. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bei den meisten Labors trotz noch nicht vorhandener Akkreditierung gemäss Eigenangaben bereits grössere Erfahrung vorhanden ist.

Gemäss Angabe der Teilnehmer wurden insgesamt vier verschiedene Typen von Karbonatisierungskammern verwendet:

- Kammer TFB: 10 Teilnehmer
- Kammer Feutron: 4 Teilnehmer
- Kammer Frutiger: 3 Teilnehmer
- Kammer Caron: 1 Teilnehmer

Wie in Abb. 22 gezeigt wird, liegt der Mittelwert der Teilnehmer mit Feutron-Kammern tendenziell tiefer als mit der TFB-Kammer. Die Resultate der Teilnehmer mit den anderen beiden Kammern liegen dazwischen. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung pro Kammertyp und der erzielten generellen Variationskoeffizienten sind die Unterschiede jedoch so gering, dass von einem vernachlässigbaren Einfluss des Kammertypen ausgegangen werden kann.

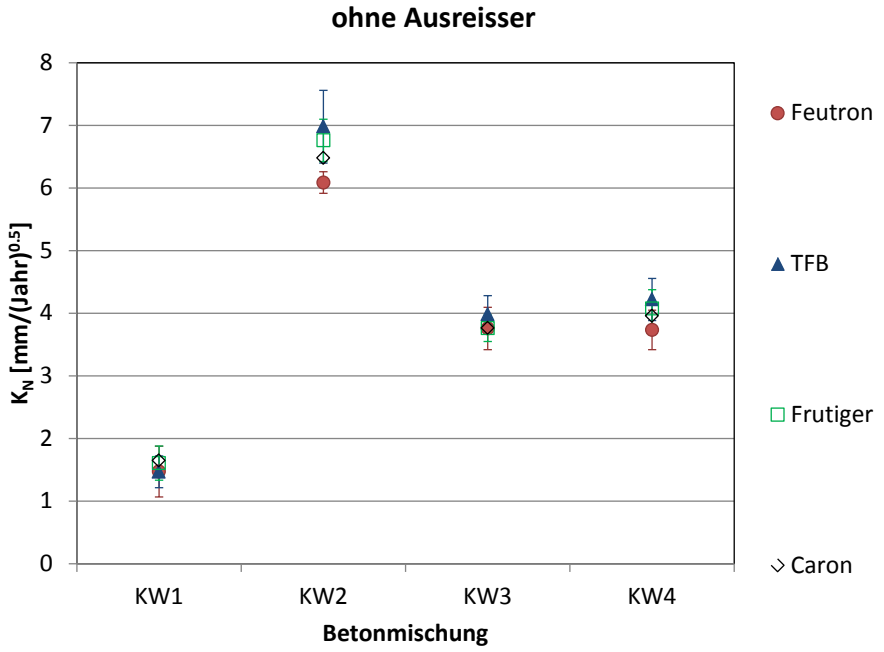

Abb. 22: Karbonatisierungskoeffizient K_N (inkl. Standardabweichungen) der vier Betone in Abhängigkeit der vier verschiedenen, innerhalb des Ringversuches verwendeten Karbonatisierungskammertypen. Die Ausreisser wurden nicht berücksichtigt.

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 69 35
www.empa.ch/abt308

EMPA
Materials Science & Technology

VAB / ALA
c/o TFB
Lindenstrasse 10
5103 Wildegg

Bericht Nr. 5214007288

Auftrag:	**Probekörperherstellung für Ringversuch Karbonatisierungswiderstand**
Objekt(e):	152 Prismen 120 x 120 x 360 mm^3, 28 Würfel 150 x 150 x 150 mm^3
Bauwerk / Bauteil:	--
Eingangs-Nr.:	9459 - 9462
Auftragserteilung:	VAB
Eingang Objekt(e):	--
Probenahme durch:	Empa
Anzahl Seiten Bericht:	3
Beilage(n):	Prüfprotokolle Betonherstellung (4 Seiten)

Inhalt

1. Auftrag 2
2. Prüfkörperherstellung 2
3. Untersuchungen und Resultate 3
   3.1 Frischbetonkontrolle 3
   3.2 Druckfestigkeit 3

G:\Berichte word\2014\12\5214007288_Objekt_RV_Karbonatisierungswiderstand.doc

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Beton & Bauchemie
Dübendorf, 02.12.2014

Prüfleiter / Prüfleiterin:
Walter Trindler

Gruppe Betontechnologie:
Roman Loser

SWISS ACCREDITATION sas.admin.ch STS 0338

Anmerkung: Die Untersuchungsergebnisse haben nur Gültigkeit für das geprüfte Objekt. Angaben zur Aussagekraft der Verfahren erfolgen auf Anfrage. Berichte und Unterlagen werden 10 Jahre archiviert. Ohne besondere Angaben oder Gegenbericht des Auftraggebers werden intakte Prüfobjekte nach 10 Monaten ab Berichtsdatum entsorgt. Das Verwenden des Berichtes zu Werbezwecken, der blosse Hinweis darauf sowie auszugsweises Veröffentlichen bedürfen der Genehmigung der EMPA.

1. Auftrag

Zur Durchführung des Ringversuches „Karbonatisierungswiderstand" gemäss SIA 262/1, Anhang I, sollen an der Empa Probekörper (Prismen 120 x 120 x 360 mm^3) mit möglichst geringer Streuung produziert werden. Insgesamt sollen Prüfkörper aus 4 verschiedenen Betonmischungen für 19 teilnehmende Labors hergestellt werden.

2. Prüfkörperherstellung

An zwei verschiedenen Betonierdaten wurden folgende vier Betonmischungen hergestellt:

Bezeichnung	**KW1**	**KW2**	**KW3**	**KW4**
Herstelldatum	13.10.2014	13.10.2014	14.10.2014	14.10.2014
Zementart	CEM I 42.5 N	CEM III/B 42.5 N	CEM II/B-M (T-LL) 42.5 N	CEM II/B-M (T-LL) 42.5 N
Zementgehalt [kg/m^3]	360	280	300	380
w/z-Wert	0.40	0.63	0.54	0.57
Grösstkorn [mm]	32	32	32	8

Die Rezepturen der Betonmischungen können der Beilage entnommen werden. Für jede Mischung wurde ein Betonvolumen von 250 Liter in einem Eirich RV 9 Intensivmischer mit 250 Litern Fassungsvermögen hergestellt. Nach dem Mischen wurde der Beton aus dem Mischer in eine Stahlwanne entleert, nochmals gut mit der Schaufel durchgemischt und eine Frischbetonkontrolle durchgeführt. Anschliessend wurden die Prüfkörper hergestellt.

Allen teilnehmenden Labors wurden von jeder Mischung je zwei Prismen 120 x 120 x 360 mm^3 zur Verfügung gestellt.

Der Beton wurde mit einem Innenvibrator (Vibriernadel) jeweils an drei Stellen pro Prisma verdichtet. Für den eigentlichen Verdichtungsvorgang wurden die Schalungen vorgängig bis zur Oberkante mit Beton gefüllt. Anschliessend wurde verdichtet und gleichzeitig wenig Beton nachgefüllt, so dass der Prüfkörper nach Ende des Verdichtungsvorgangs genau bis Oberkante Schalung gefüllt war und nur noch abtaloschiert werden musste.

Unmittelbar nach der Herstellung wurden die Prüfkörper im Klimaraum bei 20°C und 90% r.F. gelagert. Nach ca. 24 Stunden wurden die Prüfkörper ausgeschalt und bis zur Abgabe an die Teilnehmer im Laborklima im Wasser weitergelagert. Die Abgabe an die Teilnehmer erfolgte im Alter von zwei resp. drei Tagen, so dass die Vorlagerung bei 20 °C und 57 % r.F. vollständig in den einzelnen Labors erfolgen konnte.

3. Untersuchungen und Resultate

3.1 Frischbetonkontrolle

Von jeder Mischung wurde eine Frischbetonkontrolle durchgeführt. Die Resultate sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Mischung		**KW1**	**KW2**	**KW3**	**KW4**
Rohdichte	kg/m^3	2'446	2'381	2'410	2'317
Luftporengehalt	Vol.-%	1.2	1.3	1.9	1.3
Ausbreitmass	mm	370	470	430	520

Tab. 1: Resultate der Frischbetonkontrolle.

Die Mischungen wurden bewusst mit einer eher steifen Konsistenz hergestellt, um damit Entmischungen vorzubeugen. Bei KW2 und KW4 ist das Ausbreitmass trotzdem relativ hoch, was auf den hohen w/z-Wert resp. das hohe Leimvolumen zurückgeführt werden kann. Aufgrund des hohen Sandanteiles waren diese Mischungen aber sehr stabil und zeigten keinerlei Tendenz zu Entmischung, so dass eine möglichst homogene Prüfkörperherstellung ermöglicht werden konnte. Die Verdichtungsdauer wurde generell der Konsistenz angepasst, innerhalb einer Betonmischung jedoch für alle Prüfkörper konstant gehalten.

3.2 Druckfestigkeit

Im Alter von 1, 3 und 28 Tagen wurde an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge die Druckfestigkeit als Mittelwert aus zwei (1 und 3 Tage) resp. drei (28 Tage) Prüfkörpern nach EN 12390-3 bestimmt. Die Resultate sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Mischung	Druckfestigkeit [MPa]			
	KW1	KW2	KW3	KW4
1d	27.9	4.1	10.2	10.1
3d	49.3	11.3	27.0	24.9
28d	64.8	34.3	43.2	40.7

Tab. 2: Resultate der Druckfestigkeitsbestimmung zu verschiedenen Zeitpunkten (Mittelwerte).

Zum Ausschalzeitpunkt nach 24 Stunden war die Festigkeit der Mischung KW2 noch sehr tief. Mit entsprechend vorsichtigem Ausschalen konnte jedoch verhindert werden, dass die Prismen Schaden genommen haben. Zum Zeitpunkt des Transportes nach 3 Tagen war die Festigkeit schon so hoch, dass keine Transportschäden aufgetreten sein sollten.

Herstellung konventioneller Beton Auftragsnr. 5214007288

Mischung: KW1 **Herstellungsdatum: 13.10.2014** **Zeit: 14:40**

Gesteinskörnung				Betonzusammensetzung		
Bezeichnung	Herkunft	Fraktion [mm]	Massenanteil trocken [%]	geschätzt pro m^3 [kg/m^3]	geschätzt pro Charge [kg/m^3]	ermittelt pro m^3 [kg/m^3]
		0 ... 4	32	615.33	153.83	
		4 ... 8	16	307.66	76.92	
		8 ... 16	17	326.89	81.72	
		16 ... 32	35	673.01	168.25	
Zement: CEM I 42.5 N, Eingangsnr. 9382				360.00	90.00	
Zusatzstoff: --				--	--	
Verflüssiger [M-%]: 0.7 Eingangsnr. 9080 (VC3088)				2.52	0.630	
Luftporenmittel [M-%]: --				--	--	
Wasser [l]: w/z-Wert: 0.40 w/b-Wert: 0.40				142.57	35.64	
Rohdichte				2'428		2'446

250 Liter im 250 Liter Mischer, Mischzeit [s]: 90

Frischbetoneigenschaften

Luftporengehalt [Vol-%]	1.2
Ausbreitmass [cm]	370

Prüfkörper

Anzahl	Abmessung [mm]	Bezeichnung	Verarbeitung	Prüfung	Alter	Lagerung
36	120x120x360	KW1.1 - .36	verdichtet	RV Karbon	28d	Wasser
2	120x120x360	KW1.37 - .38	verdichtet	Reserve	-	Wasser
3	150x150x150	KW1.39 - .41	verdichtet	Druck	28d	20/95
2	150x150x150	KW1.42 - .43	verdichtet	Druck	24h	20/95
2	150x150x150	KW1.44 - .45	verdichtet	Druck	3d	20/95

Bemerkungen:

Herstellung konventioneller Beton Auftragsnr. 5214007288

Mischung: KW2 **Herstellungsdatum: 13.10.2014** **Zeit: 14:00**

Gesteinskörnung				Betonzusammensetzung		
Bezeichnung	Herkunft	Fraktion [mm]	Massenanteil trocken [%]	geschätzt pro m^3 [kg/m^3]	geschätzt pro Charge [kg/m^3]	ermittelt pro m^3 [kg/m^3]
		0 ... 4	40	756.16	189.04	
		4 ... 8	15	283.56	70.89	
		8 ... 16	16	302.47	75.62	
		16 ... 32	29	548.22	137.05	
Zement: CEM III/B 42.5 N, Eingangsnr. 9358				280.00	70.00	
Zusatzstoff: --				--	--	
Verflüssiger [M-%]: --				--	--	
Luftporenmittel [M-%]: --				--	--	
Wasser [l]: w/z-Wert: 0.63 w/b-Wert: 0.63				176.40	44.10	
Rohdichte				2'347		2'381

250 Liter im 250 Liter Mischer, Mischzeit [s]: 90

Frischbetoneigenschaften

Luftporengehalt [Vol-%]	1.3
Ausbreitmass [cm]	470

Prüfkörper

Anzahl	Abmessung [mm]	Bezeichnung	Verarbeitung	Prüfung	Alter	Lagerung
36	120x120x360	KW2.1 - .36	verdichtet	RV Karbon	28d	Wasser
2	120x120x360	KW2.37 - .38	verdichtet	Reserve	-	Wasser
3	150x150x150	KW2.39 - .41	verdichtet	Druck	28d	20/95
2	150x150x150	KW2.42 - .43	verdichtet	Druck	24h	20/95
2	150x150x150	KW2.44 - .45	verdichtet	Druck	3d	20/95

Bemerkungen:

Herstellung konventioneller Beton Auftragsnr. 5214007288

Mischung: KW3 **Herstellungsdatum: 14.10.2014** **Zeit: 07:25**

Gesteinskörnung				Betonzusammensetzung		
Bezeichnung	Herkunft	Fraktion [mm]	Massenanteil trocken [%]	geschätzt pro m^3 [kg/m^3]	geschätzt pro Charge [kg/m^3]	ermittelt pro m^3 [kg/m^3]
		0 ... 4	32	613.42	153.36	
		4 ... 8	16	306.71	76.68	
		8 ... 16	17	325.88	81.47	
		16 ... 32	35	670.93	167.73	
Zement: CEMII/B-M(T-LL)42.5 N, Eingangsnr. 9357				300.00	75.00	
Zusatzstoff: --				--	--	
Verflüssiger [M-%]: 0.2 Eingangsnr. 9080 (VC3088)				0.60	0.150	
Luftporenmittel [M-%]: --				--	--	
Wasser [l]: w/z-Wert: 0.54 w/b-Wert: 0.54				161.69	40.42	
Rohdichte				2'379		2'410

250 Liter im 250 Liter Mischer, Mischzeit [s]: 90

Frischbetoneigenschaften

Luftporengehalt [Vol-%]	1.9
Ausbreitmass [cm]	430

Prüfkörper

Anzahl	Abmessung [mm]	Bezeichnung	Verarbeitung	Prüfung	Alter	Lagerung
36	120x120x360	KW3.1 - .36	verdichtet	RV Karbon	28d	Wasser
2	120x120x360	KW3.37 - .38	verdichtet	Reserve	-	Wasser
3	150x150x150	KW3.39 - .41	verdichtet	Druck	28d	20/95
2	150x150x150	KW3.42 - .43	verdichtet	Druck	24h	20/95
2	150x150x150	KW3.44 - .45	verdichtet	Druck	3d	20/95

Bemerkungen:

Herstellung konventioneller Beton Auftragsnr. 5214007288

Mischung: KW4 **Herstellungsdatum: 14.10.2014** **Zeit: 08:20**

Gesteinskörnung				Betonzusammensetzung		
Bezeichnung	Herkunft	Fraktion [mm]	Massenanteil trocken [%]	geschätzt pro m^3 [kg/m^3]	geschätzt pro Charge [kg/m^3]	ermittelt pro m^3 [kg/m^3]
		0 ... 4	60	997.84	249.46	
		4 ... 8	40	665.23	166.31	
		8 ... 16	0	0.00	0.00	
		16 ... 32	0	0.00	0.00	
Zement: CEMII/B-M(T-LL)42.5 N, Eingangsnr. 9357				380.00	95.00	
Zusatzstoff: --				--	--	
Verflüssiger [M-%]: --				--	--	
Luftporenmittel [M-%]: --				--	--	
Wasser [l]: w/z-Wert: 0.57 w/b-Wert: 0.57				216.60	54.15	
Rohdichte				2'260		2'317

250 Liter im 250 Liter Mischer, Mischzeit [s]: 90

Frischbetoneigenschaften

Luftporengehalt [Vol-%]	1.3
Ausbreitmass [cm]	520

Prüfkörper

Anzahl	Abmessung [mm]	Bezeichnung	Verarbeitung	Prüfung	Alter	Lagerung
36	120x120x360	KW4.1 - .36	verdichtet	RV Karbon	28d	Wasser
2	120x120x360	KW4.37 - .38	verdichtet	Reserve	-	Wasser
3	150x150x150	KW4.39 - .41	verdichtet	Druck	28d	20/95
2	150x150x150	KW4.42 - .43	verdichtet	Druck	24h	20/95
2	150x150x150	KW4.44 - .45	verdichtet	Druck	3d	20/95

Bemerkungen: