

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

	Seite
Zusammenfassung	6
Arbeitspaket 1: Projektmanagement Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) Dr.-Ing. Olaf Aßbrock	
Teil I	16
Arbeitspaket 2: Petrographie der Gesteinskörnung Bauhaus-Universität Weimar F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde Professur Werkstoffe des Bauens Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig	
Teil II	194
Arbeitspaket 6: Auslagerung Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen	
Teil III	206
Arbeitspaket 6: Auslagerung Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Dr.-Ing. Frank Weise	
Teil IV	280
Arbeitspaket 6: Auslagerung Institut für Bauforschung Aachen der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht	

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Berlin, 25.04.2019
Ort, Datum


Dr.-Ing. Olaf Aßbrock
Name und Unterschrift Projektkoordinator

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 15214 BG

Thema

Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen.

Teilprojekt "Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung"

Berichtszeitraum

01.06.2007 bis 31.12.2018

Forschungsvereinigung

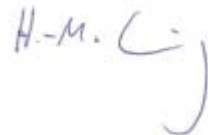
Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Forschungseinrichtung(en)

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Institut für Bauforschung Aachen der RWTH Aachen

Weimar, 30.12.2018
München,
Berlin,
Aachen,

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig
Dr.-Ing. Thomas Kränkel
Dr.-Ing. Frank Weise
Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht



Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 15214 BG

Thema

Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen.

Teilprojekt "Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung"

Berichtszeitraum

01.06.2007 bis 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Forschungseinrichtung(en)

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Institut für Bauforschung Aachen der RWTH Aachen

Weimar,
München, 23.04.19
Berlin,
Aachen,

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig
Dr.-Ing. Thomas Kränkel
Dr.-Ing. Frank Weise
Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht



Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter (in der Reihenfolge der
Forschungseinrichtung(en))

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 15214 BG

Thema

Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen.

Teilprojekt "Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung"

Berichtszeitraum

01.06.2007 bis 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Forschungseinrichtung(en)

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Institut für Bauforschung Aachen der RWTH Aachen

Dr. Frank Weise

Weimar,
München,
Berlin, den 25.4.19
Aachen,

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig
Dr.-Ing. Thomas Kränkel
Dr.-Ing. Frank Weise
Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungseinrichtung(en) **Gefördert durch**

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 15214 BG

Thema

Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen.

Teilprojekt "Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung"

Berichtszeitraum

01.06.2007 bis 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Forschungseinrichtung(en)

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Institut für Bauforschung Aachen der RWTH Aachen

Weimar,
München,
Berlin,
Aachen,

25.04.2019
Ort, Datum

Anya Vollpracht

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig
Dr.-Ing. Thomas Kränkel
Dr.-Ing. Frank Weise
Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht

Name und Unterschrift aller Projektleiter und Projektkoordinator der
Forschungseinrichtung(en)



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Forschungsnetzwerk
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

Zusammenfassung

Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Dr.-Ing. Olaf Aßbrock

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Bauhaus-Universität Weimar F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Institut für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Institut für Bauforschung Aachen der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen
Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Zusammenfassung

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG


Thema: Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von
Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten
Gesteinskörnungen
Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V. (AiF)
Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Projektkoordination: Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Berlin, 25.04.2019
Ort, Datum


Dr.-Ing. Olaf Aißbrock
Name und Unterschrift des Projektkoordinators

Zusammenfassung

„Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung“

(Kurztitel: „Verbundforschung Frost: Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung“)

1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Dieses Forschungsprojekt war Teil der Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“, welche in mehreren Teilprojekten (AiF Nummern 15212 N, 15213 N und 15214 BG) bearbeitet wurde. Diese Zusammenfassung und die einzelnen Teilberichte beziehen sich auf die Arbeitspakete 1, 2 und 6 der Verbundforschung in Teilprojekt Nr. 15214 BG. Die Arbeitspakete aller Teilprojekte sind im Bild 1 dargestellt.

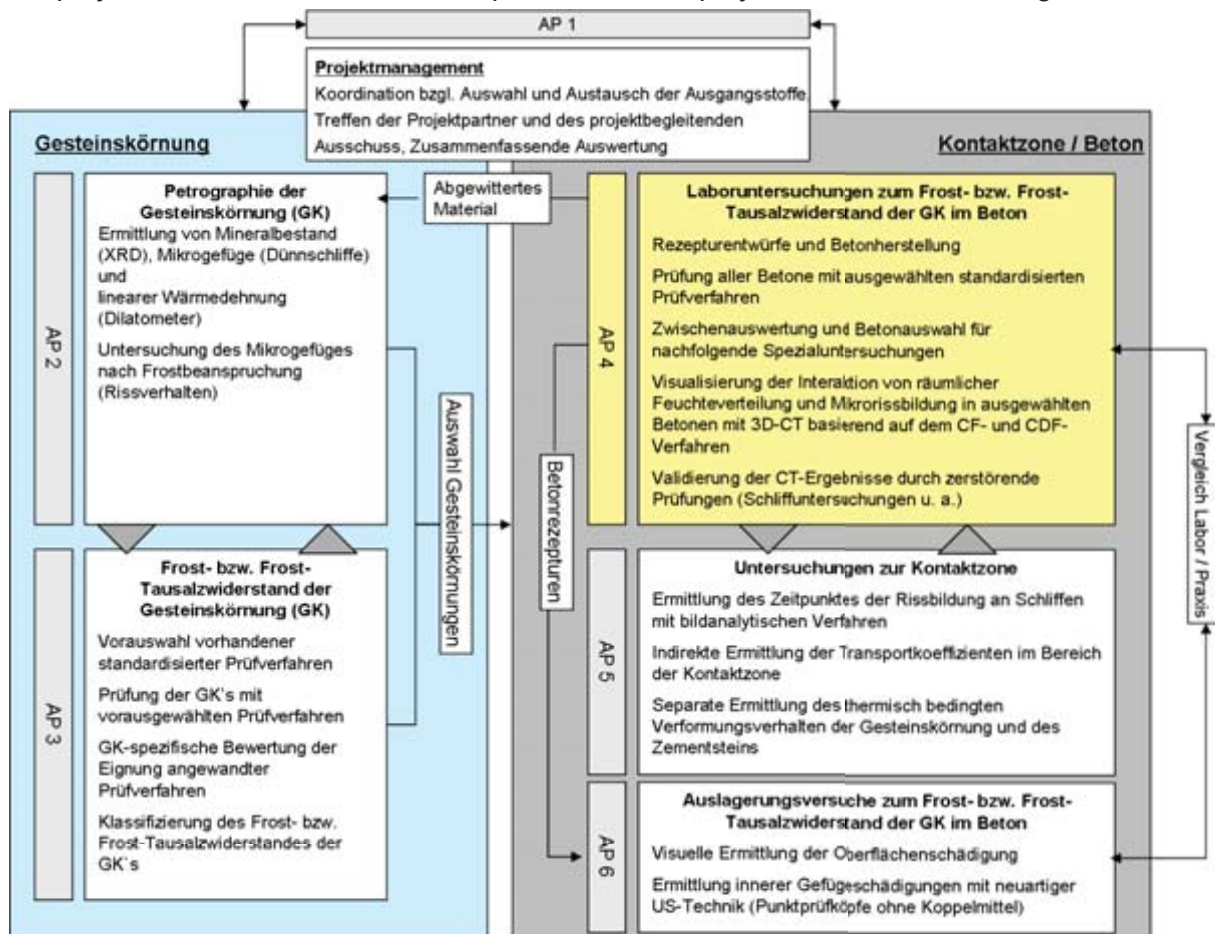


Bild 1: Struktur der Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“ – Arbeitspakete (AP), Abgrenzung und Kooperation der Einzelforschungen

Es gibt keine allgemein gültige Prüfung, mit der das Verhalten von Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung der Gesteinskörnung selbst und des damit hergestellten Betons realitätsnah und eindeutig abgebildet werden kann. Bei jeder Form der Prüfung kann bisher nicht ausgeschlossen werden, dass eine Gesteinskörnung ein anderes Verhalten aufweist als später der damit hergestellte Beton im Bauwerk. Das Zusammenspiel zwischen Gesteinskörnung und Mörtelmatrix und deren Verbund wird bei der Laborprüfung nicht oder noch nicht ausreichend berücksichtigt. Gerade das Verhalten im Beton ist jedoch maßgebend. Die Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Gesteinskörnung mit Laborprüfungen an der Gesteinskörnung und im

Beton kann je nach verwendeten Prüfverfahren und Grenzwerten zu einer unterschiedlichen Klassifizierung führen. Darüber hinaus ist die Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Frost-Laborprüfungen am Beton auf Praxis-Verhältnisse nicht geklärt.

Bisher gibt es weder umfassende Untersuchungen noch entsprechende Darstellungen, in denen Zusammenhänge zwischen petrographischen Parametern in Form von

- Mineralbestand
- Ausbildung des Mikrogefüges nach Textur oder Mikrorissbild
- Löslichkeit der einzelnen Mineralkomponenten im Prüfmedium

und der Frostbeständigkeit sowohl mit der Einzelprüfung an der ungebundenen Gesteinskörnung als auch mit der Frostprüfung im Gesamtsystem Beton beschrieben worden wären.

Im Hinblick auf die lineare Wärmedehnung ist festzustellen, dass grundlegende Untersuchungen an Gesteins- und Betonproben mehr als 50 Jahre zurückliegen und auch nur punktuell im Bereich niedriger Temperaturen gemessen wurde. Mit Untersuchungen am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar in einem Dilatometer moderner Bauart wurden eindeutige Zusammenhänge zwischen dem Mineralphasenbestand und der linearen Wärmedehnung bei Temperaturen oberhalb des Frostbereiches nachgewiesen. Es ist offen, ob das Versagen von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung neben Gefüge und Mineralbestand auch auf das Dehnungsverhalten im entsprechenden Temperaturbereich zurückgeführt werden kann.

2 Forschungsziel

Übergeordnetes Ziel der Verbundforschung war es, eine Systematik zur Klassifizierung von Gesteinskörnungen im Hinblick auf den Frost- und Frosttausalz widerstand mit ihnen hergestellter Betone abzuleiten. Dabei ist die Frage der Prüfung der Betoneigenschaften und die Anbindung der Laborprüfungen an die Verhältnisse unter praxisnahen Bedingungen im Bauwerk von besonderer Bedeutung.

Die petrographische Charakterisierung der zu untersuchenden Gesteinskörnungen erfolgte mit der Zielstellung, eine Prognose zum Rissverhalten im Fall des Frostangriffs zu ermöglichen. Zu den Untersuchungsschwerpunkten gehörten hierbei das Mikrogefüge (Dünnschliffe), die lineare Wärmedehnung (Dilatometer) und der Mineralphasenbestand (XRD). Des Weiteren erfolgten Untersuchungen zum Verhalten der losen sowie in der Betonmatrix eingebetteten Körnung vor bzw. nach einem Frostangriff. Hierzu wurde gezielt nach Gefügemerkmalen gesucht, die zur Klärung der Ursachen und des Ablaufs von Abwitterungsvorgängen während der Frostprüfung beitragen. Zur Kontrolle der Rissprognose wurde die Auswirkung der Schädigung des Einzelkorns auf den Verbund Korn/Matrix bzw. auf die Rissfortsetzung in der Matrix untersucht. Die Ergebnisse des Teils „Petrographie“ aus Arbeitspaket 2 dienen der Auswahl der ursprünglich 22 verschiedenen untersuchten Gesteinskörnungen auf 6 Körnungen für die weiterführenden Untersuchungen an Laborbetonen und an ausgelagerten Betonen.

Mit Auslagerungsversuchen wurde und wird weiterhin versucht, die im Labor gewonnenen Ergebnisse der normativen Frost- bzw. Frost-Tausalzprüfungen an den ungebundenen Gesteinskörnungen und an den daraus hergestellten Betonen in der Praxis zu verifizieren. Als Expositionsklassen wurden hierfür XF3 und XF4 gewählt. Realisiert wurde die XF3-Exposition durch Lagerung der Prüfkörper in der Wasserwechselzone des Sparbeckens der Schleuse Hilpoltstein. Die Auslagerung der Prüfkörper in der Expositionsklasse XF4 erfolgte auf dem Mittelstreifen der Bundesstraße B2 in unmittelbarer Nähe des Tunnels Farchant.

3 Ergebnisse

Aus dem Schlussbericht zu Arbeitspaket 3 /1/ ist bekannt, dass die dort untersuchten Prüfverfahren für die ungebundene Gesteinskörnung nicht miteinander korrelieren und keine Rückschlüsse auf das Verhalten von Gesteinskörnung im daraus hergestellten Beton zulassen. Aus den Ergebnissen der Arbeitspaketes 4 lassen sich bedingte Zusammenhänge zwischen einzelnen Prüfverfahren an der ungebundenen Gesteinskörnung und Laborprüfverfahren am Beton ableiten. Die Auslagerung der Betone erfolgte bisher über einen Zeitraum von 10 Jahren. Die teilweise in den Laborversuchen aus Arbeitspaket 4 erkennbaren Zusammenhänge zum Einfluss der Gesteinskörnung auf das Frost- und Frosttausalzverhalten der daraus hergestellten Betone sind an den ausgelagerten Betonen in dem bisher betrachteten Auslagerungszeitraum von 10 Jahren nicht erkennbar. Die in Arbeitspaket 2 durchgeführten Prüfungen korrelieren nicht eindeutig mit den Ergebnissen aus Arbeitspaket 4.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Laborprüfungen an der ungebundenen Gesteinskörnung und dem tatsächlichen Verhalten im Beton in der Praxis sind keine Zusammenhänge erkennbar.

Hinsichtlich der Laborprüfungen zum Frost- und Frosttausalz widerstand am Beton stellt sich die Frage, ob die Laborprüfungen die Bedingungen der Auslagerung widerspiegeln. Da diese Frage derzeit nicht zu beantworten ist, erfolgte anders als im ursprünglichen Projektantrag keine abschließende zerstörende Prüfung der ausgelagerten Proben. Damit soll die Möglichkeit einer weiter andauernden Auslagerung bestehen bleiben.

Die Einzelergebnisse aus den Arbeitspaketen 2 „Petrographie“ und 6 „Auslagerung“ dieses Projektes lassen sich mit den folgenden 10 Aussagen in Tabelle 1 zusammenfassen.

Tabelle 1: Kernaussagen zu den Ergebnissen des Forschungsvorhabens

Nr.	Ergebnis	Bericht Teil
1	Ein Zusammenhang zwischen dem normativ vorgegebenen „Dosenfrost-Prüfverfahren“ an der ungebundenen Gesteinskörnung und den Gefügeuntersuchungen liegt nicht vor.	I, 7, S. 82
2	Die Bestimmung der linearen Wärmedehnung der Gesteinskörnung eignet sich nicht, um Rückschlüsse auf die innere Gefügeschädigung des Betons zu ziehen.	I, 6.5, S. 77
3	Die Auswahl der Gesteinskörnungen für die Betonversuche erfolgte nach Kriterien, die einen möglichst breiten Wertebereich der Ergebnisse der Frostprüfungen am Beton erwarten ließen.	I, 6.2, Tab. 16 und 17, S. 59 - 60
4	Durch Verknüpfung der Methoden lineare Wärmedehnung, Mineralphasenbestand, Bewertung des Mikrogefüges an Dünnschliffen und Erfassung der inneren Schädigung durch Bildanalyse erscheint eine verbesserte Prognose des Frost- und Frosttausalzwiderstandes einer Gesteinskörnung im Hinblick auf deren Verhalten in Laborprüfverfahren an mit daraus hergestelltem Beton möglich.	I, 7, S. 83
5	Die Auslagerung XF4 zeigt weniger schadenswirksame Frost-Tauwechsel als erwartet. Schadenswirksam sind Frost-Tauwechsel mit Niederschlag und Temperaturen < -5 Grad Celsius. 9 bis 14 schadensrelevante Frost-Tauwechsel pro Winter sind aufgetreten.	II, 3.2.3, S. 9, Tabelle 5
6	Die Ergebnisse zeigen im bisher betrachteten Auslagerungszeitraum von 10 Jahren keine Korrelation zwischen Betonprüfverfahren im Labor und dem Verhalten in der Auslagerung.	II, 3.2.3, S. 9

7	Die angewendeten Laborprüfverfahren am Beton sind zu hinterfragen	II, 3.2.3, S. 9
8	Die Proben aus der Auslagerung XF3 zeigen nach 10 Jahren Auslagerung keine Veränderung. Innere Gefügeschädigungen (Ultraschalllaufzeit) und signifikante äußere Gefügeschädigungen (Abwitterung) sind nicht feststellbar.	III, 5.1, S. 18
9	Die Proben aus der Auslagerung XF4 zeigen nach 10 Jahren Auslagerung mit Ausnahme der Abwitterung von Zementstein an einer Probe keine signifikante Veränderung hinsichtlich der äußeren Gefügeschädigung. Innere Gefügeschädigungen sind im betrachteten Auslagerungszeitraum von 10 Jahren ebenfalls nicht aufgetreten.	III, 5.2, S. 44
10	Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Laborprüfungen auf die Praxis stellt sich die Frage, ob der bisher betrachtete Auslagerungszeitraum die Frostbeanspruchung der Laborprüfung hinreichend widerspiegelt.	III, 5.1, S. 18

4 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Ein wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Frost- bzw. Frosttausalzprüfungen im Labor auf die Verhältnisse am Bauwerk. Die zu diesem Zweck durchgeführten Auslagerungsversuche an einem Schleusenbauwerk sowie an einer Bundesstraße begannen nach Abschluss erster Laboruntersuchungen im Jahr 2008. Nach einem Auslagerungszeitraum von 10 Jahren zeigen sich weder bei den an der Schleuse noch bei den an der Bundesstraße ausgelagerten Betonprobekörpern signifikante innere und äußere Gefügeschädigungen.

Die bisherigen Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass auch nach weiteren Winterperioden die frostinduzierten inneren und äußeren Gefügeschädigungen nicht signifikant zunehmen. Aus diesem Grund erscheint eine Verlängerung des Auslagerungszeitraums erforderlich. Das Zeitintervall zur Entnahme der Proben könnte dabei auf z. B. fünf Jahre vergrößert werden. Sollte auch bei weiterer Auslagerung keine Schädigung der Proben eintreten, wäre das derzeitige Prüfkonzept aus Frostprüfungen an der ungebundenen Gesteinskörnung sowie dem daraus hergestellten Beton zu überdenken. Die Prüfverfahren würden dann nicht die realen Bedingungen abbilden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde für die Betonversuche sowohl im Labor als auch für die Auslagerung auch „grenzwertige“ Gesteinskörnung verwendet. Das heißt Gesteinskörnung, die nachzeitigem Prüfschema für die Verwendung in Beton für die Expositionsclassen XF3 und XF4 keine Verwendung gefunden hätte. Für eine Körnung (N19) wurde dabei auch der normativ vorgeschriebene Wasserzementwert von 0,50 auf 0,45 gesenkt. Beide Betone zeigten in den Auslagerungsversuchen keine Auffälligkeiten. Dies deutet darauf hin, dass zukünftig auch nach heutigem Stand „grenzwertige“ Gesteinskörnung in der Praxis Anwendung finden könnte. Gegebenenfalls ist ein Sicherheitsabschlag einzuführen, z. B. über die Absenkung des Wasserzementwertes von 0,50 auf 0,45. Diese würde zu einer effizienten Verwendung knapper Ressourcen beitragen. Somit erscheint auch vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung die weitere Auslagerung der Betonproben sinnvoll.

5 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

Die Wertschöpfungskette Bau ist für die gesamte Volkswirtschaft von zentraler Bedeutung. 2017 beliefen sich die in Deutschland getätigten Bauinvestitionen auf über 320 Mrd. Euro. Davon entfielen rund 61 Prozent auf den Wohnungsbau, 27 Prozent auf den Wirtschaftsbau

und 12 Prozent auf den öffentlichen Bau¹. Die Sicherung der Rohstoffe für die Baustoffherstellung ist von hoher Bedeutung, um den Bedarf zu decken. Jedoch muss dabei die Ressourcenschonung eines der wesentlichen ökologischen Ziele auf dem Weg zu einer nachhaltigen volkswirtschaftlichen Entwicklung sein. Dabei kommt der effizienten Ausnutzung natürlicher Rohstoffressourcen zur Herstellung leistungsfähiger Baustoffe und Bauprodukte eine nachhaltige Bedeutung zu.

Durch die zentrale Stellung der Nachhaltigkeit in der Entwicklung der Gesellschaft sind auch die dauerhaftkeitsrelevanten Aspekte bei der Herstellung von Betonbauwerken weiter gewachsen. Hierbei ist vor allem der Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen, wie zum Beispiel der Frost- bzw. Frosttausalz-widerstand von Beton zu nennen. Dies setzt eine im Hinblick auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmte, realitätsnahe Beurteilung der Eignung der Bau- aber auch der Ausgangsstoffe voraus.

Derzeit gibt es keine allgemein gültige Prüfung, mit der sich das Verhalten von Gesteinskörnung im Beton bei Frost- bzw. Frosttausalzbeanspruchung realitätsnah und eindeutig abbilden lässt. Es ist nicht ausgeschlossen, dass eine Gesteinskörnung ein anderes Verhalten aufweist als später im Beton im Bauwerk. Gerade das Verhalten im Beton ist jedoch maßgebend.

Durch die Umsetzung der Ergebnisse und die Nutzung von bisher als „grenzwertig“ eingestufte Ausgangsstoffe lässt sich die Betriebsdauer von Lagerstätten steigern. Dies ist ein wichtiger Beitrag zur Ressourceneffizienz und damit zur Wirtschaftlichkeit der gesamten Betonbauweise. Durch die spätere Einbringung der Ergebnisse in das Regelwerk profitieren vor allem kleine und mittlere Unternehmen. Für diese Unternehmen ist es nur eingeschränkt möglich, über individuelle Leistungsnachweise und über so genannte Performance-Tests die Nutzung alternativer oder „grenzwertiger“ Rohstoffe zu ermöglichen.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die im Bewilligungszeitraum durchgeführten Arbeiten entsprechen mit Ausnahme der Beurteilung des Gefügezustandes (AP 2, FSt 2) sowie der Bestimmung der Biegezugfestigkeit (AP 6, FSt 4) der ausgelagerten Betonproben nach Ende der Auslagerung dem im Projektantrag skizzierten Lösungsweg. Der damit verbundene Einsatz von wissenschaftlichem Personal war zur Durchführung der für den Berichtszeitraum bewilligten Arbeitspakete notwendig und angemessen. Die Finanzierungsmittel für Personalausgaben wurden in der abgerufenen Höhe verbraucht. Die in Abschnitt 7 dargestellte Übersicht über die eingesetzten Personenmonate der Forschungsstellen korreliert mit dem erreichten Arbeitsstand.

Die im Berichtszeitraum absolvierten Arbeiten weisen gegenüber der bewilligten Projektablaufplanung Abweichungen auf. Das Projekt wurde insgesamt drei Mal verlängert. Dies betrifft Verlängerungen von 2010 auf 2011, 2011 auf 2014 und 2014 auf 2018. Ein Verzug an Arbeiten liegt nicht vor. Die Verlängerung 2010/2011 war erforderlich, um die letzte beantragte Auslagerungsperiode realisieren zu können. Die Zeit von Projektbeginn 01.06.2007 bis zur Winterperiode 2007/2008 reichte nicht aus, um die erste Auslagerung vorbereiten zu können. Mit der Auslagerung wurde daher im Winter 2008/2009 begonnen. Die Projektverlängerungen 2011/2014 sowie 2014/2018 waren aus folgenden Gründen erforderlich. Aufgrund der vernachlässigbaren inneren und äußeren Gefügeveränderungen an den Auslagerungsproben in den Wintermonaten 2008/2009 und 2009/2010 wurde das Forschungsvorhaben kostenneutral bis 31.12.2014 verlängert. In diesem Zeitraum erfolgten zwei weitere Begutachtungen an den ausgelagerten Proben. Während im Jahr 2012 bei der Bemusterung der ausgelagerten Proben mit Ultraschall und Photogrammetrie noch keine signifikanten inneren und äußeren Gefügeschäden feststellbar waren, ließen die Messungen 2014 durchaus bei verschiedenen Betonen auf eine beginnende Frost- bzw.

¹ Bundesverband Baustoffe Steine und Erden. www.baustoffindustrie.de 23. April 2019

Frosttausalzschädigung schließen. Allerdings ermöglichte das relativ moderate Ausmaß der damaligen Schädigung noch keine fundierte Bewertung des Frost- bzw. Frost-Tausalz widerstandes der Betone. Daher erfolgte eine Verlängerung der Probenauslagerung um weitere vier Jahre bis 2018.

Nach Auslagerung bis 2018 zeigt sich folgendes Bild. Nach einem Auslagerungszeitraum von 10 Jahren zeigen sich weder bei den an der Schleuse noch bei den an der Bundesstraße ausgelagerten Betonprobekörpern signifikante innere und äußere Gefügeschädigungen. Die bisherigen Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass auch nach weiteren Winterperioden die frostinduzierten inneren und äußeren Gefügeschädigungen nicht signifikant zunehmen. Aus diesem Grund erscheint eine Verlängerung des Auslagerungszeitraums erforderlich. Das Zeitintervall zur Entnahme der Proben könnte dabei auf z. B. fünf Jahre vergrößert werden. Sollte auch bei weiterer Auslagerung keine Schädigung der Proben eintreten, wäre das derzeitige Prüfkonzept aus Frostprüfungen an der ungebundenen Gesteinskörnung sowie dem daraus hergestellten Beton zu überdenken. Die Prüfverfahren würden dann nicht die realen Bedingungen abbilden. Die Projektbeteiligten sind daher der Auffassung, dass es gerechtfertigt ist, vom ursprünglichen Projektplan der abschließenden zerstörenden Prüfung der Betonproben (Gefügestand und Biegezugfestigkeit) abzuweichen und die Proben auch nach Projektabschluss zum 31.12.2018 weiter in eigener Organisation und unabhängig von der beantragten Projektfinanzierung weiter auszulagern.

7 Verwendung der Zuwendung

Von den beteiligten Forschungsstellen wurden insgesamt 40,73 Personenmonate abgerechnet. Diese teilen entsprechend der nachfolgenden Tabelle 2 auf.

Tabelle 2: Übersicht zur Verwendung der Zuwendung

Forschungsstelle	Personenmonate	
	abgerechnet	bewilligt
2	26	23
3	8,39	7,8
4	4,19	3,9
5	2,15	2,5

Die im Bewilligungszeitraum durchgeführten Arbeiten weichen wie in Abschnitt 6 dargestellt vom Projektantrag ab.

Gerätebeschaffungen erfolgten nicht.

8 Umsetzbarkeit und Transfer der Forschungsergebnisse

8.1 Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erforderte eine Zusammenarbeit zwischen der Forschungsvereinigung, den Forschungsstellen sowie den beteiligten Industriepartnern, insbesondere den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Die Kooperation mit den Industriepartnern ermöglichte einen direkten Transfer der Zwischenergebnisse und der bisherigen Ergebnisse in die Wirtschaft. Für den Ergebnistransfer sind die in Tabelle 3

aufgeführten Maßnahmen zu nennen. Diese schaffen die Voraussetzungen für eine unternehmensübergreifende branchenweite Nutzung der Ergebnisse.

Tabelle 3: Transfermaßnahmen während und nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Umsetzung	Zeitraum
Information, Austausch der Praxispartner, Diskussion der Forschungsergebnisse	Treffen des projektbegleitenden Ausschusses bei den Forschungsstellen und bei der Forschungsvereinigung	07/2007, 01/2008, 05/2008, 03/2009, 04/2010, 11/2010, 10/2014
Bewertung der Ergebnisse und Erarbeitung von Alternativen zum weiteren Vorgehen. Finanzierung der weiteren Auslagerung	Beratung und Bewertung im Forschungsbeirat der Forschungsvereinigung	07/2007, 02/2008, 07/2008, 02/2008, 08/2008, 02/2009, 07/2009, 02/2010, 07/2020, 02/2011, 08/2011, 02/2012, 07/2012, 02/2013, 07/2013, 02/2014, 08/2014, 02/2015, 07/2015, 02/2016, 07/2016, 02/2017, 07/2017, 07/2018, 01/2019
Bewertung der Ergebnisse und deren Transfer in die betriebliche Praxis der Betonherstellung	Beratung und Bewertung im Arbeitsausschuss „Betontechnologie und Umwelt“ des Bundesverbandes Transportbeton (BTB)	03/2018, 10/2018
Schaffung von Voraussetzungen für die Verbesserung der Rohstoffeffizienz bei der Betonherstellung	Workshop „Rohstoffversorgung für die Betonherstellung“ des Bundesverbandes Transportbeton (BTB)	02/2018
Vorträge	Bohlmann, E.: „Frostwiderstand von Gesteinskörnung in Beton – Ergebnisse eines AiF-Projektes“ Aßbrock, O.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Gesteinskörnung und Beton	Fachtagung Praxis Transportbeton 09/2012 des Bundesverbandes Transportbeton (BTB) Transportbeton im Dialog – Forschungsforum 09/2019 des Bundesverbandes Transportbeton (BTB)
Auswertung der gesamten Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“ (Leitplan zu AiF Nummern 15212 N, 15213 N und 15214 BG).	Fachveröffentlichung	2019/2010

Eine Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre konnte bisher nicht erfolgen, da sich ein gesicherter Zusammenhang zwischen Laborprüfergebnissen und dem Verhalten der

Betonproben in der Praxis nicht ergeben hat. Die derzeitigen deskriptiven Anforderungen im technischen Regelwerk, die auf Erfahrungswerten beruhen, sind weiterhin gültig und liegen „auf der sicheren Seite“, da bisher keine Gefügeschädigungen aufgetreten sind.

8.2 Umsetzung in die betriebliche Praxis und in die Normung

Das Potenzial des Ergebnistransfers wird von den Betonherstellern als gut bezeichnet. Auf Basis dieser Einschätzung erfolgte auch die Entscheidung, den Zeitraum der Auslagerung weiter zu verlängern. Die Finanzierung erfolgt industrieseitig. Sollte sich das Verhalten der Betonproben auch weiterhin so gestalten, dass keine Gefügeschädigungen zu beobachten sind, wird erhebliches Potenzial für eine effizientere Nutzung von Rohstoffen gesehen. Die Voraussetzungen dafür sind über die Einführung von Performance-Konzepten in die Normung zu schaffen. Alle Beteiligten sind in die Baustoffnormung und die Normung der Bauausführung eingebunden. Die Ergebnisse werden von den zuständigen Fachkreisen erwartet. Die Bereitschaft zur Einbindung der Ergebnisse in das zukünftige Regelwerk besteht.

Das Einbringen der Ergebnisse in die Überarbeitung der nationalen und europäischen Normen für Gesteinskörnung konnte bisher nicht erfolgen, da der erhoffte abgesicherte Zusammenhang zwischen den Laborprüfverfahren und dem Verhalten in der Praxis noch nicht vorliegt.

Für die nachhaltige Nutzung ist darüber hinaus das Einbringen der Ergebnisse in die Entwicklung von so genannten Performance-Konzepten entscheidend. Dies erfolgt derzeit mit der Überarbeitung der so genannten Eurocodes für die Bemessung von Betonbauwerken. Darin ist die Einführung von Widerstandsklassen für die Lebensdauerbemessung vorgesehen. Diese beziehen sich auch auf den Frost- und Frosttausalz-widerstand von Beton. Gerade die Erfahrungen aus den Auslagerungsversuchen sind für diese Arbeit sehr wertvoll.

9 Literatur

- [1] Wörner, Th.; Westiner, E.; Neidinger, S.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen (52-F-0002). - Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15212 N/1, München Nov. 2010

AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

Teil I

Arbeitspaket 2: Petrographie der Gesteinskörnung

Bauhaus-Universität Weimar F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde

Professur Werkstoffe des Bauens

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Bauhaus-Universität Weimar
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Professur Werkstoffe des Bauens
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG / 1

Thema: Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“
AP 2: Petrographie der Gesteinskörnung (GK)

Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)
Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

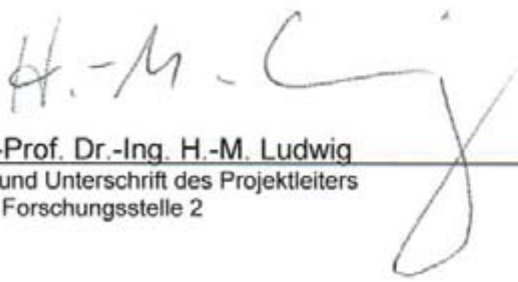
Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Aktenzeichen: Antrags-Nr. BG11532/05

Projektleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig

Sachbearbeiterin: Dipl.-Ing. D. Erfurt

31.12.2018, Weimar
Ort, Datum


Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig
Name und Unterschrift des Projektleiters
an der Forschungsstelle 2

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	2
2	Forschungsthema	3
3	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	3
3.1	Allgemeines.....	3
3.2	Petrographie der Gesteinskörnung	4
4	Forschungsziel	5
5	Durchführung	6
5.1	Phase I (Screening-Phase)	6
	Bestimmung der petrografischen Zusammensetzung der Kiese	6
	Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung	7
	Bestimmung der linearen Wärmedehnung.....	8
5.2	Phase II	9
5.3	Hauptuntersuchungsphase (Laborbeton).....	10
	Quantitative Rissanalyse an Laborbetonen nach CIF-Test.....	11
5.4	Auslagerungsversuche.....	12
6	Ergebnisse	13
6.1	Phase I (Screening-Phase)	13
	Bestimmung der petrografischen Zusammensetzung der Kiese	13
	Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung	22
	Bestimmung der linearen Wärmedehnung der Festgesteine.....	24
	Bestimmung der linearen Wärmedehnung der Kiese	28
6.2	Phase II (Untersuchungen an 6 Festgesteinen und 6 Kiesen).....	40
	Petrografische Beschreibung der Ausgangsgesteine am Dünnschliff	40
	Auswahl der Gesteinskörnung für die Betonversuche	58
6.3	Hauptuntersuchungsphase (Laborbetone mit 3 Festgesteinen und 3 Kiesen)	60
	Petrografische Beschreibung der Laborbetone nach CIF und CDF-Test	60
	Vergleichende petrografische Analyse der Gesteinskörnung nach der Frost-Tausalz-Untersuchung (Dosenfrost) am Einzelkorn und dem Einsatz im Betongemisch.....	70
	Quantitative Rissanalyse an Laborbetonen nach CIF-Test.....	73
6.4	Auslagerungsversuche.....	77
6.5	Korrelation zwischen den angewendeten Messverfahren	77
7	Zusammenfassung.....	80
8	Literatur	83

2 Forschungsthema

„Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung“

(Kurtitel: „Verbundforschung Frost: Projektmanagement - Petrographie - Auslagerung“)

3 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

3.1 Allgemeines

Bisher gibt es keine umfassenden Veröffentlichungen, in denen Zusammenhänge zwischen petrographischen Parametern und der Frostbeständigkeit sowohl mit der Einzelprüfung von Gesteinskörnungen als auch im Gesamtsystem Beton beschrieben worden sind. Darüber hinaus sind umfassende Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Laborergebnissen aus Betonversuchen auf die Praxisverhältnisse, bisher nicht bekannt.

Der vorliegende Forschungsbericht ist Teil der Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“, der von 5 Forschungsstellen in mehreren Teilprojekten (Nr. 15212 N/1, Nr. 15213 N und Nr. 15214 BG/1) bearbeitet wurde. Der Bericht enthält die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2 (AP 2) der Verbundforschung, s. Abb. 1. An der Bearbeitung des Forschungsprojektes waren die in Tab. 1 aufgeführten Forschungsstellen (FSt) beteiligt.

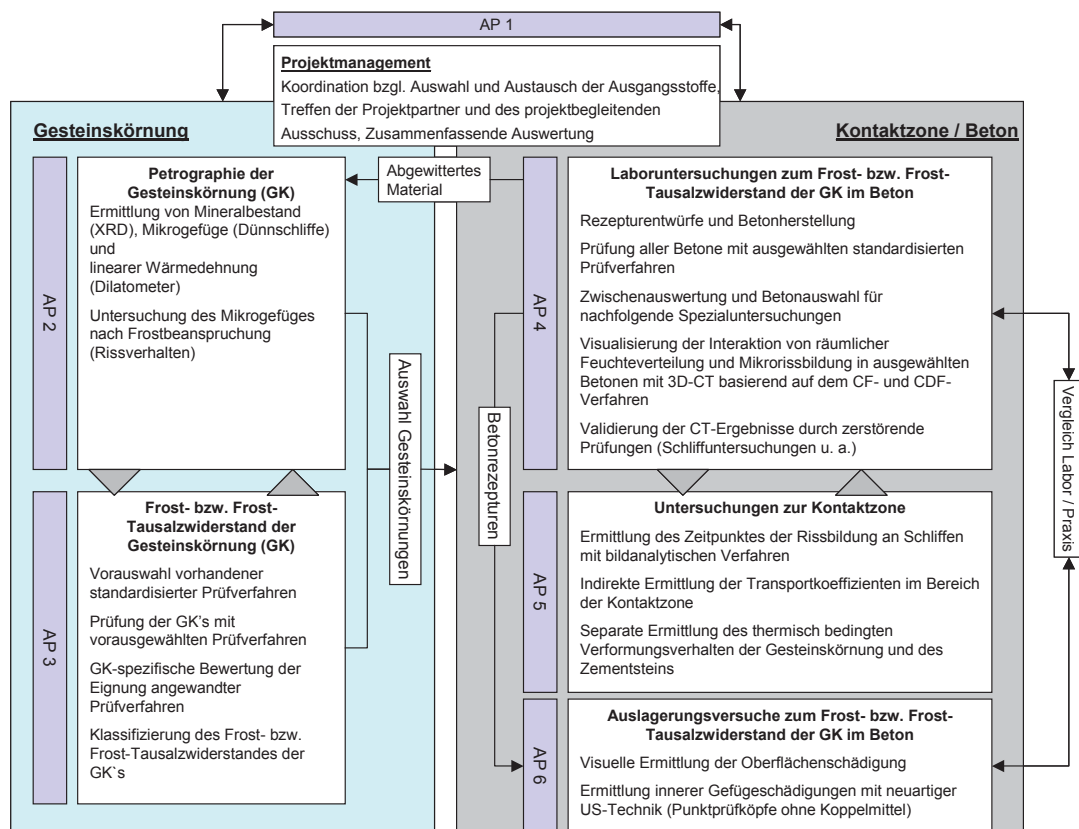


Abb. 1: Struktur der Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“ – Arbeitspakete (AP), Abgrenzung und Kooperation der Einzelforschungen

Tab. 1: beteiligte Forschungsstellen (FSt) an der Verbundforschung und deren Verteilung in den einzelnen AP

AP 1 Projektmanagement				
Forschungsgemeinschaft Transportbeton (FTB)				
AP 2	AP 3	AP 4	AP 5	AP 6
FSt 2	FSt 3	FSt 1	FSt 5	FSt 2
F. A. Finger- Institut für Baustoffkunde der Universität Weimar (FIB)	Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München (cbm)	Forschungsinstitut der Zement- industrie (FIZ)	Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac)	FIB
		FSt 4		FSt 3 cbm
		Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)		FSt 4 BAM
				FSt 5 ibac

3.2 Petrographie der Gesteinskörnung

Zu Beginn des Forschungsprojekts war bekannt, dass mit unterschiedlichen Frostprüfverfahren in Abhängigkeit vom Einsatz der Prüflösung ($MgSO_4$ oder $NaCl$) und vom Verfahren selbst (Kristallisationsversuch oder Frostprüfung) bei petrographisch gleichen oder ähnlichen Gesteinskörnungen unterschiedliche Ergebnisse möglich sind. Es war weiterhin bekannt, dass bei den unterschiedlichen Gesteinskörnungen, die separat geprüft wurden, oft keine Korrelationen zwischen den Abwitterungen der Frostprüfungen (z. B. DIN EN 1367-1, DIN EN 1367-2 und -6) sowie vor allem auch zu anderen Prüfparametern wie Dichte, Wasseraufnahme, Sättigungswert bestanden. Konsens darüber hinaus war auch, dass keine dieser Methoden alleine geeignet war, eine Gesteinskörnung umfassend zu beurteilen [4, 5]. Letztlich war es auch möglich, dass Gesteinskörnungen, die separat geprüft wurden und im Frostversuch versagt haben, in der Frostprüfung des daraus hergestellten Betons bestehen. Die Ergebnisse aus dem Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15212 N/1 [9] bestätigen, dass zwischen den angewandten Magnesiumsulfatverfahren (MS-Verfahren, dem Kristallisationsversuch (NS-Verfahren) und den Dosenfrostversuchen (FTW-Versuch, FTS-Versuch) keine oder bestenfalls mäßige Zusammenhänge vorliegen. Auch bei den Dosenfrostversuchen untereinander variieren die Ergebnisse bei gleicher Gesteinskörnung und weisen damit auf die unterschiedliche Art und Weise der Beanspruchung hin. Die Hilfsgrößen Wasseraufnahme, Festigkeitsentwicklung (SZ-Wert-Änderung) und der Mehlkorngelbheit beeinflussen das Frost- und Frost-Tausalz-Verhalten einer Gesteinskörnung erheblich, eignen sich jedoch nicht als Kriterien, um Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Frostwiderstandsfähigkeit sicher beurteilen zu können.

Eine Übertragung der Ergebnisse vom Kristallisationsversuch oder dem Frostversuch der Gesteinskörnung–Einzelprüfung auf das Verhalten als Betonbestandteil ist in vielen Fällen nicht möglich. In beiden Einzelprüfverfahren wird der Masseverlust der Körnungen als Kriterium herangezogen. Wenn die Abwitterungsformen „Abblättern“ und „Bildung von Bruchstücken“ auftreten, kann damit gerechnet werden, dass sich auch im Beton Risse um die Gesteinskörnung bilden oder Risse von der Gesteinskörnung ausgehen, die sich in der Betonmatrix fortsetzen und damit den Beton zerstören oder mindestens die Gefügefestigkeit beeinträchtigen können. Dagegen kann ein während des Kristallisations- oder Frostversuchs

auftretendes „Absanden“ später im Beton infolge der Fixierung der Gesteinskörnungs-oberfläche durch die Zementsteinmatrix nahezu ausgeschlossen werden. In [9] ergab der Vergleich zwischen der Abwitterung am Einzelkorn während der Dosenfrostprüfung und der Festigkeitsänderung, nach DIN EN 1097-2, keine Korrelation, was darauf zurückgeführt wurde, dass die Kennwerte aus verschiedenen Ursachen resultieren. Jedoch eignen sich die Kennwerte, um Gesteinskörnungen hinsichtlich ihres Frostverhaltens besser charakterisieren zu können.

Durch Frost/Tauwechsel verursachte und oberflächlich erkennbare, durch die Gesteinskörnung bedingte Schadensbilder an Betonen werden als „Pop outs“ und „D-cracking“ beschrieben (z.B. [5, 7]). Sie sind offensichtlich an bestimmte Gesteinskörnungen (poröse Sandsteine und Porphyre, Dolomite, Siltsteine, Flinte mit Kalkkrusten, Glimmerschiefer) gebunden.

Bei den anderen durch die Gesteinskörnung bedingten Schadensbilder im Beton kann im Dünnschliff erkannt werden, ob beispielsweise eine Alkali–Kieselsäure-Reaktion (AKR) vorliegt. Dann ist die Gesteinskörnung gerissen und von dem Korn ausgehend verlaufen in einer Richtung oder radialstrahlig weitere Risse in die Betonmatrix. Eine Vorschädigung durch Frost, die ebenfalls Mikrorisse im Korn erzeugen kann, ist nur dann als solche zu diagnostizieren, wenn die Bildung von AKR–Reaktionsprodukten völlig fehlt. Dagegen führen andere Vorgänge wie der reine Frostangriff oder die Bildung von sekundärem Ettringit auch zu spezifischen Schadensbildern in Form von Ringspalten um die einzelnen Gesteinskörnungen [2, 7].

Im Hinblick auf die lineare Wärmedehnung ist festzustellen, dass einerseits grundlegende Untersuchungen an Gesteins- und Betonproben mehr als 40 Jahre zurückliegen und andererseits auch nur punktuell im Bereich niedriger Temperaturen gemessen wurde [1]. Über viele Jahre war die Messung der linearen Wärmedehnung offenbar mit Problemen verbunden, so dass entsprechende Werte in Lehrbüchern entweder gar nicht [6] oder nur in geringem Umfang [5] vorhanden sind. Mit Untersuchungen am FIB [8] in einem Dilatometer wurden klar erkennbare Zusammenhänge zwischen dem Mineralphasenbestand und der linearen Wärmedehnung nachgewiesen. Auch diese Ergebnisse beziehen sich wiederum nicht auf Temperaturen im Frostbereich. Es bestand also erheblicher Nachholbedarf in der Beantwortung der Frage, ob das Versagen von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung neben Gefüge und Mineralbestand auch auf das Dehnungsverhalten im entsprechenden Temperaturbereich zurückgeführt werden kann.

4 Forschungsziel

Die petrographische Charakterisierung der zu untersuchenden Gesteinskörnungen erfolgte mit der Zielstellung, eine Prognose zum Rissverhalten im Fall des Frostangriffs zu ermöglichen. Zu den Untersuchungsschwerpunkten gehörten hierbei das Mikrogefüge (Dünnschliffe), die lineare Wärmedehnung (Dilatometer) und der Mineralphasenbestand (XRD). Des Weiteren erfolgten Untersuchungen zum Verhalten der losen sowie in der Betonmatrix eingebetteten Körnung vor bzw. nach einem Frostangriff. Hierzu wurde gezielt nach Gefügemerkmalen gesucht, die zur Klärung der Ursachen und des Ablaufs von Abwitterungsvorgängen während der Frostprüfung beitragen. Zur Kontrolle der Rissprognose wurde die Auswirkung der Schädigung des Einzelkorns auf den Verbund Korn/Matrix bzw. Rissfortsetzung in der Matrix untersucht.

Parallel bildete die petrografische Beschreibung der zu untersuchenden Gesteinskörnungen, ebenso wie AP 3, s. [9], die Grundlage für alle im Rahmen der Projektbearbeitung vorgesehenen Teilaufgaben der einzelnen AP. Der Schwerpunkt lag diesbezüglich auf der Auswahl der Gesteinskörnungen für die weiterführenden Untersuchungen an Laborbetonen, s. [10] und

an ausgelagerten Betonen für die Bewertung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis.

5 Durchführung

Das AP 2 gliedert sich in zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt handelt es sich um reine Laborversuche zur Erfassung der petrografischen Eigenschaften an Einzelkörnungen und an den mit den Einzelkörnungen hergestellten Betonen. Der zweite Abschnitt soll die petrografische Auswertung der ausgelagerten Betone beinhalten. Im Rahmen der Laboruntersuchungen stand in der Phase I (Screening-Phase) die Auswahl der Gesteinskörnungen im Mittelpunkt, die in der darauffolgenden Phase II stichhaltiger untersucht werden sollten. Im Anschluss an die Phase II wurde in der Hauptuntersuchungsphase der Zustand der ausgewählten Gesteinskörnungen nach einem Frostangriff im Beton untersucht. Zeitlich versetzt wurden die Auslagerungsversuche gestartet, an denen die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Praxis untersucht werden sollte.

5.1 Phase I (Screening-Phase)

Für die Bearbeitung der Phase I wurden 22 Gesteinskörnungen (11 Festgesteine und 11 Kiese, davon ein gebrochener Kies) von der Forschungsgemeinschaft Mineralische Rohstoffe e. V. (FG MIRO) ausgesucht. Die Auswahl erfolgte unter der Maßgabe, möglichst verschiedene Gesteine aus unterschiedlichen Regionen Deutschlands zu berücksichtigen, um eine große Bandbreite an Ergebnissen zu erhalten. Die Tab. 2 beinhaltet alle an das FIB (FSt 2), gelieferten Gesteinskörnungen mit dem entsprechenden Bezeichnungen, dem verwendeten Kürzel und der erhaltenen Korngruppe.

Bestimmung der petrografischen Zusammensetzung der Kiese

Zur Lösung der Aufgaben aus dem Forschungsantrag war im ersten Arbeitsschritt die petrografische Zusammensetzung der 11 Kiese zu klären, um die Hauptbestandteile an Gesteinskörnungen zu bestimmen, da die von der FG MIRO ausgewählten Kiese eine erwartungsgemäß heterogene Zusammensetzung aufwiesen. Festgesteine sind naturgemäß weniger problematisch, was die Homogenität betrifft. Die Kenntnis der petrographischen Zusammensetzung der Gesteinskörnungen war Grundvoraussetzung für eine repräsentative Probenentnahme. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass der Referenzkies K26 dem Kies K3 ähnlich sein sollte. Beide Kiese hatten dieselbe Provenienz, bei K26 handelte es sich lediglich um eine andere Liefercharge. Diese naheliegende Ähnlichkeit galt es zu überprüfen. Die Bestimmung der in der Lieferkörnung 16/32 mm und 16/22 mm vorhandenen Gesteinsarten fand unter Beachtung der DIN EN 932: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 2: Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben, Teil 3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung, statt.

Tab. 2: Zusammenstellung der im Rahmen der Screening-Phase untersuchten Gesteinskörnungen

Gesteinsgruppe nach TL Gestein-StB		Kürzel	Bezeichnung	Lieferkörnung		
				Korngruppe	Menge [kg]	
1	Granit, Granodiorit, Syenit	Festgestein	N17	Granit	16/22	30
2	Diorit, Gabbro		N16	Gabbro	16/22	30
3	Rhyolith, Mikrodiorit, Andesit, u.a.		N12	Quarzporphyr	16/22	30
4	Basalt, Melaphyr		N11	Basalt 1	16/22	30
			N18	Basalt 2	16/22	30
7	Diabas		N14	Diabas	16/22	30
8	Kalkstein, Dolomitstein		N13	Muschelkalk 1	16/22	30
			N15	Jurakalk	16/22	30
			N19	Muschelkalk 2	16/22	30
			N20	dev. Massenkalk	16/22	30
		N22	Muschelkalk 4n	16/22	30	
11	Kies gebrochen	Kies	K4	Rheinkies (gebr.)	16/32	30
12	Kies rund		K1	Münchener Raum	16/32	30
			K2	Elbekies	16/32	30
			K3	Rheinkies (rund)	16/32	30
			K5	Saalekies	16/32	30
			K6	Weserkies	16/32	30
			K7	Moränekies	16/32	30
			K8	Tertiärkies	16/32	30
			K9	Zorgekies	16/32	30
			K10	Mainkies	16/32	30
			K26	Referenzkies vdz	16/32	10

Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung

Der quantitative Mineralphasenbestand mittels XRD (einschließlich RIETVELD-Verfeinerung) wurde ermittelt, um im Hinblick auf die lineare Wärmedehnung der Gesteine nach Auffälligkeiten im Mineralphasenbestand zu suchen. Die qualitative Röntgenphasenanalyse wurde an Pulverpräparaten $< 40\mu\text{m}$ (Gerät Diffraktometer D 5000, SIEMENS) durchgeführt. Anschließend fand die quantitative Analyse mittels RIETVELD – Verfeinerung (Programm TOPAS/BRUKER AXS) statt. Die Mineralphasenzusammensetzung aus der Röntgenphasenanalyse lieferten durchschnittlich Werte für die 3 - 5 untersuchten Prismen im Dilatometer. Die Ergebnisse dienen der Interpretation des Dehnungsverhaltens der Prismen. Die Variation der Mineralphasenzusammensetzung wirkt sich auf die Gesteinseigenschaften und somit auf das Dehnungsverhalten aus. In vielen Gesteinen ist das Mineral Quarz für hohe α_T -Werte verantwortlich. Im Allgemeinen liefert das Mineral Quarz einen α_T -Wert von $11,0 - 12,0 [10^{-6}/\text{K}]$, während der von Calcit zwischen $4,5 - 5,0 [10^{-6}/\text{K}]$ liegt. Für das Dehnungsverhalten z.B. von Kieselkalk ist danach der prozentuale Anteil des Quarzes entscheidend.

Nach Abschluss der Untersuchungen in Phase I des Forschungsvorhabens war die Auswahl der 22 Gesteinskörnungen auf 12 (6 Naturstein, 6 Kiese) zu reduzieren. Die Eingrenzung auf 12 Gesteinskörnungen erfolgt auf der Basis der Untersuchungsergebnisse der FSt 2 und der

FSt 3. Eine weitere Reduzierung auf 3 Festgesteine und 3 Kiese war für die Phase II vorgesehen. Auf diese Weise sollten die im Anschluss stattfindenden Betonversuche auf ein überschaubares Maß beschränkt werden.

Bestimmung der linearen Wärmedehnung

Die Ermittlung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T im Dilatometer (DIL L75/76 Platinum Serie, Firma Linseis Messgeräte GmbH) wurde unter Beachtung der DIN 51045: Bestimmung der thermischen Längenänderung fester Körper, Teil 1: Grundlagen durchgeführt. Bei der Dilatometrie wird die thermische Dehnung von Festkörpern bestimmt. Der linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T ist eine stoff- bzw. gesteinspezifische Materialkonstante. Prinzipiell wird die Längenänderung je K Temperaturzuwachs in einem bestimmten Temperaturintervall, bezogen auf die Ausgangslänge bestimmt, s. Formel 1.

Formel 1: Bestimmung des lin. Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T

$$\alpha_T = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{(L_T - L_0)}{T}$$

L_0 ...Länge bei Ausgangstemperatur in mm

L_T ...länge bei $T^\circ\text{C}$ in mm

T ...Temperatur in $^\circ\text{C}$

Im Anschluss an die Ermittlung der Gesteinskörnungszusammensetzung der Kiese wurden für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T Probekörper ($7 \times 7 \times \text{max. } 20 \text{ mm}^3$) aus den Hauptbestandteilen der Kiese und den Festgesteinen hergestellt. Hier sollte gezielt der Temperaturbereich der in den anderen Arbeitspaketen durchzuführenden Frostprüfungen untersucht werden. Laut Forschungsantrag war der Temperaturbereich zwischen -20°C und 40°C von Interesse. Bestimmt wurde die lineare Wärmedehnung α_T im Bereich zwischen -40°C und 80°C .



Abb. 2: Dilatometer DIL L75/76 Platinum Serie, Firma Linseis Messgeräte GmbH

Zur Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T wurden von den Festgesteinsproben jeweils 5 Prismen präpariert. An 3 Prismen wurde die Messung durchgeführt. In Abhängigkeit der Streubreite der Ergebnisse der drei Prismen erfolgte eine Erhöhung der Probenanzahl auf 5 Prismen. Aus dem Sägeverschnitt der Prismenherstellung wurden Dünnschliffpräparate für die polarisationsmikroskopische Gefügebeschreibung innerhalb der Phasen II und Pulverpräparate für die Röntgenphasenanalyse hergestellt. Die Anzahl der Prismen für die Kiese war abhängig von der Bestimmung der hauptsächlich im Kies enthaltenen Gesteinsarten. Dies bedeutete, dass zunehmende petrographische Heterogenität der Kiese eine erhöhte Anzahl an Prismen bedingte.

Für die Messungen wurden die Probekörper in die Probenaufnahme eingelegt. Das eine Ende steht fest, am anderen Ende steht ein zwischen Kugellagern geführter Abtaststempel, der sich

mit einer einstellbaren Federkraft an die Probe anlehnt. Die Längenänderung der Probe wird über den Abtaststempel auf eine induktiven Wegaufnehmer übertragen. Die Ausdehnung der Proben kann in Abhängigkeit der Temperatur direkt am PC abgelesen werden, während der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α_T rechnerisch bestimmt wurde. Durch ein an der Probe anliegendes Thermoelement wurde die Temperatur während der Messung fortlaufend registriert. Die Messgenauigkeit beträgt nach Angaben des Herstellers max. $\pm 2\%$ bei Probekörperlängen zwischen 10 mm und 20 mm. Größere Fehler können durch ein Temperaturgefälle im Messsystem entstehen. Da Gesteine schlechte Wärmeleiter sind, stellt sich nur sehr langsam eine gleichmäßige Temperatur in der Messzelle ein. Durch eine langsame Aufheizrate von 1K/min konnte dieser Fehler minimiert werden. Daraus resultierte eine relativ lange Versuchslaufzeit pro Probe. Es konnten 2, max. 3 Probekörper pro Tag geprüft werden.

Zur Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Frostbeständigkeit der untersuchten Gesteine in einem Betongemisch sind nicht nur die α_T -Werte der geprüften Gesteinskörnungen von Belang, sondern auch die Differenz zwischen dem α_T -Wert der Gesteinskörnung und dem α_T -Wert der umgebenden Zementsteinmatrix. In Abhängigkeit des Feuchtegehaltes stellen sich für den Zementstein α_T Werte zwischen $10 \cdot 10^{-6}/K$ bis $23 \cdot 10^{-6}/K$ ein [16]. Im Betongemisch stellen sich α_T -Werte von $5 \cdot 10^{-6}/K$ und $14 \cdot 10^{-6}/K$ ein. Den größten Einfluss haben dabei Art und Menge der Gesteinskörnung. Bei Normalbetonen unter lufttrockenen Bedingungen und geringen Gehalten an Quarzit werden die höchsten Werte erzielt. Unter Verwendung von Schwerzuschlag können α_T -Werte von $20 \cdot 10^{-6}/K$ erreicht werden. Die niedrigsten Werte resultieren aus wassergesättigten Betonen mit einem hohen Gehalt an Kalksteinen. [17, 18, DIN 1045-1]

5.2 Phase II

In der Phase II wurden Untersuchungen an Dünnschliffen von Einzelkörnern an den verbliebenen 12 Gesteinskörnungen (6 Festgesteine, 6 Kiese) durchgeführt, s. Tab. 3. Die Gesteinskörnungen im Dünnschliff sollten nach ihren Textureigenschaften (Schichtung, Schieferung, Vorzugsorientierung einzelner Mineralkörner, Mikroklüfte) hin untersucht werden, da diese als potenzielle Schwachstellen bei einer Frostbeanspruchung gelten und sich im Dehnungsverhalten äußern. Darüber hinaus war der Zustand der gesteinsbildenden Minerale bezüglich der Porosität und dem Verwitterungsgrad zu untersuchen. Diese und die Textureigenschaften sind häufig Ursache für erhöhte Schwankungsbreiten der α_T -Werte.

Für die Untersuchung war die Herstellung von Gesteinsdünnschliffen erforderlich, die aus den Gesteinskörnern der gelieferten Fraktionen 16/32 mm (Kies) und 16/22 mm (gebrochener Kies, Splitt) erfolgte. Die präparierten Körnerpräparate wurden mit einem Polarisationsmikroskop (Gerät POLMI JENALAB, ZEISS) untersucht. Auf einem Dünnschliff sind 4...8 Einzelkörner aus dem Sägeverschnitt der Dilatometerproben präpariert worden. Die Gesteinsproben wurden vor dem Schleifvorgang mit gelbem Kunstharz vakuumgetränkt. Bei der Abbildung im einfach polarisierten Licht werden daher alle Hohlräume (Poren, Risse) gelb dargestellt.

Neben den zuvor beschriebenen Untersuchungen der FSt 2 im Rahmen der Screening-Phase und der Phase II wurden parallel an der TU München am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung (cbm, FSt 3) Untersuchungen zum Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten an den Gesteinskörnungen durchgeführt. Im Schlussbericht der FSt 3 (AiF-Vorhaben Nr. 15212 N/1) werden die Aufgaben und Untersuchungen der FSt 3 näher erläutert.

Tab. 3: Zusammenstellung der im Rahmen der Phase II untersuchten Gesteinskörnungen

Gesteinsgruppe nach TL Gestein-StB			Kürzel	Bezeichnung
1	Granit, Granodiorit, Syenit	Festgestein	N17	Granit
3	Rhyolith, Mikrodiorit, Andesit, u.a.		N12	Quarzporphyr
4	Basalt, Melaphyr		N11	Basalt 1
8	Kalkstein, Dolomitstein		N19	Muschelkalk 2
			N22	Muschelkalk 4n
11	Kies gebrochen	Kies	K4	Rheinkies (gebr.)
12	Kies rund		K3	Rheinkies (rund)
			K5	Saalekies
			K6	Weserkies
			K8	Tertiärkies
			K9	Zorgekies
			K26	Referenzkies vdz

Die zusammengefasste Auswertung der Ergebnisse der FSt 2 und der FSt 3 aus der Screening-Phase und der Phase II sollten Ansätze liefern, um zu klären, ob das Versagen von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung neben Gefüge und Mineralphasenzusammensetzung auch auf das Dehnungsverhalten bei entsprechenden Temperaturen im Frost-Tauwechselbereich zurückzuführen sind.

Für die sich anschließenden Betonversuche wurden Gesteinskörnungen favorisiert, die einen möglichst großen Wertebereich in den Ergebnissen der Beton-Frostprüfungen erwarten lassen. Aus den 12 verbliebenen Gesteinskörnungen (6 Festgestein, 6 Kiese) in der Phase II waren auf Basis der Ergebnisse der FSt 2 und der FSt 3 für die Betonversuche 3 Festgesteine und 3 Kiese auszuwählen.

5.3 Hauptuntersuchungsphase (Laborbeton)

Die Laboruntersuchungen zum Frost- bzw. Frost-Tausalz widerstand der Gesteinskörnung im Beton war Bestandteil des AP 4. Im Schlussbericht der FSt 1 und FSt 4 zum AiF-Vorhaben Nr. 15213 N werden die Aufgaben und Untersuchungen der FSt 1 und FSt 4 näher erläutert. Die Labor-Frostprüfungen wurden an den vom Betreuungsausschuss festgelegten Betonen durchgeführt. Die Betonherstellung fand zentral beim VDZ (FSt 1) statt. Die Betonzusammensetzungen können dem Schlussbericht (Nr. 15213 N) entnommen werden. Primär wurde darauf geachtet, die Betone mit konstanten Zementgehalt und einem konstanten w/z-Wert herzustellen, um den Einfluss der wechselnden Gesteinskörnung zu untersuchen. Diese Betonzusammensetzung läuft unter der Serie B0, die ohne Luftporenbildner für die XF3-Betone und mit Luftporenbildner für die XF4-Betone zum Einsatz kam. Zusätzlich zum Forschungsantrag wurden weitere Betone hergestellt, bei denen die Prüfung der Einflüsse der Zementart (CEMI, CEM III) sowie der Betonzusammensetzung durch Variation des Zementgehalts und des w/z-Werts im Mittelpunkt stand. Ebenso stand die Art der Prüffläche zur Diskussion. Die Frostprüfungen wurden an Sägeschnittflächen und an Prüfflächen mit PTFE-Einlagen (PTFE: Polytetrafluorethylen) vorgenommen.

Primäres Ziel des Forschungsvorhabens war jedoch das Verhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen im Beton bei wiederholter Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu untersuchen. Analog der im Forschungsantrag dargestellten Strategie wurden für die

Lichtmikroskopie an Dünnschliffen überwiegend Betone ausgewählt, s. Tab. 4, bei denen die Gesteinskörnung variierte. Die Betonversuche wurden mit 3 Festgesteinen, 3 Kiesen und einem Referenzkies durchgeführt. Bei den Festgesteinen handelt sich um den Basalt N11 und die Muschelkalk N19 und N22. Die Kiese K4, K5 und K9 verblieben ebenfalls neben dem Referenzkies K3 = K26 im Versuchsprogramm. Die Betonauswahl für die Herstellung der Dünnschliffe schlossen einen CEM I mit den Expositionen XF3 und XF4 ein. Die Prüffläche war in allen Fällen gesägt. Der Einfluss der PTFE-Prüffläche fand damit keine Berücksichtigung. Der Wechsel der Zementart wurde zusätzlich begleitend bei den Kiesen K5 und K9 ebenfalls für die Expositionen XF3 und XF4 betrachtet. Die befestigten Prüfkörper lieferte der VDZ (FSt 1) an das FIB (FSt 2) und an die BAM (FSt 4). An den frostgeprüften Betonen fanden Untersuchungen zum Zustand des Gefüges statt. Die Gefügeuntersuchungen erfolgen zunächst an ausgewählten Proben mittels Röntgen- und Synchrotron-basierter Computertomographie (CT-Untersuchung), durchgeführt von der BAM (FSt 4). Diese zerstörungsfreien Untersuchungen lieferten Erkenntnisse zum zeitlichen und räumlichen Verlauf der Rissentstehung im Beton. Im Anschluss wurden die Proben von der BAM an das FIB (FSt 2) verschickt und Dünnschliffe aus dem Probekörpern hergestellt. Die Dünnschliffe dienen für vergleichende und weiterführende bzw. ergänzende Untersuchungen und sollten die Auswirkung der Schädigung des Einzelkorns auf den Verbund Korn/Matrix bzw. Rissfortsetzung in der Matrix beschreiben. Präparierte Dünnschliffe unbefroster Referenzproben stellte das IBAC (FSt 5) zur Verfügung, das sich mit der Untersuchung der Kontaktzone (AP 5) beschäftigte.

Tab. 4: Zusammenstellung der Betone für die Präparation von Dünnschliffen

	Kürzel	Bezeichnung	Dünnschliffe von Laborbetonen Serie B0							
			CEM I unbefroster		CEM III unbefroster		CEM I befroster (S)		CEM III befroster (S)	
			XF3	XF4	XF3	XF4	XF3	XF4	XF3	XF4
Festgestein	N11	Basalt 1			--	--	VDZ	VDZ	--	--
	N19	Muschelkalk 2			--	--	BAM	VDZ	--	--
	N22	Muschelkalk 4	IBAC		--	--	IBAC	VDZ	--	--
Kies	K3	Rheinkies (rund)	IBAC				BAM/ IBAC			
	K4	Rheinkies (gebr.)			--	--	VDZ	VDZ	--	--
	K5	Saalekies	IBAC				VDZ/ IBAC	VDZ	VDZ	VDZ
	K9	Zorgekies					BAM	BAM	BAM	BAM

VDZ/ BAM/ IBAC	Dünnschliffuntersuchungen an Probenmaterial von VDZ/ BAM/ IBAC
	Dünnschliff nicht vorgesehen
--	Beton nicht hergestellt

Quantitative Rissanalyse an Laborbetonen nach CIF-Test

Während der Projektlaufzeit wurde eine neue Methode zur Bestimmung von Rissen in Betondünnschliffen mittels computergestützter Bildanalyse entwickelt. Durch diese Bildanalyse ist es möglich, die innere Schädigung von Betonen quantitativ zu bewerten [11]. Die Dünnschliffe werden an einem Mikroskop aufgenommen, welches über eine CMOS-Kamera und einen motorischen Objektisch verfügt. Durch mosaikartiges Abrastern der Dünnschliffe werden die Einzelbilder mosaikartig zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Anschließend erfolgte die Segmentierung, Klassifikation und Analyse der Risse. Zur Quantifizierung der inneren Schädigung wird sich den Größen der gesamten aufsummierten Risslängen sowie der gesamten aufgenommenen Fläche bedient, aus deren Quotienten der Parameter der Rissdichte in m/m^2 ermittelt wird. Die Rissdichte findet im Folgenden Verwendung, um den Zustand der Betonmatrix quantifiziert darzustellen und diesen mit anderen Größen, wie bspw. dem Wärmedehnungskoeffizienten oder dem dyn. E-Modul, korrelieren zu können. Weiterhin wird die mittlere Rissbreite der Risse ermittelt und deren

Maximalwert als für die Betonprobe charakteristisch angesetzt, vergleichbar zur Rissbreitenbegrenzung bei Stahlbeton [12]. Die Größen der Risslänge und mittleren Rissbreite werden aktuell noch näherungsweise ermittelt, sollen in Zukunft jedoch pixelgenau über die Skelettierung erfolgen. Zusätzlich wird die Segmentierung weiterentwickelt, um Objekte benutzerunabhängig mit Hilfe eines trainierten Klassifikators für einen Algorithmus des maschinellen Lernens bestimmen zu können [13,14].

5.4 Auslagerungsversuche

Parallel zur Herstellung der Prüfkörper für die Frostprüfungen im Labormaßstab wurden von der TU München (FSt 3) mit den Festgesteinen N11, N19, N22 und den Kiesen K3 = K26, K4, K5, K9 Betonprobekörper für Auslagerungsversuche hergestellt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Labor-Frostprüfverfahren auf die Praxis zu klären. Für die Auslagerung wurden 2 Orte, s. Tab. 5, gewählt, die als praxisnaher Vergleich für die Exposition XF3 und XF4 stehen.

Tab. 5: Auslagerungsstellen

Auslagerungsstelle 1	Expositionsklasse XF4 nach DIN 1045-2	Autobahn A 95 München – Garmisch-Partenkirchen im Bereich Tunnel Farchant: bei Garmisch-Partenkirchen
Auslagerungsstelle 2	Expositionsklasse XF3 nach DIN 1045-2	Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein

Die Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes der ausgelagerten Betone fand primär durch die BAM (FSt 4) statt, die nach festgelegten Winterperioden die ausgelagerten Balken mittels zerstörungsfreien Prüfverfahren (visuelle Begutachtung, photogrammetrische Analyse der Oberflächentextur zur Beurteilung der Abwitterung, Ultraschallmessungen E-Modul-Abfall) hinsichtlich ihrer Schädigung beurteilten. Die Definition, Beschreibung und Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfverfahren können dem Schlussbericht der FSt 4 (Nr. 15214 BG / 1) entnommen werden. Des Weiteren wird im Schlussbericht der FSt 4 die notwendige Fortsetzung der Auslagerungsversuche begründet.

Nach Abschluss der zerstörungsfreien Prüfungen ist gemäß dem Forschungsantrag vorgesehen, die Untersuchungen von Dünnschliffen anzuschließen, um den Gefügestand der ausgelagerten Betonbalken zu erfassen.

6 Ergebnisse

6.1 Phase I (Screening-Phase)

Bestimmung der petrografischen Zusammensetzung der Kiese

Der Untersuchungsablauf der Kiese stellte sich im Vergleich zu den Festgesteinen als sehr komplex heraus. Kiese sind naturgemäß heterogen. Die durchschnittliche thermische Dehnung eines Kiese setzt sich aus der thermischen Dehnung der einzelnen Bestandteile zusammen. Dementsprechend war im Vorfeld der Versuche im Dilatometer eine augenscheinliche Betrachtung zur Bestimmung der im Kies enthaltenen Gesteinsarten erforderlich. Die Bestimmung der Kieszusammensetzung erfolgte im Schnitt an 6-7 kg der gelieferten Gesteinskörnung unter Beachtung der DIN EN 932-2/ -3.

Kies 1: Münchner Kies Lieferdatum: 28.09.2007
 Liefernummer: 07119
 Lieferkörnung: 16/32

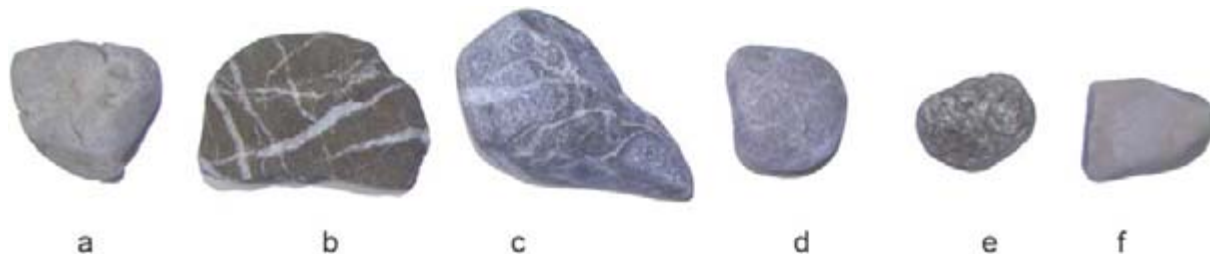


Abb. 3: Zusammensetzung Münchner Kies (a: Kalkstein, b: Kieselkalk, c: Kieselschiefer, d: Quarzit, e: Gneis, f: Dolomit)

Die Analyse der Fraktion 16/32 von Kies 1 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Kalkstein	50 %
Kieselkalk	25 %
Kieselschiefer	8 %
Quarzit	6 %
Gneis	6 %
Dolomit	4 %
Sonstige	< 1 %

Der Kies 1 besteht zu 75 % aus Kalkstein und Kieselkalk. Aus diesen zwei Hauptbestandteilen konnten je 3 Prismen für die Bestimmung der linearen Wärmedehnung gewonnen werden.

Kies 2: Elbekies Lieferdatum: 11.10.2007
 Liefernummer: 07125
 Lieferkörnung: 16/32

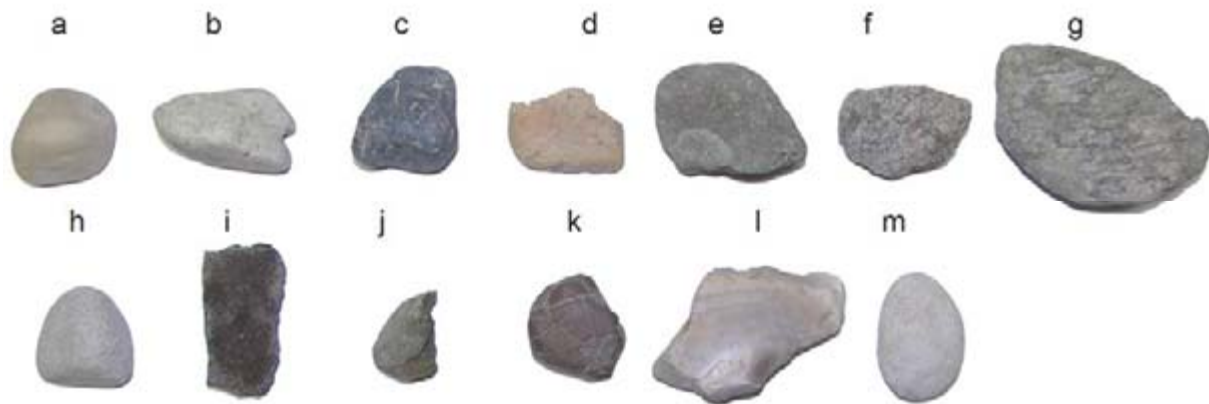


Abb. 4: Zusammensetzung Elbekies (a: Quarz, b: Quarzit, c: Kieselschiefer, d: Porphyry, e: Grauwacke, f: Granit, g: Gneis, h: Sandstein, i: Andesit, j: Tonschiefer, k: Chert (Hornstein), l: Flint, m: Calcit)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kieses 2 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Quarz	44 %	Sandstein	2 %
Quarzit	18 %	Andesit	1 %
Kieselschiefer	12 %	Tonschiefer	< 1 %
Porphyry	7 %	Chert (Hornstein)	< 1 %
Grauwacke	6 %	Flint	< 1 %
Granit	6 %	Calcit	< 1 %
Gneis	5 %		

Der Kies 2 enthält zu 74 % Quarz, Quarzit und Kieselschiefer. Von diesen drei Gesteinsarten wurden Proben zur Herstellung von Prismen für die Untersuchungen im Dilatometer zurückgestellt. Aus dem Mineralbestand, s. XRD-Ergebnisse, dieser hauptsächlich im Kies enthaltenen Gesteine ist zu erwarten, dass die Versuche im Dilatometer ähnliche α_T -Werte liefern sollten.

Kies 3: Niederrheinkies (rund)

Lieferdatum: 05.10.2007

Liefernummer: 07124

Lieferkörnung: 16/32

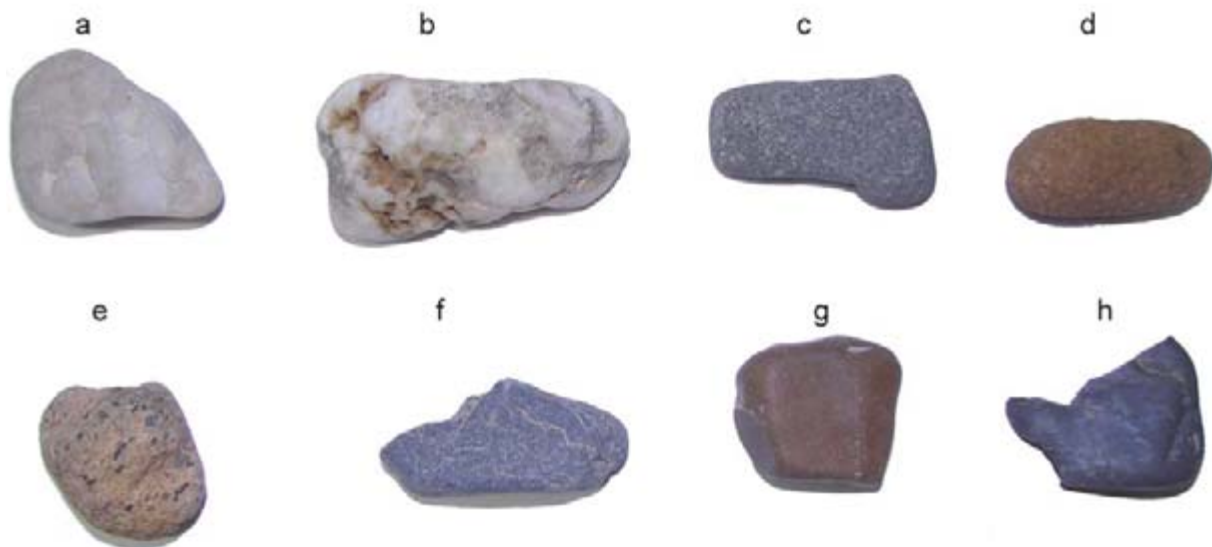


Abb. 5: Zusammensetzung Niederrheinkies (rund), (a: Quarz, b: Quarzit, c: Grauwacke, d: Sandstein, e: Porphyr, f: Kieseliefer, g: Chert (Hornstein), h: Flint)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kieses 3 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Quarz	47 %
Quarzit	23 %
Grauwacke	16 %
Sandstein	5 %
Porphyr	3 %
Kieseliefer	3 %
Chert (Hornstein)	2 %
Flint	2 %

Der Kies 3 setzt sich zu 86 % aus Quarz, Quarzit und Grauwacke zusammen. Aus diesen drei Hauptbestandteilen wurden jeweils 5 Prismen für die Versuche im Dilatometer hergestellt.

Neben der Körnung 16/32 sollte die Zusammensetzung des Referenzkieses K26 untersucht werden. Der Kies K26 stammte aus einer anderen Liefercharge, sodass nicht klar war, wie stark die Zusammensetzung evtl. abweicht. Die Herstellung der Betone für die Labor-Frostprüfung und die Auslagerungsprüfung erfolgte mit dem Referenzkies K26, jedoch unter Verwendung der Körnung 8/16. Aus diesem Grund wurde die Körnung 8/16 von Kies 3 ebenfalls bezüglich der enthaltenen Gesteinsarten quantitativ analysiert.

Die Analysen der Fraktion 8/16 der Kiese K3 und K26 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

	K3	K26
Quarz	37 %	38 %
Quarzit	44 %	43 %
Grauwacke	5 %	9 %
Sandstein	4 %	3 %
mag. Gesteine	3 %	2 %
Kieselschiefer	4 %	3 %
Chert (Hornstein)	2 %	<1 %
Flint	<1 %	2 %

Es traten keine signifikanten Unterschiede zwischen K3 und K26 auf.

Kies 4: Niederrheinkies (gebr.) Lieferdatum: 05.10.2007
 Liefernummer: 07123
 Lieferkörnung: 16/22

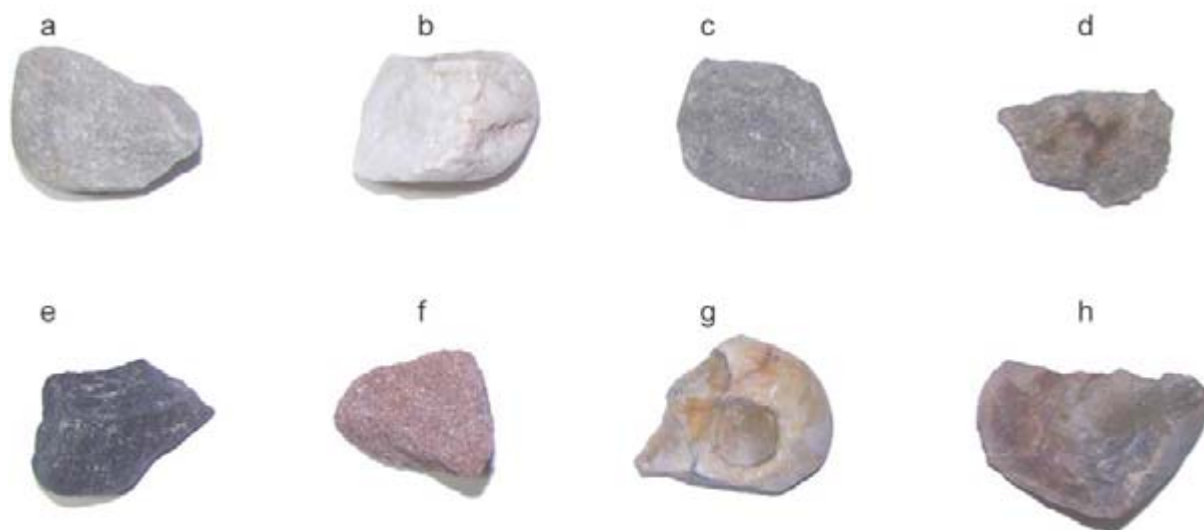


Abb. 6: Zusammensetzung Niederrheinkies (gebr.), (a: Quarzit, b: Quarz, c: Grauwacke, d: Porphyr, e: Kieselschiefer, f: Sandstein, g: Flint, h: Chert (Hornstein))

Die Analyse der Fraktion 16/22 des Kieses 4 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Quarzit	33 %
Quarz	26 %
Grauwacke	19 %
Porphyr	8 %
Kieselschiefer	7 %
Sandstein	4 %
Flint	1 %
Chert (Hornstein)	1 %

Die Kiese 3 und 4 stammen aus dem gleichen Lieferwerk. Im Wesentlichen ergab die Analyse des gebrochenen Kieses ähnliche prozentuale Zusammensetzung. Der Kies 4 besteht zu

59 % aus Quarzit und Quarz, sowie aus 19% Grauwacke. Dem gegenüber stehen 69 % Quarz und Quarzit, sowie 16 % Grauwacke aus dem ungebrochenen Kies 3.

Kies 5: Saalekies Lieferdatum: 22.08.2007
 Liefernummer: 07104
 Lieferkörnung: 16/32

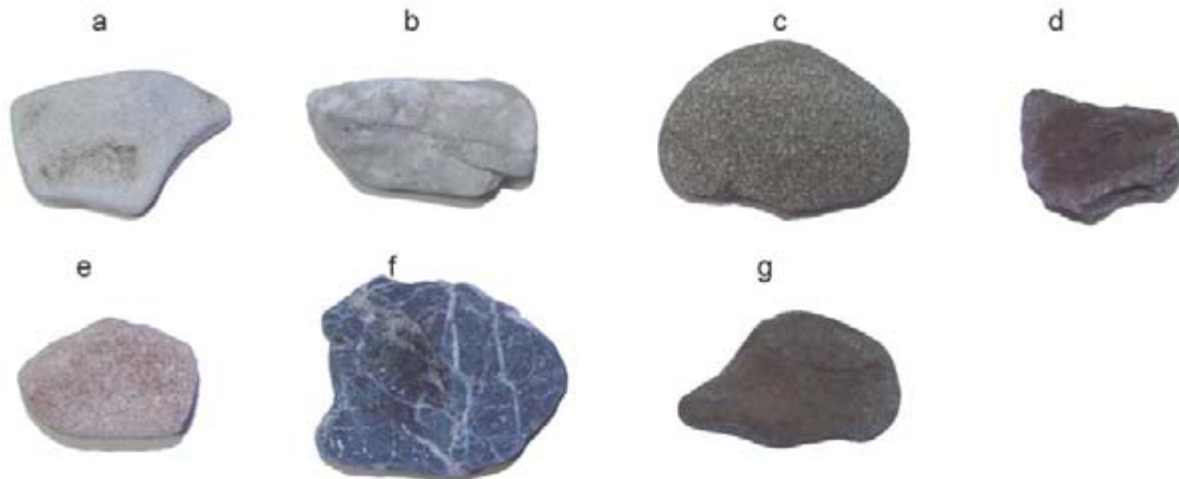


Abb. 7: Zusammensetzung Saalekies (a: Kalkstein, b: Quarz, c: Grauwacke, d: Rhyolith bis Andesit, e: Sandstein, f: Kieselschiefer, g: Tonschiefer)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kieses 5 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Kalkstein	44 %
Quarz	33 %
Grauwacke	7 %
Rhyolith bis Andesit	6 %
Sandstein	5 %
Kieselschiefer	4 %
Tonschiefer	1 %

Der Kies 5 besteht zu 77 % aus Kalkstein und Quarz. Es wird davon ausgegangen, dass bei den Versuchen im Dilatometer der Ergebnisdurchschnitt das Dehnungsverhalten des Gesamtkieses widerspiegelt.

Kies 6: Weserkies Lieferdatum: 16.10.2007
 Liefernummer: 07133
 Lieferkörnung: 16/32

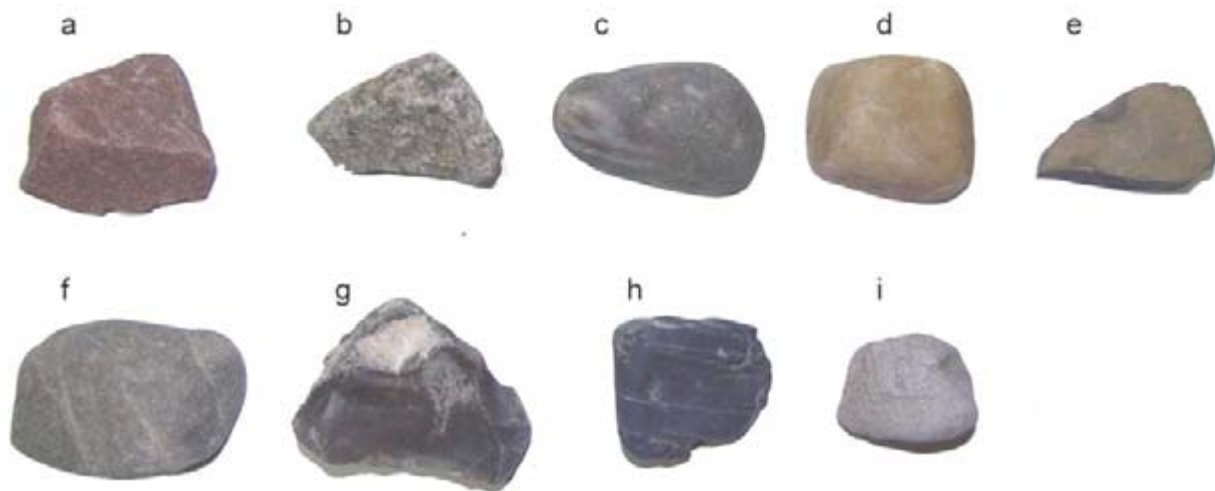


Abb. 8: Zusammensetzung Weserkies (a: Sandstein, b: Granit, c: Quarzit, d: Quarz, e: Tonschiefer, f: Grauwacke, g: Flint, h: Kieselschiefer, i: Kalkstein)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kieses 6 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Sandstein	67 %	Grauwacke	4 %
Granit	8 %	Flint	2 %
Quarzit	7 %	Kieselschiefer	2 %
Quarz	6 %	Kalkstein	1 %
Tonschiefer	4 %		

Als Hauptbestandteil des Kieses 6 wurde Sandstein erfasst. Sandstein ist ein Sediment, welches sich vorwiegend aus Quarzkörnern zusammensetzt, die durch ein Bindemittel (kieseliges BM, Tonminerale, Eisenoxide oder Calcit als BM) miteinander verklebt sind. Der größte Teil der außer Sandstein enthaltenen Gesteine weist ebenfalls das Mineral Quarz als Hauptbestandteil auf. Die Versuche im Dilatometer wurden daher auf den Sandstein beschränkt.

Kies 7: Moränekies

Lieferdatum: 17.10.2007

Liefernummer: 07134

Lieferkörnung: 16/32

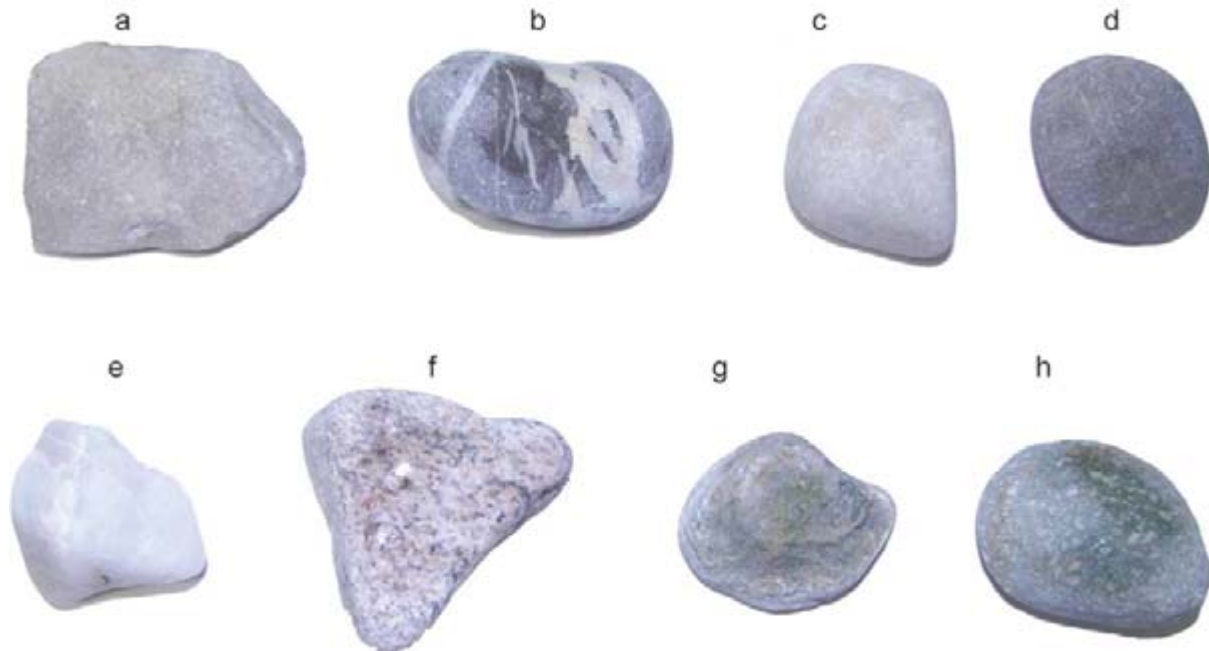


Abb. 9: Zusammensetzung Moränekies (a: Kalkstein, b: Kieselschiefer, c: Quarzit, d: Grauwacke, e: Quarz, f: Granit, g: aplitische Ganggesteine, h: Porphy)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kieses 7 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Kalkstein	47 %
Kieselschiefer	20 %
Quarzit	12 %
Grauwacke	10 %
Quarz	5 %
Granit	3 %
Aplitische Ganggesteine	2 %
Porphy	1 %

Der Kies 7 hatte von allen untersuchten Kiesen die größte Anzahl an Einzelbestandteilen. Vier Gesteinsarten sind mit einem Anteil ≥ 10 M.-% vertreten. Dazu gehören Kalkstein, Kieselschiefer, Quarzit und Grauwacke, die in der Summe 89 % des Kieses umfassen. Davon wurden jeweils 5 Prismen im Dilatometer untersucht.

Kies 8: Tertiärkies Lieferdatum: 25.09.2007
 Liefernummer: 07118
 Lieferkörnung: 16/32

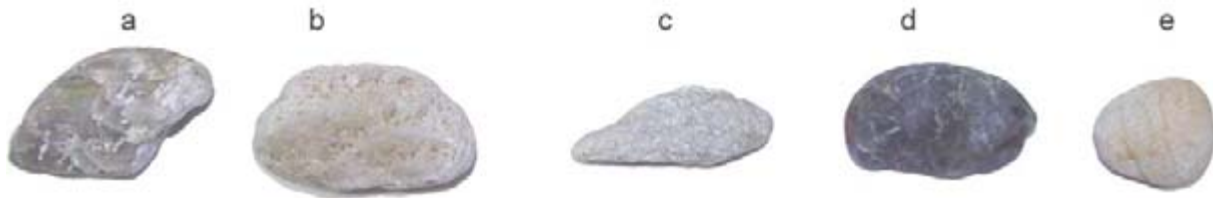


Abb. 10: Zusammensetzung Tertiärkies (a: Quarz, b: Quarzit, c: Gneis, d: Kieselschiefer, e: Sandstein)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kieses 8 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Quarz	86 %
Quarzit	7 %
Gneis	5 %
Kieselschiefer	1 %
Sandstein	< 1 %

Der Kies 8 zeigte mit 86 % Quarz vergleichsweise homogene Eigenschaften. Überdies ist im Mineralbestand der restlichen enthaltenen Gesteine Quarz ebenfalls ein Hauptbestandteil. Die Messung der linearen Wärmedehnung an den Quarzprismen sollte den Größenbereich des α_T des Gesamtkieses bestätigen.

Kies 9: Zorgekies Lieferdatum: 13.09.2007
 Liefernummer: 07116
 Lieferkörnung: 16/32



Abb. 11: Zusammensetzung Zorgekies (a: konglomeratische Grauwacke, b: Porphyry, c: schieferiger Quarzit, d: Kieselschiefer, e: Quarzit, f: Tonschiefer, g: Sandstein)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kiesel 9 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Konglomeratische Grauwacke	47 %
Porphy	26 %
Schiefriger Quarzit	12 %
Kieselschiefer	6 %
Quarzit	4 %
Tonschiefer	3 %
Sandstein	1 %
Sonstige (Granit)	< 1 %

Der Kies 9 enthält in der Summe 85 % konglomeratischer Grauwacke, Porphy und schiefrigen Quarzit. Davon wurden 3-5 Prismen für die Untersuchungen im Dilatometer gewonnen.

Kies 10: Mainkies Lieferdatum: 20.08.2007
 Liefernummer: 07103
 Lieferkörnung: 16/32

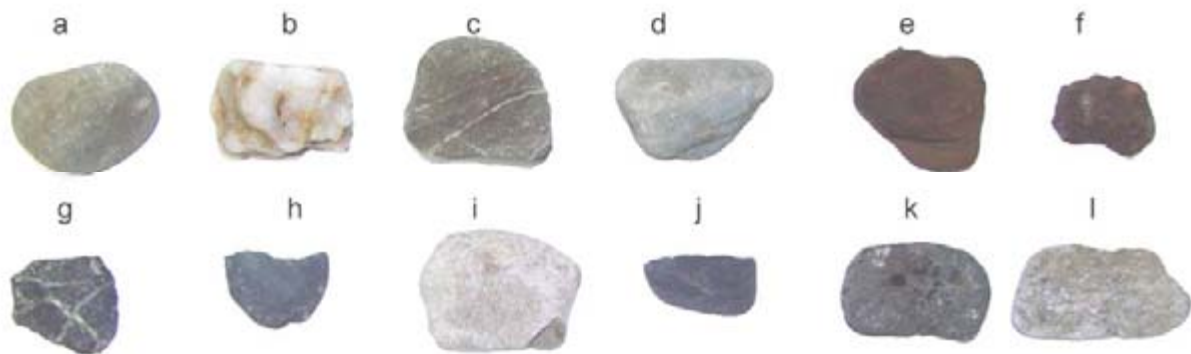


Abb. 12: Zusammensetzung Mainkies (a: Quarzitähnliche, b: Quarz, c: schiefriger Quarzit, d: Tonschiefer, e: Sandstein, f: Porphy, g: Kieselschiefer, h: Schiefer, i: Kalkstein, j: Basalt, k: Melaphyrähnliche, l: Glimmer)

Die Analyse der Fraktion 16/32 des Kiesel 10 führte zu folgenden Ergebnissen in M.-%:

Quarzitähnliche	40 %	Kieselschiefer	4 %
Quarz	17 %	Schiefer	4 %
Schiefriger Quarzit	15 %	Kalkstein	4 %
Tonschiefer	5 %	Basalt	2 %
Sandstein	5 %	Melaphyrähnliche	1 %
Porphy	4 %	Glimmer	< 1 %

Der Kies 10 setzt sich aus 72 % quarzitähnlichen Gesteinen, Quarz und schiefrigen Quarzit zusammen. Aus diesen drei hauptsächlich im Kies enthaltenen Gesteinen wurden insgesamt 9 Prüfprismen zur Ermittlung der linearen Wärmedehnung hergestellt.

Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung

Aus dem Sägerschnitt bei der Herstellung der Dilatometerproben wurden wie zuvor beschrieben Pulverpräparate hergestellt. Die Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung aus der Röntgenphasenanalyse liefert damit einen Durchschnitt der im Dilatometer untersuchten Prismen.

Die Ergebnisse der Röntgenphasenanalyse mit anschließender RIETVELD – Verfeinerung sind in Tab. 6 zusammengefasst.

Mit den anschließenden Ergebnissen aus dem Abschnitt zur Bestimmung der linearen Wärmedehnung zeigte sich der bekannte Zusammenhang zwischen dem Quarzgehalt der Gesteinskörnung und dem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T . Die Gesteinskörnungen N12, N16, N17 sowie K2, K3, K4, K6, K8, K9 und K10 mit vergleichsweise hohen Quarzgehalten liefern hohe α_T -Werte. Die Kalksteinvertreter unter den untersuchten Gesteinskörnungen N13, N15, N19, N20, N22 sowie K1, K7 und K5 lieferten vergleichsweise niedrige α_T -Werte.

Quarz- und karbonatfreie Gesteinskörnungen wie N11, N18 und N14 (mit vernachlässigbaren 3,3% Quarz) bestehen vorwiegend aus Pyroxenen und einem teilweise sehr hohen amorphen Anteil. Aus der Ermittlung der linearen Wärmedehnung resultierten hohe α_T -Werte.

Im Ergebnis der Frostuntersuchungen an den Einzelkörnungen an der TU München (FSt 3, s. [9]) wurde als entscheidendes Prüfkriterium die Abwitterung beim Frost-Tausalz-Versuch (Dosenfrost-Prüfung) herangezogen. Dieses Kriterium diente neben den Ergebnissen der FSt 2 als Grundlage zur Auswahl der Gesteinskörnung für die Betonversuche. Hintergrund war, dass die Wiederholpräzision günstiger und die Streuung zwischen den Einzelwerten geringer war als beim Magnesiumsulfat-Verfahren.

Im Folgenden sind die Kürzel der Gesteinskörnungen farblich untersetzt. Die Farbe Grün steht für einen bestandenen und die Farbe Rot für einen nicht bestandenen Frost-Tausalz-Versuch. Der Vergleich der Ergebnisse aus der Mineralphasenzusammensetzung und der linearen Wärmedehnung mit dem Frost-Tausalz-Widerstand (Dosenfrost) der FSt3 zeigte, dass Gesteinskörnungen mit hohen Quarzgehalten bei gleichzeitig hohen α_T -Werten die Dosenfrostprüfung bestehen, während karbonathaltige Gesteinskörnung überwiegend durchfallen.

Tab. 6: quantitative Mineralphasenzusammensetzung der Kieshauptbestandteile und der Festgesteine

	Karbonate			Oxide/ Hydroxide				Nesosilikate			Phyllosilikate			Tonminerale				Tektosilikate				amorph	
	Calcit	Dolomit	Ankerit	Quarz	Hämatit	Goethit	Magnetit	Perowskit	Granat	Olivin	Pyroxene	Amphibol	Inosilikat	Glimmer	Muskowit	Phlogopit	Chlorit	Illit	Albit	Anorthit	Orthoklas		Nephe lin
K1	KS	87,9	11,8	0,3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0,7	--	--	--	--
K2	G	59,1	19,1	21,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	3,8	--	2,1	--	--	--	--	23,8	--	--
Ks	G	--	--	48,1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	4,4	--	--	--	--	--	1,8	--	--	--
Q	Q	--	--	93,8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Qt	Qt	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Q	Q	--	--	97,6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2,4	--	--	--	--
K3	Q	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Qt	Qt	--	--	92,0	0,3	0,8	--	--	--	--	--	--	1,9	3,2	--	1,8	--	2,5	2,1	--	1,0	--	--
Gw (Qt)	Gw (Qt)	--	--	92,0	0,8	0,2	--	--	--	--	--	--	2,3	--	--	--	--	2,0	3,2	--	1,5	--	--
K4	Qt	--	--	90,0	0,8	0,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Q	Q	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Gw (Qt)	Gw (Qt)	--	--	88,9	0,4	--	--	--	--	--	--	--	4,3	--	--	0,3	--	--	5,5	--	0,6	--	--
K5	Q	67,1	--	32,9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Q	Q	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
K6	S	--	--	89,6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
K7	G	42,5	Fe-haltig? s..	1,4	52,7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	5,4	--	5,0	--	--
KS	KS	95,0	--	5,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	3,4	--	--	--	--
Ks	Ks	40,3	--	59,7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Qt	Qt	26,2	--	54,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
K8	Q	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	17,3	--	2,3	--	--
K9	Gw	--	--	48,3	0,8	--	--	--	--	--	--	--	5,7	--	--	4,3	--	--	33,6	--	7,1	--	--
Rh	Rh	--	--	47,3	3,3	--	--	--	--	--	--	--	6,2	--	--	--	--	--	19,4	--	23,8	--	--
sQt	sQt	--	--	49,9	--	--	--	--	--	--	--	--	4,9	--	--	3,8	5,4	--	28,6	--	7,4	--	--
K10	Q	0,5	Fe-haltig? s..	0,6	83,3	--	--	--	--	--	--	--	2,6	--	1,3	--	--	--	5,2	--	6,6	--	--
Qt	Qt	--	--	30,6	--	--	--	--	--	--	--	7,4	4,1	2,7	2,3	--	--	22,5	21,8	8,7	--	--	--
sQt	sQt	--	--	79,9	--	--	--	--	--	--	--	--	5,4	--	2,6	--	--	10,8	--	1,3	--	--	--
N11	Basalt 1	--	--	--	--	3,3	--	--	18,4	35,7	--	--	--	--	--	--	--	--	4,1	--	9,2	--	29,2
N12	Quarzporphyr	11,8	--	41,1	0,2	--	--	--	--	--	--	--	3,6	--	--	--	--	--	20,2	--	16,3	--	6,7
N13	Muschelkalk1	60,3	Fe-haltig? s..	38,3	1,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
N14	Diabas	--	--	3,3	0,5	--	1,0	--	3,8	13,1	6,8	--	--	--	--	5,8	--	--	--	--	--	--	--
N15	Jurakalk	98,2	0,3	0,3	1,1	--	--	--	--	--	--	--	--	3,1	--	--	--	--	18,2	--	--	--	? 44,5
N16	Gabbro	--	--	? 76,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	4,8	--	3,6	--	--	14,0	--	1,3	--	--
N17	Granit	--	--	45,6	Spur?	--	--	--	--	--	--	--	5,4	--	4,5	--	--	--	28,0	--	16,4	--	--
N18	Basalt2	--	--	--	--	3,7	0,4	--	9,7	50,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	8,0	5,8	22,5
N19	Muschelkalk2	43,9	--	52,0	4,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
N20	Devon.Masse nKalk	97,8	1,5	0,7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
N22	Muschelkalk4	87,9	--	6,6	5,4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

-- nicht enthalten

Fros-Tausalz-Versuch bestanden

Fros-Tausalz-Versuch nicht bestanden

Bestimmung der linearen Wärmedehnung der Festgesteine

Aus den 11 Bruchsteinwerken wurden 5 Prismen für die Messung der linearen Wärmedehnung vorbereitet. Die Tab. 7 enthält die Probenanzahl, die für das jeweilige Festgestein im Dilatometer gemessen wurde. Die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T wird an den Beispielen N11 und N22 gezeigt. Analog zu diesen Beispielen sind die Ergebnisse der anderen Festgesteine im Anhang A aufgeführt.

Tab. 7: Anzahl der gemessenen Dilatometerprismen der Festgesteine

Bezeichnung		Probenumfang
N11	Basalt 1	5
N12	Quarzporphyr	5
N13	Muschelkalk 1	6
N14	Diabas	5
N15	Jurakalk	4
N16	Gabbro	3
N17	Granit	5
N18	Basalt 2	4
N19	Muschelkalk 2	3
N20	dev. Massenkalk	4
N22	Muschelkalk 4n	3

Die Abb. 13 und Abb. 14 zeigen Aufnahmen der Prismen (N11, N22) für die Bestimmung der linearen Wärmedehnung im Dilatometer. Die Gesteine für die Herstellung der Prismen wurden aus der Korngruppe 16/22 herausgesucht. Die Einhaltung der Probengeometrie von 7x7x max. 20 mm³ war bezüglich der Länge aufgrund der Korngröße vergleichsweise problematisch. Die Zielvorgabe zur Messung von mind. 3 Prismen konnte für alle Festgesteine eingehalten werden. Die Probekörperlängen variierten dabei zwischen 12 mm und 20 mm. Aus Voruntersuchungen [8] ist bekannt, dass bei Prismenlängen von 10-20 mm die Genauigkeit der Ergebnisse bei $\pm 2\%$ liegt.

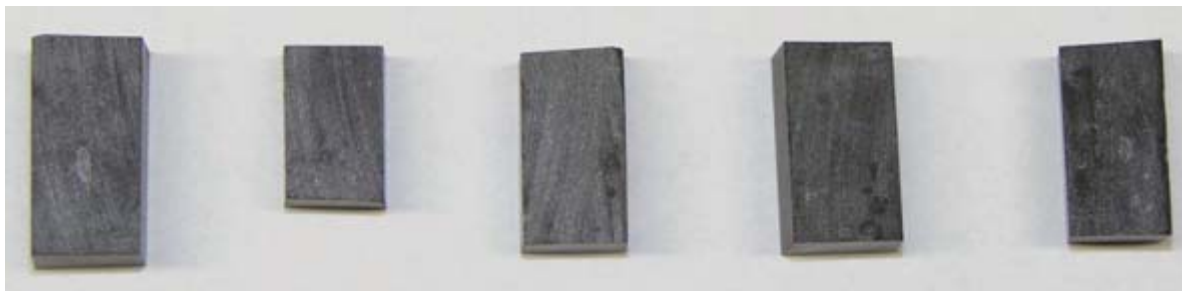


Abb. 13: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Basalt N11



Abb. 14: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Muschelkalk N22

In Tab. 8 und Tab. 9 sind die Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Festgesteine N11 und N22 in Abhängigkeit der Temperatur und auf den Referenzwert von 20°C, dargestellt. Für den Basalt N11 wurden 2 Messungen wiederholt. Diese sind mit einem rote „W“ gekennzeichnet. Aus den Einzelwerten wurden in Abhängigkeit der Temperatur die Mittelwerte in $10^{-6}/K$, die Standardabweichung in $10^{-6}/K$, der Variationskoeffizient und die Quantil-Werte in Prozent berechnet. Bei der Betrachtung der Mittelwerte für alle Festgesteine zeigte sich, s. auch Anhang A, dass der α_T -Wert von 80°C bis 20°C abnahm und bei -20°C i.d.R. ein leichter Anstieg zu verzeichnen war. Nur bei den Festgesteinen N13, N17(quasi identisch mit 20°C) und N20 lagen die α_T -Werte unter dem Wert bei 20°C. Die Auswertung der Kiese, s. nächster Abschnitt, ergab vergleichbare Tendenzen.

Tab. 8: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N11 in Abhängigkeit der Temperatur

Festgestein N11	Basalt1				
Datum	26.03.2008				
Bez.	α_T (x^{-6}/K) bezogen auf 20°C				
N11	-20°C	20°C	40°C	60°C	80°C
N11-1	8,50	8,63	8,50	8,68	8,80
W N11-1	8,65	8,86	9,29	9,28	9,31
N11-2	8,87	8,40	8,70	8,19	7,76
W N11-2	8,06	8,76	9,41	9,81	10,31
N11-3	7,80	7,91	7,57	7,46	7,45
N11-4	10,04	9,09	9,66	9,58	9,50
N11-5	10,84	10,55	10,40	10,39	10,42
Mittelwert	8,97	8,89	9,08	9,06	9,08
Stabw	1,09	0,82	0,91	1,01	1,16
Varia-Koeff.	12,19	9,28	10,05	11,14	12,73
5%-Quantil	7,87	8,03	7,85	7,64	7,53
95%-Quantil	10,60	10,11	10,18	10,22	10,39

Tab. 9: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N22 in Abhängigkeit der Temperatur

Festgestein N22	Muschelkalk				
Datum	31.03.2008				
Bez.	Ausdehnungskoeffizient α_T (x^{-6}/K) bezogen auf 20°C				
N22	-20°C	20°C	40°C	60°C	80°C
N22-1	6,33	5,91	6,36	6,33	6,44
N22-2	5,06	4,56	5,00	5,63	6,35
N22-3	5,19	5,41	6,14	6,58	6,94
Mittelwert	5,53	5,29	5,83	6,18	6,58
Stabw	0,70	0,68	0,73	0,49	0,32
Varia-koeff.	12,64	12,89	12,51	7,97	4,83
5%-Quantil	5,07	4,63	5,08	5,69	6,37
95%-Quantil	6,22	5,86	6,34	6,56	6,89

Die Standardabweichung lag i.d.R. bei ca. $1,0 \cdot 10^{-6}/K$ und darunter. Nur für N13 wurden deutlich höhere Standardabweichungen bestimmt. Der Variationskoeffizient variierte in

Abhängigkeit der Temperatur und der Art des Festgesteins erheblich. Es ergaben sich keine erkennbaren Zusammenhänge.

Die Abb. 15 und Abb. 16 zeigen die grafische Darstellung der Einzelwerte für α_T in Abhängigkeit der Temperatur. Die Einzelwerte schwanken hier von ca. 5% bis ca. 13% um die Mittelwerte (rot). Die tendenzielle Abnahme des mittleren α_T -Wertes zwischen 80°C und 20°C sowie der leichte Anstieg zwischen 20°C und -20°C ist bei N22 gut zu erkennen. Ähnliche Tendenzen treffen auch auf die meisten anderen untersuchten Festgesteine zu, vergl. mit Anhang A. Eigentlich wäre ein temperaturabhängiger linearer Verlauf mit steigenden α_T -Werten zwischen -20°C bis 80°C zu erwarten gewesen. Weshalb dies scheinbar nicht der Fall ist, kann nach derzeitigem Kenntnisstand nicht erklärt werden. Die Messungen waren reproduzierbar. Ob es sich um einen systematischen Fehler handelt, konnte nicht geklärt, aber auch nicht ausgeschlossen werden.

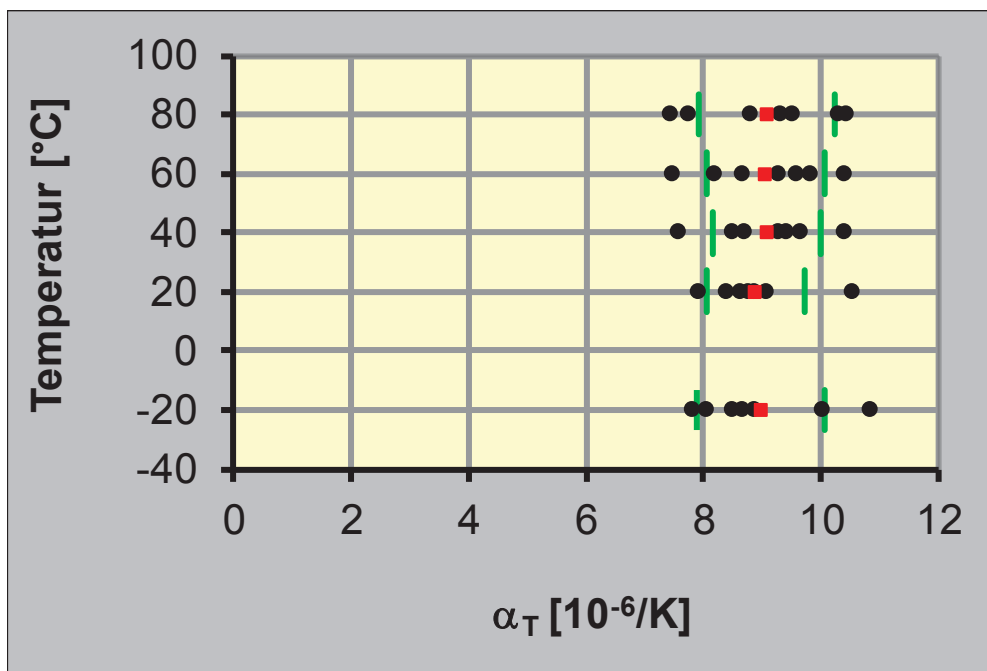


Abb. 15: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N11 in Abhängigkeit der Temperatur

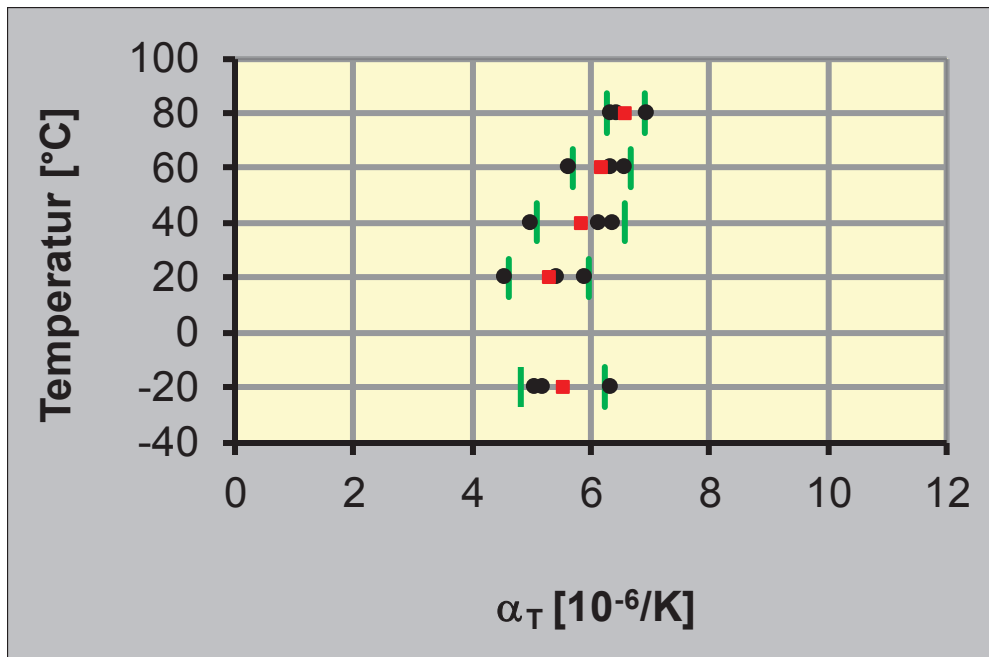


Abb. 16: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N22 in Abhängigkeit der Temperatur

Obwohl es sich bei den Festgesteinen, um mehr oder weniger homogene Festkörper handelt, traten vergleichsweise starke Schwankungsbreiten auf, s. Abb. 17 und Abb. 18. Einen wesentlichen Einfluss auf die lineare Wärmedehnung üben dabei die Korngrößen der Einzelminerale, die richtungsabhängigen Kristalleigenschaften anisotroper Minerale, texturbedingte Eigenschaften bei metamorphen Gesteinen u. a. aus, s. Abschnitt 6.2.

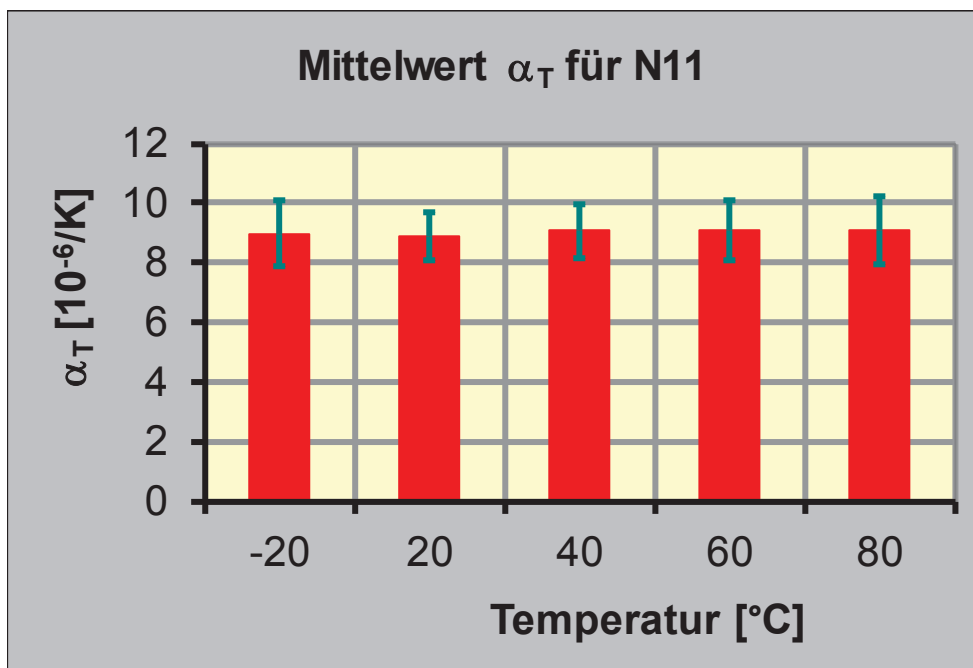


Abb. 17: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N11 in Abhängigkeit der Temperatur

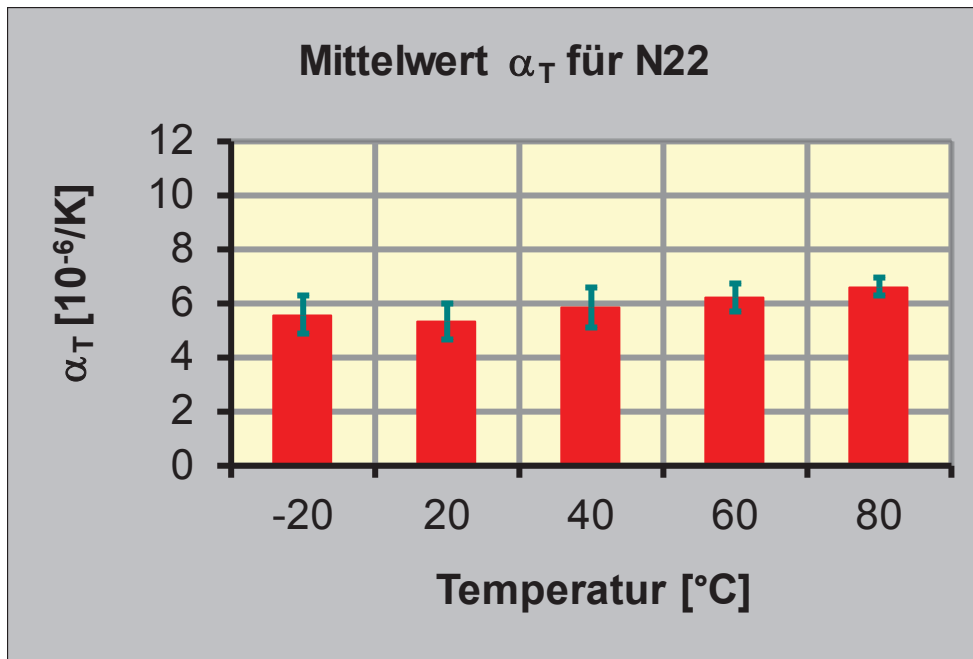


Abb. 18: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N22 in Abhängigkeit der Temperatur

Bestimmung der linearen Wärmedehnung der Kiese

Nach der Quantifizierung der Hauptbestandteile (festgelegt als Anteile ≥ 10 M.-%) wurden Gesteinsproben von jedem Hauptbestandteil für die Bestimmung der linearen Wärmedehnung zurückgestellt. Gegenüber den Festgesteinen resultiert aus der Bestimmung der Kieszusammensetzung eine deutlich erhöhte Probenzahl für die Versuche im Dilatometer, s. Tab. 10.

Die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T der jeweiligen im Kies enthaltenen Einzelkomponenten sowie die Ermittlung des entsprechenden Mittelwertes für jeden Kies zeigen die folgenden Beispiele für K3 und K5. Analog zu diesen Beispielen sind die Ergebnisse der anderen Kiese im Anhang A aufgeführt.

Die Abb. 19 und Abb. 20 zeigen Aufnahmen der Prismen für die Bestimmung der linearen Wärmedehnung im Dilatometer. Ziel war es, 5 Prismen ($7 \times 7 \times$ max. 20 mm³) pro Kieshauptbestandteil herzustellen und mind. 3 Prismen zu prüfen. In allen Fällen konnte diese Vorgabe an die Anzahl erfüllt werden, jedoch nicht eine einheitliche Prismengröße. Die Abb. 20 zeigt für die Quarzkomponente nur 2 Prismen. Es wurden zu einem späteren Zeitpunkt weitere Prismen hergestellt, jedoch nicht fotografiert.



Abb. 19: Kies K3

Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7×7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T , links: Quarz, Mitte: Quarzit, rechts: Grauwacke

Tab. 10: Bestandteile der Kiese < 10 M.-% und Anzahl der gemessenen Dilatometerprismen

Bezeichnung		Hauptbestandteile	Probenanzahl
K1	Münchner Kies	Kalkstein (KS)	3
		Kieselkalk (Kk)	3
K2	Elbekies	Quarz/Quazit (Q, Qt)	3
		Kieselschiefer (Ks)	4
		Granit/Gneis (G)	4
K3	Rheinkies (rund)	Quarz (Q)	5
		Quarzit (Qt)	5
		Grauwacke (Gw)	5
K4	Rheinkies (gebrochen)	Quarzit (Qt)	4
		Quarz (Q)	5
		Grauwacke (Gw)	4
K5	Saalekies	Kalkstein (KS)	5
		Quarz (Q)	3
K6	Weserkies	Sandstein (Sdst)	5
K7	Moränekies	Kalkstein (KS)	5
		Kieselschiefer (Ks)	5
		Quarzit (Qt)	5
		Grauwacke (Gw)	5
K8	Tertiärkies	Quarz (Q)	4
K9	Zorgekies	Grauwacke (Gw)	5
		Rhyolith (Rh)	4
		schiefrige Quarzite (sQt)	3
K10	Mainkies	Quarzit (sQt)	3
		Quarz (Q)	3
		schiefriger Quarzit (sQt)	3

Probleme gab es, wenn die Geometrie der Gesteinskörner aus der Korngruppe 16/32 es nicht ermöglichte entsprechende Prismenformate zu präparieren. Dies war z.B. bei zu plattig geformten Gesteinskörnern der Fall. Genesebedingte Einflussfaktoren, wie Schichtung, Porosität und Gefügestörungen (Risse, Mineralgänge) sorgten häufig für kleinere Abplatzungen an den Prismen. Wenig Probleme gab es mit Gesteinen, die ein feinkörniges, dichtes und/ oder ungerichtetes Gefüge aufwiesen. Die Quarze in den Kiesen waren häufig nicht groß genug oder brachen an Subkorn Grenzen aus. Bei Sedimentgesteinen, wie Grauwacken, gab es Abplatzungen an Schichtgrenzen.



Abb. 20: Kies K5

Aufnahmen der Prismen (Querschnitt $7 \times 7 \text{ mm}^2$) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T , links: Kalkstein, rechts: Quarz

In Tab. 11 und Tab. 12 Tab. 8 Tab. 9 sind die Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Kiese K3 und K5 in Abhängigkeit der Temperatur und auf den Referenzwert von 20°C , dargestellt. Der α_T -Werte der Kiese ergeben sich aus den gewichteten Anteilen der α_T -Werte der enthaltenen Hauptkomponenten. Die Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T liegen für den Kies K3 alle über $10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ Bereich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Hauptbestandteile Quarz (Q), Quarzit (Qt) und Grauwacke (Gw) überwiegend aus dem Mineral Quarz bestehen, welches i.d.R. im Bereich der Gesteine hohe α_T -Werte liefert.

Tab. 11: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die im Kies K3 enthaltenen Einzelkomponenten in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Rheinkies (rund)
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α_T ($\times 10^{-6}/\text{K}$) bezogen auf 20°C				
	-20°C	20°C	40°C	60°C	80°C
K3					
K3-1-Q	12,89	13,31	12,95	12,84	13,30
K3-2-Q	12,04	11,87	12,44	12,61	12,68
K3-3-Q	12,71	12,93	13,70	13,94	14,16
K3-4-Qt	14,59	12,97	12,94	12,95	13,22
K3-5-Qt	11,63	11,51	11,52	11,81	12,03
K3-6-Qt	12,83	12,65	13,19	13,98	14,49
K3-7-Qt	11,88	11,30	11,38	11,76	12,29
K3-8-Gw	15,04	12,89	11,43	11,18	11,63
K3-9-Gw	11,70	10,58	10,44	10,46	10,48
K3-10-Gw	14,20	11,98	12,28	11,80	11,69
Mittelwert	12,95	12,20	12,23	12,33	12,60
Stabw	1,25	0,89	1,01	1,14	1,23
Varia-koeff.	9,62	7,28	8,28	9,26	9,75
5%-Quantil	11,66	10,90	10,86	10,78	11,00
95%-Quantil	14,84	13,16	13,47	13,96	14,34

Der Kies K5 enthält nach der petrografischen Analyse Kalkstein und Quarz als Hauptbestandteile. Bekanntermaßen liefern Kalksteine eher niedrige Werte, hier deutlich unter $10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, während Quarze im Bereich der Gesteine eher α_T -Werte über $10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ ergeben. Daher war eine hohe Varianz zwischen den Einzelwerten zu erwarten.

Tab. 12: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die im Kies K5 enthaltenen Einzelkomponenten in Abhängigkeit der Temperatur

Kies K5	Saalekies
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K5					
K5-1-KS	4,38	4,59	4,86	5,17	5,47
K5-2-KS	4,94	4,40	4,68	5,06	5,04
K5-4-KS	6,26	6,42	7,97	9,45	10,74
K5-5-KS	5,14	4,85	5,74	5,98	6,04
K5-3-Q	11,42	10,72	10,53	10,68	10,89
K5-6-Q	10,17	9,76	9,31	9,45	8,99
K5-7-Q	11,90	14,03	13,27	13,55	13,82
Mittelwert	7,74	7,82	8,05	8,48	8,71
Stabw	3,29	3,73	3,21	3,20	3,32
Varia-koeff.	42,45	47,72	39,88	37,71	38,11
5%-Quantil	5,00	4,54	5,00	5,34	5,34
95%-Quantil	11,76	13,04	12,45	12,69	12,94

Die Mittelwerte von Kies K5 steigen erwartungsgemäß mit zunehmender Temperatur, s. Tab. 12, Abb. 22. Jedoch kann auch hier nicht von einem linearen Verlauf ausgegangen werden. Tendenziell konnte für die Kiese, vgl. Anhang A, das gleiche Phänomen festgestellt werden, was bereits bei den Festgesteinen beobachtet wurde. Danach nahm der mittlere α_T -Wert zwischen 80°C und 20°C ab, um zwischen 20°C und -20°C wieder zuzunehmen. Mit Sicherheit ist die lineare Wärmedehnung von Kiesen deutlich schwerer zu erfassen, als die von Festgesteinen. Der Verlauf zwischen -20°C und 80°C ist bei beiden jedoch vergleichbar. Die Ursache/-n für den Verlauf konnte/-n nicht geklärt werden. Für die Klärung dieses Phänomens sind weitere Forschungen erforderlich.

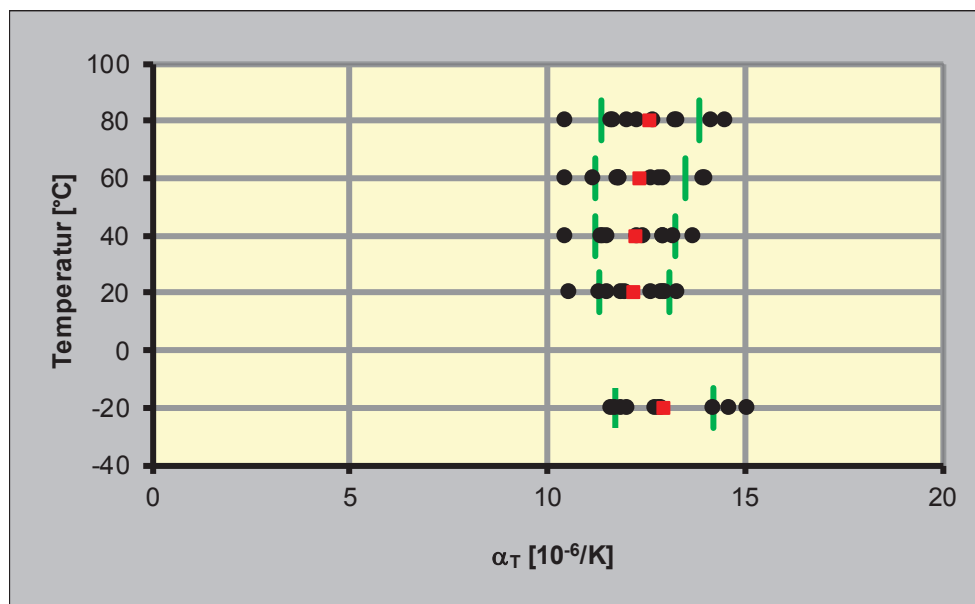


Abb. 21: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für Kies K3 in Abhängigkeit der Temperatur

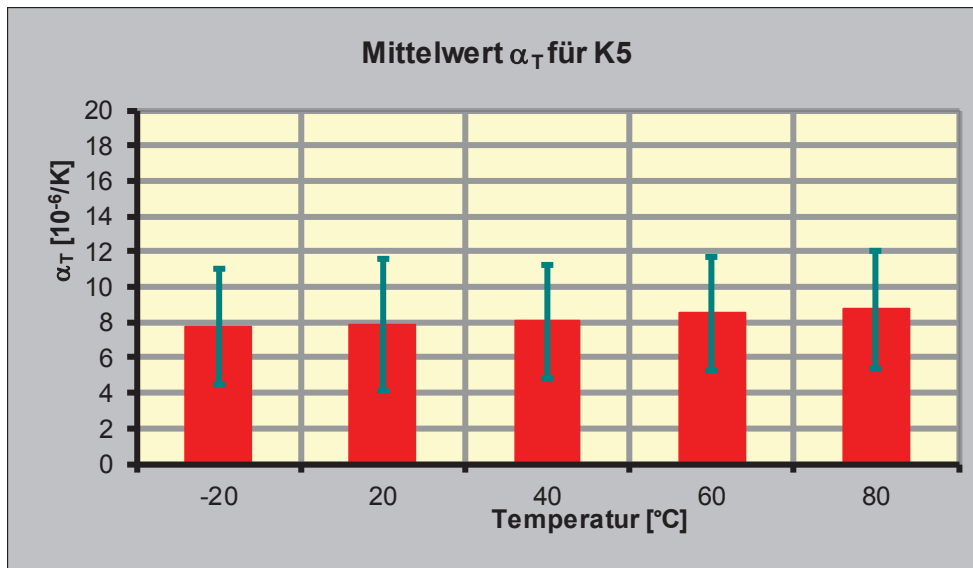


Abb. 24: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K5 in Abhängigkeit der Temperatur

Die Diagramme in Abb. 25 und Abb. 26 zeigen für die Festgesteine und die Kiese die Mittelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T in Abhängigkeit der Temperatur. Die Mittelwerte ergaben sich aus den Einzelmesswerten aller geprüften Probekörper, s. Tab. 13, Tab. 14. Für die Kiese wurde der mittlere lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α_T gewichtet nach den prozentualen Anteilen der Hauptbestandteile berechnet. Die Mittelwerte, für den im Vergleich zur Frostprüfung interessierenden Bereich, bei -20°C sind in den Diagrammen Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt. Die grün hinterlegten Punkte bzw. Balken stehen für eine bestandene Frost-Tausalz-Prüfung, die roten Balken überschreiten das Abnahmekriterium der Dosenfrostprüfung. Danach weisen sowohl die Festgesteine als auch die Kiese mit zunehmendem α_T -Wert i.d.R. einen höheren Widerstand gegen Frost-Tausalz-Belastung auf. Daneben scheinen sich Wertebereiche für α_T abzuzeichnen, die eine Abhängigkeit zwischen den Frost-Tausalz-Untersuchungsergebnissen (Dosenfrost) und der linearen Wärmedehnung vermuten lassen. Bei den Festgesteinen bestehen alle Gesteine (s. Tab. 13, N17, N14, N11, N12, N16, N18) die Frost-Tausalz-Untersuchung (Dosenfrost), die einen α_T -Wert größer $7 \cdot 10^{-6}/K$ aufweisen. In dieser Gruppe sind Gesteine mit hohen Quarzanteilen zu finden oder quarzfreie Gesteine mit amorphen Anteilen. Festgesteine mit α_T -Werte unter $7 \cdot 10^{-6}/K$ (s. Tab. 13, N20, N15, N22, N19, N13) überschreiten das Abnahmekriterium der Dosenfrostprüfung mehrheitlich. Dabei handelt es sich ausschließlich um verschiedenartige Kalksteine. Lediglich N20 bildete eine Ausnahme und bestand die Frost-Tausalz-Untersuchung. Zwischen den beiden Gruppen von Festgesteinen, die die Frost-Tausalz-Untersuchung bestanden bzw. nicht bestanden, liegt ein schmaler nicht von Messwerten besetzter Korridor. Die Festlegung einer möglichen Grenze der linearen Wärmedehnung, die die Frost-Tausalz-beständige Gesteinskörnung von den nicht beständigen Gesteinskörnungen trennt, bedarf jedoch weiterer Forschung.

Tab. 13: Mittelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Festgesteine in Abhängigkeit der Temperatur

Fest-gestein	Mittelwert α_T [$10^{-6}/K$] - Phase 1				
	-20°C	20°C	40°C	60°C	80°C
N20	3,63	3,77	4,40	4,57	4,70
N15	5,59	5,24	5,27	5,36	5,44
N22	5,19	5,13	5,83	6,18	6,58
N19	5,85	5,47	5,94	6,12	6,44
N13	5,83	6,57	6,71	6,41	6,64
N17	7,64	7,65	8,06	8,17	8,13
N14	8,86	7,86	8,03	8,15	8,26
N11	9,21	8,92	8,97	8,86	8,79
N12	10,39	10,14	10,03	9,68	9,65
N16	10,10	9,92	10,21	10,22	10,30
N18	10,43	10,09	10,23	10,15	10,00

Tab. 14: nach Prozentualen Anteilen der Kieshauptbestandteile gewichtete Mittelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Kiese in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Bezeichnung	Hauptbestandteile [%]		α_T [$10^{-6}/K$]										
				-20°C		20°C		40°C		60°C		80°C		
K1	Münchner Raum	Kalkstein	50	75	4,17	6,69	3,99	6,26	4,41	6,64	4,55	6,88	4,64	7,03
		Kieselkalk	25		10,92		9,58		10,02		10,33		10,59	
K2	Elbekies	Quarz	44	85	17,45	15,00	17,15	14,68	17,80	15,19	17,75	15,30	17,93	15,55
		Quarzit	18		13,72		13,55		13,62		13,70		13,96	
		Kieselschiefer	12		14,49		13,89		14,06		14,19		14,48	
		Granit/Gneis	11		7,84		7,54		8,55		9,31		9,87	
K3	Rheinkies (rund)	Quarz	47	86	12,55	12,80	12,70	12,38	13,03	12,52	13,13	12,63	13,38	12,89
		Quarzit	23		12,73		12,11		12,26		12,63		13,01	
		Grauwacke	16		13,65		11,82		11,38		11,15		11,27	
K4	Rheinkies (gebr.)	Quarzit	33	78	12,15	12,73	12,16	11,98	12,48	12,13	12,55	12,18	12,87	12,53
		Quarz	26		12,91		12,04		12,32		12,63		13,15	
		Grauwacke	19		13,49		11,58		11,25		10,91		11,11	
K5	Saalekies	Kalkstein	44	77	4,82	7,54	4,61	7,57	5,09	7,64	5,40	7,90	5,52	7,97
		Quarz	33		11,16		11,50		11,04		11,23		11,23	
K6	Weserkies	Sandstein	67	67	12,01	12,01	11,08	11,08	11,08	11,08	11,22	11,22	11,49	11,49
K7	Moränekies	Kalkstein	47	89	4,91	6,42	4,47	6,03	4,36	6,02	4,51	6,16	4,62	6,29
		Kieselschiefer	20		8,41		8,02		7,99		8,16		8,39	
		Quarzit	12		10,76		10,45		10,54		10,57		10,64	
		Grauwacke	10		4,37		4,04		4,44		4,68		4,75	
K8	Tertiärkies	Quarz	86	86	12,34	12,34	12,66	12,66	11,91	11,91	12,26	12,26	12,33	12,33
K9	Zorgekies	Grauwacke	47	85	11,80	10,59	10,04	8,74	9,64	8,11	9,62	8,23	9,77	8,45
		Porphyr	26		8,88		7,60		7,40		7,53		7,71	
		schiefrige Quarzite	12		9,58		6,11		3,64		4,33		4,85	
K10	Mainkies	Quarzit	40	72	12,35	12,47	11,10	11,42	11,09	11,41	11,19	11,52	11,43	11,74
		Quarz	17		12,49		12,81		12,96		12,95		13,04	
		schiefriger Quarzit	15		12,77		10,71		10,52		10,78		11,07	

Tab. 15: gewichtete Mittelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Kiese in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	α_T [$10^{-6}/K$] - Phase 1				
	-20°C	20°C	40°C	60°C	80°C
K7	6,42	6,03	6,02	6,16	6,29
K1	6,69	6,26	6,64	6,88	7,03
K5	7,54	7,57	7,64	7,90	7,97
K9	10,59	8,74	8,11	8,23	8,45
K6	12,01	11,08	11,08	11,22	11,49
K10	12,47	11,42	11,41	11,52	11,74
K8	12,34	12,66	11,91	12,26	12,33
K4	12,73	11,98	12,13	12,18	12,53
K3	12,80	12,38	12,52	12,63	12,89
K2	15,00	14,68	15,19	15,30	15,55

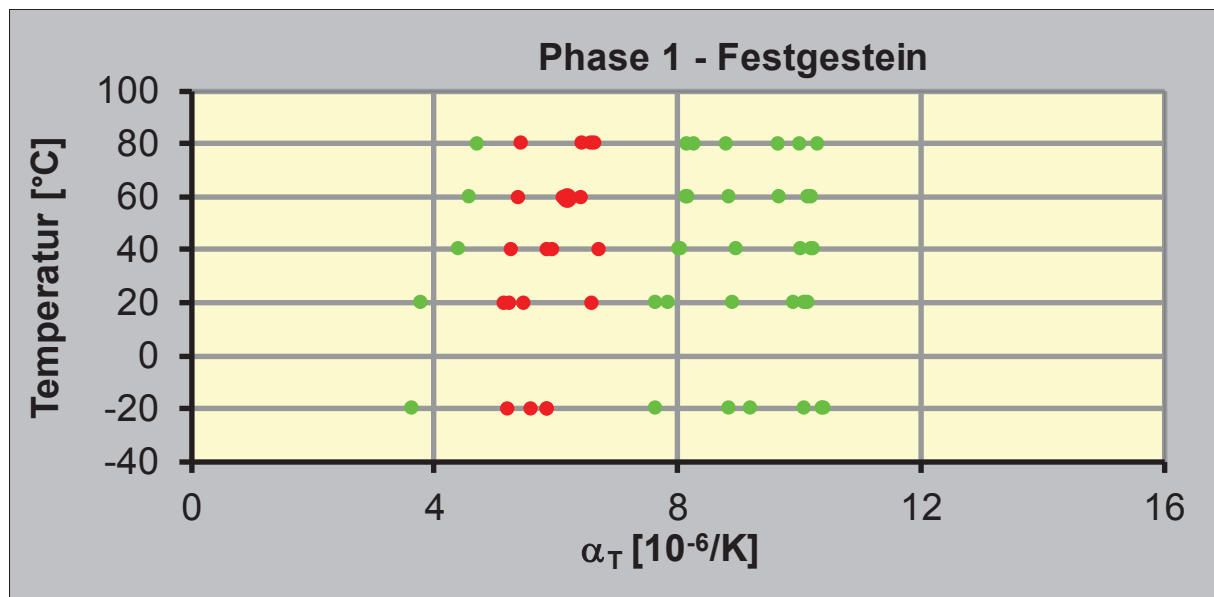


Abb. 25: grafische Darstellung des mittleren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für alle Festgesteine in Abhängigkeit der Temperatur

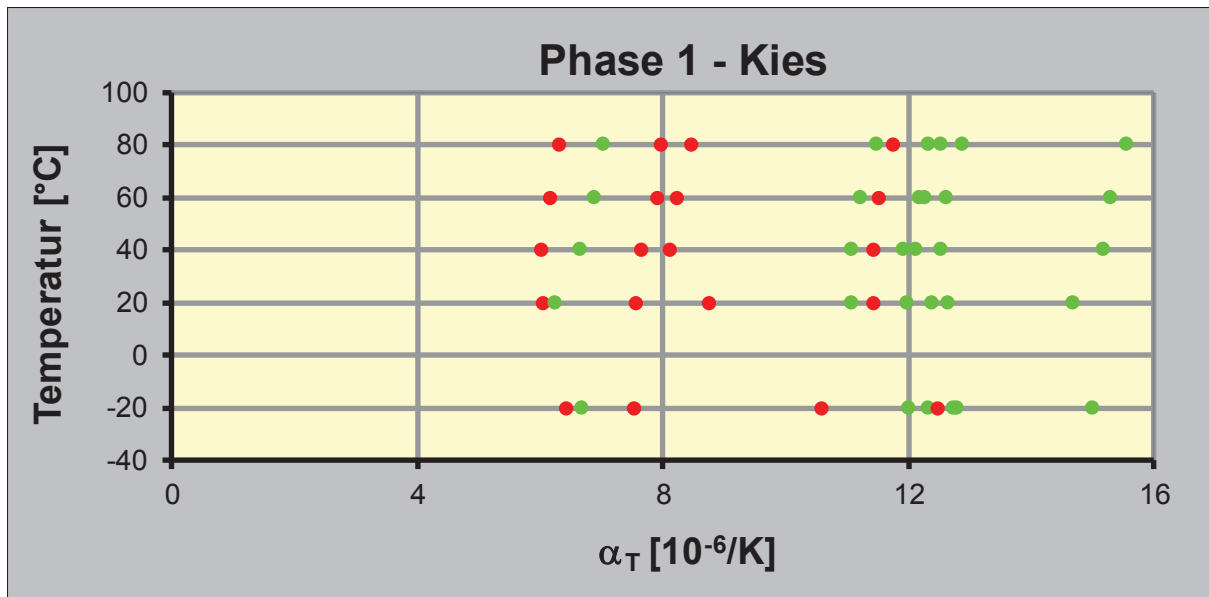


Abb. 26: grafische Darstellung des mittleren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für alle Kiese in Abhängigkeit der Temperatur

Mit den Ergebnissen der Festgesteine vergleichbar, zeigen die Kiese mit zunehmenden α_T -Werten überwiegend einen höheren Widerstand gegenüber einer Frost-Tausalz-Beanspruchung, s. Tab. 14, Abb. 26 und Abb. 28. Es deutet sich ebenfalls ein nicht von Messwerten besetzter Korridor zwischen Kies 9 und Kies 6 an, der in dem temperaturabhängigen Punkt-Diagramm Abb. 26 deutlich hervortritt. Der nicht von Messwerten besetzter Korridor ist im Vergleich zu den Festgesteinen, zu höheren α_T -Werten verschoben. Dies erklärt sich mit der heterogenen Zusammensetzung der Kiese. Der Kies 5 besteht in den Hauptkomponenten zu 44 M.-% aus Kalkstein und zu 33 M.-% aus Quarz. Die mittleren α_T -Werte liegen für den Kalkstein bei $5,09 \cdot 10^{-6}/K$ und für den Quarz bei $11,23 \cdot 10^{-6}/K$. Der α_T -Wert des Kieses 5 ergibt sich aus den gewichteten Anteilen der α_T -Werte dieser beiden Komponenten. Die Kiese 3, 4, 6 und 8 enthalten vorrangig Gesteinskomponenten, die aus dem Mineral Quarz aufgebaut sind, wie Quarz, Quarzit, Sandstein oder Grauwacke. Daher liefern diese Kiese 3, 4, 6 und 8 eher höhere α_T -Werte. Eine Betrachtung der einzelnen Kieskomponenten führt vermutlich zu einem den Festgesteinen vergleichbaren nicht von Messwerten besetzten Korridor. Für das Belegen/ Widerlegen dieser Annahme sind weitere Untersuchungen erforderlich.

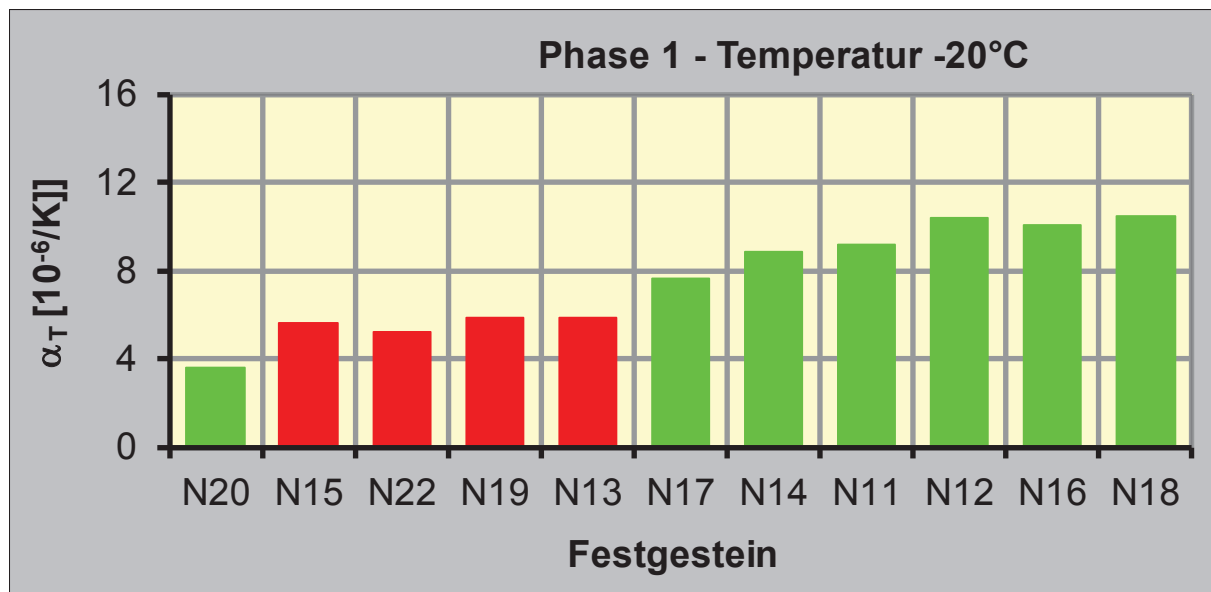


Abb. 27: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für alle Festgesteine bei -20°C

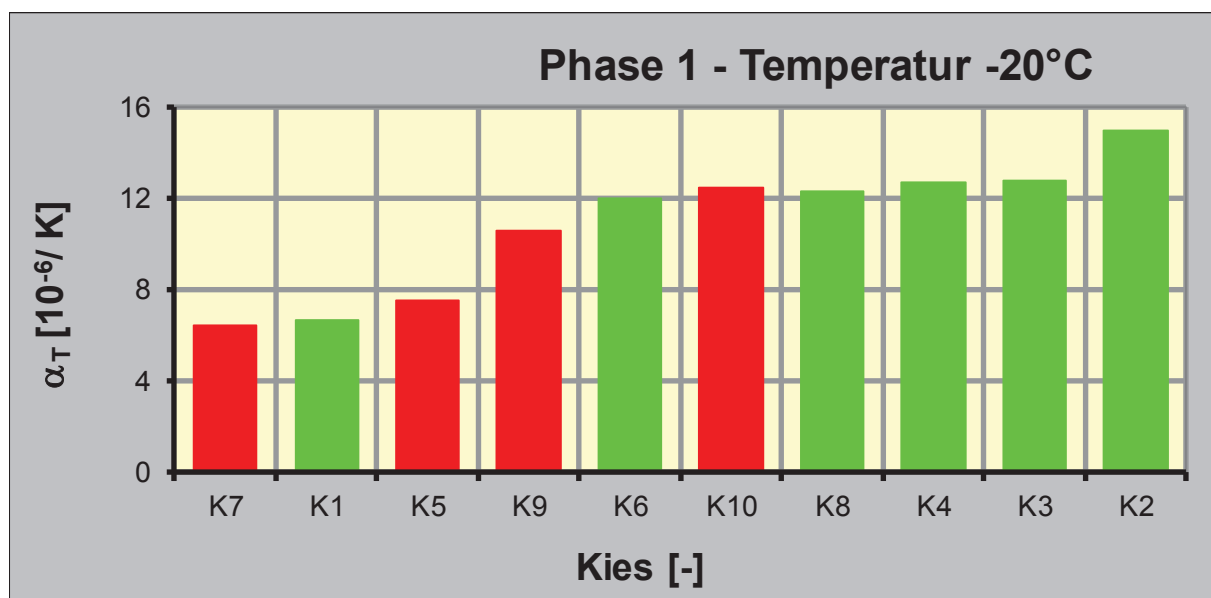


Abb. 28: gewichteter mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für alle Kiese bei -20°C

Nach Abschluss der Phase I wurde die Anzahl der Festgesteine und der Kiese auf Grundlage der Ergebnisse der FSt 2 und der FSt 3 auf jeweils 6 Lieferwerke reduziert. Die Auswahl der 12 Gesteinskörnungen erfolgte unter der Maßgabe, dass die Ergebnisse in der Hauptuntersuchungsphase eine große Spreizung erwarten ließen und petrografisch unterschiedliche Gesteinskörnungen eingesetzt wurden. Auf Grund der geringeren Streuung der Einzelprüfungen und der besseren Wiederholpräzision wurden als entscheidendes Prüfkriterium die Ergebnisse aus dem Frost-Tausalz-Versuch (Dosenfrost) herangezogen.

Auf der Basis dieser im Betreuungsausschuss definierten Maßgaben wurden folgende Gesteinskörnungen ausgewählt:

- Festgesteine: N17, N12, N11, N15, N22 und N19
- Kiese: K3, K4, K5, K6, K8 und K9

Die Abb. 29 bis Abb. 32 zeigen die Ergebnisse der linearen Wärmedehnung reduziert auf die Gesteinskörnungen der Phasen II. Der Granit N17 weist von den Gesteinen, die den Frost-Tausalz-Versuch bestanden haben, mit $7,64 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ den geringsten α_T -Wert auf und wies bei

den Frostprüfungen an den Einzelkörnungen große Unterschiede bei den Abwitterungswerten auf. Der Quarzporphyr (Rhyolith) N12 zeigte bei -20°C mit dem Basalt N18 die höchste lineare Wärmedehnung und bei den Frostversuchen (FTW, MS) am Einzelkorn Ergebnisse in vergleichbarer Größenordnung. Der Basalt N11 enthält keinen Quarz und lieferte trotzdem hohe α_T -Werte und ein sehr gutes Frost-Tausalz-Verhalten. Demnach ist nicht nur das Mineral Quarz für hohe α_T -Werte verantwortlich.

Die Festgesteine mit einem α_T -Wert unter $7,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ überschritten das Abnahmekriterium des Frost-Tausalz-Versuchs. Es handelte sich um verschiedene Kalksteintypen. Während der Jurakalk N15 fast ausschließlich aus Calcit bestand, enthielt der Muschelkalk N22 neben Calcit noch Anteile, unter 10 M.-%, von Ankerit (eisenhaltiges Karbonat) und Quarz. Der Muschelkalk N19 war wie die anderen Kalksteine überwiegend karbonatisch aufgebaut, jedoch mit etwa hälftigen Anteilen aus Ankerit und Calcit.

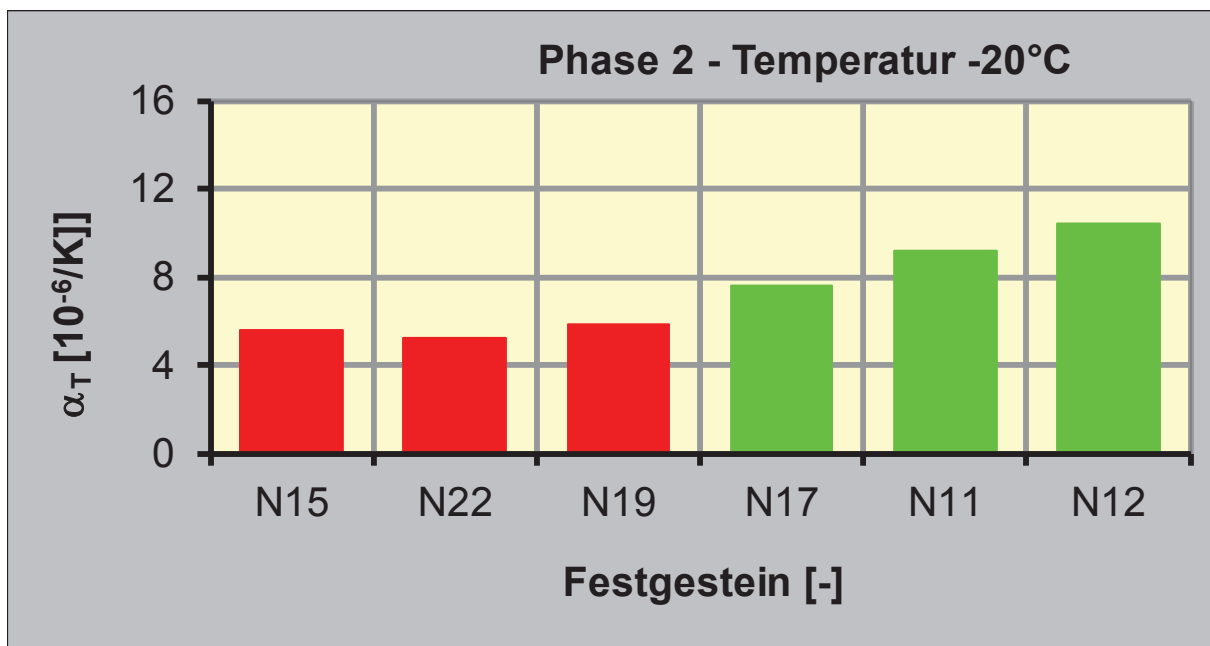


Abb. 29: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für die Festgesteine der Phase 2 bei -20°C

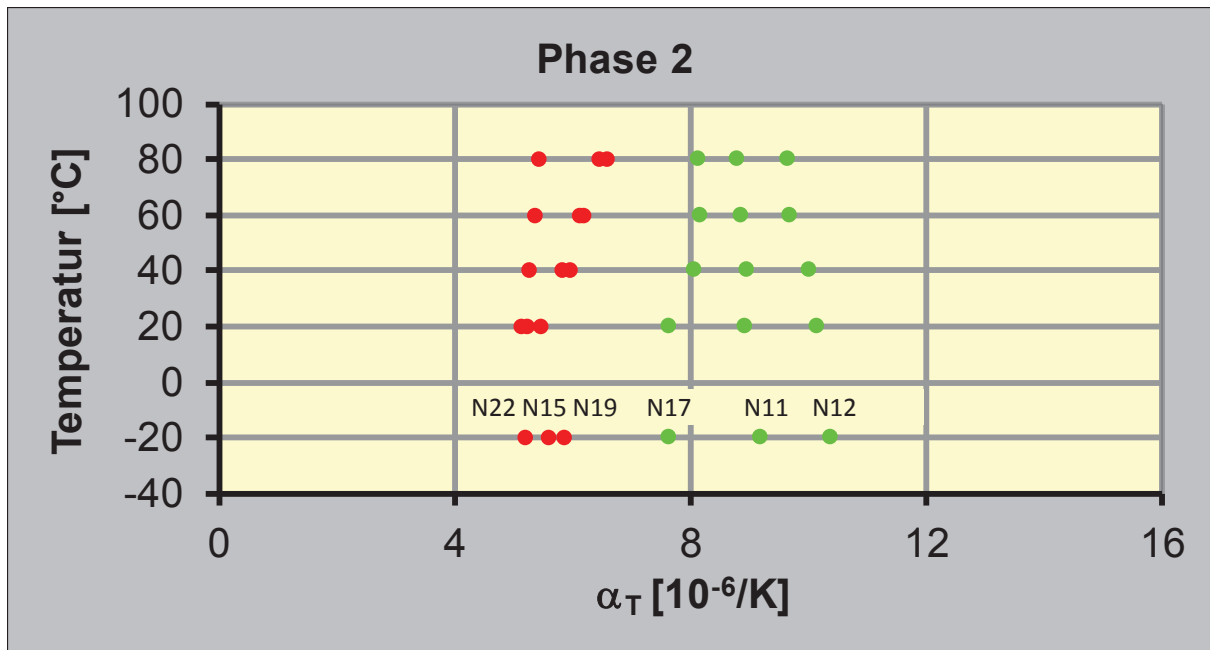


Abb. 30: grafische Darstellung des mittleren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Festgesteine der Phase 2 in Abhängigkeit der Temperatur

Bei den Kiesen sollte die gebrochene und die ungebrochene Variante des Rheinkieses (K3, K4) weiter untersucht werden. Diese zeigten ein gutes Frost-Tausalz-Verhalten und lieferten die zweithöchsten α_T -Werte. Der Saalekies K5 war bezüglich der hohen Kalkstein- und Quarzanteile aus petrografischer Sicht von besonderem Interesse. Die Kiese K6 und K8 enthalten hauptsächlich Quarz. Im Weserkies K6 steckt der Quarz hauptsächlich im Sandstein und im Tertiärkies K8 handelt es sich um monomineralische Quarzgesteine. Der Zorgekies lieferte hohe Abwitterungen in beiden Frostprüfverfahren (FTW, MS) und lies aufgrund der petrografischen Zusammensetzung einen grenzwertigen Frostwiderstand bei den Betonversuchen erwarten.

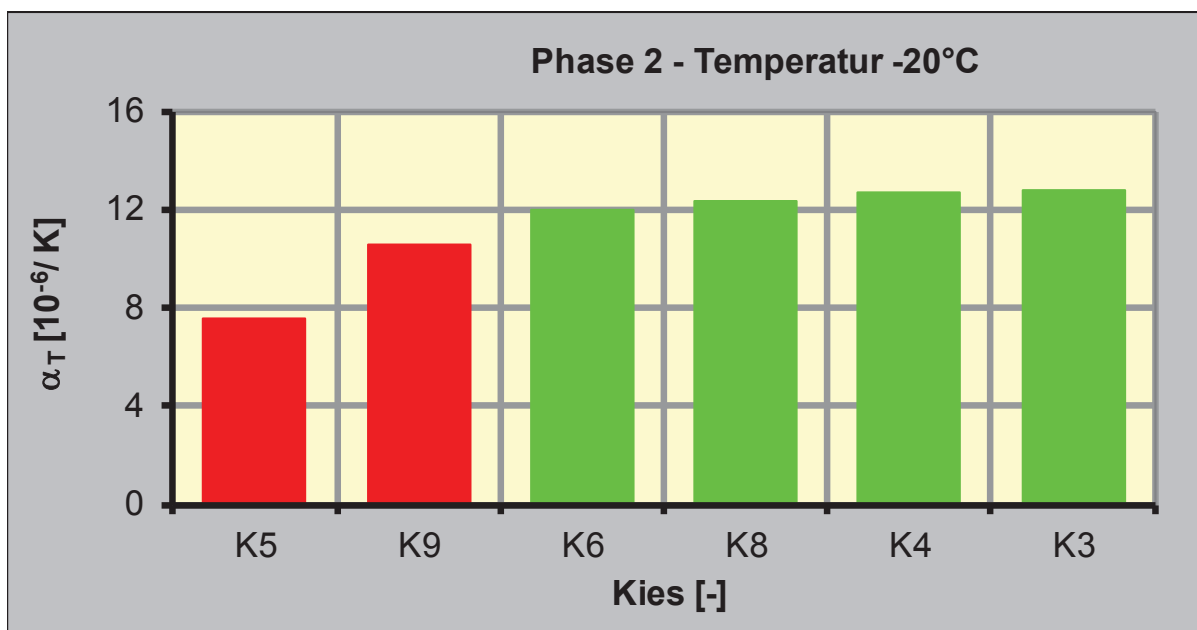


Abb. 31: gewichteter mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für die Kiese der Phase 2 bei -20°C

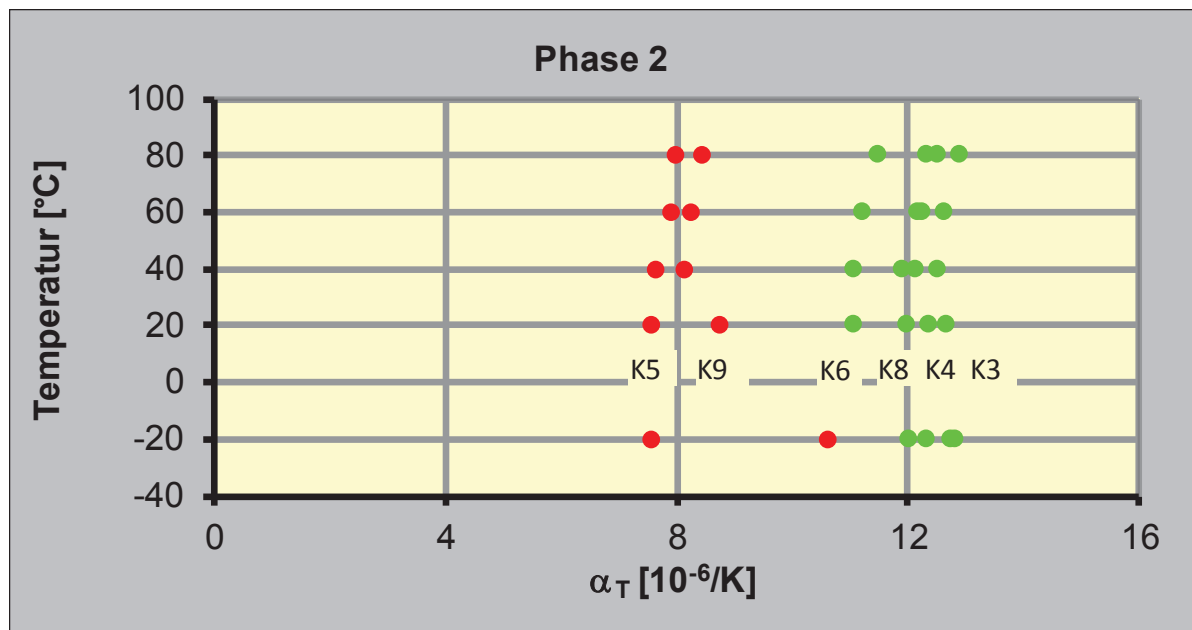


Abb. 32: grafische Darstellung des mittleren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für die Kiese der Phase 2 in Abhängigkeit der Temperatur

6.2 Phase II (Untersuchungen an 6 Festgesteinen und 6 Kiesen)

Petrografische Beschreibung der Ausgangsgesteine am Dünnschliff

Für die Beschreibung der Gefügemerkmale im Dünnschliff wurde ein Protokoll erstellt. Auf diese Art wurde eine Basis geschaffen, die Gesteinskörnungen auf gleiche Weise zu untersuchen und auszuwerten. In dem Protokoll wurde die Gesteinsart, Gefügemerkmale wie Textur-/Schichttyp, Mineralverteilung, Korngrößen der Minerale, Unregelmäßigkeiten wie Poren und Risse u.a. vermerkt. Die Untersuchung von Dünnschliffen erfolgte an den verbliebenen 6 Festgesteinen und 6 Kiesen. Die Protokolle sind im Anhang B zusammengestellt. Für die 6 Festgesteine (N11, N12, N15, N17, N19, N22) wurde jeweils 1 Dünnschliff von 4-5 Einzelkörnern präpariert. Bei den Kiesen erfolgte für jeden Hauptbestandteil die Anfertigung eines Dünnschliffpräparats i.d.R. mit 3-5 Einzelkörnern. In Einzelfällen, wie für die Kalksteine im Kies K5, wurden bis zu 9 Einzelkörner präpariert. Die Dünnschliffproben wurden, ebenso wie die Pulverpräparate der XRD, aus dem Sägeverschnitt der Dilatometerprismen hergestellt.

Die Abb. 33 bis Abb. 36 zeigen die Übersichtsaufnahme des Dünnschliffs und Mikroaufnahmen vom Gefüge des Basalts N11. Der Basalt weist das charakteristische porphyrische Gefüge eines recht frischen Vulkanits mit Einsprenglingen aus Augit und Olivin in einer feinkristallinen, teils amorphen Grundmasse auf. Punktuell sind Hohlräume in Form von Drusen zu finden, in die hauptsächlich Augite hineingewachsen sind. Weitere Unregelmäßigkeiten, wie Risse, sind nicht zu finden. Das Gefüge wirkt insgesamt sehr dicht. Neben Augit und Olivin sind im Gefüge Feldspäte zu finden. Die Mineralphasenzusammensetzung aus der XRD belegt das Vorhandensein von Augit und Olivin. Bei den Feldspäten handelt es sich um Albit, einen Natrium-Aluminium-Silikat.

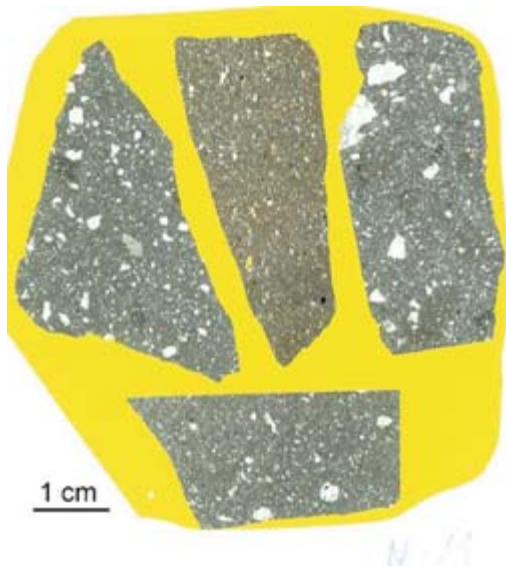


Abb. 33: Dünnschliffpräparat von Basalt N11



Abb. 34: N11, porphyrisches Basaltgefüge; einfach Pol.



Abb. 35: N11

porphyrisches Basaltgefüge mit Augiteinsprenglingen in einer teils amorphen Grundmasse; × Pol.

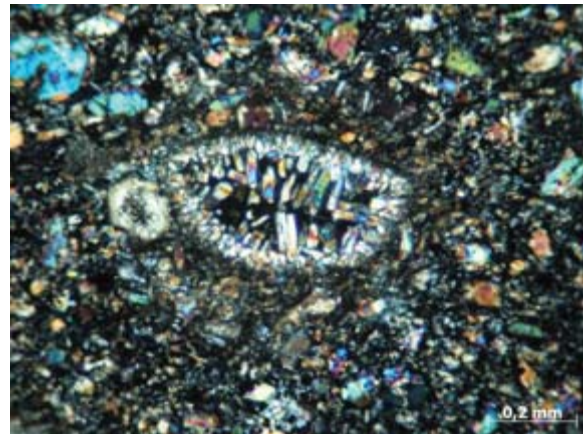


Abb. 36: N11

Detail aus Abb. 35 mit einer Druse im Basalt; × Pol.

Die Abb. 37 bis Abb. 40 zeigen die Übersichtsaufnahme des Dünnschliffs und Mikroaufnahmen vom Gefüge des Rhyoliths (alte Bez. Quarzporphyr) N12. Der Rhyolith weist eine feinkörnige Grundmasse aus Quarz, Feldspäten und Glimmer sowie amorphe Anteile auf. Es fehlen die für Rhyolith typischen Einsprenglingsminerale, die dem Rhyolith i.d.R. ein porphyrisches Gefüge verleihen. Derartige Rhyolithe laufen unter der Bezeichnung aphyrische Rhyolithe. Bei den Glimmern handelt es sich um Muskowit, der bei dem Verwitterungsprozess der Feldspäte durch Serizitisierung als feinschuppiges Mineral auf den Feldspatoberflächen gebildet wurde. Darüber hinaus zeigt die Grundmasse eine schwache Fließstruktur. Im Gefüge traten vereinzelt Mikrorisse auf. Poren, Hohlräume oder andere Unregelmäßigkeiten lagen nicht vor.



Abb. 37: Dünnschliffpräparat des Rhyoliths N12

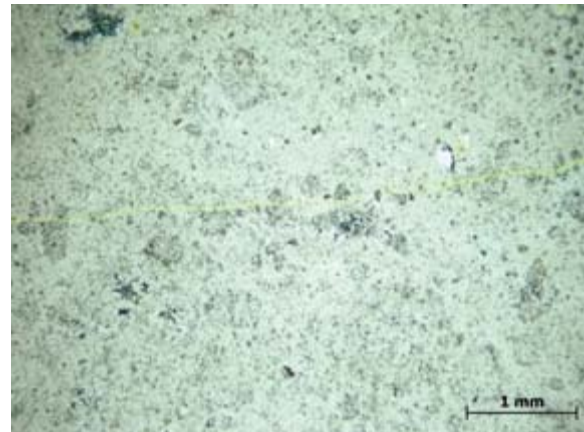


Abb. 38: N12, Mikroriss im Rhyolithgefüge; einfach Pol.

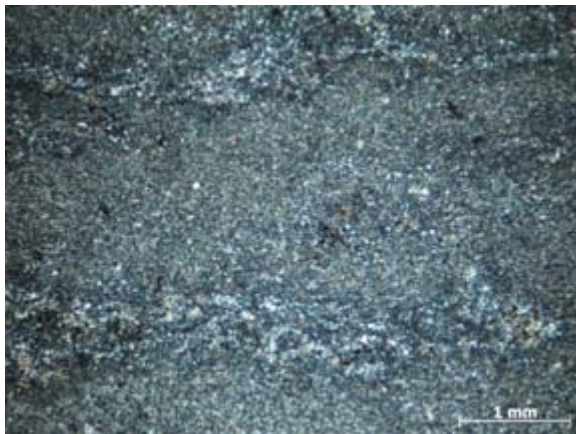


Abb. 39: N12

Rhyolith mit schwacher Fließtextur und ohne Einsprenglingsminerale; × Pol.



Abb. 40: N12

Bildmitte mit beginnender Verwitterung der Feldspäte durch Serizitisierung; × Pol.

Der Jurakalk N15 lässt sich in 3 Typen unterteilen. Der Typ A zeigt ein sehr dichtes Gefüge mit Schalenresten von Mikroorganismen. Der Typ B weist Hohlräume auf, die durch Calcitwachstum teilweise wieder komplett gefüllt sind. Als Folge der Sedimentation mit wechselnden Lagen von Hämatit und Calcit zeigt der Typ C eine deutliche Schichtstruktur. Bei den Typen A und B sind die bestehenden Sedimentstrukturen durch starke Umkristallisierung fast vollständig verwischt. Die Korngrenzen sind gelappt und daher im Polarisationsmikroskop nicht erkennbar. Teilweise treten Nester des ehemals dichten, feinkörnigen Gesteins auf.

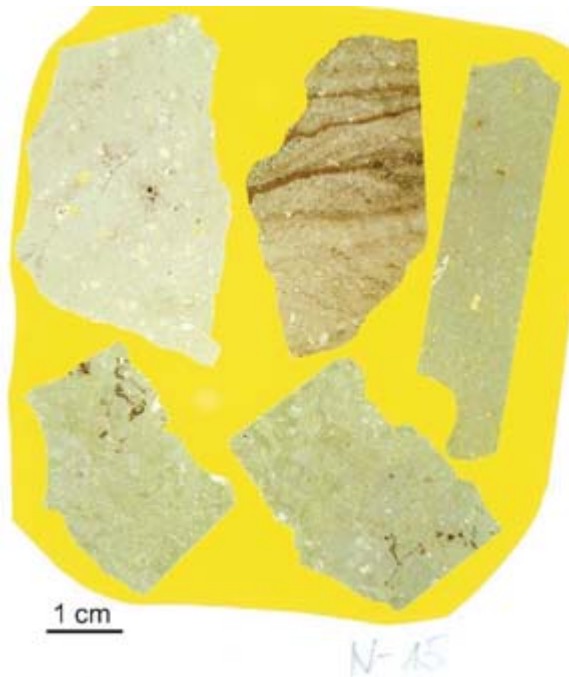


Abb. 41: Dünnschliffpräparat des Jurakalks N15



Abb. 42: N15

dichte und feinadrige Hämatitlage zwischen Calcit-schichten; × Pol.



Abb. 43: N15

Kalksteinvarietät mit Schalenresten von Mikroorganismen, kleineren Hohlräumen und Nestern von feinkörnigem dichtem karbonatischem Material; einfach Pol.

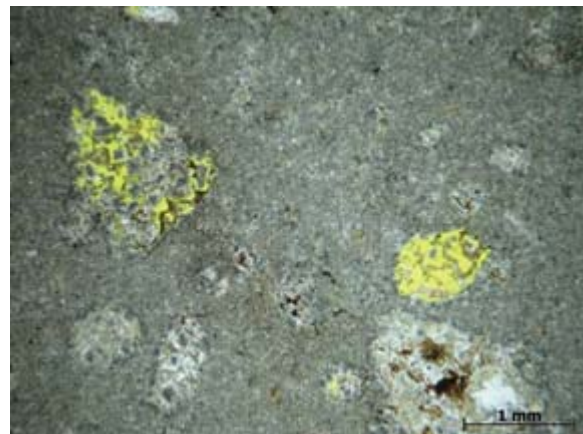


Abb. 44: N15

Hohlräume im Kalkstein, teilw. mit Calcitkristallen gefüllt; einfach Pol.

Der Granit N17 weist als Plutonit ein grobkörniges mosaikartiges Gefüge aus Quarz, Alkali-feldspat, Plagioklas und Hellglimmer auf. Die Mineralkörner zeigen meist eine kompakte Kornform, teilweise sind die Quarze gestreckt. Die Korngrenzen der Quarze sind eckig bis schwach suturiert. Bei Drehung des Objektisches ist eine schwache undulöse Auslöschung der Quarze erkennbar, die als Hinweis auf eine mäßig schwache metamorphe Überprägung der Quarze gilt. Die Plagioklase treten meist verzwillingt auf und zeigen deutliche Verwitterungsspuren durch den Prozess der Serizitisierung. Weitere Auffälligkeiten sind Poren, Mikrorisse und -klüfte.



Abb. 45: Dünnschliffpräparat des Granits N17

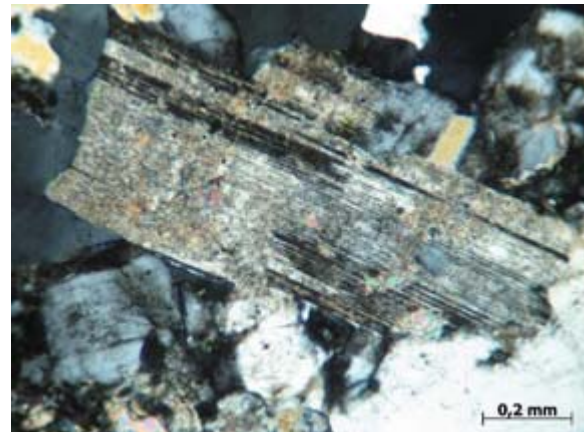


Abb. 46: N17, serizitisierter Plagioklas; \times Pol.



Abb. 47: N17

Mikrokluft im Granitgefüge, Bild rechts mit schwach undulös auslöschenden Quarzen neben Hellglimmer und verzwillingten serizitisierten Plagioklas; li: einfach Pol, re: \times Pol.

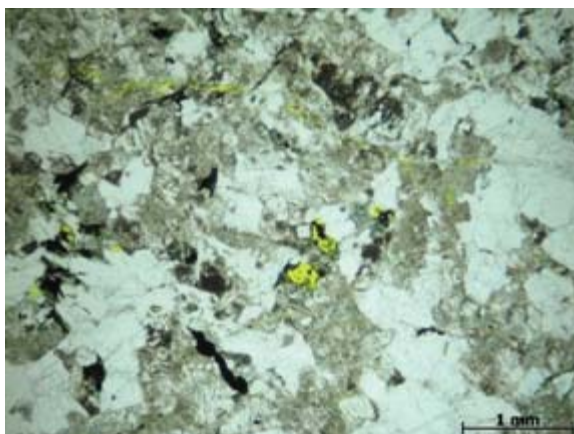
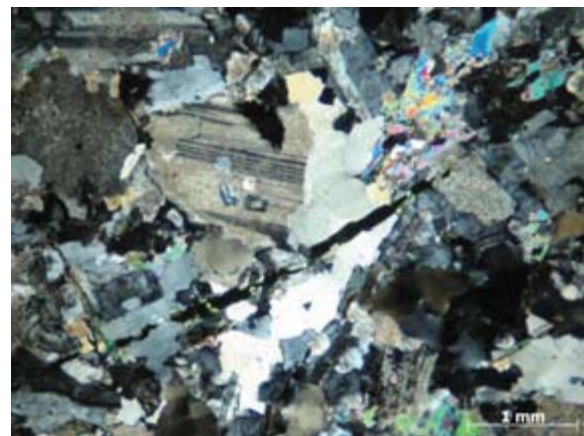


Abb. 48: N17

Poren und Mikroriss im Granitgefüge; einfach Pol.

Der Muschelkalk N19 lässt sich wie N15 in 3 Typen unterteilen, jedoch mit anderen Gefügemerkmalen. Der Typ A zeigt ein sehr dichtes feinkörniges Gefüge, bei dem die Korngrenzen kaum zu erkennen waren. Im Gefüge dieser dichten Kalksteine wurden z.T. Fossilreste von Schneckenhäusern und Muschelschalen gefunden. Der Typ B weist Bereiche mit feinkristallinem Quarz auf, die durch Verkiezelung karbonatischer Bestandteile entstanden.

Der Typ C kennzeichnete sich durch Schichtwechsel von karbonatischen und ferritischen Lagen aus. Punktuell wurden Poren im Kalksteingefüge gefunden, Risse jedoch nicht.



Abb. 49: Dünnschliffpräparat des Muschelkalks N19

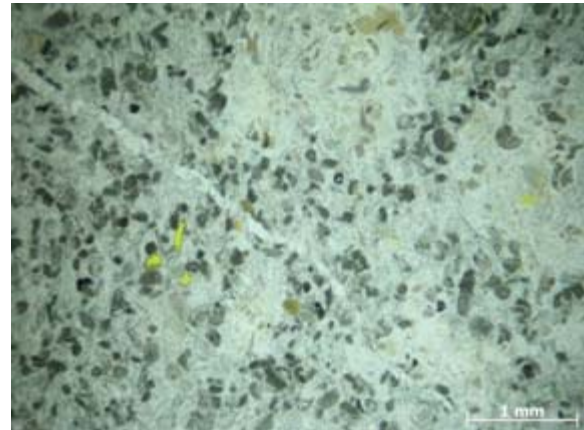


Abb. 50: N19, Kalkstein mit vereinzelt Poren; einfach Pol.

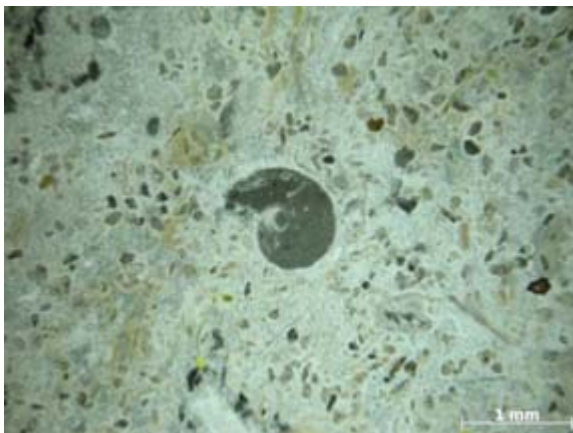


Abb. 51: N19

Kalkstein mit Fossilführung; einfach Pol.

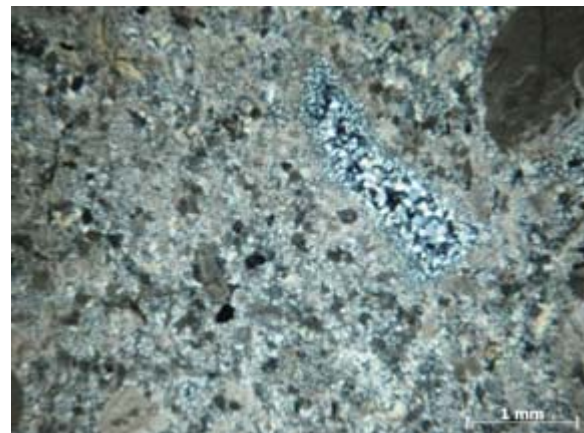


Abb. 52: N19

Kalkstein mit feinkörnigen Quarznestern; × Pol.



Abb. 53: N19

Ferritische Kalksteinvariante mit deutlicher Feinschichtung; einfach Pol.

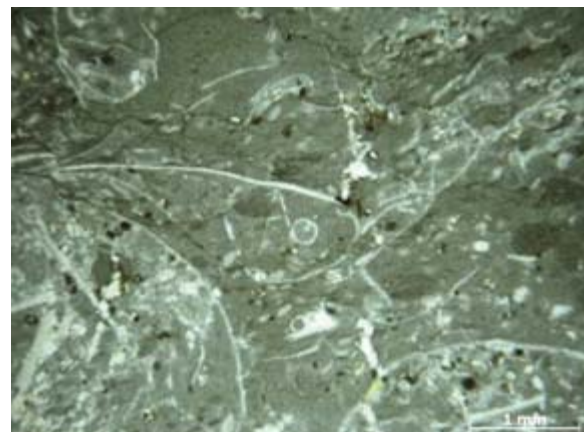


Abb. 54: N19

Dichte Kalksteinvariante ohne erkennbare Schichtung im Mikrobereich, die Schalenreste von Mikroorganismen enthält; einfach Pol.

Für den Muschelkalk N22 lassen sich ebenfalls 3 verschiedene Varietäten unterscheiden. Die 3 Typen zeigen ein sehr dichtes sowie poren- und rissfreies Gefüge. Der Typ A ist ein Kalkstein mit Resten von Mikroorganismen und einer schwachen Schichtung durch feine Ankeritlagen. Die zweite Variante enthält grobe Reste von Mikroorganismen sowie fein- bis mittelkörnige Calcitaggregate. Bei Typ C handelt es sich um einen Kalk mit großkörnigen Calcitstrukturen in einem feinkörnigen karbonatischen Bindemittel.



Abb. 55: Dünnschliffpräparat des Muschelkalks N22

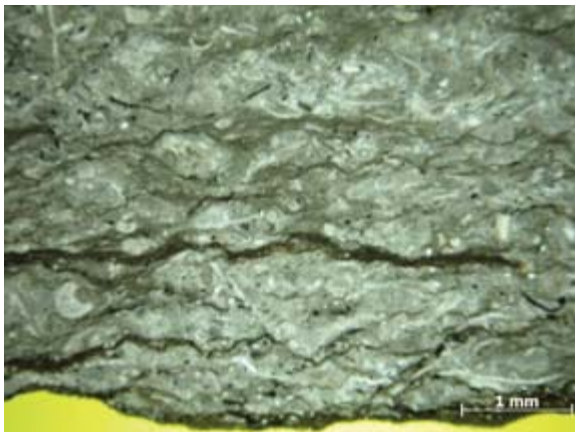


Abb. 56: N22

Dichte Kalksteinvariante mit Resten von Mikroorganismen und Feinschichtung durch Ankeritlagen; einfach Pol.

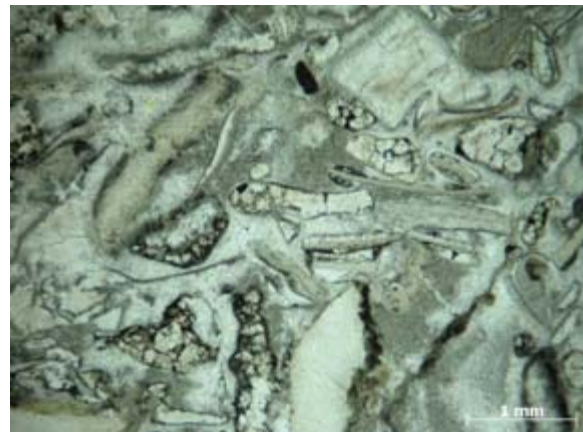


Abb. 57: N22

dichter Kalkstein mit groben Resten von Mikroorganismen; einfach Pol.

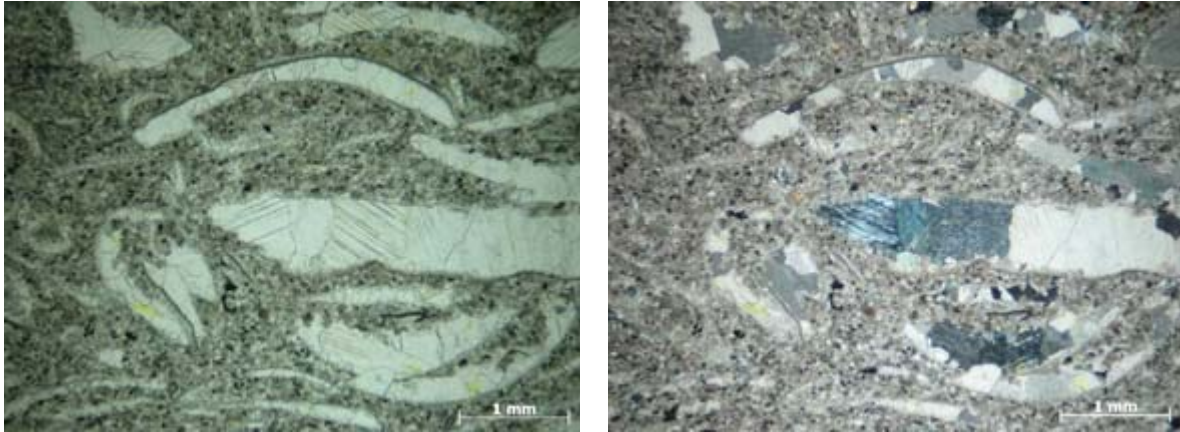


Abb. 58: N22

dichter, feinkörniger Kalkstein mit feinverteilten Kohlenstoffprodukten sowie Gänge aus groß kristallisierten Calcitkörnern (Calcitgänge = Marmor ähnlich); li: einfach Pol., re.: \times Pol.

Der Niederrheinkies K3 setzt sich nach der petrographischen Bestimmung der Einzelkomponenten hauptsächlich aus Quarz, Quarzit und Grauwacke zusammen. Von diesen Komponenten wurden Dünnschliffpräparate angefertigt, s. Abb. 59. Wie im Abschnitt 5.2 beschrieben, wurden die Präparate mit einem gelben Epoxidharz getränkt und damit Hohlräume und Risse gelb dargestellt. Bereits in der Übersichtsaufnahme des Dünnschliffpräparates der Quarzkörner sind diverse Hohlräume erkennbar, s. Abb. 59. Die Mikroaufnahmen der Quarzkörner zeigen verschiedene Quarztypen. In der Abb. 60 weist der Quarz eine klare Textur des Gefüges auf, einhergehend mit einer undulösen Auslöschung der Quarzsubkörner. Diese optischen Gefügeeigenschaften resultieren aus einer tektonischen Beanspruchung der Quarze, die in [15] ausführlich untersucht und beschrieben wurden. Die Abb. 61 lässt einen tektonisch weniger beanspruchten Quarz erkennen. Das Gefüge zeigt Quarzsubkörner mit glatten Korngrenzen und einer schwachen undulösen Auslöschung ohne erkennbare Textur. Einen Zusammenhang zwischen diesen Gefügeunterschieden und der im Abschnitt 6.1 ermittelten linearen Wärmedehnung ist nicht feststellbar. Die α_T -Werte der Quarze aus Kies K3 wiesen vergleichsweise geringe Standardabweichungen auf und der Variationskoeffizient lag bei ca. 5 %. Dagegen lieferten Sedimentgesteine, wie Grauwacken und einige Quarzite (metamorph überprägte Sandsteine) aufgrund ihrer Genese durch Ablagerung etwas höhere Standardabweichungen. Die Variationskoeffizienten von α_T lagen deutlich über 5 % und meist knapp unter 10 %.



Abb. 59: Dünnschliffpräparate des Kiese K3

li.: poröse Quarzkörner; Mitte und re: Quarzit und Grauwacke

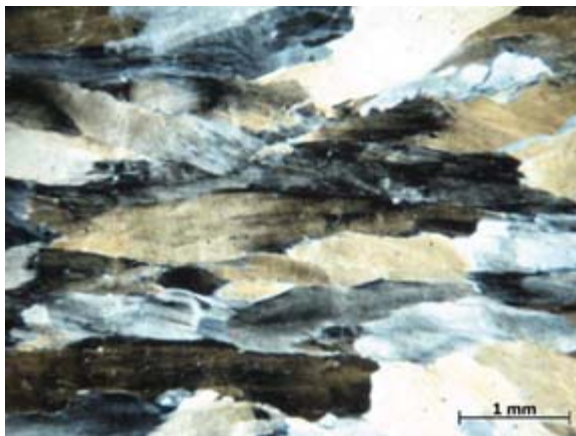


Abb. 60: K3-Q

Metamorph überprägtes Quarzgefüge mit texturierten und undulös auslöschenden Quarzsubkörnern; × Pol.

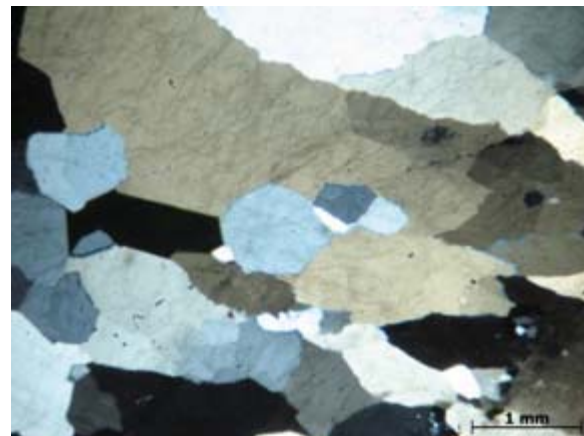


Abb. 61: K3-Q

Quarzgefüge mit geraden Subkorn Grenzen und schwacher undulöser Auslöschung; × Pol.

Die Grauwacken und Quarzite sind deutlich feinkörniger als die Quarzkiesel. Während die Grauwacken von Tonmineraladern durchzogen sind und fein verteilt Quarznester enthalten, sind die Quarzite deutlich homogener in der Mineralzusammensetzung und der Gefügeausbildung. Jedoch enthalten die Quarzite punktuell opake Mineralphasen, bei denen es sich aufgrund des quadratischen Habituses um Pyrit handeln könnte. Daneben weisen die Quarzite Mikrorisse auf, die an Mineralkorngrenzen entlang verlaufen. Poren sind im Quarzitgefüge ebenfalls zu finden.

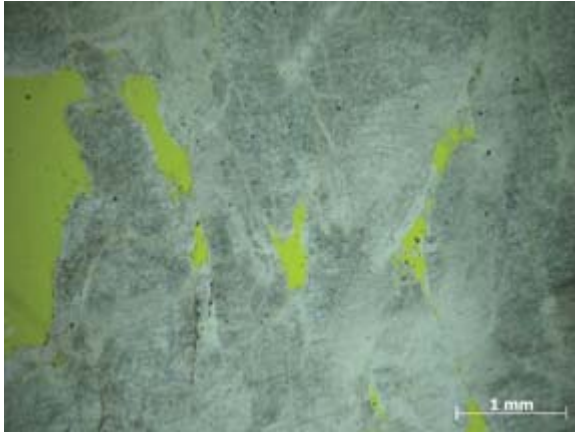


Abb. 62: K3-Q

Hohlräume im Quarzgefüge; einfach Pol.

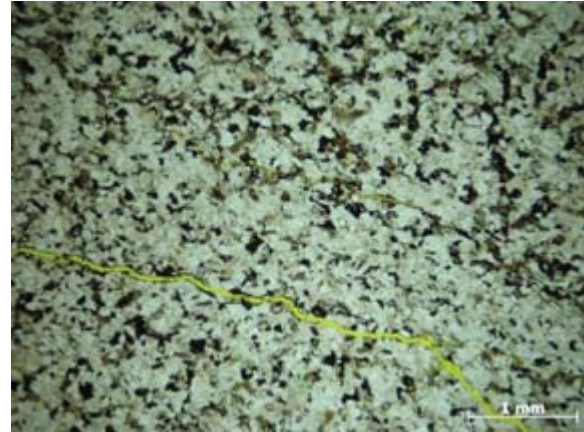


Abb. 63: K3-Qt

Risse im Quarzit mit feinverteiltem Pyrit im Gefüge; einfach Pol.

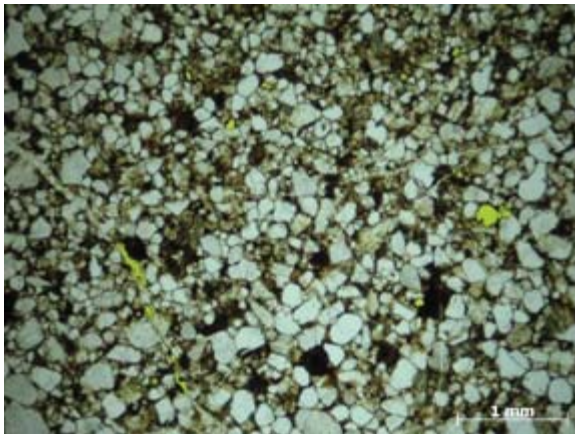


Abb. 64: K3-Qt

Poren und Mikrorisse im mittelkörnigen Quarzitgefüge; einfach Pol.



Abb. 65: K3-Qt

Feinkörniges Quarzitgefüge; × Pol.

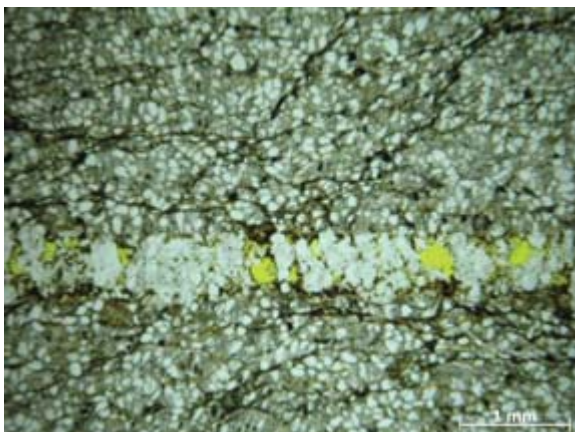
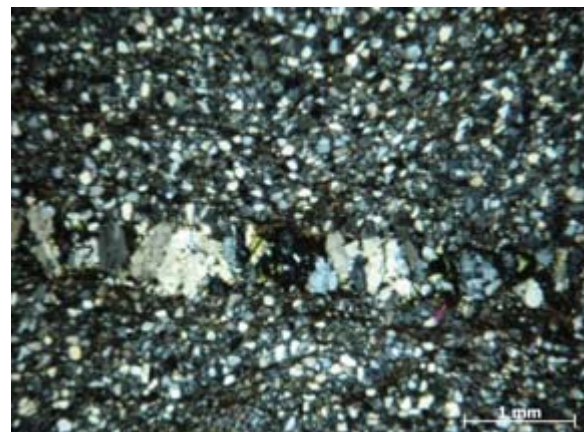


Abb. 66: K3-Gw

Grauwackekorn mit einem Quarzgang und Tonmineraladern im Gefüge, der Quarzgang enthält Hohlräume; li.: einfach Pol., re.: × Pol.



Beim Kies K4 handelt es sich um die gebrochene Variante des Kieses K3. Die wesentlichen Strukturen der Quarze und Quarzite sind denen von K3 vergleichbar, s. Abb. 68 und Abb. 69.

Grauwacken wurden nicht präpariert. Risse in den Quarziten traten nicht auf. Möglicherweise wurden die Risse bei der Aufbereitung der Gesteinskörnung (Brechvorgang) freigelegt. Das Quarzgefüge zeigt hier deutlichere Spuren eines metamorph überprägten Sandsteins. Teilweise sind noch viele Hohlräume vorhanden, andere wurden bereits durch Quarzwachstum geschlossen, s. Abb. 70. Neben Quarz und Quarzit sind Flint und Kieseliefer präpariert worden. Diese zeigen ein kryptokristallines Gefüge. Die Kornformen und -grenzen sind im Polarisationsmikroskop nicht auflösbar. Die Kieseliefer enthalten Radiolarien (Strahlentierchen), s. Abb. 72. Daraus resultiert auch der Begriff Radiolarit, wie Kieseliefer fachlich korrekt genannt werden.



Abb. 67: Dünnschliffpräparat des Kiese K4



Abb. 68: K4

grobkörniges Quarzgefüge mit eckigen Korngrenzen;
 × Pol.

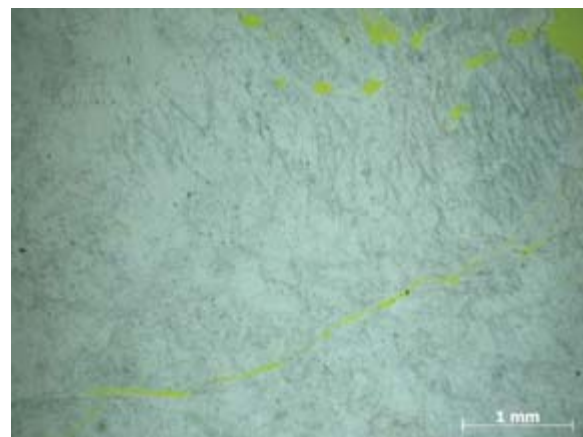


Abb. 69: K4

Risse und Poren im Gefüge; II Pol

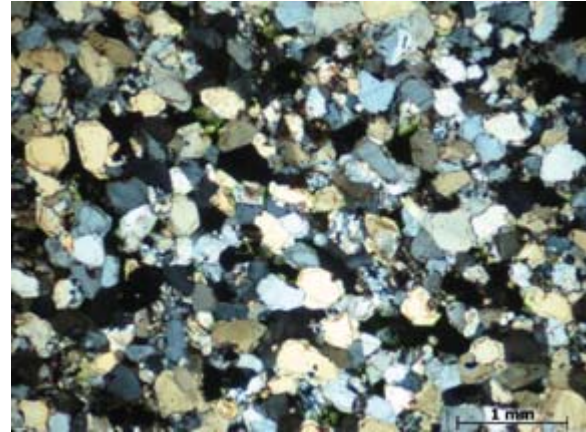
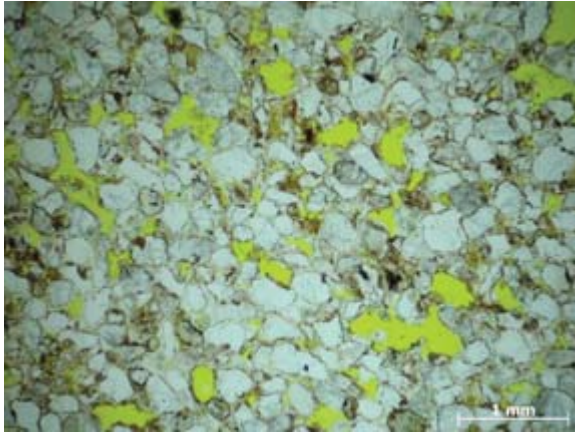


Abb. 70: K4

Quarzit mit punktkontaktgestütztem Gefüge und Anwachssäumen an einzelnen Quarzkörnern; li.: einfach Pol., re.: x Pol.

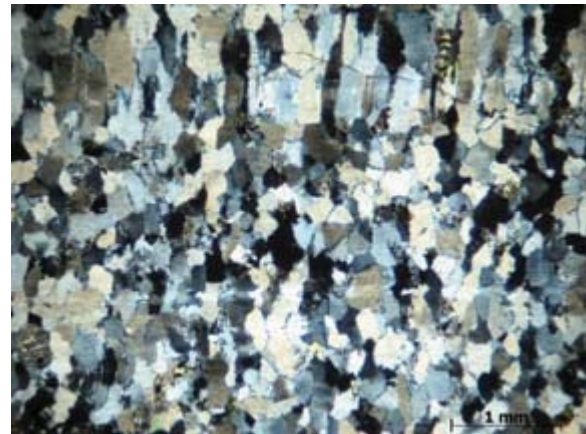
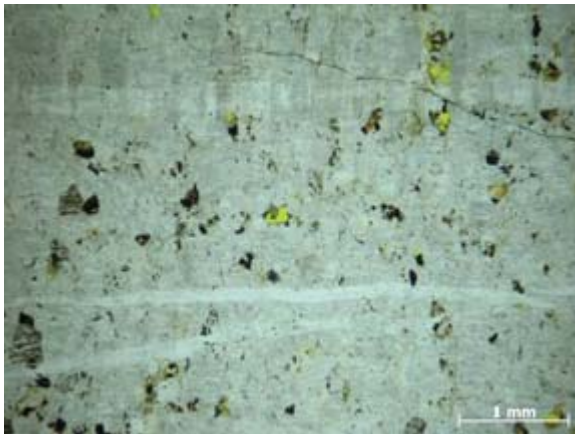


Abb. 71: K4

Schiefriger Quarzit mit schwacher Texturierung des Gefüges und vereinzelt Poren; li.: einfach Pol., re.: x Pol.



Abb. 72: K4

Kieselschiefer (Radiolarit) mit kryptokristallinem Gefüge und schichtige Ablagerung von Radiolarien; li.: einfach Pol., re.: x Pol.

Der Kies K5 enthält als Hauptbestandteile Kalkstein und Quarz. Die Kalksteine zeigen sehr unterschiedliche Gefügestrukturen, die auch in der Dünnschliffübersicht, s. Abb. 73, bereits erkennbar sind. Die Kalksteinvarianten lassen sich in 3 Typen unterteilen. Zum einen liegen

Kalksteine mit einem sehr dichten feinkörnigen Gefüge vor, ohne Poren, Hohlräume und Risse. Zum anderen treten poröse Kalksteine mit fossilen Mikroorganismen auf. Darüber hinaus sind als dritte Variante wiederum dichte Kalksteine mit organischen Bestandteilen zu finden. Alle drei Varianten zeigen keine ausgeprägte Schichtung.

Die Quarze sind teilweise porös und weisen punktuell eine deutliche Mikrorissbildung auf. Die Mikroaufnahmen der Quarzkörner zeigen Quarzsubkörner mit einer deutlichen undulösen Auslöschung. Teilweise sind die Quarzsubkörner in eine Richtung gestreckt und verleihen dem Gefüge eine texturierte Erscheinung. Die undulöse Auslöschung und die Textur des Gefüges sind Hinweise auf eine tektonische Beanspruchung der Quarze. Die gefundenen Mikrorisse verlaufen an den Subkorn Grenzen der Quarze entlang. Poren und Risse als Gefügeeigenschaften könnten auch die Ursache sein, dass die lineare Wärmedehnung der Quarze von K5 niedrigere α_T -Werte lieferte als die Quarze aus K2. Auch die höhere Standardabweichung und die Variationskoeffizienten knapp unter 20 % deuten darauf hin.

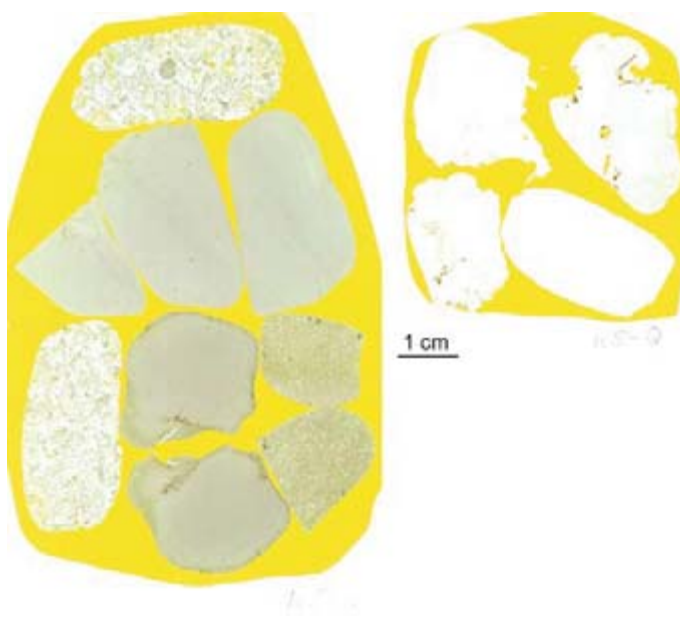


Abb. 73: Dünnschliffpräparat des Kiese K5

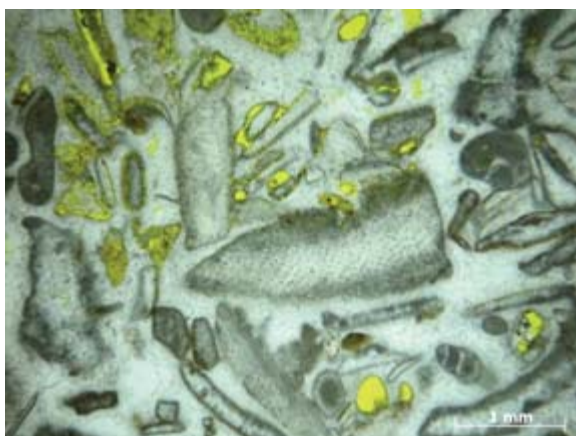


Abb. 74: K5-KS

Kalkstein mit vergleichsweise großen fossilen Bestandteilen und ausgeprägter Porosität; einfach Pol.



Abb. 75: K5-KS

Dichter, feinkörniger (kryptokristalliner) Kalkstein, frei von Poren und Rissen; einfach Pol.

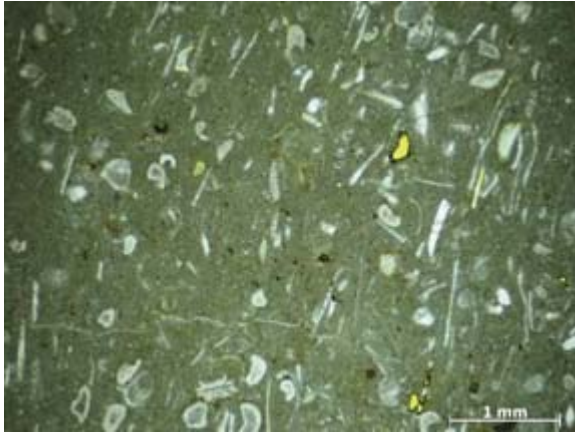


Abb. 76: K5-KS

Kalkstein mit fossilen Bestandteilen und vereinzelt Poren; einfach Pol.

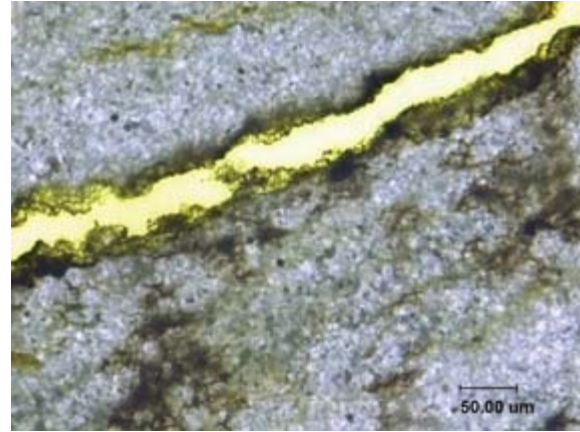


Abb. 77: K5-KS

Gerissener Kalkstein mit bräunlichen Lagen an den Rissflanken (vermtl. eisenhaltige Phasen); einfach Pol.

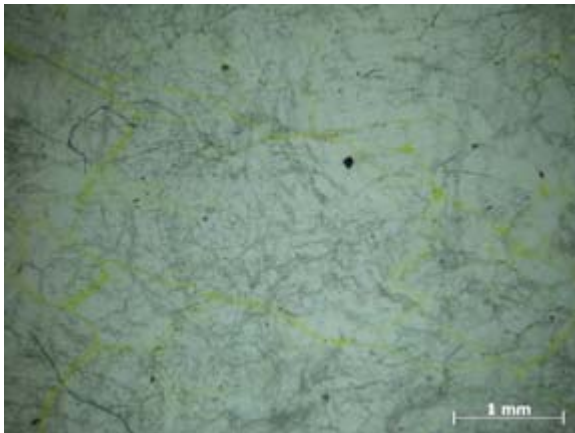


Abb. 78: K5-Q

fein verteilte Risse im grobkörnigen Quarzgefüge mit eckigen bis suturierten Korngrenzen und deutlich undulöser Auslöschung der Quarzsubkörner; links: II Pol., rechts: × Pol.

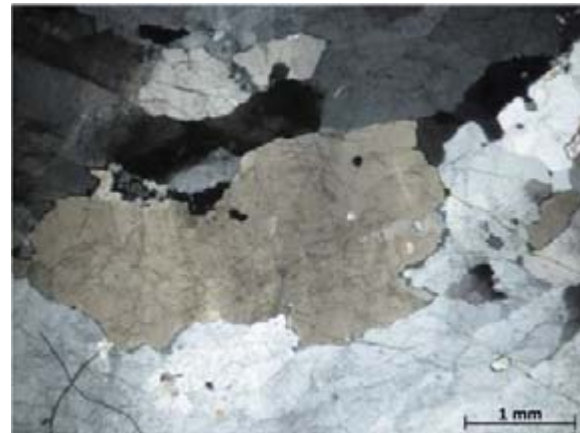


Abb. 79: K5-Q

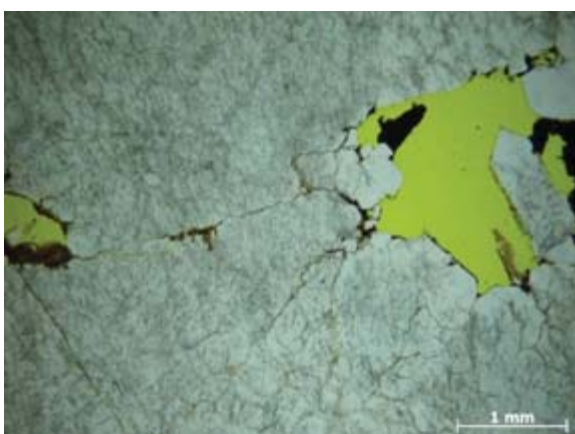


Abb. 80: K5-Q

punktuell liegen Hohlräume im Quarzgefüge vor; einfach Pol.

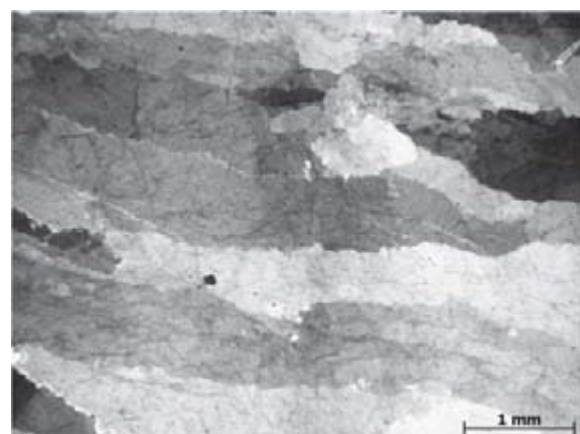


Abb. 81: K5-Q

ausgeprägte Textur des Quarzgefüges infolge Druck- u. Temperaturbelastung und undulöser Auslöschung der Quarzsubkörner; × Pol.

Die Abb. 82 zeigt die präparierten Sandsteine von Kies K6. Bei zwei Gesteinskörnern ist eine mehr oder weniger deutliche Feinschichtung zu erkennen, die durch Tonmineraleinlagerungen

verursacht wurde, s. auch Abb. 83. Diese Sandsteine sind zudem deutlich feinkörniger als die anderen drei Sandsteine. Darüber hinaus weisen die gröber körnigen Sandsteine ein offenporiges Gefüge auf, s. Abb. 84. In dem Zusammenhang wird von einem durch Punktkontakt gestütztem Gefüge gesprochen. Ein Einfluss auf die ermittelten α_T -Werte lässt sich hier jedoch nicht ableiten. Während die Sedimente (Grauwacke) bei den Kiesen K3 und K4 Variationskoeffizienten knapp unter 10 % lieferten, lagen die Werte für den Sandstein von K6 unter 5 %.



Abb. 82: Dünnschliffpräparat des Kiese K6

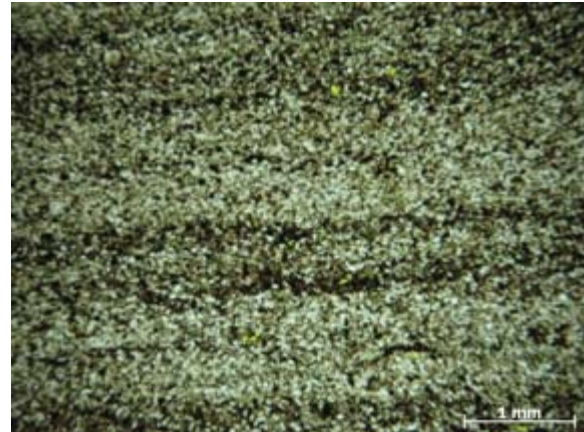


Abb. 83: K6-S, dichter, feinkörniger Sandstein mit ebener Feinschichtung; einfach Pol.

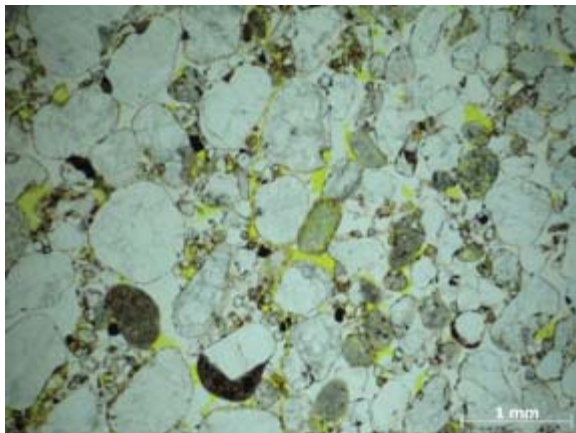
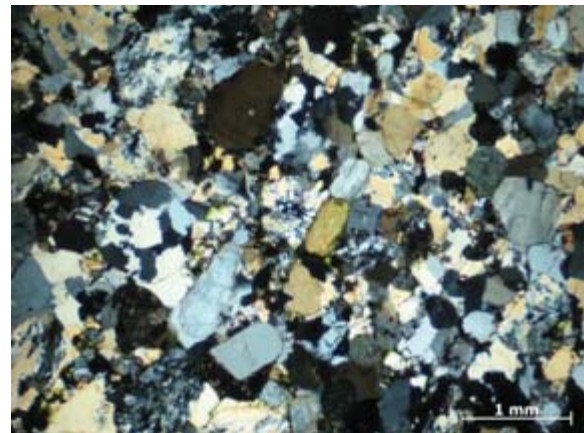


Abb. 84: K6-S



offenporiges, grobkörniges Sandsteingefüge; links: einfach Pol., rechts: \times Pol.

Der Kies K8 ist mit 86 M.-% Quarz ein fast reiner Quarzkies. Die Quarzkörner weisen verschiedene Merkmale auf, die durch Druck- und Temperatureinwirkung hervorgerufen wurden und damit Hinweise auf tektonische Beanspruchung der Quarze sind, s. Abb. 86. Es treten aber auch Rekristallisationen an den Korngrenzen der Quarzsubkörner auf, s. Abb. 88, die auf eine Entspannung des Gefüges hindeuten. Andere Gefügebereiche zeigen keine Hinweise auf eine tektonische Beanspruchung, s. Abb. 87. Hier sind die Subkorngrenzen gerade. Es tritt keine undulöse Auslöschung auf und die Kornformen sind eher kompakt und nicht gestreckt. Die Variationskoeffizienten der α_T -Werte lagen zwischen 2 % und knapp unter 9 %. Vermutlich resultieren die Abweichungen eher aus dem teilweise porigen und rissigen Gefüge als aus der Mikrostruktur der Quarze, s. Abb. 89.



Abb. 85: Dünnschliffpräparat des Kiese K8

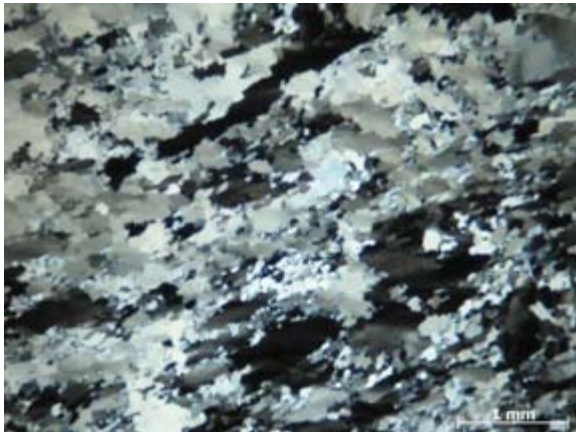


Abb. 86: K8-Q

leicht texturiertes Quarzgefüge mit Rekristallisationen an den Subkorgrenzen; × Pol.

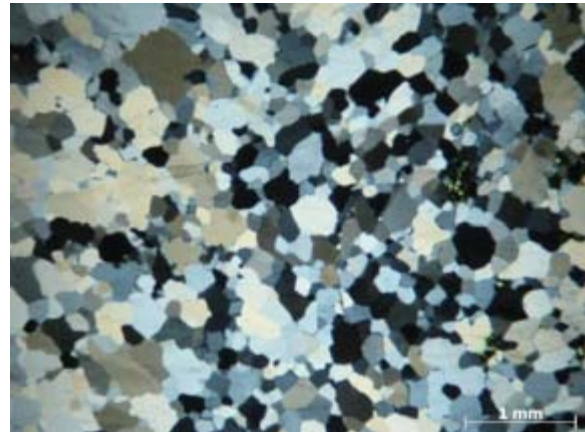


Abb. 87: K8-Q

ungestresste Quarzsubkörner mit mittel- bis grobkörnigem Gefüge; × Pol.

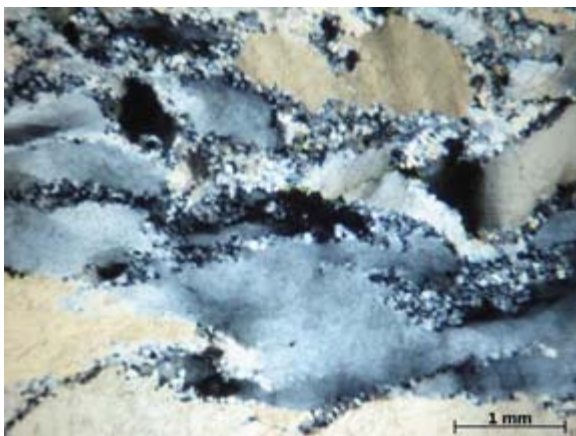


Abb. 88: K8-Q

Quarzgefüge mit starker undulöser Auslöschung der Quarzsubkörner und Rekristallisationen an den Subkorgrenzen; × Pol.

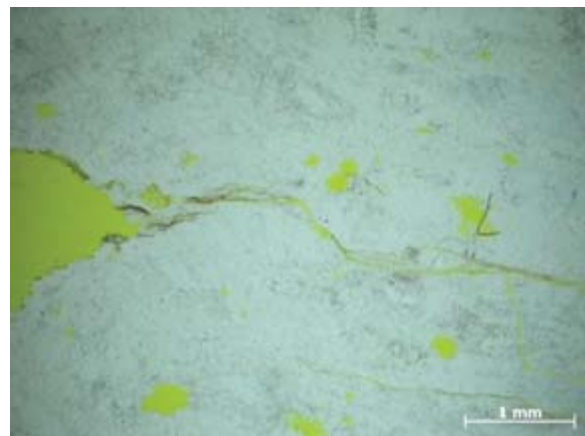


Abb. 89: K8-Q

Risse und Hohlräume im Quarzgefüge; einfach Pol.

Die Abb. 90 enthält die präparierten Gesteinskörner der Hauptbestandteile Grauwacke, Quarzporphyr (Rhyolith) und schiefriger Quarzit aus dem Kies K9. Die Grauwacken weisen ein sehr grobkörniges Gefüge auf und enthalten Quarz, Feldspat, Gesteinsbruchstücke und Bereiche mit feinkristallinem Quarz. Die Bestandteile stammen von verschiedenen Ausgangsgesteinen. In dem Zusammenhang fällt oft der Begriff polymiktes Gefüge. Verbunden sind die Bestandteile durch ein tonig hämatitreiches Bindemittel. Die Grauwacken lieferten mit ca. $10 \cdot 10^{-6}/K$ vergleichsweise hohe α_T -Werte.

Die Rhyolithe zeigen als Vulkanite das klassisch porphyrische Gefüge aus Einsprenglingsmineralen in einer fein- bis grobkristallinen Grundmasse. Bei den Einsprenglingsmineralen handelt es sich überwiegend um Feldspäte (Orthoklas, Plagioklas), Pyroxen und partiell Quarz. Die Rhyolithe sind stark verwittert. Die Feldspateinsprenglinge sind durch Serizitierung getrübt, die Pyroxene umgewandelt in Chlorit, Hämatit und Rutil. Durch die Verwitterungsprozesse wurden Bestandteile herausgelöst und hinterließen Fehlstellen im Gefüge. Daraus resultiert eine gewisse Porosität. Weiterhin treten Mikrorisse im Gefüge auf. Die α_T -Werte lagen knapp unter $8 \cdot 10^{-6}/K$

Bei den makroskopisch bestimmten schiefrigen Quarziten handelt es sich eher um feinkörnige Grauwacken, die von Quarzgängen durchzogen sind, um Kieselschiefer mit gröberkörnigen Quarzbereichen und Quarzgängen sowie um verwitterten Diabas mit Quarzaggregaten durch Mineralumbildung während der Alteration. Die Bestimmung der linearen Wärmedehnung gestaltete sich schwierig, da die Prismen oft an den Quarzgängen gebrochen sind. Daher sind die α_T -Werte zwischen $4 \cdot 10^{-6}/K$ und $9 \cdot 10^{-6}/K$ nur bedingt verwertbar.

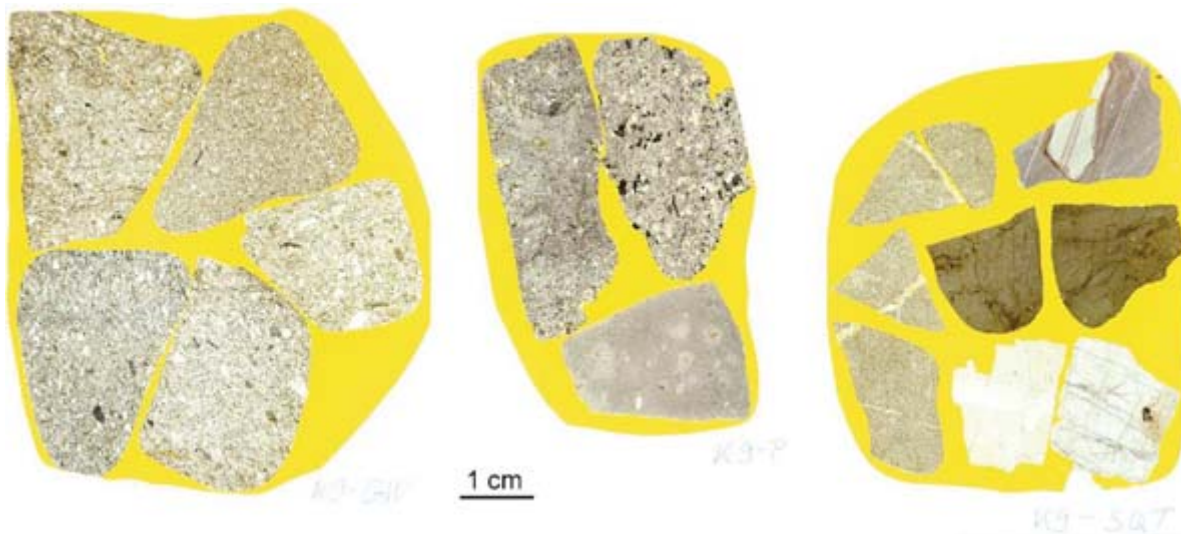


Abb. 90 Dünnschliffpräparate des Kiese K9, li.: Grauwacke, Mitte: Rhyolith, re.: schiefriger Quarzit

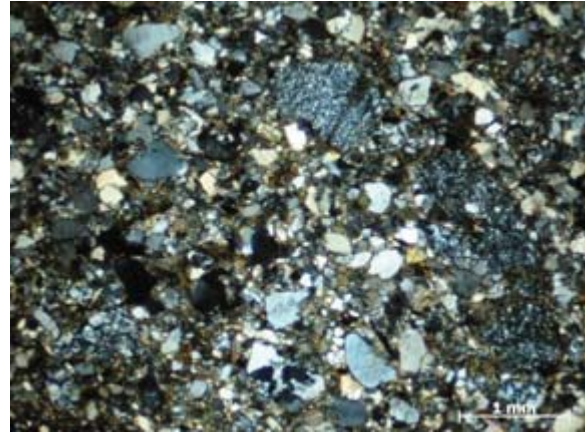
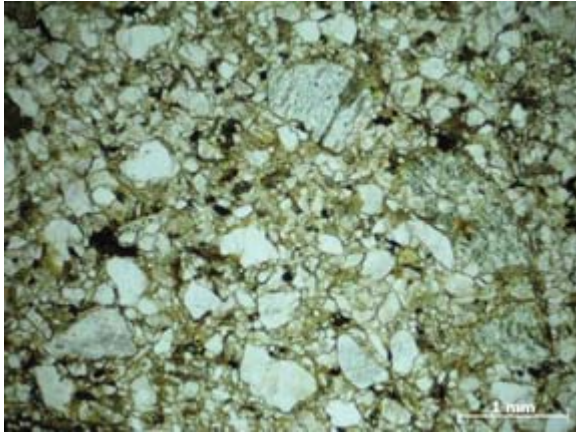


Abb. 91: K9-GW

Grauackegefüge mit vielen Feinquarznestern; li.: einfach Pol., re.: × Pol.

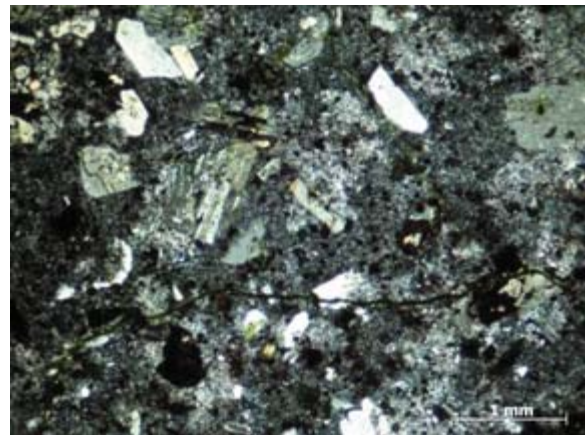
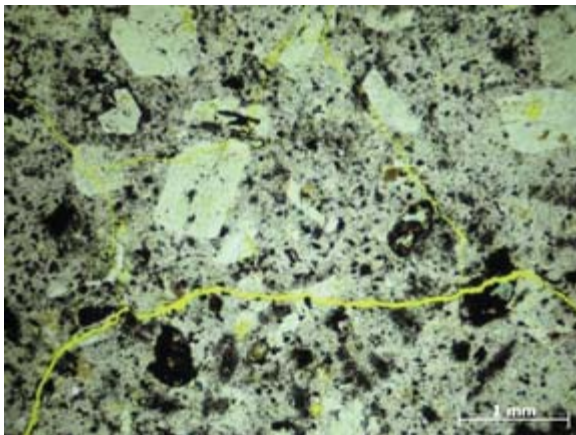


Abb. 92: K9-P

fein verteilte Risse im Rhyolithgefüge, Einsprenglingsminerale liegen in feinkörniger Grundmasse; links: einfach Pol., rechts: × Pol.

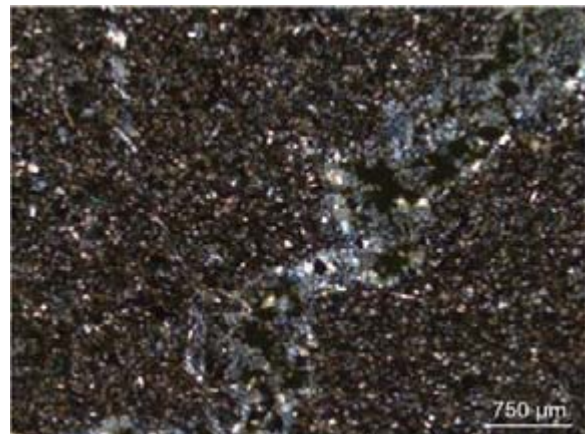
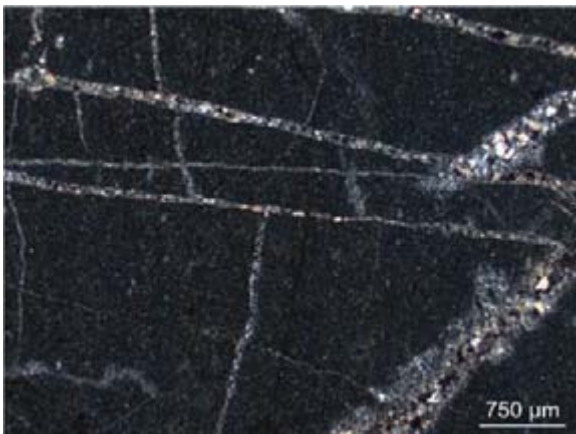


Abb. 93: K9-sQt

Kieselschiefer mit grobkörnigen Quarzgängen; × Pol.

Abb. 94: K9-sQt

Feinkörnige Grauacke mit grobkörnigen Quarzgang; × Pol.

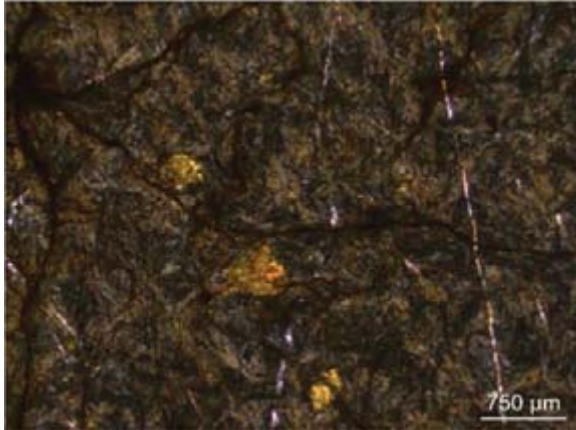


Abb. 95: K9-sQt

verwitterter Diabas mit Quarzaggregaten durch Mineralumbildung während der Alteration; × Pol.

Unter den 6 untersuchten Festgesteinen waren 3 Magmatite (N11, N12, N17) und 3 Sedimente (N15, N19, N22). Die Kiese enthalten hauptsächlich Sedimente und metamorphe Gesteinskörnungen. Der Kies K9 weist mit 8 verschiedenen Bestandteilen als einziger Kies neben den Sedimenten 26 % Porphyr, einen Magmatit, auf.

Die Kalksteinvertreter waren häufig sehr heterogen in ihren Gefügeeigenschaften zusammengesetzt. Die Variationen umfassen dichte und poröse Kalksteine, häufig mit Schalenresten von Mikroorganismen. Punktuell liegen Schichtbildungen vor.

Gefügeeigenschaften, wie Poren, Risse, Hohlräume, Schichtungen und Texturen wurden als Inhomogenitäten im Gesteinsverband vorgefunden und führten zu höheren Schwankungsbreiten bei der Bestimmung der linearen Wärmedehnung. Dies bestätigten die statistischen Auswertungen. Eine Korrelation zwischen Porenvolumen und der linearen Wärmedehnung gab es jedoch nicht. Eine Bestimmung der Porositätskennwerte (Gesamtporosität, offene Porosität) könnte zukünftig hilfreich bei der Interpretation der Ergebnisse.

Aufgrund der wenigen Beispiele mit ausgeprägter Textur bzw. Schichtung konnten keine Zusammenhänge zu anderen Untersuchungsergebnissen hergestellt werden.

Auswahl der Gesteinskörnung für die Betonversuche

In Kooperation mit der TU München (FSt 3) konnte aus den Ergebnissen beider FSt (FSt 2 und FSt 3) die Anzahl der für die Betonversuche zu untersuchenden Gesteinskörnungen auf 3 Festgesteine und 3 Kiese reduziert werden. Die Auswahl basierte auf der Grundlage folgender Kriterien:

- Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α_T der, nach Phase 1, zwölf verbliebenen Gesteinskörnungen, stellte sich zwischen $5,38 \cdot 10^{-6}/K$ (N15) und $12,64 \cdot 10^{-6}/K$ (K3) ein. Die Höhe des α_T -Wertes ist abhängig vom Quarz- und Karbonatgehalt der Gesteinskörnung. Mit zunehmendem Quarzgehalt stieg der α_T -Wert. Höhere Karbonatgehalte verursachten geringere α_T -Werte.

Ebenfalls hohe α_T -Werte erzielten Gesteinskörnungen (N11, N14, N18), die nach der Röntgenanalyse einen hohen amorphen Anteil besaßen.

- Für die ermittelten linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten ließen sich zwei Wertebereiche definieren, die durch einen nicht von Messwerten besetzten Korridor voneinander getrennt sind. Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Dosenfrostprüfung ergab sich folgender Zusammenhang:

- ⇒ Der erste Wertebereich umfasste insbesondere die karbonathaltigen Gesteinskörnungen mit niedrigen $\alpha_{T,-20^{\circ}\text{C}}$ -Werten. Diese galten nach der Dosenfrostprüfung überwiegend als nicht frostbeständig.
- ⇒ Die quarzreichen Gesteinskörnungen und die mit einem hohen amorphen Anteil, grenzten den zweiten Wertebereich ab und galten nach der Dosenfrostprüfung überwiegend als frostbeständig.
- Die polarisationsmikroskopischen Gefügeuntersuchungen belegten, dass sich Risse, Poren und Hohlräume ebenso wie Inhomogenitäten in der Mineralverteilung auf die Ermittlung der linearen Wärmedehnung auswirkten und große Schwankungsbreiten verursachten. Jedoch konnte mit den Ergebnissen der Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen kein eindeutiger Zusammenhang zu den Ergebnissen der Dosenfrostprüfung hergestellt werden.

In den Tab. 16 und Tab. 17 sind die Gesteinskörnungen mit den Auswahlkriterien zusammengefasst, die einen möglichst großen Wertebereich in den Ergebnissen der Beton-Frostprüfungen erwarten ließen.

Tab. 16: Auswahlkriterien der 3 Festgesteine für die Betonversuche

Festgestein	Auswahlkriterien
N11 Basalt	$\alpha_{Tm,-20^{\circ}\text{C}} = 921 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ (zweithöchster Wert) XRD: kein Quarz, hoher amorpher Anteil DS: keine Poren, Risse im Gefüge FTS-Versuch: bestanden
N22 Muschelkalk4	$\alpha_{Tm,-20^{\circ}\text{C}} = 5,19 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ (zweitniedrigster Wert) XRD: Karbonatgehalt 94,5% (Calcit 87,9%) DS: keine Poren, Risse → <u>dichtes Gefüge</u> FTS-Versuch: nicht bestanden Praxis bewährt
N19 Muschelkalk2	$\alpha_{Tm,-20^{\circ}\text{C}} = 5,85 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ (N22 ähnlich) XRD: Karbonatgehalt 95,9% (Calcit 43,9%, 52% Ankerit) DS: vereinzelte Poren sonst eher <u>dichtes Gefüge</u> FTS-Versuch: nicht bestanden

Tab. 17: Auswahlkriterien der 3 Kiese für die Betonversuche

Kies	Auswahlkriterien
K3 Rheinkies (rund) (entspricht dem Referenzkies K26 für die Betonversuche)	$\alpha_{Tm,-20^{\circ}C} = 12,80 \cdot 10^{-6}/K$ (höchster Wert) XRD: hoher Quarzanteil in Hauptgemengteilen DS: Hauptgemengteile zeigen Poren, Mikrorisse FTS-Versuch: bestanden
K4 Rheinkies (gebr.)	→ gebrochene Variante von K3 → Untersuchte Eigenschaften mit K3 vergleichbar $\alpha_{Tm,-20^{\circ}C} = 12,73 \cdot 10^{-6}/K$ (zweithöchster Wert) XRD: hoher Quarzanteil in Hauptgemengteilen DS: Hauptgemengteile zeigen Poren, Mikrorisse FTS-Versuch: bestanden
K 5 Saalekies	$\alpha_{Tm,-20^{\circ}C} = 7,54 \cdot 10^{-6}/K$ (kleinster Wert) XRD: Karbonatgehalt 67,1% (einziger Kalksteinkies) DS: Hauptgemengteile zeigen Poren, Mikrorisse FTS-Versuch: nicht bestanden
K 9 Zorgekies	$\alpha_{Tm,-20^{\circ}C} = 10,59 \cdot 10^{-6}/K$ (kleinster Wert) XRD: Kies mit der heterogensten Zusammensetzung DS: Hauptgemengteile zeigen Poren, Mikrorisse FTS-Versuch: nicht bestanden

6.3 Hauptuntersuchungsphase (Laborbetone mit 3 Festgesteinen und 3 Kiesen)

Petrografische Beschreibung der Laborbetone nach CIF und CDF-Test

Die Bewertung der Widerstandsfähigkeit der Betone gegenüber Frost-Tau-Wechsel mit und ohne Tausalz erfolgt unter Berücksichtigung folgender Untersuchungskriterien:

- Abwitterungstiefe der befestigten Prüffläche
- Art der Risse (Ring-, Randspalte, Risse in der Gesteinskörnung, Risse in der Zementsteinmatrix)
- relative Bewertung der auftretenden Risse in Abhängigkeit der DS-Fläche
- Rissbreitenausmessung
- Rissbewertung in Abhängigkeit der eingesetzten Gesteinskörnung

Die Übersichtsaufnahmen der präparierten DS, siehe Abb. 96 und Abb. 97, enthalten die Lage der Fotoaufnahmen, die Kennzeichnung der Hauptrissbilder sowie an drei Messstellen die Tiefe der Abwitterung der befestigten Prüfflächen. Die Dünnschliffbezeichnung K3-I-3 steht für den verwendeten Kies K3 unter Einsatz eines CEM I bei XF3 Prüfbedingungen. Analoges gilt für den Beton N19-I-3 (Festgestein N19, CEM I, XF3). Die Übersichtsaufnahmen zeigen deutlich Unterschiede in der Rissintensität. Beide Prüfoberflächen sind geprägt von oberflächenparallelen Risscharen. Während die Rissintensität im Beton mit dem Kies K3 nach den obersten 1,5 cm stark nachlässt, weist der Beton mit dem Festgestein N19 über die gesamte DS-Höhe Risse infolge der Frostbelastung auf. An der gegenüberliegenden Seite der Prüfoberfläche im Dünnschliff N19-I-3 tritt eine vergleichbar starke Rissintensität wie an der

tatsächlichen Prüfoberfläche auf. Die halbquantitative Einschätzung der inneren Schädigung auf Basis der inneren Schädigung erfolgt in Tab. 18 mit Angabe von Plus-Zeichen bei vereinzelter bis starker Rissbildung und Minus-Zeichen bei fehlender Rissbildung infolge Frosts.

Die auftretenden Risse werden unterschieden in Ring- und Randspalte (R), gerissene Gesteinskörner (G) und in Rissverlauf durch die Betonmatrix (B). Diese Zuordnung ist ebenfalls Tab. 18 zu entnehmen. Danach liegen für den Beton K3-I-3 nur Ring- bzw. Randspalte und an der Prüffläche oberflächenparallele Risse durch die Betonmatrix vor. Im Beton N19-I-3 hingegen zeigen sich neben Randspalten an den Kalksteinen und Rissen in der Betonmatrix überwiegend Gefügerisse in der Gesteinskörnung. Bezogen auf die Frostprüfung deutet gerissene Gesteinskörnung auf eine fehlende Frostbeständigkeit der eingesetzten Gesteinskörnung hin.

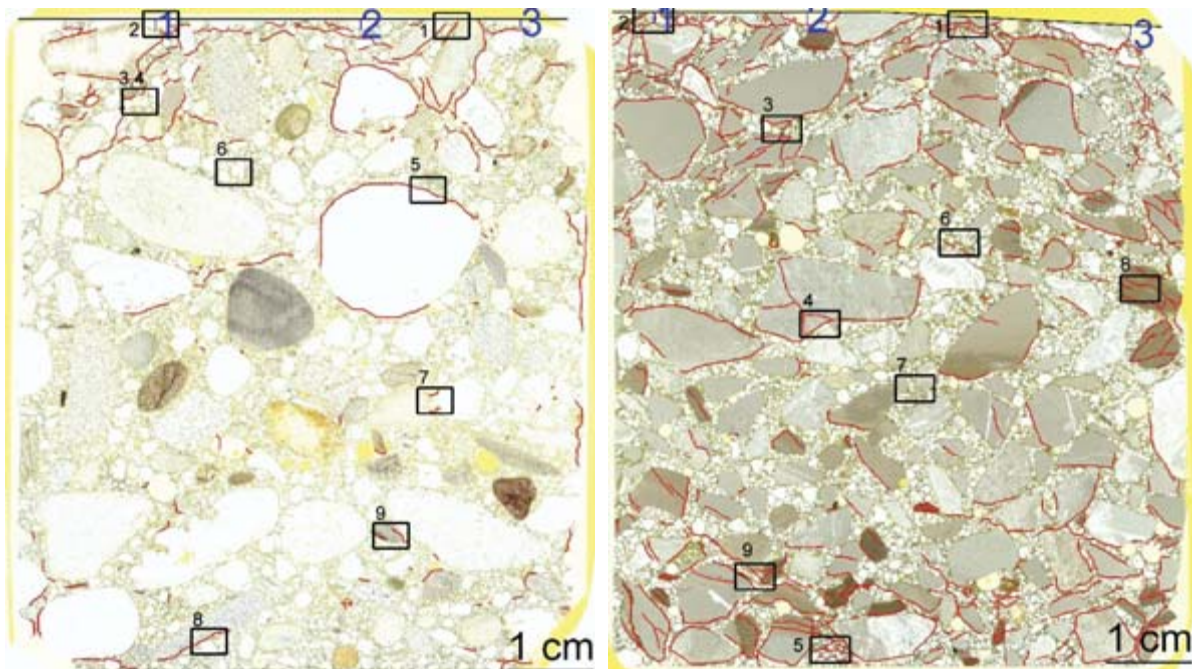


Abb. 96: DS-Scan: K3-I-3 mit Markierung der Risse (rot), Lage der Fotoaufnahmen und Stellenbez. Der Abwitterungstiefen (blau)

Abb. 97: DS-Scan: N19-I-3 mit Markierung der Risse (rot), Lage der Fotoaufnahmen und Stellenbez. Der Abwitterungstiefen (blau)

Randspalte treten erwartungsgemäß um Kalksteine auf, meist aufgrund der großen Differenz der α_T -Werte zwischen Gesteinskörnung und der umgebenden Zementsteinmatrix. Andere Gesteinskörner zeigen diese Art der Rissbildung seltener, aber auch bei Quarzen sind solche Randspalte zu beobachten. Quarzkörner in Kiesen, wie hier im Kies K3, besitzen meist infolge der Transportvorgänge im Wasser eine glatte Oberfläche. Daraus resultiert aufgrund der fehlenden Oberflächenrauigkeit ein schlechterer Haftverbund. Übersteigen die Spannungen in der Phasengrenzfläche (Gesteinskorn/ Zementstein) die Haftzugfestigkeit, entstehen Randspalte. Der Einfluss von gerundetem Korn und gebrochenem Korn wurde an den Kiesen K3-gerundet und K4-gebrochen geprüft, s. weiter unten.


Die dritte Spalte der Tab. 18 beinhaltet die Ergebnisse der Prüfungen am Dilatometer zur Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T , siehe Abschnitt 6.1 und dient als Vergleichskriterium zum Verhalten der Gesteinskörnung im Beton. Die farbliche Unterteilung resultiert aus der Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach DIN EN 1337-1 (Dosenfrost), durchgeführt von der TUM (FSt 3) [9]. Die grün hinterlegten

Zellen stehen für eine bestandene Frost-Tausalz-Prüfung, die roten Zellen überschreiten das Abnahmekriterium der Dosenfrostprüfung.

Tab. 18: relative Rissbewertung und Art der Rissbildung

	Kürzel	α_T	Dünnschliffgefüge (visuelle Schädigung)				Dünnschliffgefüge (Risse)			
		m	CEM I befrosted		CEM III befrosted		CEM I befrosted		CEM III befrosted	
		[10 ⁻⁶ /K]	XF3	XF4	XF3	XF4	XF3	XF4	XF3	XF4
Festgestein	N11	8,95	+++++	(+)	--	--	R/G/B	R/G	--	--
	N19	5,96	+++++	++	--	--	R/G/B	R/G	--	--
	N22	5,78	+++(+)	++	--	--	R/Z/B	R/G	--	--
Kies	K3	12,64	+++				R/B			
	K4	12,31	(+)	-	--	--	R/B	-	--	--
	K5	7,80	+++(+)	+	+++	++	R/B	R/B/G	R/B/G	R/B/G
	K9	9,10	++++	(+)	+	+	R/B/G	R/G	G/R	G/R

-- Beton nicht hergestellt

 Dünnschliff nicht vorgesehen

+++++	stark geschädigt	R...Randspalt
++++	deutlich geschädigt	G...Gefügeriss im GK
+++	häufige Rissbildung	B...Gefügerisse Betonmatrix
++	vermehrte Rissbildung	
+	vereinzelte Rissbildung	
-	keine Risse infolge Frosts	

Während sich erfahrungsgemäß der Frost-Tausalz-Widerstand von XF4-Beton vorwiegend in der Menge der Abwitterung zeigt, äußert sich bei XF3-Betonen der Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln im Grad der inneren Schädigung, also im E-Modul-Abfall. Demnach ist die Auswertung der vorliegenden Risse vorrangig hilfreich bei der Bewertung der XF3-Betone. Maßgebend für die Bewertung der Beziehung zwischen linearer Wärmedehnung der Gesteinskörnung und der Frostbeständigkeit der Gesteinskörnung im Betongemisch ist die Einbeziehung der linearen Wärmedehnung des umgebenden Zementsteins. Mit zunehmender Differenz der linearen Wärmedehnung zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix nehmen bei Temperaturwechsel thermisch bedingten Spannungen in der Phasengrenzfläche zu. Übersteigen die Spannungen die Zugfestigkeit des Betons entstehen Risse, vorzugsweise als Rand- u./o. Ringspalte an Phasengrenzflächen. Das entstandene Rissystem dient als Weg für das Eindringen von Lösungen und kann sich auf die Frostbeständigkeit des Systems Beton negativ auswirken.

Die kalkreichen Gesteinskörnungen (N19, N22, K5) mit niedrigeren α_T -Werten zeigten eine starke Rissbildung mit betonschädigender Intensität, s. Anhang C. Ebenfalls deutliche Rissbildungen liefern der Basaltsplitt (N11) und der sehr heterogen zusammengesetzte Kies K9 mit mittleren α_T -Werten, s. Anhang C. Allerdings fehlen bei der halbquantitativen Bewertung der vorliegenden Risse die Rissweiten. Bei dem Basaltsplitt N11 und dem Kies K9 liegen die Rissweiten im Durchschnitt unterhalb der Rissweiten der Betone mit kalksteinhaltiger Gesteinskörnung (N19, N22, K5). Dies bestätigt sich weitgehend auch in den Ergebnissen des E-Modulabfalls, innerhalb des vom VDZ durchgeführten CIF-Tests, s. [10]. Gesteinskörnungen mit höheren α_T -Werte zeigten eine geringere Neigung zur Bildung von Randspalten.

Die folgenden 4 Bilder stehen exemplarisch für die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen an Betondünnschliffen. Die Abb. 98 und Abb. 99 dokumentieren die Prüfoberflächen der befestigten Betone K3-I-3 und N19-I-3. Beide Bildausschnitte zeigen Betonprüfflächen mit oberflächenparallelen Risscharen infolge der Frostbeanspruchung. Im linken Bild fehlt ein Teil der Prüffläche, während das rechte Bild noch die komplette Sägefläche wiedergibt. Die deutlichen Unterschiede bei der inneren Schädigung der Betone K3-I-3 und N19-I-3 zeigen bereits die DS-Übersichten, vergleiche Abb. 96 und Abb. 97. Der muschelkalkhaltige Beton weist eine deutliche höhere Intensität in der Rissbildung auf als der kieshaltige Beton. Im Ergebnis der Frostuntersuchungen an der TUM (FSt 3) war die Gesteinskörnung N19 nicht frostbeständig und lieferte bei der Bestimmung der linearen Wärmedehnung, s. 6.1, geringe α_T -Werte. Beide Faktoren sind als Ursache für die fehlende Frostbeständigkeit des Betongemisches zu werten.

Im Vergleich dazu führten hohe α_T -Werte und eine bestandene Dosenfrostprüfung nicht zwangsläufig zu einem höheren Frostwiderstand des mit der Gesteinskörnung hergestellten Betons. Für die erhöhte Rissbildung im oberflächennahen Bereich der Prüffläche im Beton K3-I-3 könnte eine geringe Verbundfestigkeit zwischen Gesteinskorn und Zementsteinmatrix verantwortlich sein. Die Randspalte treten vorzugsweise an Quarzen auf. Da Quarzkörner in Kiesen meist infolge der Transportvorgänge im Wasser eine glatte Oberfläche besitzen, resultiert daraus aufgrund der fehlenden Oberflächenrauigkeit ein schlechterer Haftverbund als z. B. bei gebrochener Gesteinskörnung. Übersteigen die Spannungen in der Phasengrenzfläche (Gesteinskorn/ Zementstein) die Haftzugfestigkeit, entstehen ebenfalls Randspalte. Der Einfluss von gerundetem und gebrochenem Korn auf den Frostwiderstand zeigt sich bei den Ergebnissen der Betone mit einem Kies aus dem gleichen Lieferwerk. Der Kies K3 (gerundete Variante) zeigt während des CIF-Test gegenüber dem Kies K4 (gebrochene Variante) einen stärkeren Abfall des relativen dynamischen E-Moduls. Die an den Dünnschliffen vorgefundenen Rissbilder und die ermittelten Rissweiten bestätigten dieses Ergebnis, s. Abb. 98, Abb. 102.

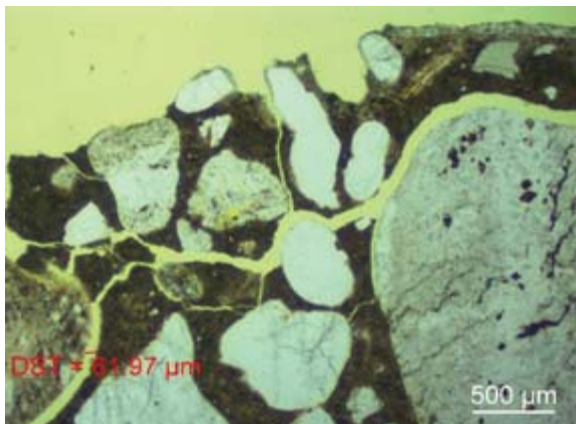


Abb. 98: K3-I-3 Bild2

Oberflächenparallele Abwitterung der Prüffläche mit deutlicher Rissbildung an Korngrenzen entlang; einfach Pol.

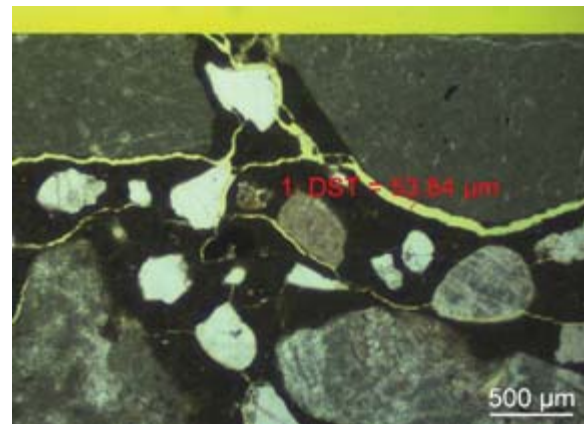


Abb. 99: N19-I-3 Bild1

Oberflächenparallele Rissbildung an der Prüffläche, Bereich bislang ohne Abwitterung; einfach Pol.

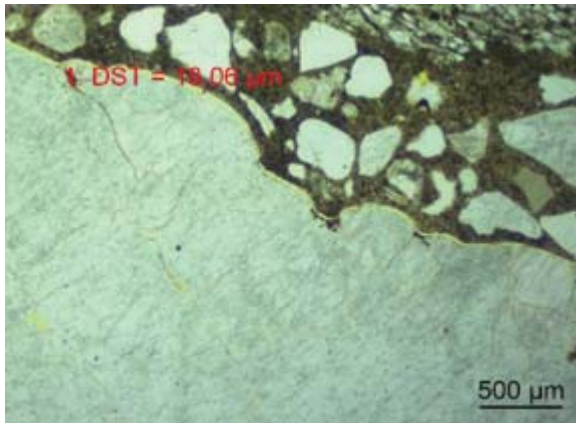


Abb. 100: K3-I-3 Bild5
 Randspalt an Quarzkorn; einfach Pol.

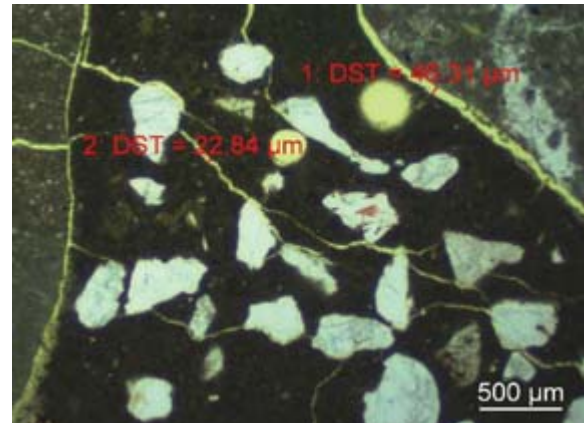


Abb. 101: N19-I-3 Bild5
 Rissbildung an Phasengrenzfläche, im Ge-
 steins- und Zementsteingefüge; einfach Pol.

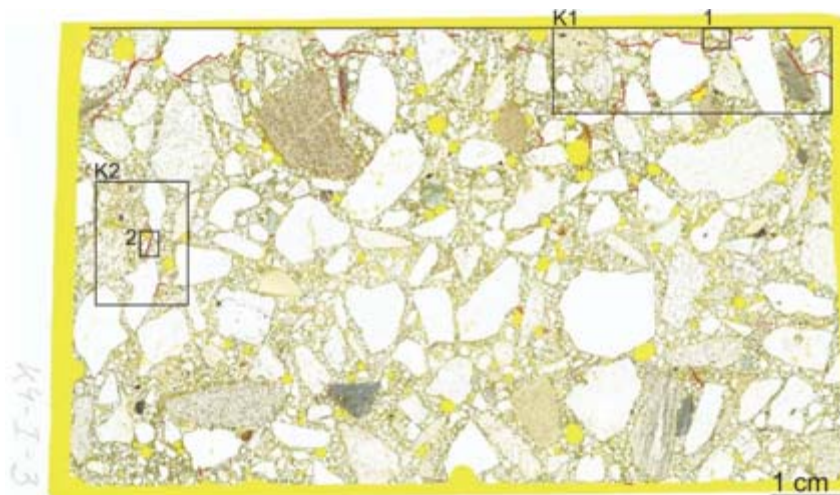


Abb. 102: DS-Scan: K4-I-3 mit Markierung der Risse (rot), Lage der Fotoaufnahmen

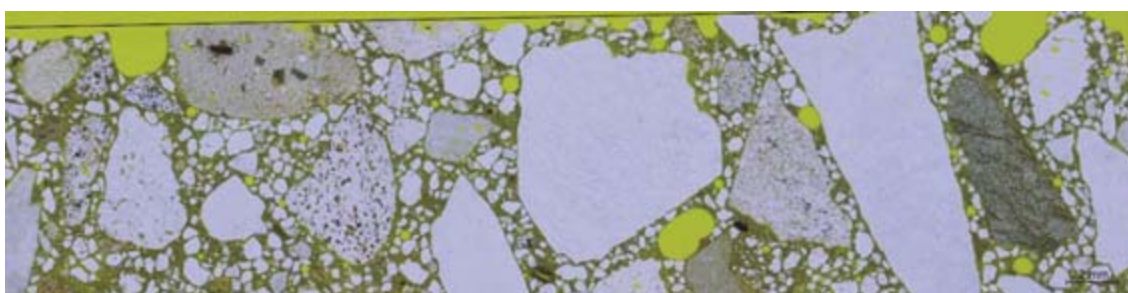


Abb. 103: K4-I-3_Detail K1 aus Abb. 102 mit insgesamt deutlich weniger Rissen und geringeren Rissweiten im Vergleich zu K3-I-3

Eine positive Wirkung auf die Frostbeständigkeit der Betone wurden erwartungsgemäß mit der Zugabe von LP-Mittel (XF4) und der Verwendung von CEM III-Zement erzielt.

Die Abwitterungstiefen an der Prüfoberfläche wurden an drei Messpunkten bestimmt, s. Tab. 19. Obwohl die Intensität der Rissbildung im Beton mit CEM I-Zement bei den Kiesen K5 und K9 (siehe Tab. 19) von vereinzelter Rissbildung (XF4) bis zu einer deutlichen Schädigung (XF3) reicht, ist die Tiefe der Abwitterung scheinbar unabhängig von der Exposition. Die Bestimmung der Abwitterungstiefen am Dünnschliff stellt offenbar keine geeignete Methode dar, um die Frostbeständigkeit von Betonen zu bewerten. Die Präparation eines Dünnschliffs aus einem CDF-geprüften Probekörper war für die Bestimmung der Abwitterungstiefen nicht

ausreichend. Aufklärung hinsichtlich der Abwitterungsmengen bezüglich der Exposition bieten die vom VDZ durchgeführten Frostprüfungen an Laborbetonen, s. [10].

Tab. 19: Oberflächenabwitterung in mm

	Kürzel	α_T	Dünnschliffgefüge (Oberflächenabwitterung [mm])												
		m	CEM I (XF3)			CEM I (XF4)				CEM III (XF3)			CEM III (XF4)		
		[10 ⁻⁶ /K]	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3
Festgestein	N11	8,95	0,5	1,5	1,2	0,8	1,7	1,3		--	--	--	--	--	--
	N19	5,96	1,4	1,4	1,6	6,5	3,2	2,0		--	--	--	--	--	--
	N22	5,78	0,6	1,5	0,9	2,2	2,4	2,6		--	--	--	--	--	--
Kies	K3	12,64	1,3	1,2	0,8										
	K4	12,31	0,6	0,3	0,5	0,9	1,3	0,6		--	--	--	--	--	--
	K5	7,80	1,5	1,2	0,9	1,6	0,7	1,1	0,8	0,9	0,6	0,6	2,6	2,4	1,2
	K9	9,10	1,2	1,1	2,6	1,4	0,6	1,3		0,3	0,4	1,9	1,6	1,8	2,7

-- Beton nicht hergestellt

■ Dünnschliff nicht vorgesehen

Zusammenfassend wurde in Tab. 20 eine Klassifizierung der untersuchten Laborbetone in Abhängigkeit der vorgefundenen Risse (Rissmenge, Rissweite) und der Höhe der Abwitterung in der Dünnschliffebene vorgenommen. In der Gruppe I mit hoher Abwitterung sind erwartungsgemäß ausschließlich XF4-Betone zu finden und bei den starken inneren Gefügeschäden XF3-Betone. Dieses Ergebnis dreht sich zur Gruppe III hin um. Die XF3-Betone zeigen prüftechnisch bedingt geringe bzw. keine Abwitterung und die XF4-Betone aufgrund der zusätzlich eingebrachten Luftporen keine bzw. nur eine punktuelle Rissbildung.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse der linearen Wärmedehnung lassen sich folgende Aussagen treffen.

- Bei niedrigen linearen Ausdehnungskoeffizienten α_T (ca. 4,0-6,4*10⁻⁶/K) der Gesteinskörnung liefern XF4-Betone eher hohe Abwitterungen. Die XF3-Betone zeigen dann stärkere innere Gefügeschäden.
- Bei mittleren α_T -Werten (ca. 6,5-12*10⁻⁶/K) ist die Frostbeständigkeit von der Art des eingesetzten Bindemittels und dem Einsatz der Gesteinskörnung als gebrochenes Material von Bedeutung.
- Während sich ein Wechsel der Zementart (CEM I/ CEM III) bei XF3-Betonen (vergl. K5-I-3 mit K5-III-3 und K9-I-3 mit K9-III-3) positiv auf die innere Schädigung auswirkt, erhöhen sich die Abwitterungsmengen bei XF4-Betonen (vergl. K5-I-4 mit K5-III-4 und K9-I-4 mit K9-III-4).

Tab. 20: Klassifizierung der Laborbetone nach optischen Kriterien am Dünnschliff

<ul style="list-style-type: none"> • Gruppe I 	<ul style="list-style-type: none"> – hohe Abwitterung: 	<ul style="list-style-type: none"> – starke Rissbildung:
	<ul style="list-style-type: none"> N19-I-XF4 N22-I-XF4 K5-III-XF4 K9-III-XF4 	<ul style="list-style-type: none"> N19-I-XF3 N11-I-XF3 K9-I-XF3 N22-I-XF3 K5-I-XF3
<ul style="list-style-type: none"> • Gruppe II 	<ul style="list-style-type: none"> – mittlere Abwitterung: 	<ul style="list-style-type: none"> – häufige Rissbildung:
	<ul style="list-style-type: none"> K9-I-XF3 N19-I-XF3 N11-I-XF4 K5-I-XF3 K3-I-XF3 N11-I-XF3 K9-I-XF4 K5-I-XF4 	<ul style="list-style-type: none"> K5-III-XF3 K3-I-XF3 N22-I-XF4 N19-I-XF4 K5-III-XF4 K4-I-XF3
<ul style="list-style-type: none"> • Gruppe III 	<ul style="list-style-type: none"> – niedrige Abwitterung: 	<ul style="list-style-type: none"> – keine/ vereinzelte Risse:
	<ul style="list-style-type: none"> K4-I-XF4 K9-III-XF3 K5-III-XF3 N22-I-XF3 K4-I-XF3 	<ul style="list-style-type: none"> K5-I-XF4 K9-III-XF4 K9-III-XF3 K9-I-XF4 N11-I-XF4 K4-I-XF4

Eine Einordnung der Frostbeständigkeit der Laborbetone nach optischen Gesichtspunkten zeigt Tab. 21. In der mittleren Spalte wurden die petrografisch beurteilten Betone am Dünnschliff in wahrscheinlich frostbeständig (grün mit Häckchen) und wahrscheinlich nicht frostbeständig (rot mit Kreuz) eingeteilt. In der rechten Spalte stehen die Ergebnisse der linearen Wärmedehnungen der Einzelkörner. Diese sind unterteilt in bestandene Dosenfrostprüfung (grün) und nicht bestandene Dosenfrostprüfung (rot). Danach scheinen Gesteinskörnungen mit niedrigen α_T -Werten sowohl die Dosenfrostprüfung als auch die Frostprüfung im Betonmisch nicht zu bestehen. Bei hohen α_T -Werten der Gesteinskörnungen ist der Frostwiderstand im Beton tendenziell gegeben. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Gesteinskörnung könnte hier noch eine Rolle spielen, vergl. K3-I-3 und K4-I-3. Bei mittleren α_T -Werten sind die Übergänge von frostbeständig und nicht frostbeständig fließend. Eine Verbesserung der Frostbeständigkeit kann in Abhängigkeit der Exposition durch eine Anpassung der Betonrezeptur (Wechsel der Zementart, Verringerung des w/z-Wertes, s. hierzu nachfolgenden Abschnitt) ermöglicht werden. Der vorliegende Sachverhalt müsste durch weitere Versuchsreihen mit anderen Gesteinskörnungen überprüft werden. Der Probenumfang ermöglicht keine statistisch belastbaren Aussagen.

Tab. 21: Einschätzung der Frostbeständigkeit nach optischen Kriterien im Dünnschliff mit Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der linearen Wärmedehnung der Einzelkörnungen

FIB Weimar		lineare Wärmedehnung
Einschätzung (FTW/ FTSW)		$\alpha_T [10^{-6}/K]$
N11-I-XF3	x	8,95
N11-I-XF4	✓	
XFN19-I-3	x	5,96
N19-I-XF4	x	
N22-I-XF3	x	5,78
N22-I-XF4	x	
K3-I-XF3	x	12,64
K3-I-XF4	kein Dünnschliff	
K4-I-XF3	✓	12,31
K4-I-XF4	✓	
K5-I-XF3	x	7,80
K5-I-XF4	✓	
K5-III-XF3	x	
K5-III-XF4	✓	
K9-I-XF3	x	9,10
K9-I-XF4	✓	
K9-III-XF3	✓	
K9-III-XF4	✓	

Da die Betone mit der kalksteinhaltigen Gesteinskörnung durchweg einen geringen Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln zeigten, sollte geklärt werden, ob durch Erhöhung der Zementmenge oder durch Erniedrigung des w/z-Wertes signifikante Verbesserungen des Widerstandes der Betone gegenüber Frost-Tau-Wechsel eintreten. Dafür wurden die Ausgangsrezeptur (B0-N19-I-0-XF3, $z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) und die Betone B1-N19-I-0-XF3 mit einem w/z-Wert von 0,45 und B3-N19-I-0-XF3 mit einem auf 340 kg/m^3 erhöhten Zementgehalt verglichen.

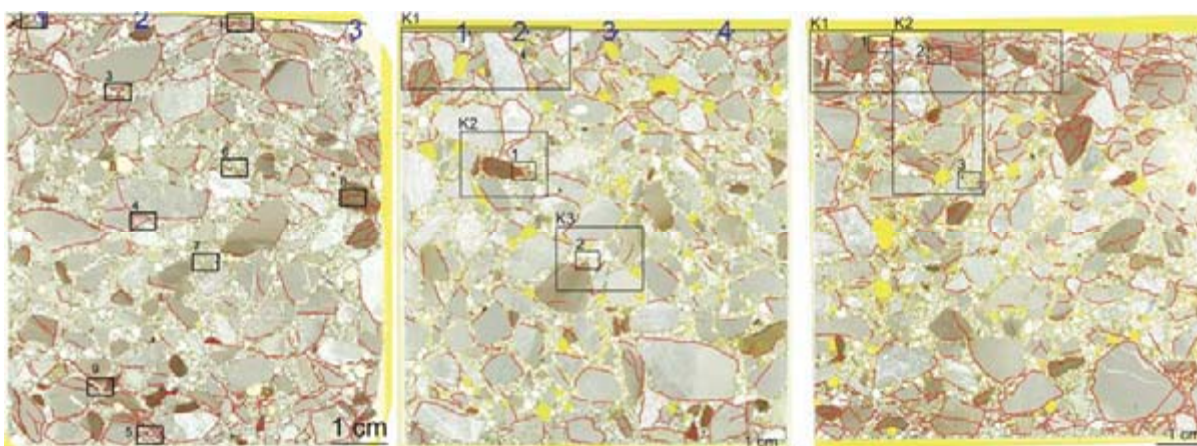


Abb. 104: Dünnschliffübersichten

B0-N19-I-0-XF3-Referenz
 $w/z = 0,5$; $z = 320 \text{ kg/m}^3$

B1-N19-I-0-XF3
 $w/z = 0,45$; $z = 320 \text{ kg/m}^3$

B3-N19-I-0-XF3
 $w/z = 0,5$; $z = 340 \text{ kg/m}^3$

Die Übersichten der Dünnschliffe, in Abb. 104, zeigen die Lage der Fotoaufnahmen, die Kennzeichnung der Haupttrissbilder sowie die Messstellen für die Bestimmung der Abwitterung. Die Dünnschliffübersichten zeigen deutliche Unterschiede in der Rissintensität. Während die Senkung des w/z-Wertes auf 0,45 auch einen Rückgang der Rissbildung bewirkt, liefert die Erhöhung der Zementmenge keinen optisch erkennbaren Unterschied zur Referenzmischung B0-N19-I-0-XF3. Hierzu wird auf die Ergebnisse zur quantitativen Rissanalyse mittels computergestützte Bildanalyse (nächster Abschnitt) verwiesen. Die modifizierten Betone zeigen wie der Ausgangsbeton infolge der Frost-Tauwechsel-Einwirkung Risse in der Zementsteinmatrix, in der Gesteinskörnung und die Ausbildung von Randspalten um die Gesteinskörnung (siehe Abb. 105, exemplarisch). Die an diversen Stellen ermittelten Rissweiten differieren ebenfalls in Abhängigkeit der Betonrezeptur (Senkung w/z-Wert, Erhöhung Zementmenge). Der Ausgangsbeton liefert durchschnittliche Rissweiten von 30 μm . Der Beton B1-N19-I-0-XF3 mit dem niedrigeren w/z-Wert von 0,45 weist Rissweiten im Schnitt von 15 μm auf (Abb. 106) und der Beton mit dem höheren Zementgehalt erreicht Rissweiten von durchschnittlich 25 μm (Abb. 107). Die Intensität der auftretenden Risse und die Rissweiten drücken den Grad der inneren Schädigung aus, der sich im Abfall des relativ dynamischen E-Moduls während der CIF-Prüfung äußert. Tendenziell korrelieren die Ergebnisse der vom VDZ durchgeführten CIF-Prüfung [10] mit den Ergebnissen der Dünnschliffuntersuchungen. Der E-Modul-Abfall war bei der Referenz B0 am höchsten. Eine leichte Verbesserung des E-Modul-Abfalls wurde durch Erhöhung der Zementmenge (B3) erreicht. Mit der Senkung des w/z-Wertes auf 0,45 (B1) war der E-Modul-Abfall am geringsten.

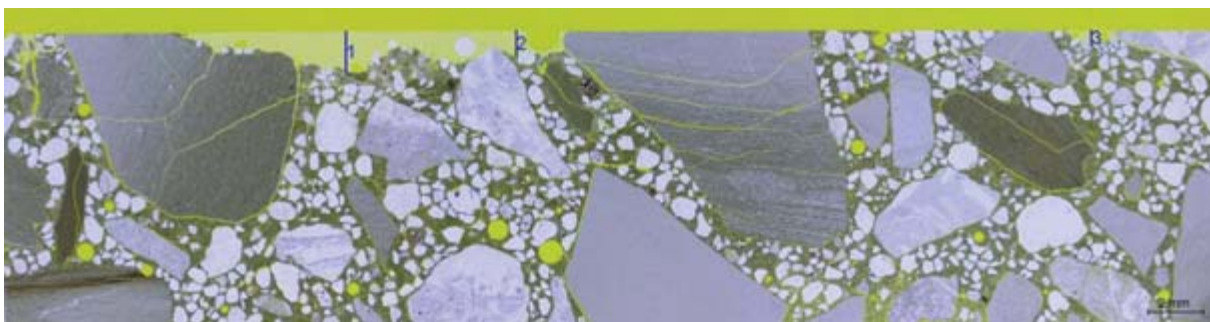


Abb. 105: gesägte Prüfoberfläche des Betons B3-N19-I-0-XF3 (siehe Abb. 104, K1) mit Randspalten, Risse in der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix

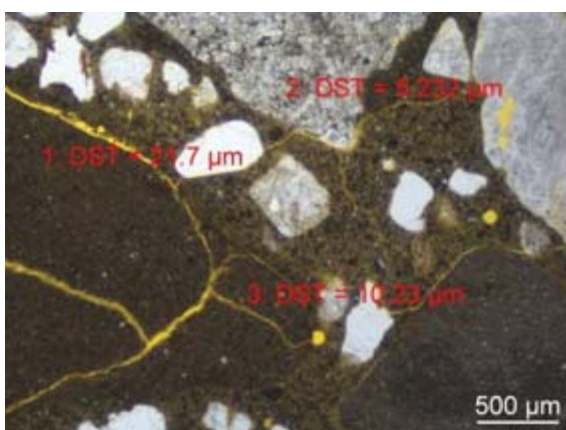


Abb. 106: B1-N19-I-0-XF3

Rissbildung im Gesteinskorn, als Randspalte und durch die Zementsteinmatrix verlaufend

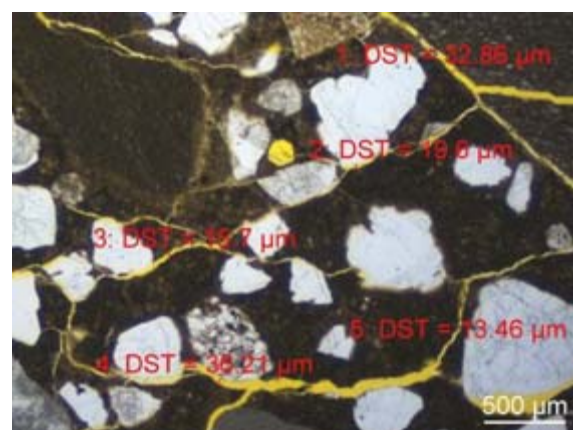


Abb. 107: B3-N19-I-0-XF3

Rissbildung infolge Frost-Tau-Einwirkung im Gesteinskorn, in der Zementsteinmatrix und an Phasengrenzflächen verlaufend

Neben dem Einfluss des Zementgehaltes und des w/z-Wertes wurde an den Beispielen der Kiese K5 und K9 der Einfluss der Zementart untersucht. Hierzu wurde der CEM I 32,5 R durch

einen CEM III/A 42,5 N LH/NA ausgetauscht. Die Abb. 108 und Abb. 109 zeigen die während des CiF-Tests entstandenen Risse. Die Prüfoberflächen entsprechen den oberen langen Bildkanten. Der Dünnschliff von K5-III-3 weist im Bereich der Prüfoberfläche eine geringfügig intensivere Rissbildung auf als der Dünnschliff K5-I-3. Abseits der Prüfoberfläche treten im Dünnschliff K5-III-3 weniger Risse auf. Die ermittelte Rissdichte aus der computergestützten Bildanalyse, s. Abschnitt zur quantitativen Rissanalyse, bestätigt eine geringere Gefügeschädigung bei Austausch des Zements. Neben der Art der auftretenden Risse (Randspalte, Risse in der Betonmatrix, gerissene Gesteinskörner) sind die gemessenen Rissweiten für die Beurteilung des Verhaltens von Betonen gegenüber einem Frostangriff von Belang. Die Rissweite kann jedoch nur punktuell gemessen werden. Ein Einfluss der Präparation der Dünnschliffe auf die Rissweite kann nicht ausgeschlossen werden. Der Wechsel der Zementart führte bei dem Kies K5 zwar zu einer Verringerung der Rissmenge, jedoch zeigten sich punktuell größere Rissweiten, vgl. Abb. 110 und Abb. 111. Mit der neu entwickelten Methode zur quantitativen Risserfassung ist für die Rissweite aktuell die Angabe der minimalen, der maximalen und der Mittleren Rissweite für einen definierten Rissabschnitt möglich. Die Auswertung ist im nachfolgenden Abschnitt ausführlich dargestellt.

Die Abbildungen Abb. 112 und Abb. 113 zeigen den Einfluss des Zementaustauschs für die Exposition XF4. Die Abwitterungstiefen an der befestigten Oberfläche sind in der untersuchten Dünnschliffebene deutlich höher, vergl. Tab. 19. Darüber hinaus treten etwas mehr Risse im Zusammenhang mit den im Kies enthaltenen Kalksteinen auf.

Die Ergebnisse für den Kies K9 sind im Anhang C zusammengestellt. Hier führte der Austausch des Zementes ebenfalls zu einer deutlichen Verbesserung der Rissneigung (geringere Risshäufigkeit, kleinere Rissweite) für die Exposition XF3 und zu einer Erhöhung der Abwitterung für die Exposition XF4.

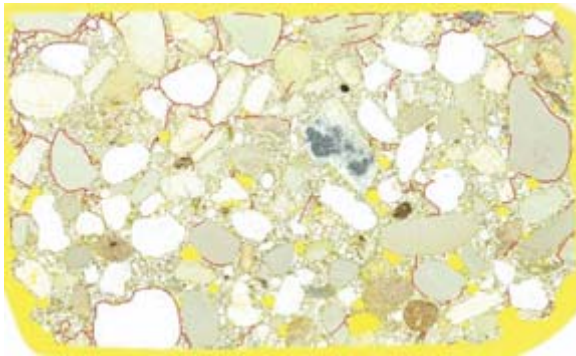


Abb. 108: K5-I-3 mit Markierung der Risse nach CiF auf einer Dünnschlifffläche von 6*10 cm²

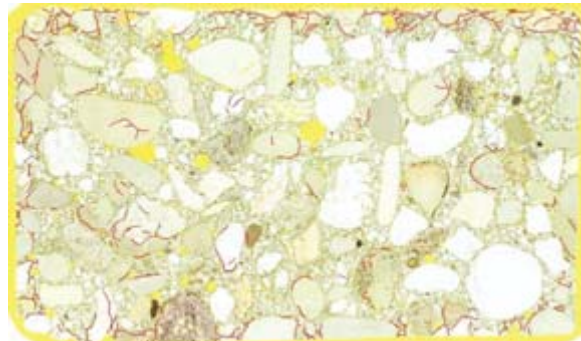


Abb. 109: K5-III-3 mit Markierung der Risse nach CiF auf einer Dünnschlifffläche von 6*10 cm²

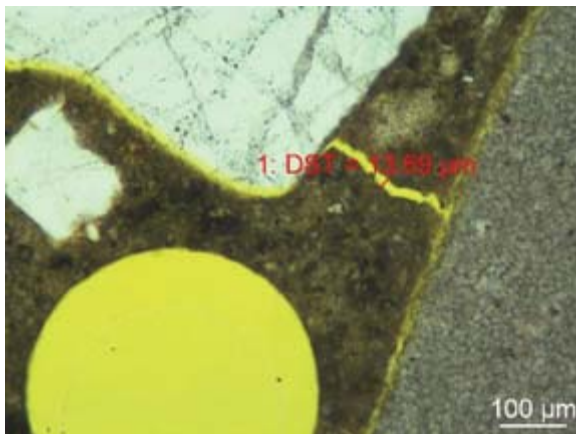


Abb. 110: K5-I-3 punktuelle Rissweite im Bereich der Prüfoberfläche

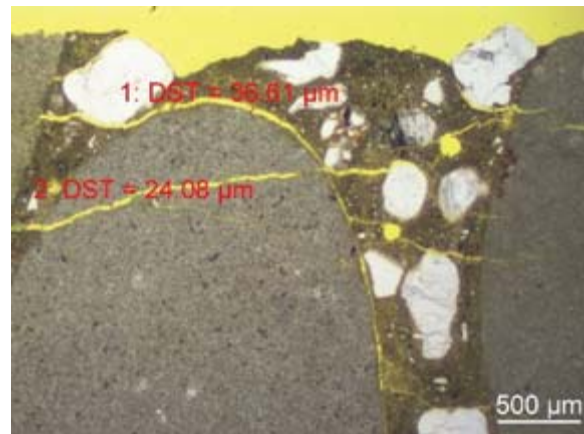


Abb. 111 K5-III-3 punktuelle Rissweiten im Bereich der Prüfoberfläche

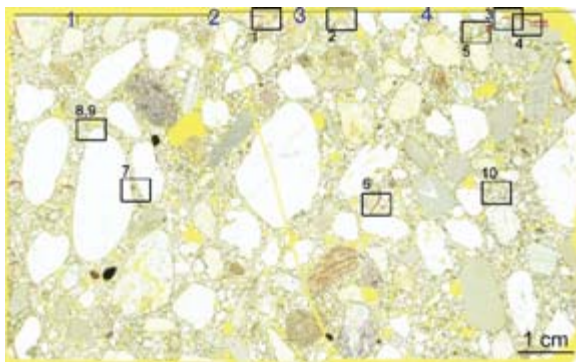


Abb. 112: K5-I-4 mit Markierung der Risse (rot), Messpunkte der Abwitterungstiefen (blau) und Lage der Fotoaufnahmen nach CDF auf einer Dünnschlifffläche von 6*10 cm²



Abb. 113: K5-III-4 mit Markierung der Risse (rot), Messpunkte der Abwitterungstiefen (blau) und Lage der Fotoaufnahmen nach CDF auf einer Dünnschlifffläche von 6*10 cm²

Vergleichende petrografische Analyse der Gesteinskörnung nach der Frost-Tausalz-Untersuchung (Dosenfrost) am Einzelkorn und dem Einsatz im Betongemisch

Die Abbildungen Abb. 114 und Abb. 115 zeigen die Gesteinskörnung N22 nach der Dosenfrostprüfung am Einzelkorn und nach der CDF-Prüfung eingebettet im Beton. Es fällt auf, dass nach der Dosenfrostprüfung die dunklen Ankeritlagen in den Kalksteinen nicht mehr vorhanden bzw. nur noch wenige Anhaftungen von Ankerit an den Korngrenzen erhalten sind. Eingebettet im Beton zeigen die Kalksteine Risse im Bereich der Ankeritlagen. Der geringe Frostwiderstand des Kalksteins N22 steht offenbar im Zusammenhang mit diesen Ankeritlagen. Die Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung, s. Tab. 22, liefert für die Körnung 11-12 mm nur noch Spuren von Ankerit in der Gesteinskörnung. Im Umkehrschluss wurde für das abgewitterte Material (0,63-1 mm) eine Anreicherung von Ankerit erwartet. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Stattdessen gab es eine Anreicherung von Schichtsilikaten (Muskowit, Illit, Klinochlor). Für den Nachweis quellfähiger Schichtsilikate, die bekanntermaßen den Frostwiderstand beeinflussen, bedarf es einer aufwendigeren Probenaufbereitung (Extraktion, Anreicherung der interessierenden Mineralphasen erforderlich). Die Tonmineralogie ist ein eigenständiges Fachgebiet, welches im Rahmen des Projektes nicht weiter betrachtet werden konnte.



Abb. 114: Dünnschliff N22-FTSW mit Einzelkörnern nach der Dosenfrostprüfung

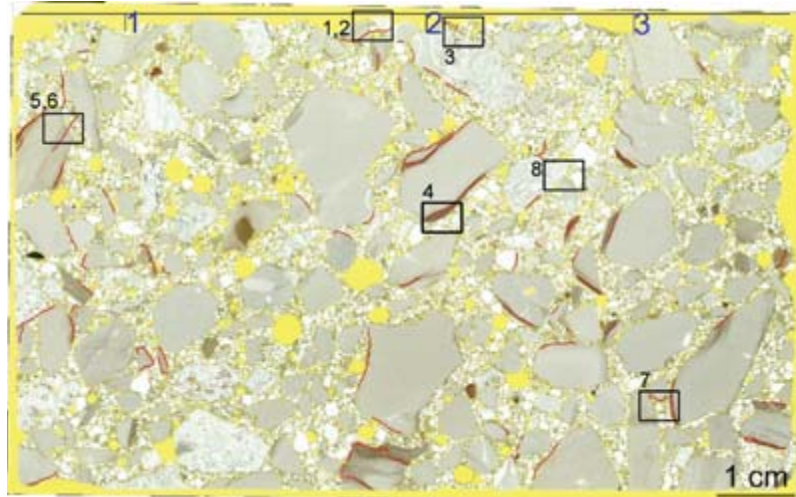


Abb. 115: Dünnschliff N22-I-4 mit Markierung der Risse (rot), Messpunkte der Abwitterstiefen (blau) und Lage der Fotoaufnahmen nach CDF auf einer Dünnschlifffläche von 6*10 cm²

Tab. 22: Mineralgehalte von N22 vor Dosenfrost und nach Dosenfrost

Mineralgehalte [M.-%]	N22_Referenz	N 22 _ 0,63-1 mm	N 22 _ 11-12 mm
Calcit	87,9	72,2	97,0
Quarz	5,4	6,9	1,5
Muskowit / and. Glimmer	--	5,7	1,0
Orthoklas	--	2,9	Spuren
Pyrit	--	0,6	Spuren
Ankerit	6,6	0,4	Spuren
Albit (o.ä. Fsp.)	--	2,5	--
Illit	--	7,2	--
Klinochlor	--	1,6	--

In den Abbildungen Abb. 116 bis Abb. 118 ist der Muschelkalk N19 vor der Frostprüfung, nach der Dosenfrostprüfung am Einzelkorn und eingebettet im Beton nach der CiF-Prüfung dargestellt. Bei der Auswahl der Einzelkörner für die Dünnschliffe wurde darauf geachtet, alle vorkommenden Varianten zu präparieren. Nach der Dosenfrostprüfung lagen keine ferritisch gebundenen Kalksteine (Ankerit, s. Mineralphasenanalyse) in der Korngruppe 11-12 mm vor. Diese sind offenbar bei der Frostprüfung zerfallen. Bei der CiF-Prüfung traten im Zusammenhang mit den dunklen feinkörnigen Ankeritlagen Risse im Gesteinsgefüge auf, die i.d.R. der Schichtstruktur folgten. An den fossilführenden Kalksteinen und den Kalksteinen mit feinkörnigen Quarznestern wurden ausschließlich Randspalte um die Gesteinskörner festgestellt, die auf eine Entspannung des Gefüges in der Phasengrenzfläche hinweisen. Die Entstehung dieser Randspalte resultiert wahrscheinlich aus der deutlichen Differenz der α_T -Werte von Betonmatrix und Kalksteinkörnung.



Abb. 116: N19 vor Frostprüfung



Abb. 117: N19 nach Dosenfrost

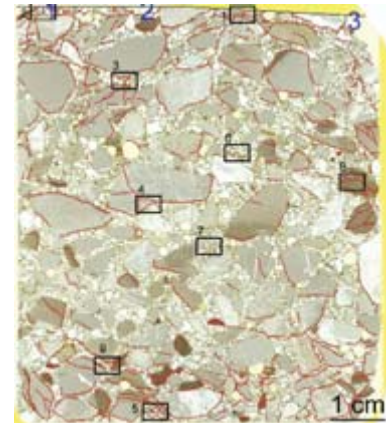


Abb. 118: N19-I-3 mit Markierung der Risse (rot), Messpunkte der Abwitterungstiefen (blau) und Lage der Fotoaufnahmen nach CiF auf einer Dünnschlifffläche von 6*6 cm²

Für den Basalt N11 wurde auf einen Vergleich vor und nach der Frostprüfung am Einzelkorn und im Beton verzichtet. Der Basalt hatte die Frostprüfung am Einzelkorn bestanden, s. [9]. Es war nicht zu erwarten, dass das Basaltgefüge im Dünnschliff nach der Frostprüfung am Einzelkorn Unterschiede zum Referenzdünnschliff aufweist.

Wenig vielversprechend waren die Untersuchungen an Einzelkörnern der befestigten Kiese. Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung der Kiese war es nur bedingt möglich eine Vorher-Nachher-Aussage zu treffen. Die Interpretation von Rissen im Gesteinsgefüge stellte sich als besonders problematisch heraus. Risse können bereits vor der Frostprüfung im Labor durch Transportvorgänge im Fluss entstanden sein, während der Gesteinsgenese oder auch durch natürliche Frost-Tau-Wechsel an der Lagerstätte (Fluss, Baggersee). Diese Risse können im Referenzdünnschliff beschrieben werden. Die Risse, die durch eine Frostprüfung im Labor evtl. hinzukommen, lassen sich von den ursprünglich vorhandenen Rissen nicht unterscheiden. Es ist damit nicht möglich, Aussagen zur Entstehung von Risse nach erfolgter Dosenfrostprüfung zu treffen. Im Gesteinsgefüge der Kiese (K3, K5, K9) wurden Risse in Grauwacke, Quarzit, Kalkstein und einem roten Kieselschiefer gefunden. Bei dem Kalkstein und dem Kieselschiefer verliefen die Risse partiell parallel und nah zum Kornrand. Eine derartige Rissausbildung resultiert vermutlich aus der Frostbeanspruchung im Labor. Die Grauwacke und der Quarzit zeigten Risse, die eher der Schichtstruktur der Gesteine folgten, jedoch in der Art auch in den Referenzproben der Einzelkörner und der Betone vor der Frostbeanspruchung zu finden waren. Die meisten anderen Gesteinskörner wiesen noch gut gerundete Kornränder ohne Abwitterungsspuren auf. Diese Gesteinskörner wurden als frostbeständig eingestuft. Für eine Bewertung der Frostbeständigkeit der Kiese wäre eine deutlich höhere Anzahl an Dünnschliffpräparaten erforderlich gewesen, durch die jedoch die Probleme bei der Interpretation der Gefügemerkmale verblieben wären.



Abb. 119: K3 nach der Dosenfrostprüfung



Abb. 120: K5 nach der Dosenfrostprüfung

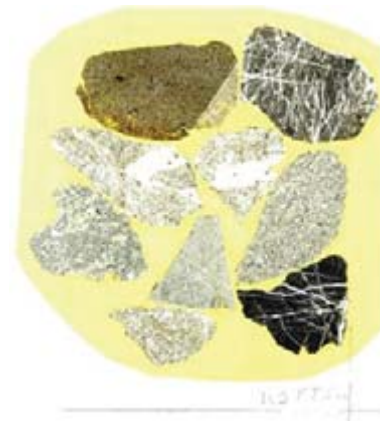


Abb. 121: K9 nach der Dosenfrostprüfung

Quantitative Rissanalyse an Laborbetonen nach CIF-Test

Die innere Schädigung der Betone wird über die in Kapitel 5.2 beschriebene Methode quantifiziert. Abb. 122 und Abb. 123 veranschaulichen am Beispiel der Probe B3-N19-I-XF3 die Resultate der Bildanalyse. Weitere Ansichten der analysierten Dünnschliffe sind Anhang D zu entnehmen. In den Abb. 124 bis Abb. 126 sind die ermittelten Rissgrößen dargestellt. Die farbliche Unterteilung resultiert aus der Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach DIN EN 1337-1 (Dosenfrost), durchgeführt von der TUM (FSt 3) [9]. Grün hinterlegte Punkte bzw. Balken stehen für eine bestandene Frost-Tausalz-Prüfung, rote Balken überschreiten das Abnahmekriterium der Dosenfrostprüfung. Als charakteristischer Wert für die innere Schädigung wird der Parameter der Rissdichte verwendet, durch den die aufgenommene Fläche sowie die aufsummierten Risslängen Berücksichtigung finden. Wie zuvor erläutert wurde, entstehen Risse durch die Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons, was bspw. aus thermischen Spannungen resultieren kann. Das hier analysierte Rissssystem im Mikrogefüge schließt jegliche Arten von Rissen mit ein (Risse in der Betonmatrix, Risse in der Gesteinskörnung, Randspalte). Somit beziehen sich die Ergebnisse der Analyse stets auf das gesamte Betongefüge. Da sich der Frost-Tausalz-Widerstand von XF4-Betonen hauptsächlich in der Menge der Abwitterung äußert und der Frost-Tau-Widerstand von XF3-Betonen in der inneren Schädigung, ist die hier angewandte Bildanalyse primär bei der Bewertung von XF3-Betonen dienlich.

Die untersuchten Proben weisen unter wiederholter Frost-Tau-Beanspruchung die in Abb. 125 und Abb. 126 gezeigten Rissbreiten und Rissdichten auf. Alle Proben verfügen über eine Rissbreite von $< 0,5$ mm. Auffällig ist, dass die Probe B3-N19-I-0-3 über die höchste Rissdichte verfügt. Der hohe Grad der inneren Schädigung äußert sich ebenfalls im prozentualen Anteil der Rissfläche gegenüber der aufgenommenen Fläche, s. Abb. 124. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine Erhöhung des Zementgehaltes einen deutlichen Anstieg der Rissbildung und damit eine Verringerung des Frost-Tau-Widerstandes mit sich bringt. Die Absenkung des w/z-Wert der Probe B1-N19-I-3 von 0,50 auf 0,45 führte zu einem geringen Anstieg der Rissdichte gegenüber B0-N19-I-3, s. Abb. 127. In wie weit dies einer Streuung unterliegt, kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht geklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen. Die aus dem vorherigen Kapitel zur petrografischen Beschreibung der Dünnschliffe erkennbaren optischen Unterschiede, s. Abb. 104, konnten mittels der Bildanalyse in Abhängigkeit der Modifizierung quantitativ nachgewiesen werden und sind in Abb. 127 aufgeführt. Während B0-N19-I-3 und B1-N19-I-3 ein ähnliches Rissbild aufweisen, wird in der Probe B3-N19-I-3 ein

deutlich intensiveres Rissbild erkennbar. Weiterhin ließ sich beobachten, dass die maximalen Rissbreiten der Probe B0-N19-I-3 von 0,21 mm auf 0,07 mm (B1-N19-I-3) und 0,08 mm (B3-N19-I-3) abnahmen. Mit Senkung des w/z-Werts oder auch Erhöhung der Zementmenge konnte die maximale Rissbreite verringert werden.

Den Ergebnissen des Frost-Tausalz-Widerstandes (Dosenfrost) zufolge hat der Muschelkalk N19 die Prüfung nicht bestanden. Dieser zeigt jedoch im Beton im Vergleich zum Festgestein N11 deutlich geringere Rissdichten und würde damit einen besseren Frost-Tau-Widerstand aufweisen. Dies widerspricht jedoch den Ergebnissen aus der Bestimmung des E-Modul-Abfalls, der in der Probe N19-I-3 deutlich höher ausgeprägt war. Auch bei der petrografischen Beschreibung der Betondünnschliffe ergab sich, dass N19-I-3 und N11-I-3 zwar eine vergleichbare Risshäufigkeit zeigten, die punktuell gemessenen Rissbreiten bei N11-I-3 aber deutlich kleiner waren. Somit hätte die Rissdichte bei N11-I-3 niedriger sein müssen als bei N19-I-3. Die Ursache liegt vermutlich in der Präparation der Dünnschliffe. Normalerweise werden die Dünnschliffe immer vom selben Präparator mit denselben Materialien präpariert. Jedoch wurden einige Betone erst bei der BAM untersucht und im Anschluss an das FIB geschickt. Diese Proben waren bereits mit einem anderen gelben Epoxidharz getränkt. Bei der automatischen Bildanalyse wird mit Schwellwerten gearbeitet. Die Schwellwertsetzung ist manuell und hat bekanntermaßen einen Einfluss auf die Bestimmung der bildanalytischen Daten. Die Schwellwertsetzung soll zukünftig bearbeiterunabhängig erfolgen, ist aber im Rahmen dieses Projektes noch nicht umsetzbar.

Unter den Kiesen zeigt der Beton mit dem verwendeten kalksteinhaltigen Gesteinskörnung K5 die größte Rissdichte. Die hohe Rissdichte des Betons und der vergleichsweise niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient des Kieses decken sich mit den Ergebnissen der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands (Dosenfrost). In Abb. 128 wird deutlich, dass die Rissdichte der Betone, die den kalksteinhaltigen Kies K5 enthalten, mit dem Wechsel der Zementart von CEM I zu CEM III abnimmt. Damit bestätigen sich die Beobachtungen und Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln, dass mit dem entsprechenden Wechsel der Zementart ein höherer Frost-Tau-Widerstand erzielt werden kann. Die Abb. 126 verdeutlicht, dass durch den Wechsel der Zementart eine ähnliche Rissdichte wie die der Proben K3-I-3 und K4-I-3 erreicht werden kann, deren Gesteinskörnungen nach Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands (Dosenfrost) als frostbeständig beurteilt wurden. Dennoch weist die Probe K5-I-3 die größte maximale Rissdichte mit 0,5 mm auf.

Die Betonproben K3-I-3 und K4-I-3 enthalten Gesteinskörnungen, die die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands (Dosenfrost) bestanden haben und über einen in vorherigen Untersuchungen nachgewiesenen hohen Frost-Tau-Widerstand verfügen. Demzufolge haben beide Proben eine erwartungsgemäß niedrige Rissdichte.

Als nicht frostbeständig, wurde der in der Probe K9-I-3 enthaltene Zorgekies eingestuft, welcher, trotz seiner hohen Heterogenität, die geringste Rissdichte der gesamten Messreihe aufzeigte. Die Ursache lässt sich auf sehr kleine Rissbreiten, nahe der Auflösungsgrenze erklären. Teilweise waren die Risse auch mit Portlandit oder Karbonatisierungsprodukten gefüllt. Nach aktuellem Entwicklungsstand der automatischen Risserkennung bereiten gefüllte Risse noch Probleme. Die automatische Erfassung von gefüllten Rissen ist ein weiteres Forschungsfeld an dem noch gearbeitet wird.

Bei Betrachtung der gesamten Messreihe, kann vermutet werden, dass Betone mit quarzhaltiger Gesteinskörnung (K3, K4) im Allgemeinen über eine niedrigere Rissdichte verfügen als Betone mit kalkhaltiger Gesteinskörnung (N19, K5).

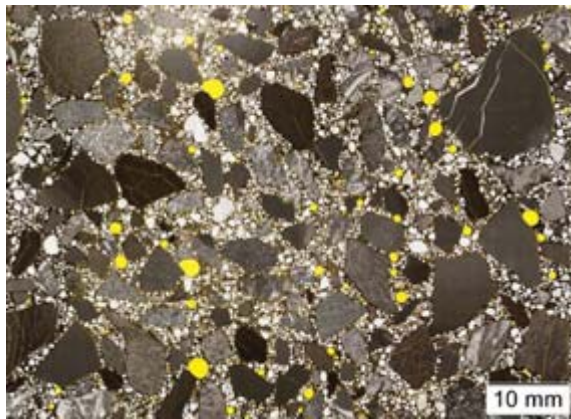


Abb. 122: Ansicht Dünnschliffaufnahme

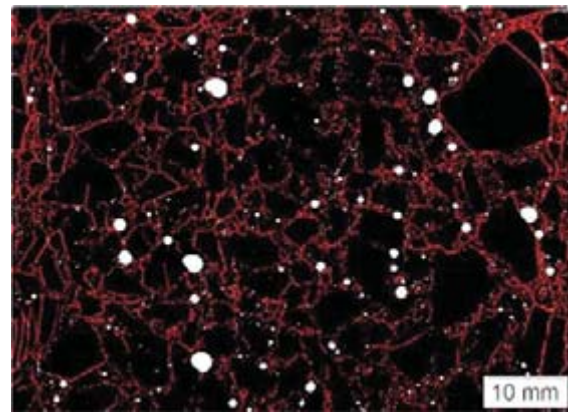


Abb. 123: Resultat Bildanalyse mit Markierung der Risse (rot), Poren (weiß), Matrix und Gesteinskörnung (schwarz)

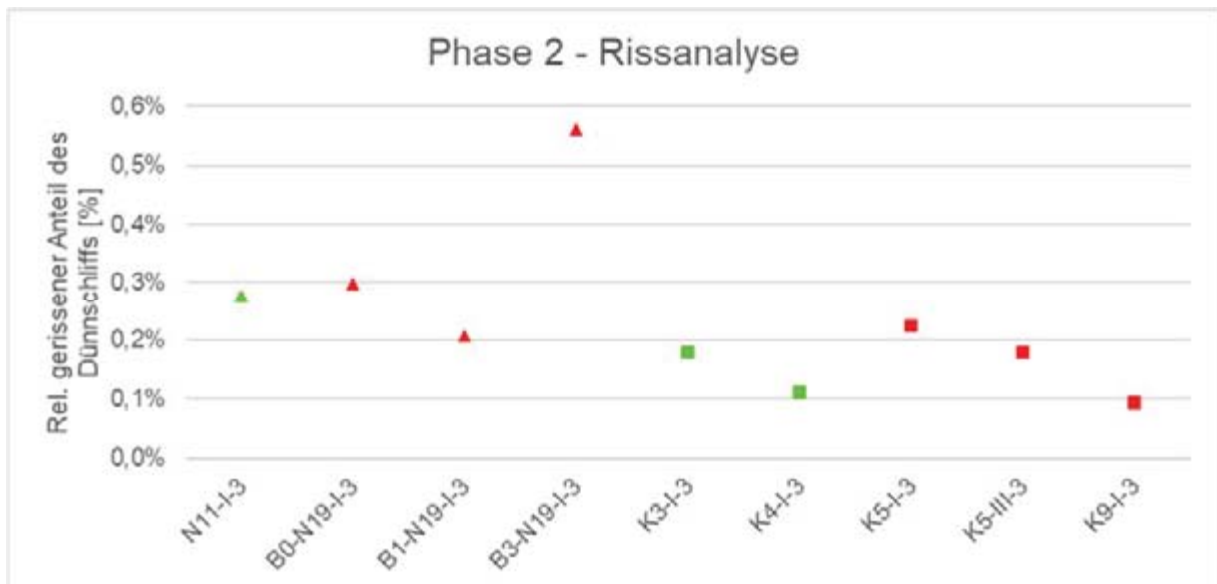


Abb. 124: Relativer gerissener Anteil der Dünnschliffe

Tab. 23: Analyierte Dünnschliffflächen

	N11-I-3	B0-N19-I-3	B1-N19-I-3	B3-N19-I-3	K3-I-3	K4-I-3	K5-I-3	K5-III-3	K9-I-3
Analyierte Fläche [mm²]	3999	3837	3777	3667	3860	4002	3998	3992	3860

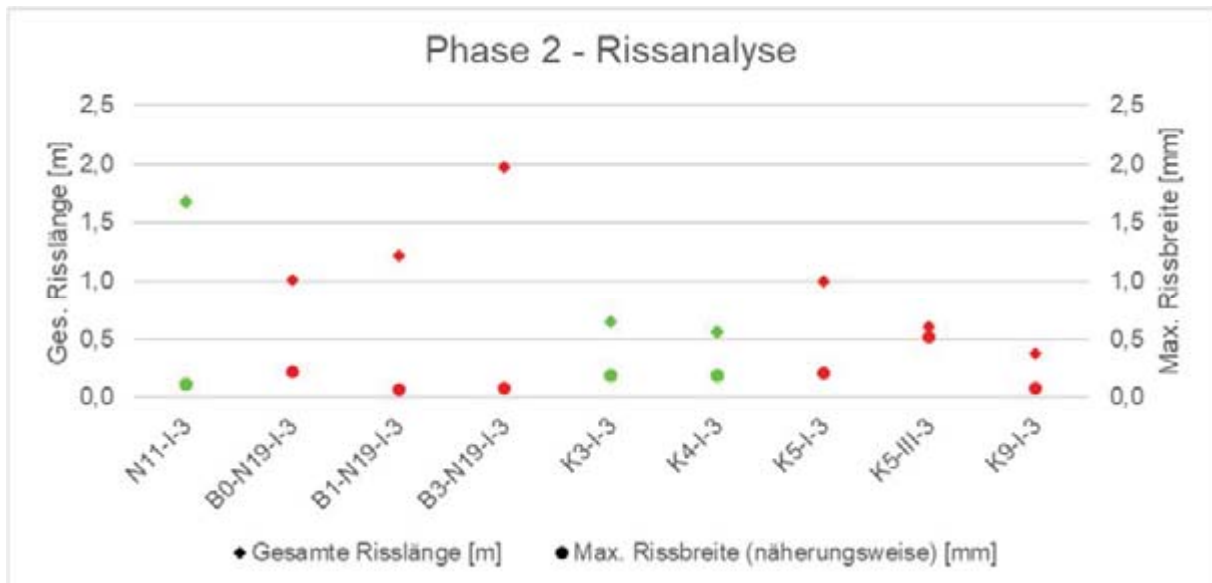


Abb. 125: Gesamte Risslängen und maximale Rissbreiten der Dünnschliffe

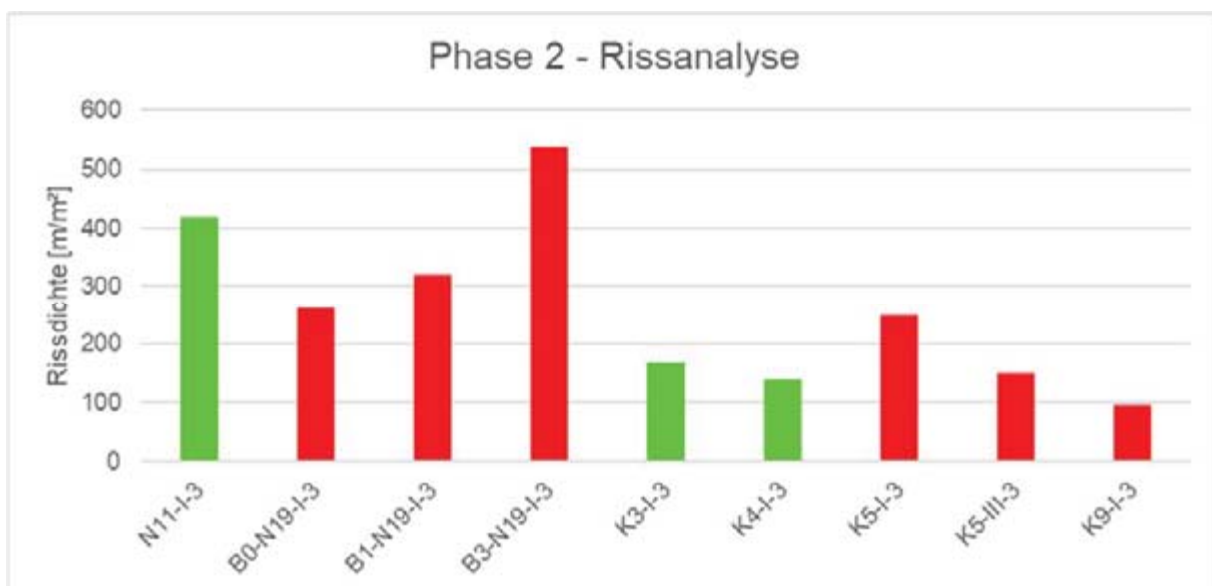


Abb. 126: Rissdichten der Betonproben

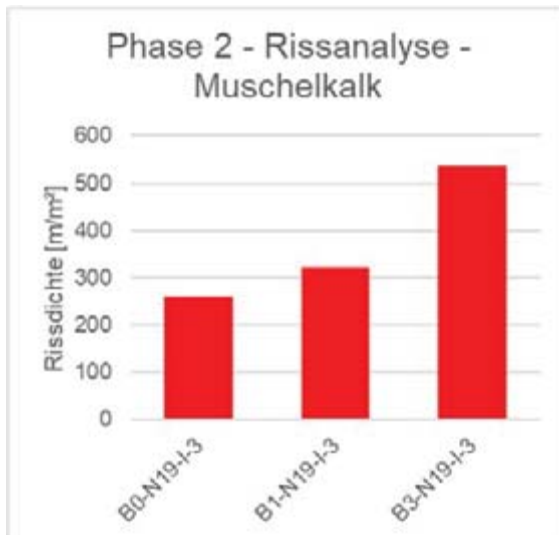


Abb. 127: Rissdichten der Betonproben mit muschelkalkhaltigem Festgestein N19

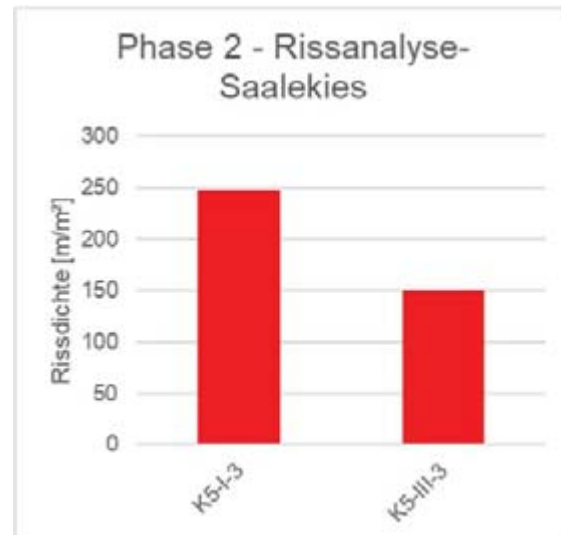


Abb. 128: Rissdichten der Betonproben mit kalksteinhaltigem Saalekies K5

6.4 Auslagerungsversuche

Die Auslagerungsversuche laufen seit 2008 und sind noch nicht abgeschlossen. Eine Weiterführung der Auslagerungsversuche ist geplant. Aus diesem Grund konnten, von der FSt 2, noch keine Untersuchungen an den ausgelagerten Betonen durchgeführt werden.

6.5 Korrelation zwischen den angewendeten Messverfahren

Die nachfolgenden Diagramme (siehe Abb. 129-3) zeigen eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Bestimmung der linearen Wärmedehnung (α_T) und der Ergebnisse von den vom VDZ (FSt 1) durchgeführten CIF- und CDF-Tests. Für die geprüften Festgesteinskörnungen N11, N19 und N22 der XF3-Betone zeigt der relative dynamische E-Modul als Abnahmekriterium für den CIF-Test eine tendenzielle Abhängigkeit zu den ermittelten α_T -Werten. Eine derartige Abhängigkeit ergibt sich für die geprüften Kiese nicht. Möglicherweise üben andere nur am Rande betrachtete Kriterien einen größeren Einfluss aus, wie z. B. Ausbildung der Phasengrenzfläche sowie der damit zusammenhängende Haftverbund zwischen Gesteinskorn und Zementsteinmatrix. Darüber hinaus ergeben sich nach Abschnitt 6.1 die α_T -Werte der Kiese, aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung, aus den gemittelten α_T -Werten der im Kies enthaltenen Hauptkomponenten (= Anteile über 10 M.-%). Damit sind Bestandteile mit Anteilen unter 10-M.-% in den α_T -Werten nicht berücksichtigt. In Summe scheint aktuell die Bestimmung der linearen Wärmedehnung von Kieskomponenten als Korrelationskriterium zu den Frostprüfparametern nicht eignet.

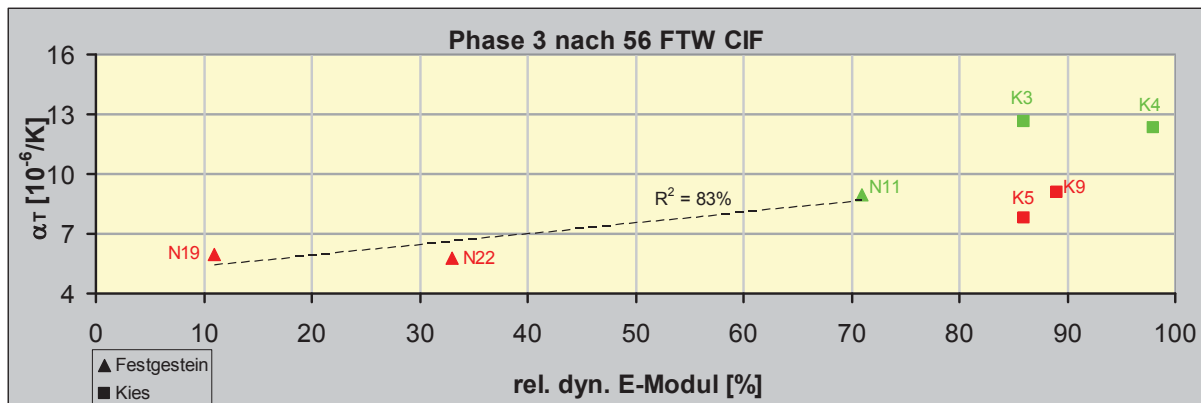


Abb. 129: Gegenüberstellung der linearen Wärmedehnung α_T und des relativen dynamischen E-Moduls nach 56 FTW im CIF-Verfahren

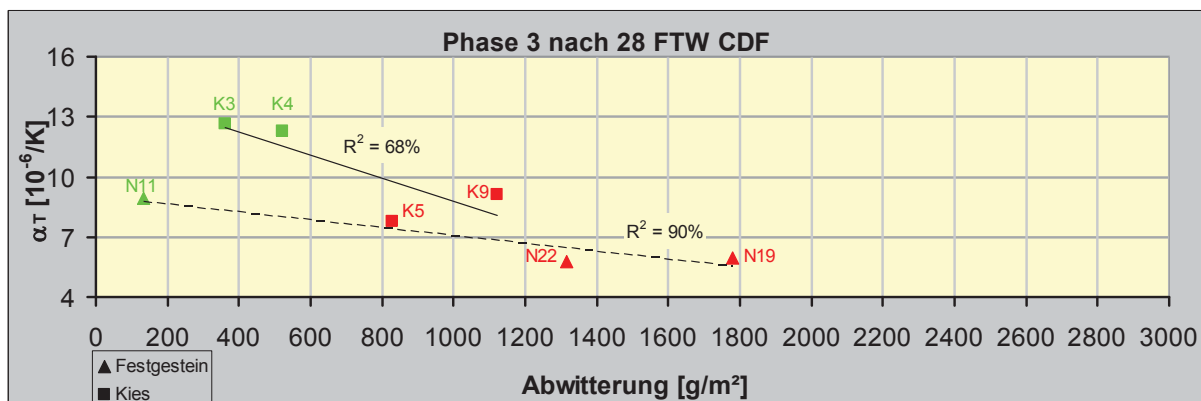


Abb. 130: Gegenüberstellung der linearen Wärmedehnung α_T und der Abwitterung nach 28 FTW im CDF-Verfahren

Die Abwitterung als Abnahmekriterium für den CDF-Test zeigt für die geprüften Festgesteinskörnungen der XF4-Betone eine gute Abhängigkeit, die Kiese lassen eine tendenzielle Abhängigkeit erkennen. Die Abwitterung von K9 nach 56 FTW wurde nicht bestimmt, so dass sich eine scheinbar höhere Abhängigkeit zeigt, als tatsächlich vorliegt. Für eine statistisch abgesicherte Aussage zur Abhängigkeit zwischen der linearen Wärmedehnung α_T und der Abwitterung liegen zu wenige Ergebnisse vor. Weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet sind erforderlich.

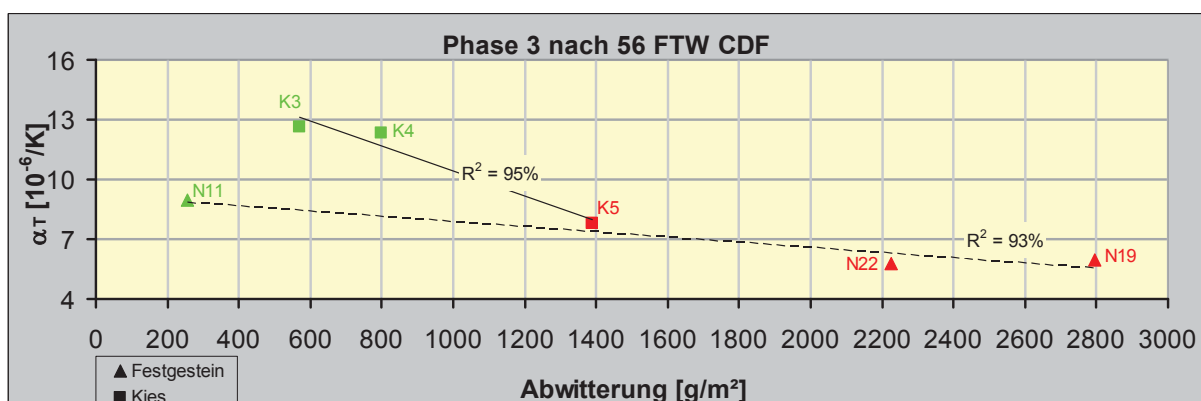


Abb. 131: Gegenüberstellung der linearen Wärmedehnung α_T und der Abwitterung nach 56 FTW im CDF-Verfahren

Die computergestützte Bildanalyse liefert quantitative Rissparameter, die einen bearbeiterunabhängigen Vergleich zwischen der inneren Schädigung an einem Dünnschliff und den Parametern aus er Frostprüfung an Laborbetonen zulassen. Die Abb. 132 stellt die Rissdichte dem Abfall des dyn. E-Moduls und der Abwitterung getrennt nach den Festgesteinen und den Kiesen dar. Prinzipiell ist eine tendenzielle Abhängigkeit zwischen der Rissdichte und dem

Abfall des dyn. E-Moduls erkennbar. Die Ursache der Diskrepanz bei B0-N19-I-3, s. auch Abb. 134, folgt aus der abweichenden Präparation der Dünnschliffe. Die unterschiedliche Gelbfärbung des verwendeten Epoxydharzes verursacht Probleme bei der Schwellwertsetzung. Daraus resultieren Abweichungen bei der Ermittlung der Rissparameter und eine Vergleichbarkeit der Proben ist nur bedingt gegeben. Mit der petrografischen Beschreibung des Dünnschliffs B0-N19-I-3 war zu erwarten, dass die Rissdichte deutlich höher hätte liegen müssen. Vor diesem Hintergrund ergibt sich auch der bereits gefundene Zusammenhang, dass eine Senkung des w/z-Wertes (B1-N19-I-3) eine deutlich bessere Frostbeständigkeit erzielt, als eine Erhöhung der Zementmenge (B3-N19-I-3).

Bei den Kiesen folgt ebenfalls mit höherem E-Modul-Abfall eine Erhöhung der Rissdichte. Lediglich der Beton K5-III-3 zeigt eine im Vergleich zum E-Modul-Abfall zu geringe Rissdichte, s. auch Abb. 135. Die Begründung ist in der Auswahl der analysierten Dünnschlifffläche zu suchen. Die Dünnschliffe wurden aus verschiedenen Probekörpern präpariert, aus denen unterschiedliche Dünnschliffgrößen resultieren. Vom VDZ (FSt 1) wurden CiF und CDF geprüfte Probekörper direkt an das FIB (FSt 2) geschickt. Daraus ergaben sich Dünnschliffformate von 10*6 cm. Ein Teil der Proben vom VDZ wurde zunächst bei der BAM (FSt 4) mittels eines Computertomographen (CT) auf innere Schädigung hin untersucht. Aus diesen Proben ergaben sich Dünnschliffformate von 6*6 cm². Für die quantitative Rissfassung an Dünnschliffen wurde auf eine vergleichbar große Analysefläche geachtet, s. Tab. 20. Als Folge waren einige Dünnschliffaufnahmen auf eine vergleichbare Analysefläche zu beschneiden. Die Probe K5-III-3 zeigte vor allem an den Randbereichen (Prüffläche und gegenüber der Prüffläche) eine deutliche Rissbildung, die bei der Analyse teilweise nicht in der Analysefläche lag. Der Analysewert für die Rissdichte ist damit zu niedrig.

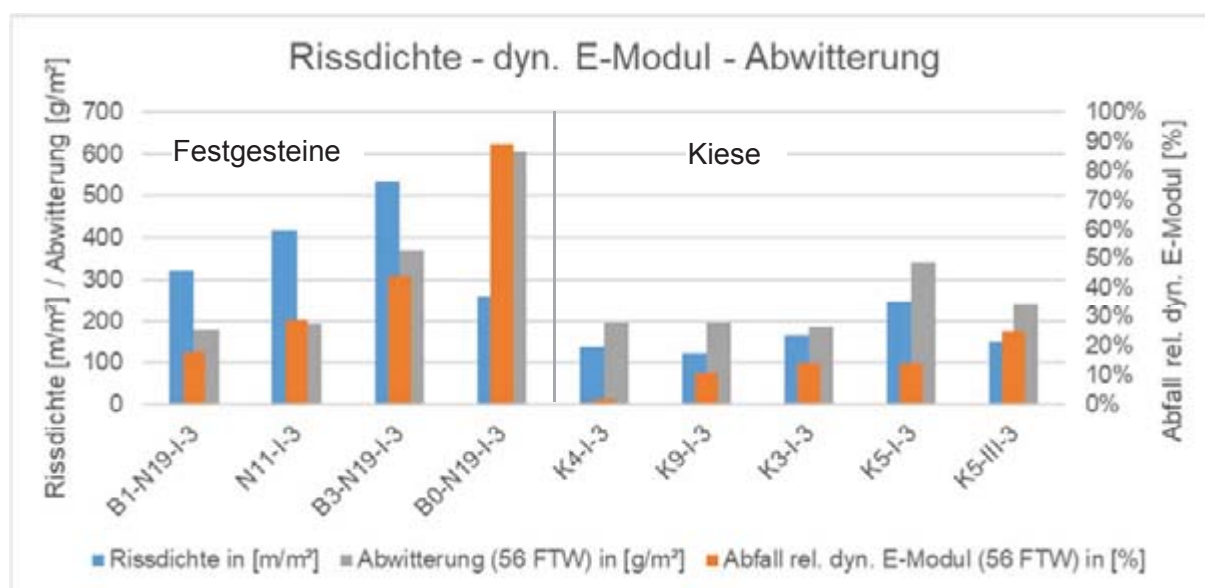


Abb. 132: Gegenüberstellung der Rissdichte aus der Bildanalyse, Abwitterung und der Abfall des dyn. E-Moduls nach 56 FTW

In der Abb. 133 ist die Rissdichte den α_T -Werten bei -20°C gegenübergestellt. Allgemein kann formuliert werden, dass bei gleicher Betonzusammensetzung und verschiedenen Gesteinskörnungen mit steigendem α_T -Wert der Gesteinskörnung tendenziell die Rissdichte sinkt. Die Parameter verhalten sich damit gegenläufig. Die Rissdichte von B0-N19-I-3 ist nach oben genannten Gründen deutlich zu niedrig und passt damit nicht in die Korrelation. Wird die Betonrezeptur verändert, z.B. durch Senkung des w/z-Wertes (B1-N19-I-3), Erhöhung der Zementmenge (B3-N19-I-3) oder der Wechsel der Zementart (K5-III-3) ist ein Vergleich mit

dem α_T -Wert der Gesteinskörnung allein nicht zweckmäßig. Die Kenntnis zum Wärmedehnungsverhalten der umgebenden Betonmatrix muss dann hinzugezogen werden.

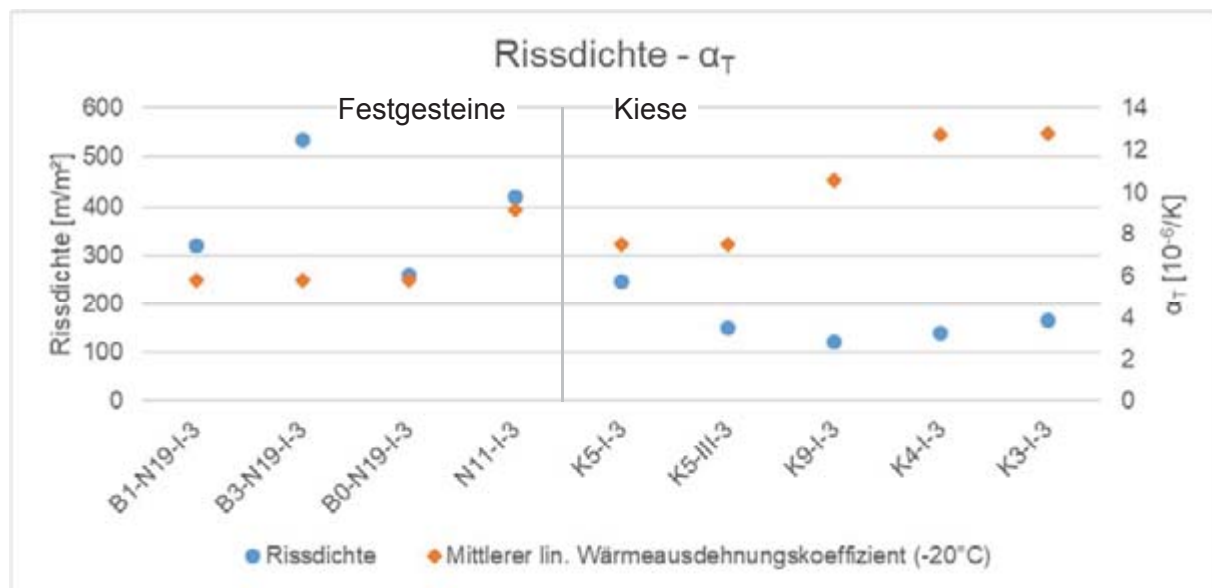


Abb. 133: Gegenüberstellung der Rissdichte aus der Bildanalyse und des mittleren lin. Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T bei $-20^\circ C$

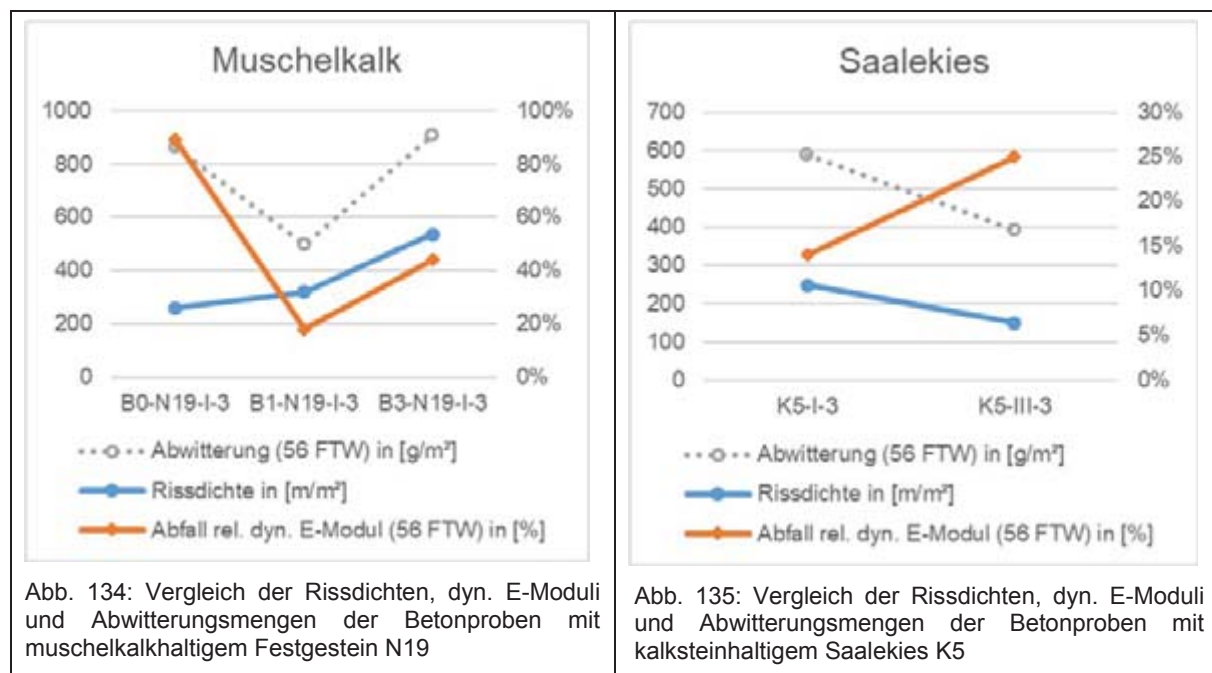


Abb. 134: Vergleich der Rissdichten, dyn. E-Moduli und Abwitterungsmengen der Betonproben mit muschelkalkhaltigem Festgestein N19

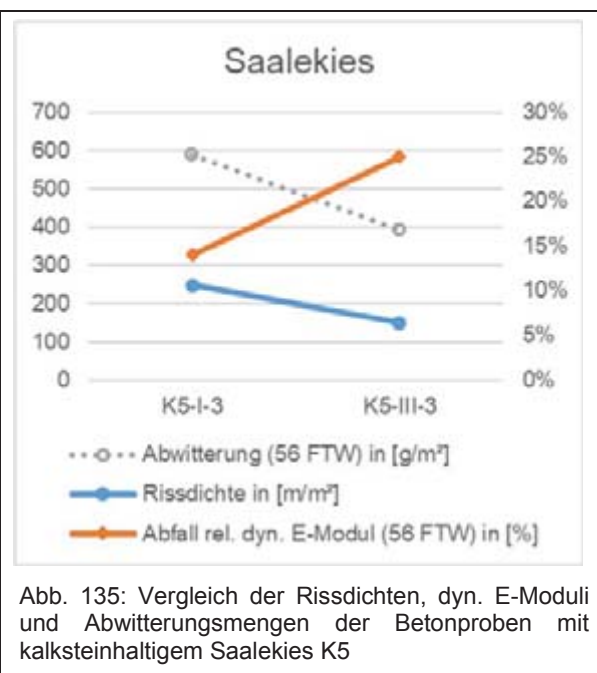


Abb. 135: Vergleich der Rissdichten, dyn. E-Moduli und Abwitterungsmengen der Betonproben mit kalksteinhaltigem Saalekies K5

7 Zusammenfassung

Aufgabe der FSt2 war zu klären, ob das Versagen von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung neben Gefüge und Mineralphasenzusammensetzung auch auf das Dehnungsverhalten bei entsprechenden Temperaturen im Frost-Tauwechselbereich zurückzuführen ist. Zu den Untersuchungsschwerpunkten gehörten hierbei das Mikrogefüge (Dünnschliffe), die lineare Wärmedehnung (Dilatometer) und der Mineralphasenbestand (XRD). Die Projektbearbeitung gliederte sich in Laborversuche zur Erfassung der petrographischen Eigenschaften an Einzelkörnungen und an den mit den Einzelkörnungen hergestellten

Betonen sowie in petrografische Untersuchungen an ausgelagerten Betonen. Die Durchführung und Auswertung der Laborversuche erfolgte bis Ende 2010. Die Auslagerungsversuche laufen seit 2008 und sind noch nicht abgeschlossen. Eine Weiterführung der Auslagerungsversuche ist geplant. Aus diesem Grund konnten, von der FSt 2, noch keine Untersuchungen an den ausgelagerten Betonen durchgeführt werden. Der vorliegende Schlussbericht bezieht sich damit ausschließlich auf die Ergebnisse der Laboruntersuchungen.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden in der Phase I (Screening-Phase) 22 Gesteinskörnungen petrografisch charakterisiert. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde die Anzahl der Gesteinskörnungen auf 6 Festgesteine und 6 Kiese reduziert. In der Phase II erfolgten Untersuchungen an Dünnschliffen. Ziel war die Erfassung von Gefügemerkmalen, die zur Klärung für das z.T. unterschiedliche Verhalten von Gesteinskörnungen bei der Frostprüfung am Einzelkorn sowie eingebettet im Beton beitragen. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Einzelkorn bildeten die Grundlage für die Auswahl der Gesteinskörnungen, die für die Laborfrostprüfungen an Betonen und für die ausgelagerten Betone verwendet werden sollten.

Der vorliegende Bericht umfasst die Ergebnisse aus dem AP 2 und die Beantwortung folgender Fragen:

- Lassen sich die ermittelten petrografischen Eigenschaften in Zusammenhang mit dem Verhalten der Gesteinskörnung bei Frostbeanspruchung am Einzelkorn oder auch eingebettet im Beton bringen?
- Liefern die petrografischen Eigenschaften einen Beitrag, um die Unstimmigkeiten zwischen den ermittelten Kennwerten aus den anderen Arbeitspaketen zu lösen?
- Lassen sich die Ergebnisse aus den Untersuchungen von Einzelkörnern und dem Verhalten im Gesamtsystem Beton korrelieren?

Zum Projektbeginn war die Zusammensetzung der Kiese zu bestimmen. Kiese sind naturgemäß heterogen. Die zu bestimmenden Eigenschaften (Mineralphasenzusammensetzung, lineare Wärmedehnung, petrografische Gefügemerkmale) setzen sich aus den Eigenschaften der einzelnen Bestandteile zusammen. Von den 11 nach Augenschein untersuchten Kiesen enthielten 7 Kiese drei oder mehr Gesteinsarten und nur 2 Kiese eine Gesteinsart mit einem Anteil ≥ 10 M.-%. Die Kiese K1, K5 und K7 zeigten hohe Kalksteingehalte, während die Kiese K2, K3, K4, K5, K10 und K26 hauptsächlich Quarz und Quarzit aufwiesen. Die Ausnahmen zu den beiden Gruppen um Kalkstein und Quarz/ Quarzit bildeten der Kies 6 mit 67 M.-% Sandstein und der Kies 9 mit 47 M.-% konglomeratischer Grauwacke.

Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α_T und die Mineralphasenzusammensetzung (XRD) wurde an den 11 Festgesteinen und den jeweiligen Kiesbestandteilen mit einem Anteil ≥ 10 M.-% bestimmt. Es stellten sich α_T -Werte bei -20°C zwischen $3,63 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ (N20) und $12,80 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ (K3) ein. Mit den Ergebnissen aus der XRD zeigte sich der bekannte Zusammenhang zwischen dem Quarzgehalt der Gesteinskörnung und dem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T . Die Gesteinskörnungen N12, N16, N17 sowie K2, K3, K4, K6, K8 und K10 mit vergleichsweise hohen Quarzgehalten lieferten hohe α_T -Werte. Die Kalksteinvertreter unter den untersuchten Gesteinskörnungen N13, N15, N19, N22 sowie K1, K7 und K5 wiesen vergleichsweise niedrige α_T -Werte auf. Quarz- und karbonatfreie Gesteinskörnungen wie N11, N18 und N14 (mit vernachlässigbaren 3,3% Quarz) bestehen vorwiegend aus Pyroxenen und einem teilweise sehr hohen amorphen Anteil. Hier wurden hohe α_T -Werte ermittelt.

Für die Phase II wurden Gesteinskörnungen favorisiert, die eine hohe Ergebnisbandbreite für die Frost- und Frost-Tausalzversuche der Betone erwarten ließen. Deshalb wurden Kiese mit einem hohen Kalksteingehalt (K5) sowie mit einem hohen Quarzgehalt (K8) für die CiF-/ CDF-

Prüfung ausgewählt. Der Weserkies (K6) mit dem hohen Sandsteingehalt und der Zorgekies (K9) mit dem hohen Grauwackeanteil nahmen eine Sonderstellung ein und sollten ebenfalls weiter untersucht werden. Ergänzend zur petrografischen Fragestellung war die Kombination Rundkorn, gebrochenes Korn der Kiese K3 und K4 aus dem gleichen Lieferwerk interessant. Bei den Festgesteinen verblieben in Phasen II N11, N12, N15, N17, N19 und N22 im Programm. Die polarisationsmikroskopischen Gefügeuntersuchungen belegten, dass sich Risse, Poren und Hohlräume ebenso wie Inhomogenitäten in der Mineralverteilung auf die Ermittlung der linearen Wärmedehnung auswirkten und große Schwankungsbreiten verursachten. Es konnte kein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Dosenfrostprüfung und den untersuchten Gefügeeigenschaften hergestellt werden.

Für die Hauptuntersuchungsphase wurden auf Basis der Ergebnisse aus der Phase I und II 3 Festgesteine (N11, N19, N22) und 4 Kiese (K3=K26, K4, K5, K9) für die Frostprüfungen (CiF, CDF) an Laborbetonen ausgewählt.

Bei der anschließenden petrografischen Beschreibung der befestigten Laborbetone wurden deutliche Unterschiede in der Rissintensität festgestellt. Von einer punktuellen Rissbildung des Betons K5-I-4 bis zu einer starken Schädigung des Betongefüges in N19 I-3 lag eine große Bandbreite von Gefügeschäden infolge der Frostbeanspruchung vor. Die Risse bildeten sich an Phasengrenzflächen aus, setzten sich teilweise in die Zementsteinmatrix fort und bei augenscheinlich fehlender Frostbeständigkeit der Gesteinskörnung traten Gefügerisse im Gesteinskorn auf. Randspalte resultierten aus Unverträglichkeiten der Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Gesteinskorn und Zementsteinmatrix. Der Einfluss der Kornoberfläche (Rundkorn/ gebrochenes Korn) wurde an den Kiesen K3 (Rundkorn) und K4 (gebrochenes Korn) untersucht. Es ergab sich der erwartete Zusammenhang des geringeren Haftverbundes zwischen Gesteinskorn und Zementsteinmatrix aufgrund einer ungenügenden Oberflächenrauigkeit bei Rundkörnern gegenüber gebrochenem Korn. Als Folge der Frost-Tauwechselbeanspruchung entstanden beim Kies K3 gegenüber dem Kies K4 vermehrt Randspalten um die Gesteinskörner. Daraus resultierte für K3 auch ein höherer Abfall des dyn. E-Moduls.

Nach Abschluss der Untersuchungen an Betondünnschliffen ergab sich eine Einteilung in 3 Gruppen unter Berücksichtigung der Abwitterungstiefe und der inneren Gefügeschädigung. In der Gruppe I mit hoher Abwitterung waren erwartungsgemäß ausschließlich XF4-Betone zu finden. Hohe innere Gefügeschäden traten ausschließlich bei XF3-Betonen auf. Dieses Ergebnis drehte sich zur Gruppe III hin um. Die XF3-Betone zeigten prüftechnisch bedingt geringe bzw. keine Abwitterung und die XF4-Betone aufgrund der zusätzlich eingebrachten Luftporen keine bzw. nur eine punktuelle Rissbildung. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der linearen Wärmedehnung lieferten niedrige lineare Ausdehnungskoeffizienten α_T (ca. $4,0-6,4 \cdot 10^{-6}/K$) der Gesteinskörnung für XF4-Betone eher hohe Abwitterungen. Die XF3-Betone zeigten dann stärkere innere Gefügeschäden. Bei mittleren α_T -Werten (ca. $6,5-12 \cdot 10^{-6}/K$) war die Frostbeständigkeit der Betone von der Art des eingesetzten Bindemittels und dem Einsatz der Gesteinskörnung als gebrochenes Material von Bedeutung. Während sich ein Wechsel der Zementart von CEM I zu CEM III bei XF3-Betonen positiv auf die innere Schädigung auswirkte, erhöhten sich die Abwitterungsmengen bei XF4-Betonen.

Die Risse infolge der Frost-Tauwechselbeanspruchung bei XF3-Betonen zeigten neben den Rissweiten den Grad der inneren Schädigung der Betonmatrix. Die petrografisch beschriebene innere Schädigung stimmte tendenziell mit dem vom VDZ gemessenen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls überein. Dies bestätigte auch die im Entwicklungsstadium befindliche Methode zur quantitativen Risserfassung an Dünnschliffen mit Hilfe einer computergestützten Bildanalyse. Hier zeigte sich jedoch, dass Risse im Bereich der Auflösungsgrenze (Rissweite $< 3\mu m$), gefüllte Risse und die Probenpräparation der Dünnschliffe einen erheblichen Einfluss

auf die quantifizierten Rissparameter ausübten. Dennoch ergab sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen der erfassten Rissdichte und dem ermittelten Abfall des dyn. E-Moduls.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Bestimmung der linearen Wärmedehnung im Dilatometer, der Mineralphasenbestand (XRD), die Bewertung des Mikrogefüges an Dünnschliffen und die quantitative Erfassung der inneren Schädigung durch die computergestützte Bildanalyse wertvolle Methoden zur ergänzenden Bewertung der Frostbeständigkeit der Einzelkörnung und der im Beton eingebetteten Gesteinskörnungen darstellen. Die Verknüpfung dieser Informationen kann einen deutlichen Mehrwert für die Präzisierung der Prognose des FTW/ FTSW der Gesteinskörnung bieten.

8 Literatur

- [1] Dettling, H.: Die Wärmedehnung des Zementsteines, der Gesteine und der Betone.- Diss. TH Stuttgart 1961
- [2] Dombrowski, K.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton.- Dissertation Bauhaus-Universität Weimar 2003, 272 S.
- [3] Jacobsen, U.H.; Johansen, V.; Thaulow, N.: Optical Microscopy – a Primary Tool in Concrete Examination.- Ramboll – Bulletin no. 65, 1997
- [4] Manns, W.; Neubert, B.; Wies, S.: Frostwiderstand von Betonzuschlag. AiF-Forschungsvorhaben Nr. 9293 – Schlussbericht des Vorhabens vom 31.07.1996
- [5] Peschel, A.: Natursteine.- Verl. Grundstoffind. 1977, 390 S.
- [6] Schön; J.: Petrophysik-Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen.- Enke Verl. Stuttgart 1983, 405 S.
- [7] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff.- Birkhäuser Verlag 2001, 340 S.
- [8] Streicher, D.: Dilatometrische Untersuchungen an Natursteinen.- Dipl. Arbeit Bauhaus - Uni Weimar 1995, 75 S.
- [9] Wörner, Th.; Westiner, E.; Neidinger, S.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen (52-F-0002). - Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15212 N/1, München Nov.'2010
- [10] Müller, Ch., Weise, F.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Prüfung von Gesteinskörnungen im Beton“. Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15213 N, Nov.'2010
- [11] Patzelt, M.; Erfurt, D.; Heinrich, U.; Ludwig, H.-M.: Computergestützte Bildanalyse zur quantitativen Bestimmung von Rissen in Betondünnschliffen / Computer-aided image analysis for the quantitative determination of cracks in concrete thin sections; Konferenzband der 20. ibausil in Weimar – Band 1, S. 1-1057, ISBN 978-3-00-059950-7

- [12] DIN EN 1992-1-1:2011-01 (EC2) – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spanbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; dt. Fass. EN 1992-1-1:2004 + AC: 2010.
- [13] Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I. & Frise, E. et al. (2012), "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis", Nature methods 9(7): 676-682, PMID 22743772, doi:10.1038/nmeth.2019
- [14] Arganda-Carreras, I.; Kaynig, V. & Rueden, C. et al. (2017), "Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy pixel classification.", Bioinformatics (Oxford Univ Press) 33 (15), PMID 28369169, doi:10.1093/bioinformatics/btx180
- [15] Freyburg, E.; Schliffkowitz (jetzt Erfurt), D.: Bewertung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen nach petrographischen und mikrostrukturellen Kriterien.- 16. IBAUSIL Weimar 2006, Tagungsband 2, S. 355-371
- [16] Verein Deutscher Zementwerke e. V.: Zement-Taschenbuch 2008, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 51. Ausgabe, S. 357
- [17] Dettling, H.: Die Wärmedehnung des Zementsteins der Gesteine und der Betone. In Weigler, H.; Fischer, R.; Dettling, H.: Verhalten von Betonen bei hohen Temperaturen. – Berlin: Ernst & Sohn, 1964. – (DAfStb: Schriftenreihe 164)
- [18] Ziegeldorf, S.; Kleiser, K.; Hilsdorf, H. K.: Vorherbestimmung und Kontrolle des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Beton. – Berlin: Ernst & Sohn, 1979. – (DAfStb: Schriftenreihe 305)

Ergebnisse - Bestimmung der linearen Wärmedehnung

N12.....	2
N13.....	4
N14.....	6
N15.....	7
N16.....	9
N17.....	11
N18.....	13
N19.....	15
K1.....	16
K2.....	18
K4.....	20
K6.....	22
K7.....	24
K8.....	26
K9.....	27
K10.....	29

N12

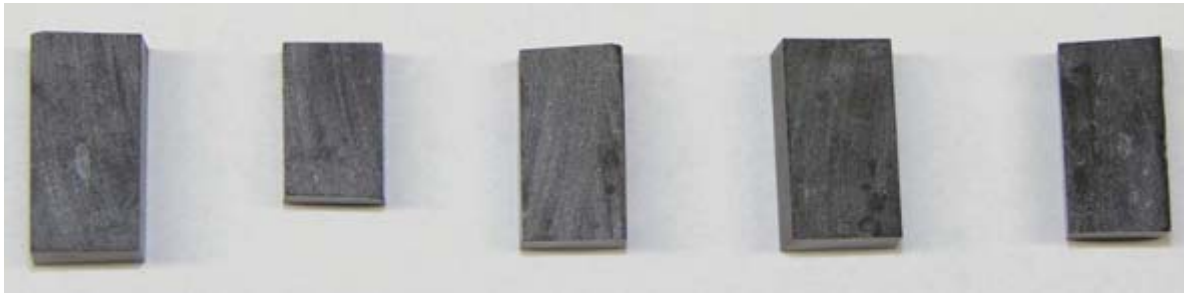


Abb. A- 1: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Basalt N12

Tab. A- 1: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N12 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Quarzporphyr
Datum	26.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁻⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N12					
N12-1	8,13	8,32	8,29	8,57	8,74
N12-2	9,03	8,56	8,87	8,94	9,02
N12-3	9,01	8,75	8,74	8,91	9,02
N12-4	15,35	15,56	14,47	12,01	11,30
N12-5	10,43	9,53	9,78	9,96	10,19
Mittelwert	9,15	8,79	8,92	9,10	9,24
Stabw	0,95	0,52	0,62	0,60	0,65
Varia-koeff.	10,39	5,96	7,01	6,60	6,98
5%-Quantil	9,01	8,60	8,77	8,92	9,02
95%-Quantil	14,37	14,35	13,53	11,60	11,08

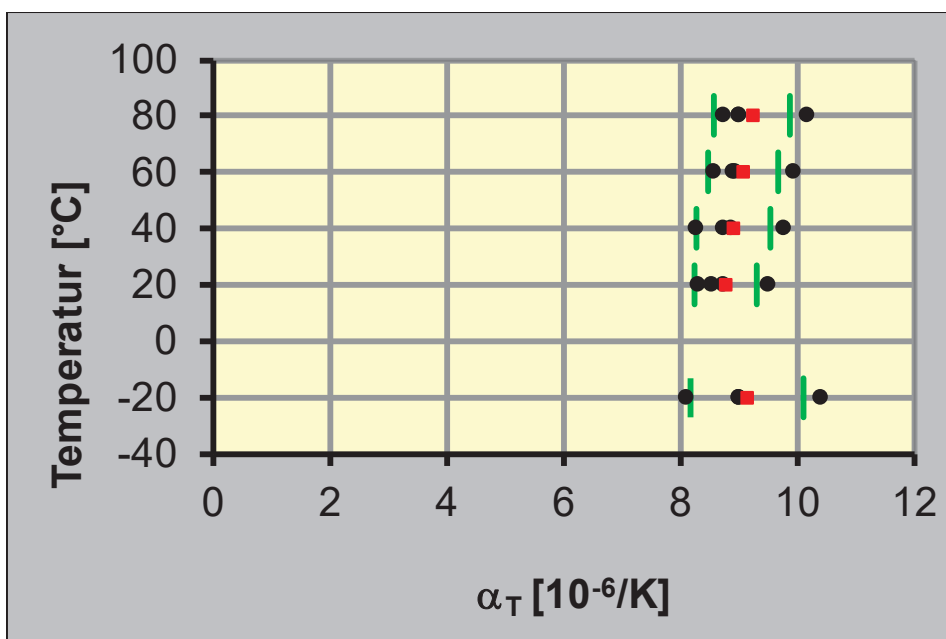


Abb. A- 2: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N12 in Abhängigkeit der Temperatur

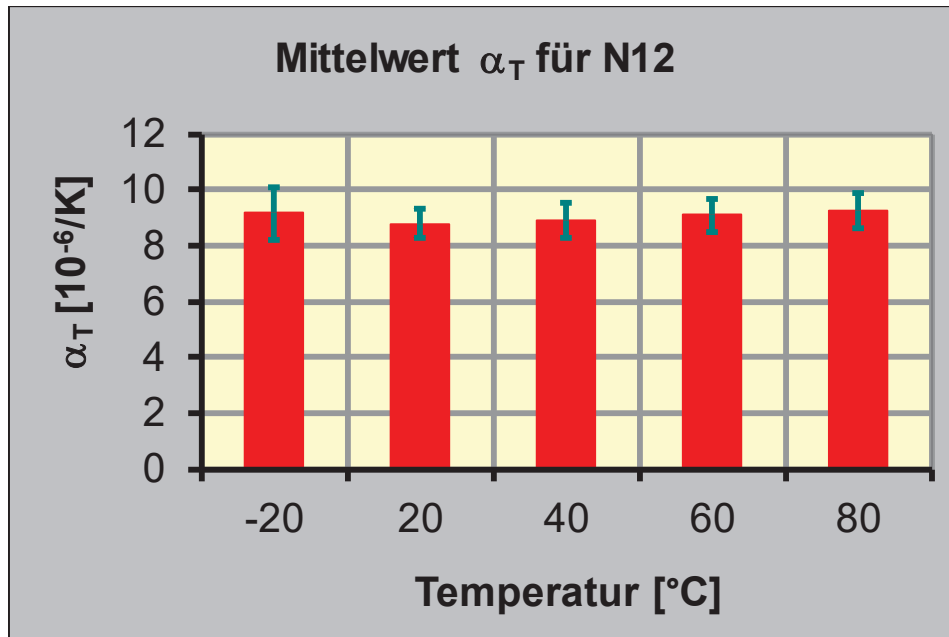


Abb. A- 3: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N12 in Abhängigkeit der Temperatur

N13



Abb. A- 4: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Muschelkalk 1 N13

Tab. A- 2: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N13 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Muschelkalk 1
Datum	26.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁻⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N13					
N13-1	4,26	4,12	5,13	5,74	6,17
N13-2	7,80	7,78	7,71	7,94	8,19
N13-3	3,75	3,84	4,40	4,72	4,93
W N13-3	4,80	4,72	5,60	5,74	5,86
N13-4	6,09	6,61	6,82	7,06	7,00
N13-5	7,26	10,51	9,51	6,61	6,92
W N13-5	2,62	2,50	5,88	5,89	4,94
N13-6	5,18	5,58	5,68	5,94	6,13
W N13-6	6,77	6,84	6,71	7,33	7,59
Mittelwert	5,66	6,26	6,53	6,30	6,51
Stabw	1,65	2,58	1,88	1,14	1,12
Varia-koeff.	29,22	41,21	28,84	18,07	17,19
5%-Quantil	3,07	3,04	4,88	5,13	4,93
95%-Quantil	7,67	9,83	9,06	7,72	7,89

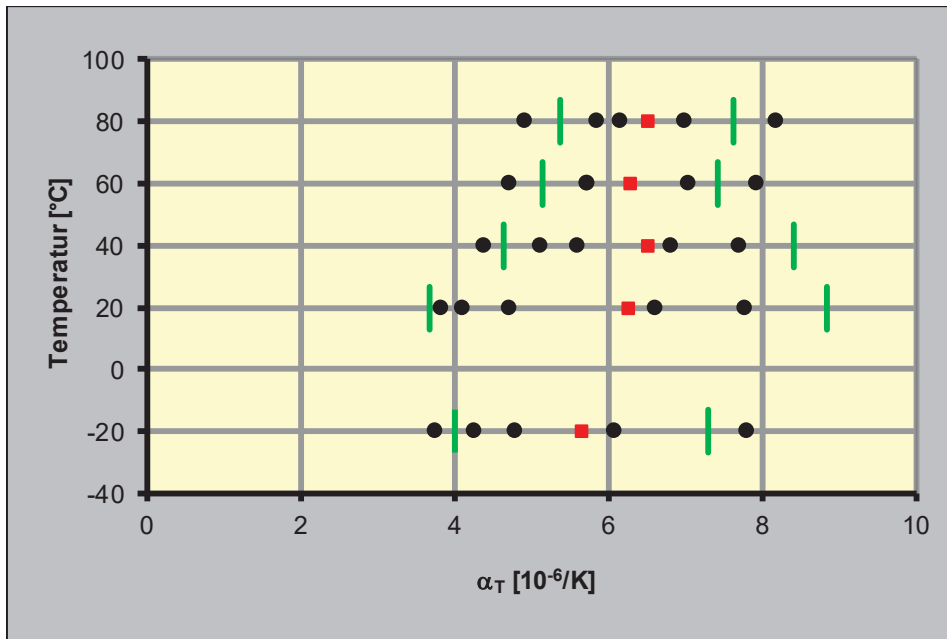


Abb. A- 5: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N13 in Abhängigkeit der Temperatur

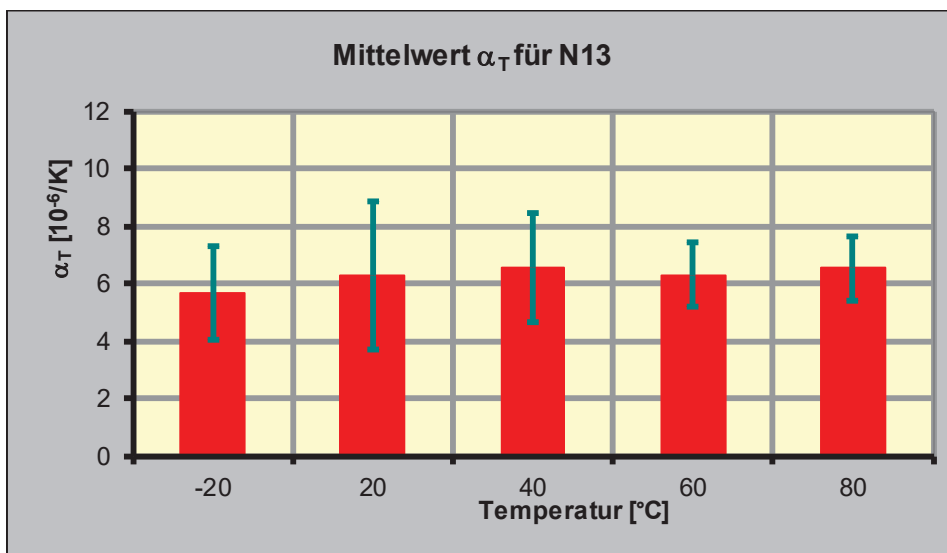


Abb. A- 6: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N13 in Abhängigkeit der Temperatur

N14

Abb. A- 7: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Diabas N14

Tab. A- 3: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N14 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Diabas
Datum	26.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁻⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N14					
N14-1	7,43	5,95	6,56	6,93	7,15
N14-2	8,88	7,89	8,19	8,36	8,51
N14-3	10,28	9,20	9,23	9,22	9,24
N14-4	8,57	7,99	7,88	7,97	8,04
N14-5	9,15	8,25	8,29	8,27	8,38
Mittelwert	8,86	7,86	8,03	8,15	8,26
Stabw	1,03	1,18	0,96	0,83	0,76
Varia-koeff.	11,60	15,08	12,00	10,13	9,21
5%-Quantil	8,63	7,86	7,91	8,01	8,08
95%-Quantil	10,05	9,01	9,04	9,05	9,09

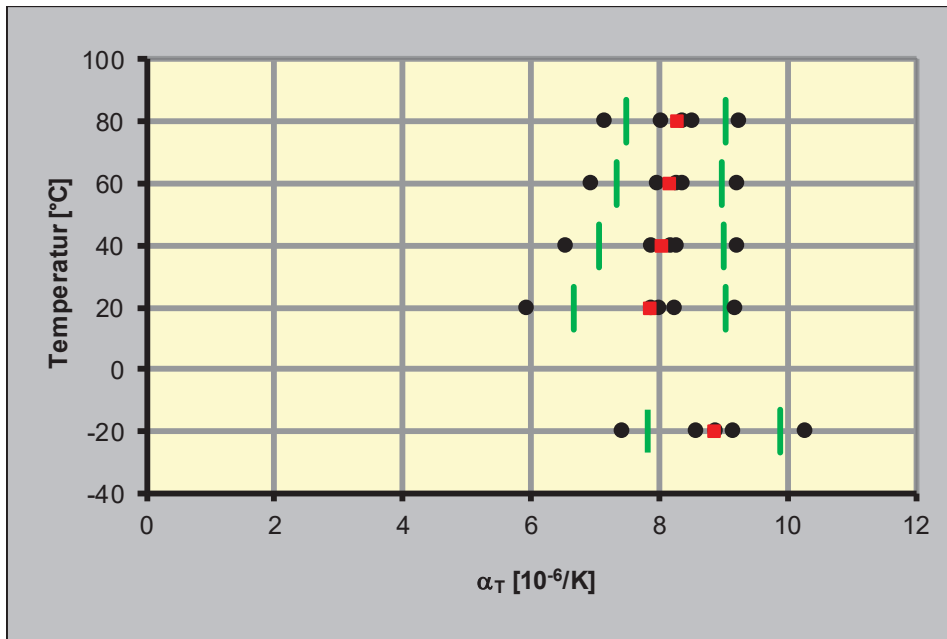


Abb. A- 8: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N14 in Abhängigkeit der Temperatur

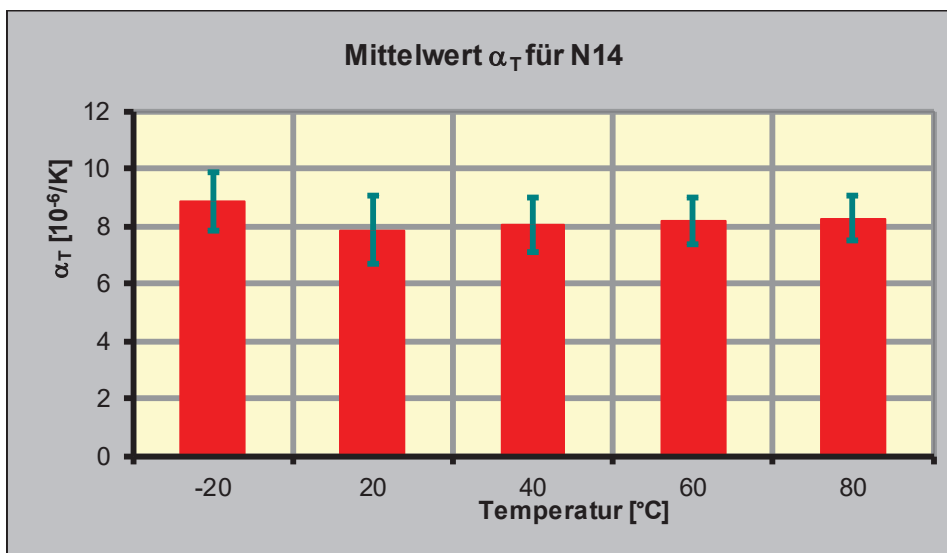


Abb. A- 9: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N14 in Abhängigkeit der Temperatur

N15

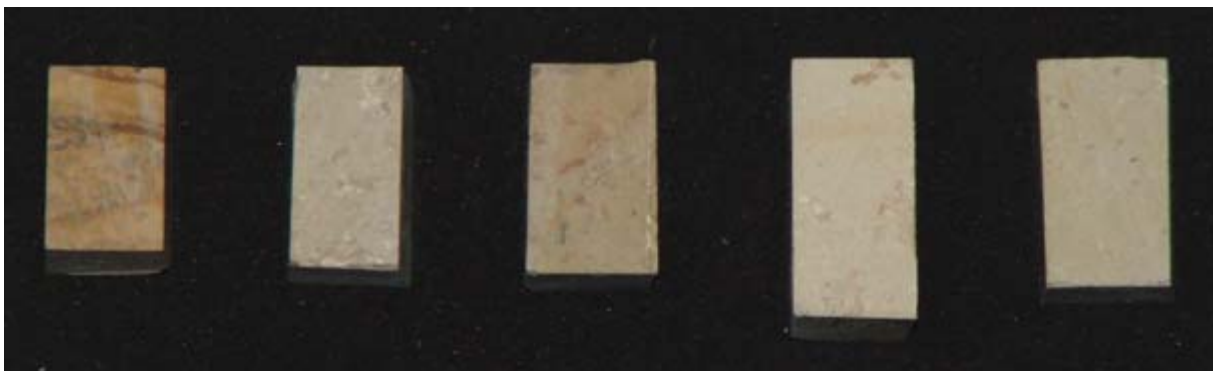


Abb. A- 10: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Jurakalk N15

Tab. A- 4: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N15 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Jurakalk
Datum	26.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N15					
N15-1	5,74	5,45	5,52	5,63	5,74
N15-2	5,10	4,63	4,45	4,01	3,72
N15-3	5,07	4,46	4,62	5,21	5,46
N15-4	5,62	5,65	5,61	5,68	5,82
N15-5	6,40	6,00	6,13	6,29	6,44
Mittelwert	5,59	5,24	5,27	5,36	5,44
Stabw	0,55	0,67	0,71	0,85	1,02
Varia-koeff.	9,76	12,70	13,47	15,83	18,83
5%-Quantil	5,08	4,49	4,48	4,25	4,06
95%-Quantil	6,27	5,93	6,03	6,17	6,32

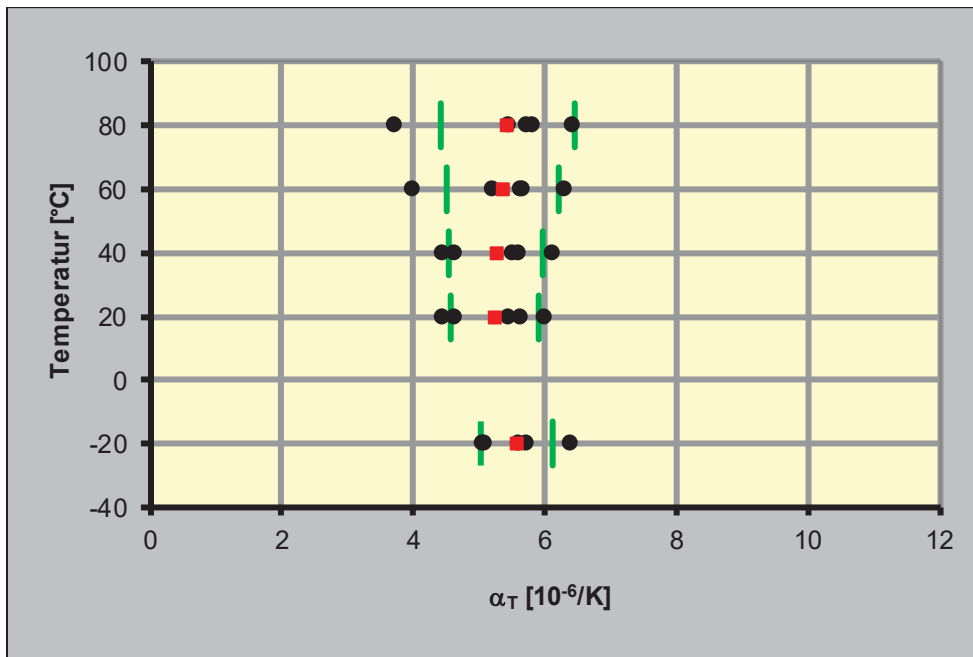


Abb. A- 11: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N15 in Abhängigkeit der Temperatur

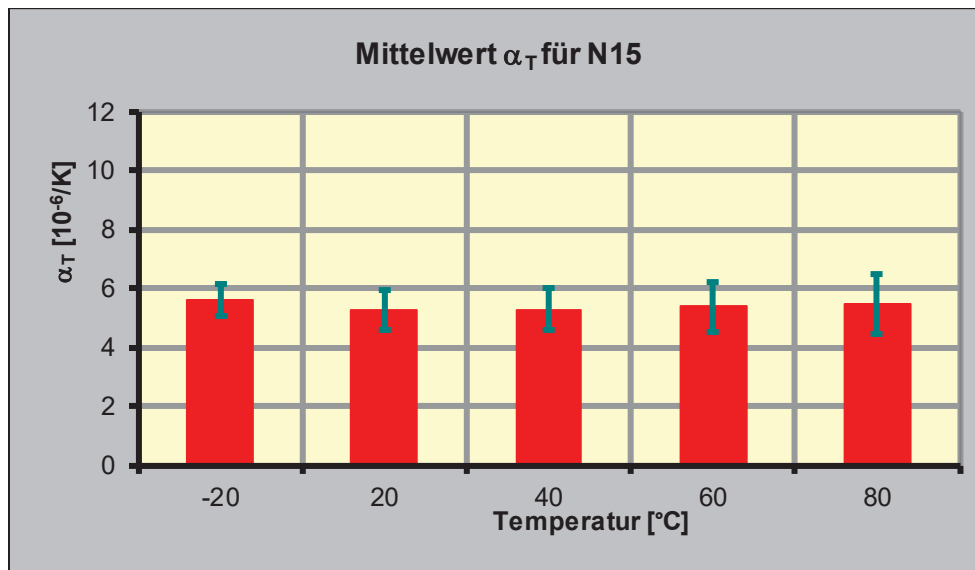


Abb. A- 12: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N15 in Abhängigkeit der Temperatur

N16



Abb. A- 13: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Gabbro N16

Tab. A- 5: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N16 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Gabbro
Datum	26.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N16					
N16-1	9,94	9,19	10,01	9,98	10,03
N16-2	9,63	9,46	9,29	9,31	9,40
N16-3	10,72	11,10	11,33	11,36	11,46
Mittelwert	10,10	9,92	10,21	10,22	10,30
Stabw	0,56	1,03	1,03	1,05	1,06
Varia-koeff.	5,56	10,42	10,13	10,23	10,25
5%-Quantil	9,68	9,51	9,38	9,40	9,49
95%-Quantil	10,64	10,94	11,20	11,22	11,32

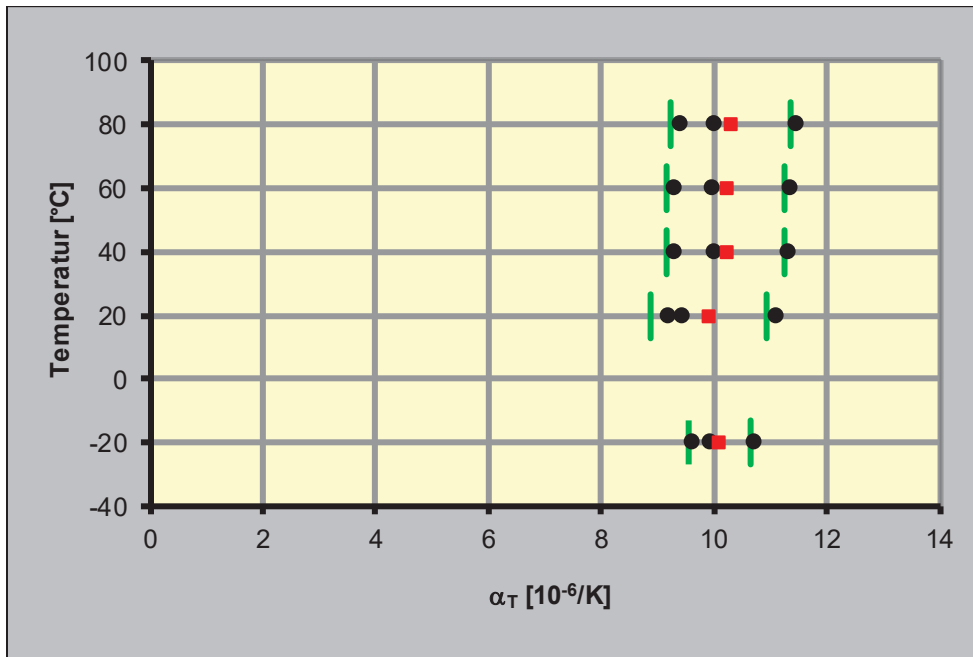


Abb. A- 14: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N16 in Abhängigkeit der Temperatur

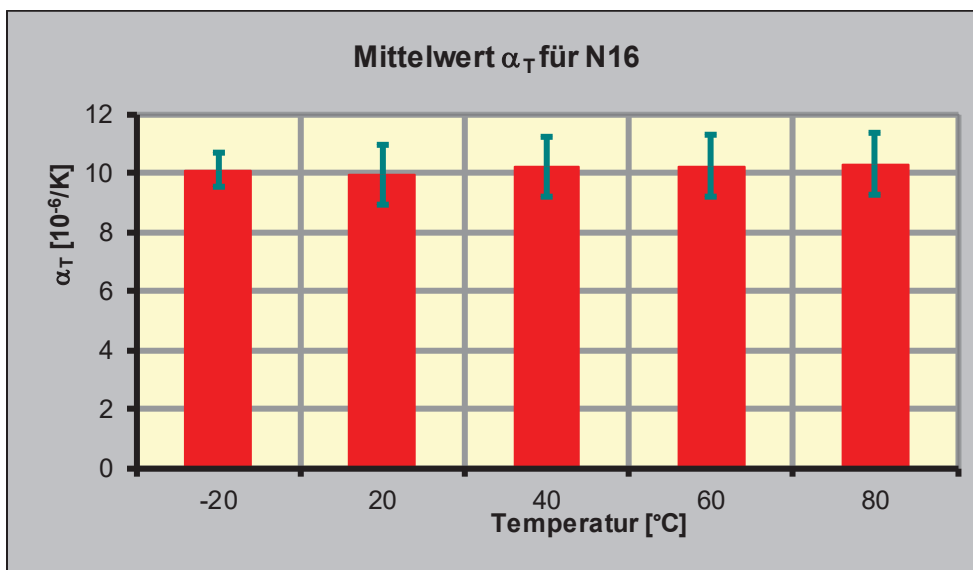


Abb. A- 15: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N16 in Abhängigkeit der Temperatur

N17

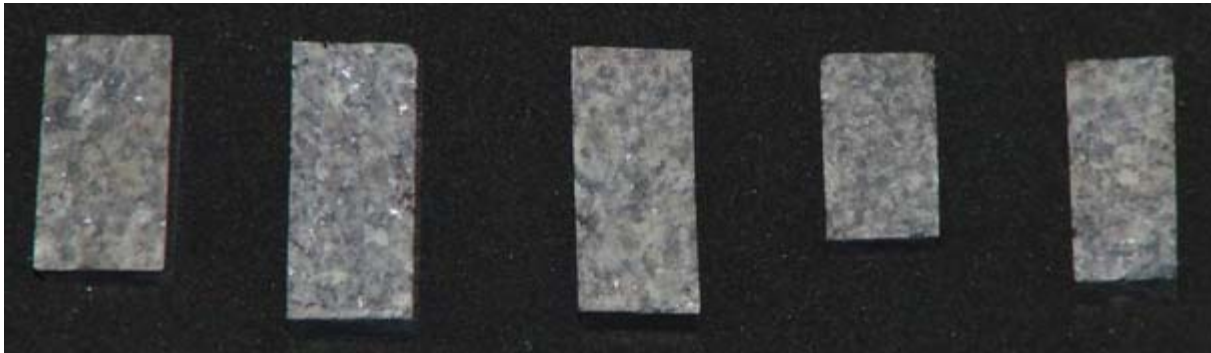


Abb. A- 16: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Granit N17

Tab. A- 6: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N17 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Granit
Datum	26.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N17					
N17-1	7,33	7,62	8,58	8,83	9,04
N17-2	7,06	6,90	7,36	7,28	7,31
N17-3	8,82	8,39	8,23	8,23	7,72
N17-4	6,93	7,55	7,82	8,06	8,03
N17-5	8,08	7,81	8,32	8,44	8,57
Mittelwert	7,64	7,65	8,06	8,17	8,13
Stabw	0,79	0,54	0,48	0,57	0,68
Varia-koeff.	10,39	6,99	5,93	7,02	8,41
5%-Quantil	6,96	7,03	7,45	7,44	7,39
95%-Quantil	8,67	8,27	8,53	8,75	8,95

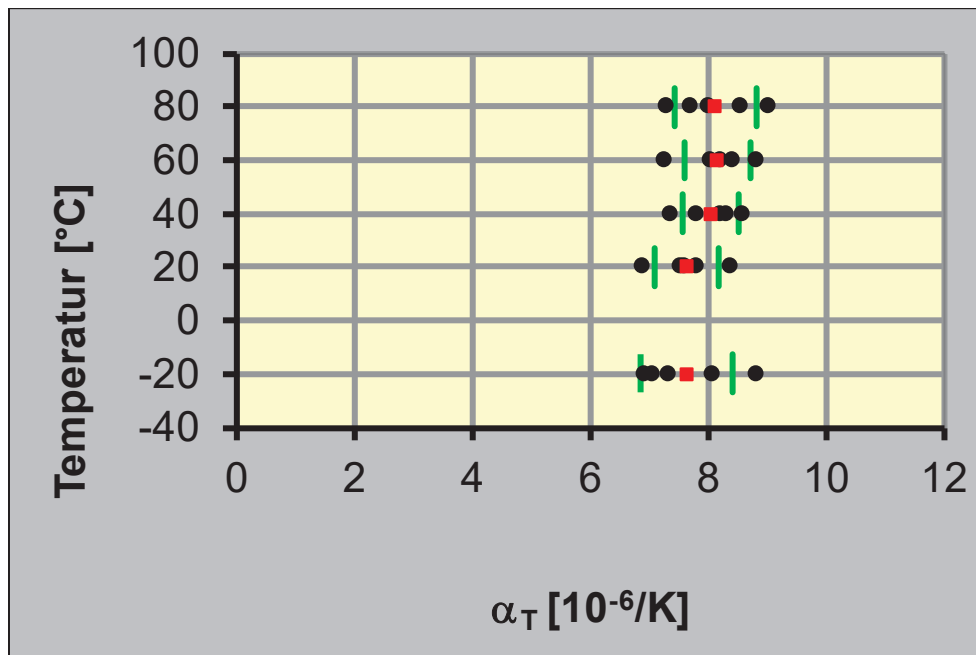


Abb. A- 17: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N17 in Abhängigkeit der Temperatur

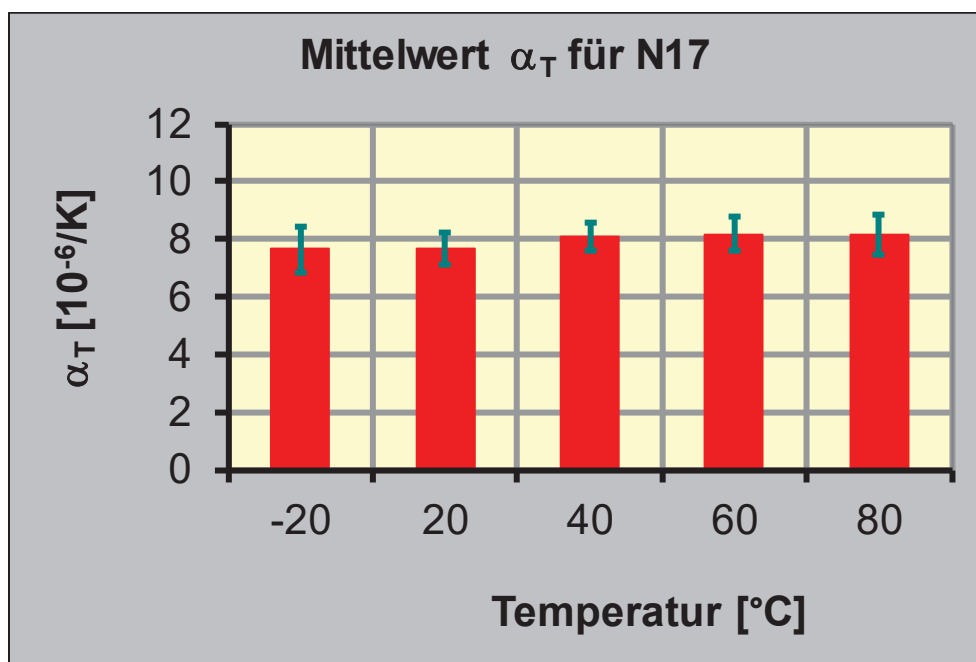


Abb. A- 18: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N17 in Abhängigkeit der Temperatur

N18



Abb. A- 19: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Basalt N18

Tab. A- 7: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N18 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Basalt2
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N18					
N18-1	10,93	11,22	10,86	10,72	10,56
N18-2	10,84	10,33	10,55	10,33	10,04
N18-3	9,21	8,89	9,33	9,32	9,11
N18-4	10,72	9,91	10,18	10,21	10,28
Mittelwert	10,43	10,09	10,23	10,15	10,00
Stabw	0,81	0,97	0,66	0,59	0,63
Varia-koeff.	7,81	9,59	6,46	5,83	6,29
5%-Quantil	9,39	9,04	9,46	9,44	9,24
95%-Quantil	10,92	11,09	10,81	10,66	10,52

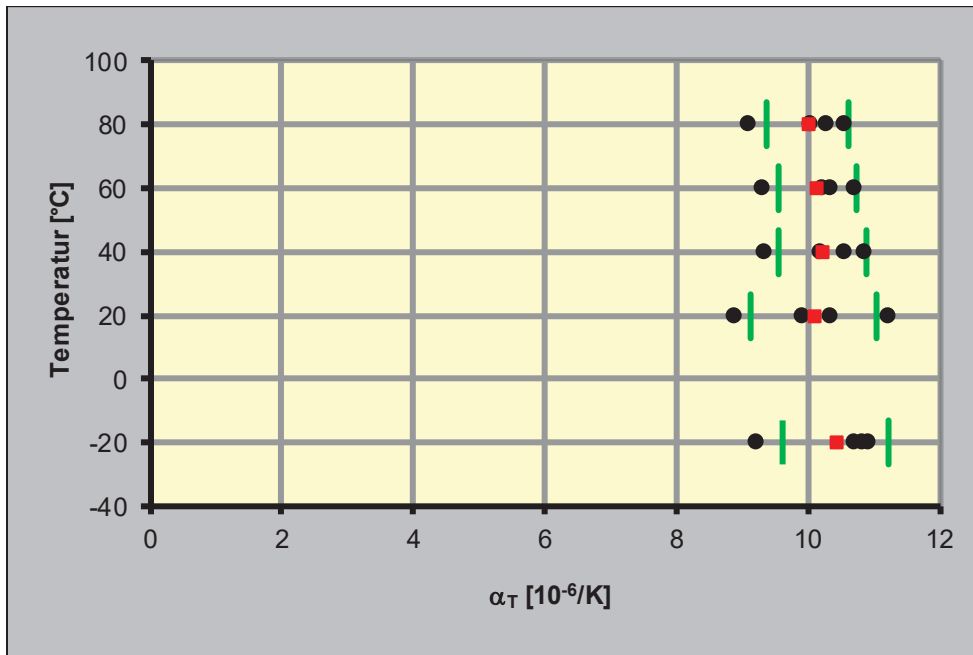


Abb. A- 20: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N18 in Abhängigkeit der Temperatur

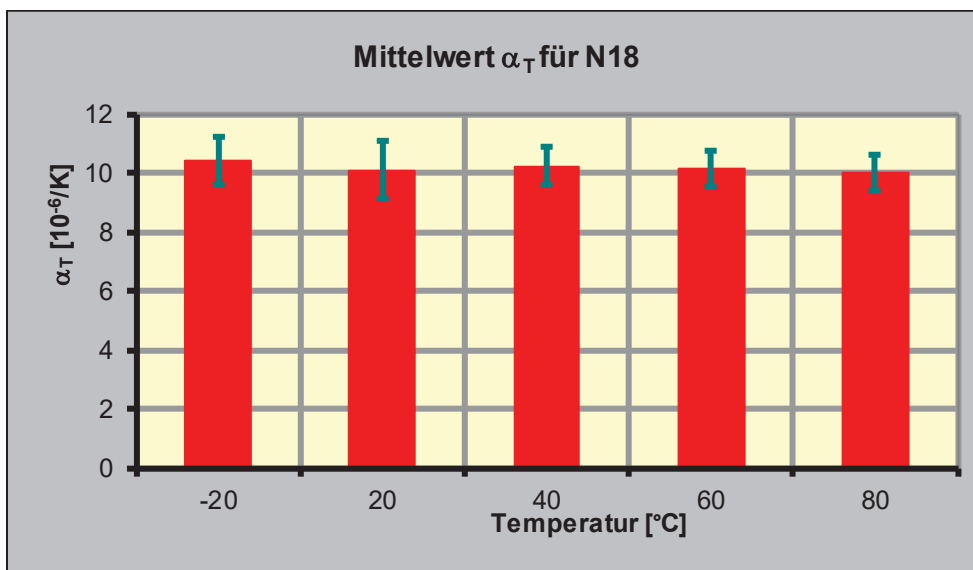


Abb. A- 21: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N18 in Abhängigkeit der Temperatur

N19



Abb. A- 22: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Basalt N19

Tab. A- 8: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für das Festgestein N19 in Abhängigkeit der Temperatur

Naturstein	Muschelkalk2
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁻⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
N19					
N19-1	6,08	5,82	5,81	5,84	5,91
N19-2	5,88	5,07	5,94	6,16	6,48
N19-3	5,59	5,52	6,08	6,35	6,94
Mittelwert	5,85	5,47	5,94	6,12	6,44
Stabw	0,25	0,38	0,14	0,26	0,52
Varia-koeff.	4,21	6,90	2,27	4,21	8,01
5%-Quantil	5,62	5,11	5,94	6,12	6,45
95%-Quantil	6,06	5,79	6,07	6,33	6,89

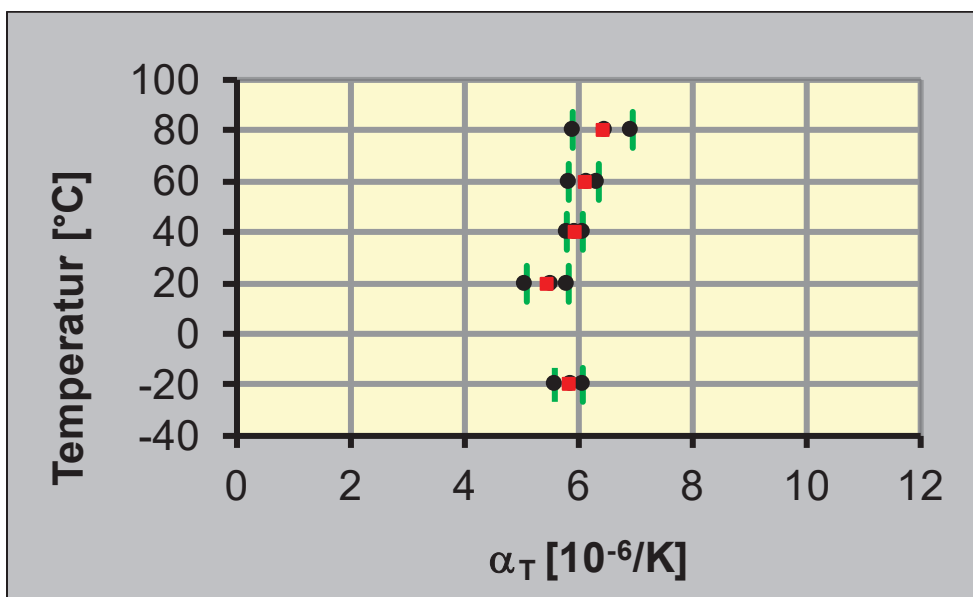


Abb. A- 23: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für N19 in Abhängigkeit der Temperatur

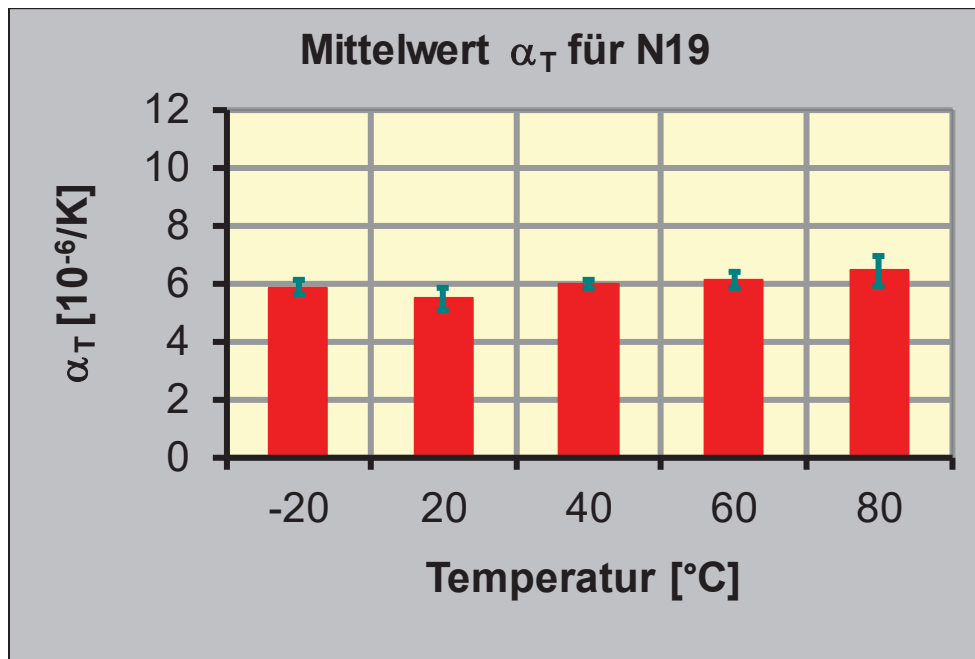


Abb. A- 24: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für N19 in Abhängigkeit der Temperatur

K1

Tab. A- 9: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K1 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Münchner Raum
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K1					
K1-1-KS	7,15	6,93	7,33	7,55	7,68
K1-2-KS	3,58	3,70	4,46	4,60	4,70
K1-3-KS	4,76	4,28	4,36	4,50	4,57
K1-4-KK	11,15	9,60	10,01	10,29	10,58
K1-5-KS	6,77	6,40	6,68	7,00	7,21
K1-6-KK	10,68	9,55	10,03	10,36	10,59
Mittelwert	7,35	6,74	7,15	7,38	7,56
Stabw	3,06	2,51	2,52	2,59	2,67
Varia-koeff.	41,65	37,23	35,27	35,08	35,30
5%-Quantil	3,88	3,85	4,39	4,53	4,60
95%-Quantil	11,03	9,59	10,03	10,34	10,59

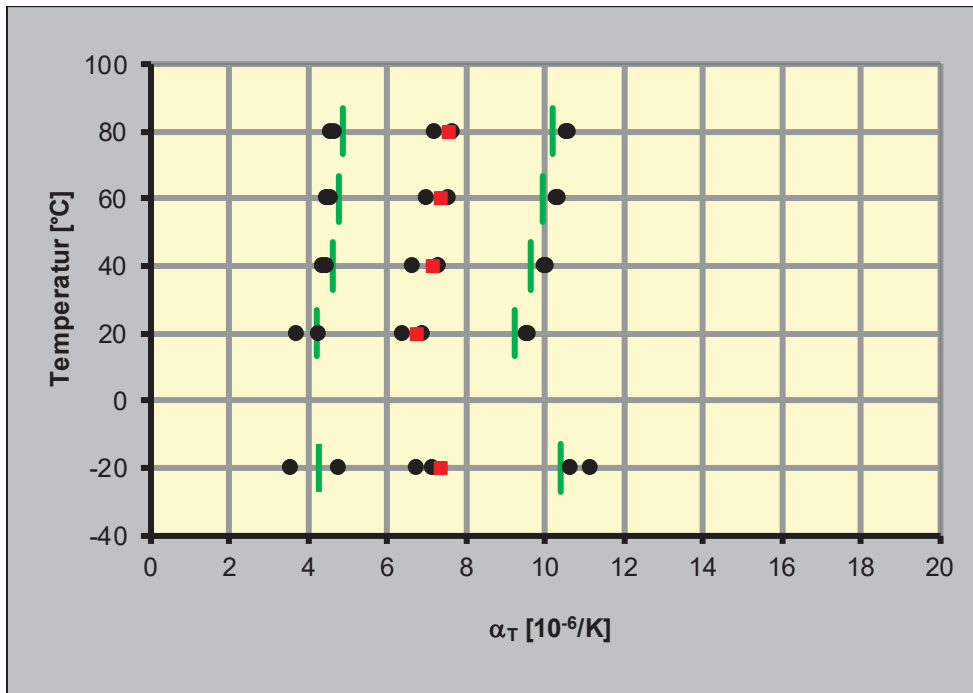


Abb. A- 25: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K1 in Abhängigkeit der Temperatur

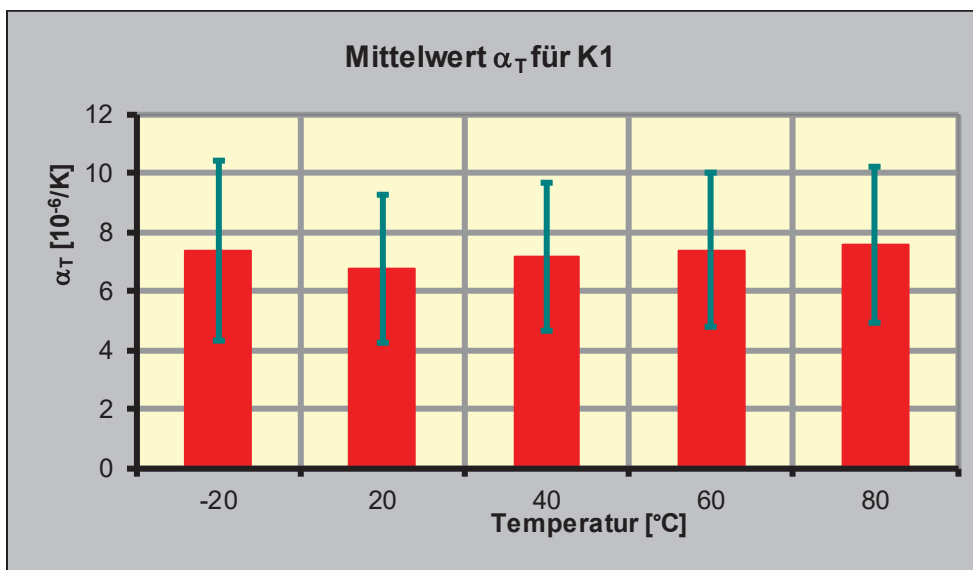


Abb. A- 26: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K1 in Abhängigkeit der Temperatur

K2

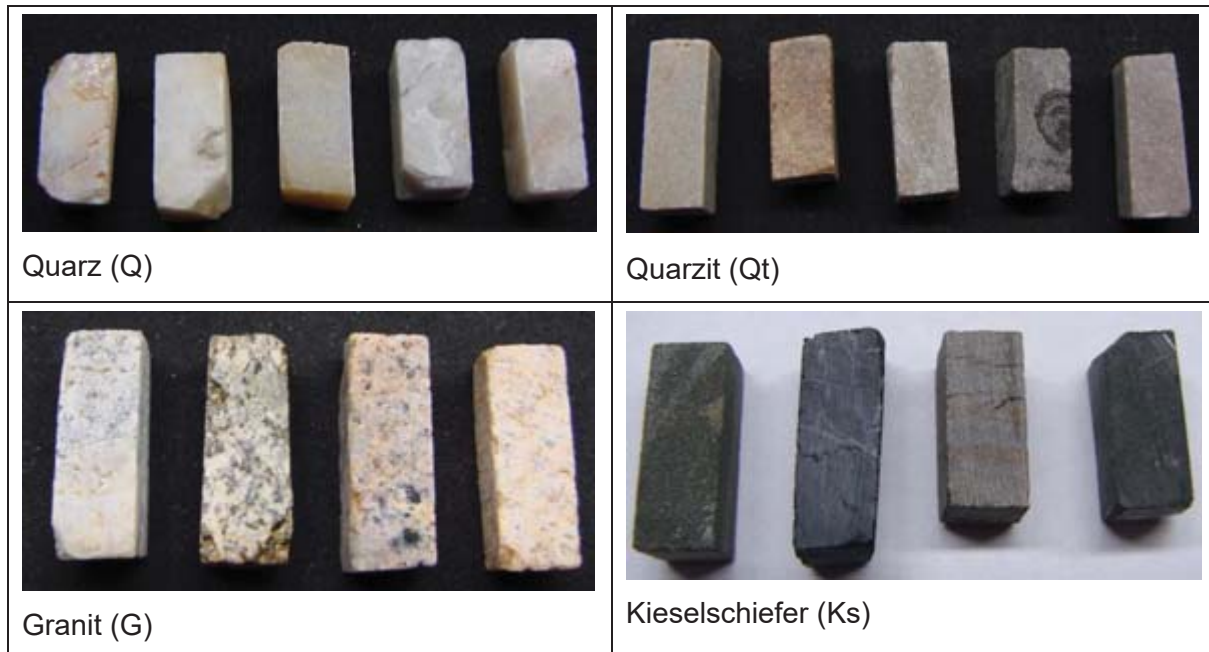


Abb. A- 27: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K2

Tab. A- 10: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K2 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Elbekies
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K2					
K2-1-Q	15,28	15,87	17,22	18,01	18,66
K2-2-Q	17,60	17,30	17,22	16,22	16,15
K2-3-Q	19,02	18,54	19,72	19,60	19,56
K2-4-Qt	13,75	14,16	14,16	14,53	14,94
K2-5-Q	17,90	16,90	17,03	17,16	17,33
K2-7-Qt	13,69	12,93	13,08	12,87	12,97
K2-8-Ks	14,22	13,54	13,62	13,63	13,76
K2-9-Ks	14,65	13,53	13,82	13,75	14,09
K2-11-Ks	14,41	13,82	13,99	14,30	14,69
K2-12-Ks	14,66	14,68	14,81	15,08	15,36
K2-13-G	8,54	8,22	9,14	9,89	10,39
K2-14-G	7,14	6,86	7,95	8,73	9,35
Mittelwert	13,58	13,32	13,92	14,64	14,69
Stabw	3,69	3,45	3,27	3,54	3,15
Varia-koeff.	27,20	25,92	23,53	24,15	21,42
5%-Quantil	7,45	7,74	8,72	9,48	10,03
95%-Quantil	18,29	17,73	18,10	20,01	18,98

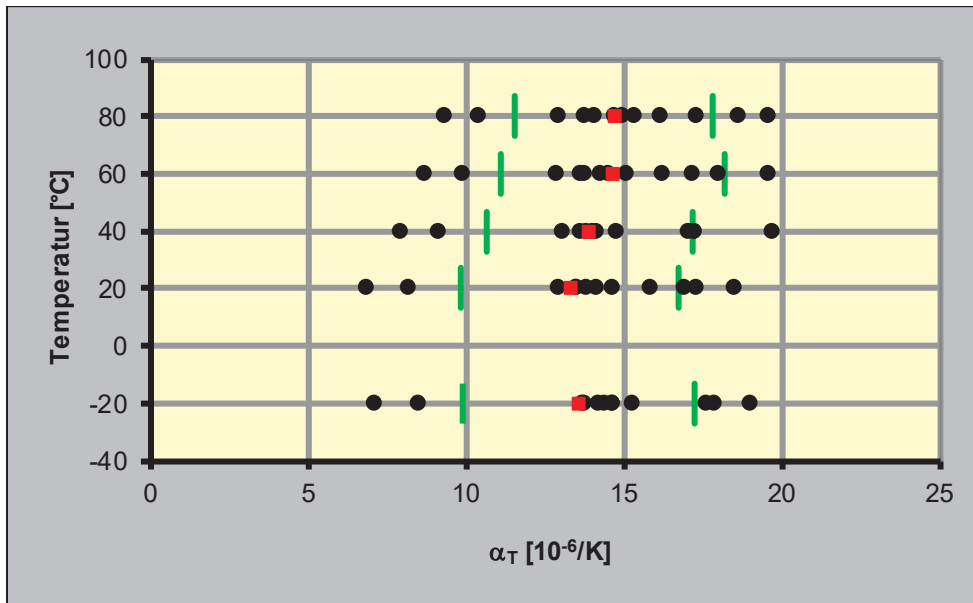


Abb. A-28: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K2 in Abhängigkeit der Temperatur

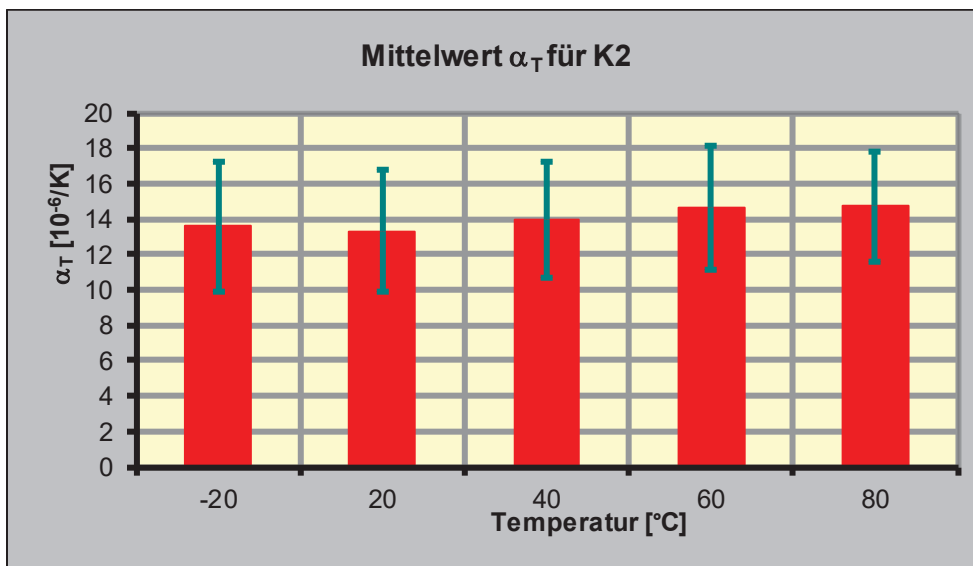


Abb. A-29: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K2 in Abhängigkeit der Temperatur

K4

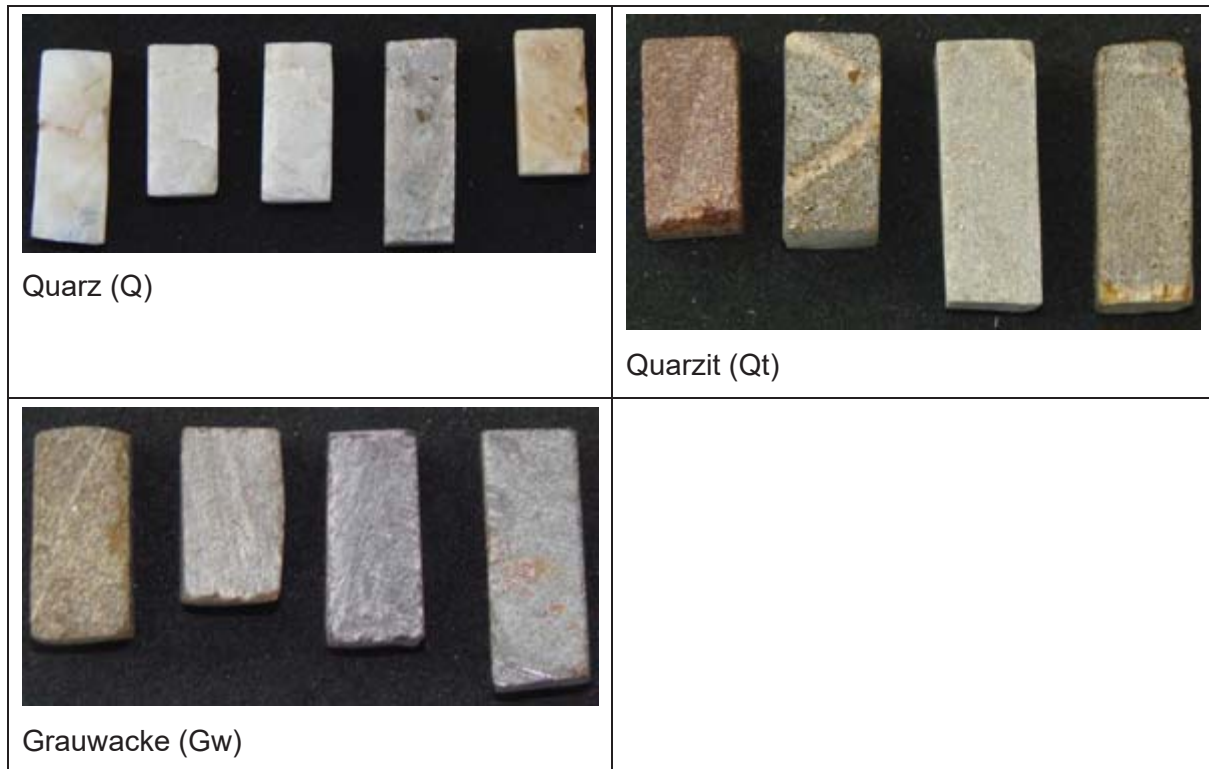


Abb. A- 30: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K4

Tab. A- 11: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K4 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Rheinkies (gebrochen)
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K4					
K4-1-Qt	12,71	12,85	13,7	13,86	14,16
K4-2-Qt	12,61	12,95	12,67	12,48	13,02
K4-3-Qt	11,84	11,59	12,24	12,33	12,48
K4-4-Qt	11,43	11,23	11,32	11,53	11,83
K4-5-Q	12,83	12,57	13,19	13,9	14,49
K4-6-Q	11,6	10,94	11,1	11,4	12,01
K4-7-Q	14,31	12,61	12,66	12,59	12,94
K4-8-Gw	14,84	12,61	11,23	10,9	11,43
K4-9-Gw	13,92	11,62	12,08	11,44	11,41
K4-10-Gw	11,7	10,5	10,44	10,38	10,48
Mittelwert	12,78	11,95	12,06	12,08	12,43
Stabw	1,21	0,88	1,03	1,17	1,26
Varia-koeff.	9,47	7,35	8,52	9,72	10,12
5%-Quantil	11,51	10,70	10,74	10,61	10,90
95%-Quantil	14,60	12,91	13,47	13,88	14,34

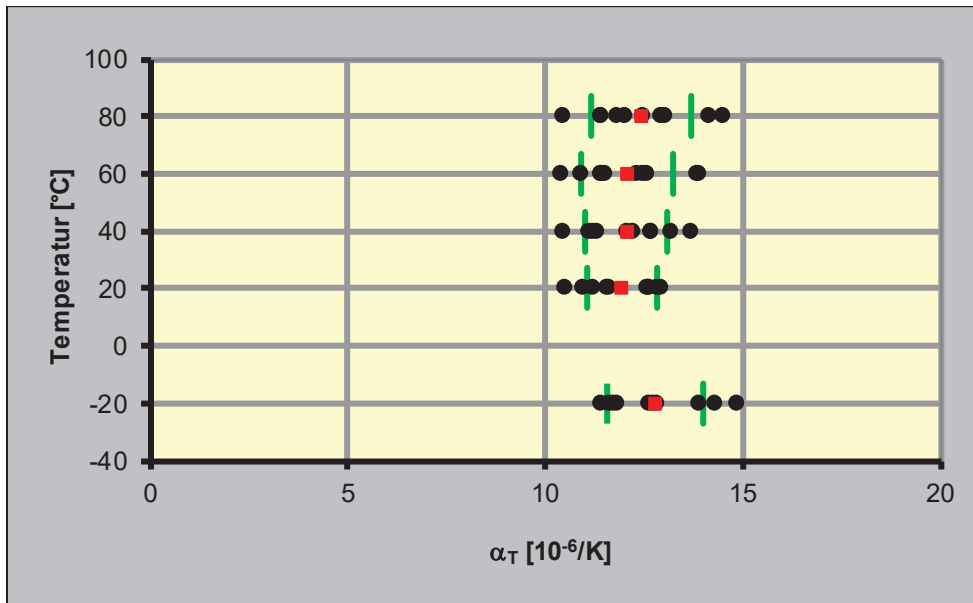


Abb. A- 31: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K4 in Abhängigkeit der Temperatur

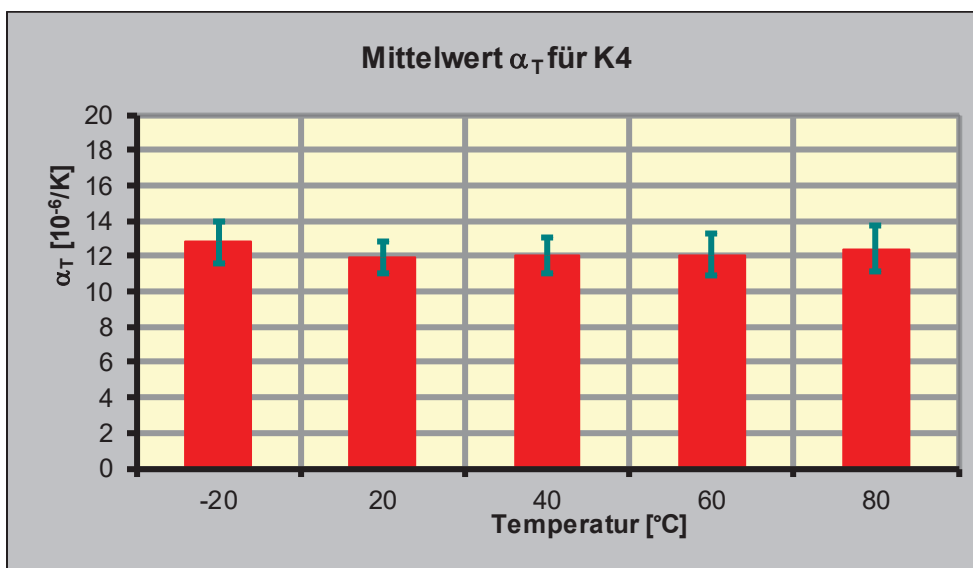


Abb. A- 32: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K4 in Abhängigkeit der Temperatur

K6



Kalkstein (KS)

Abb. A- 33: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K6

Tab. A- 12: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K6 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Weserkies
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K6-S					
K6-S-1	12,06	13,16	11,70	11,44	11,70
K6-S-2	12,54	10,22	10,92	11,13	11,31
K6-S-3	11,72	10,07	10,49	10,73	11,05
K6-S-4	11,72	10,85	11,21	11,59	11,90
Mittelwert	12,01	11,08	11,08	11,22	11,49
Stabw	0,39	1,43	0,51	0,38	0,38
Varia-koeff.	3,23	12,92	4,59	3,39	3,33
5%-Quantil	7,96	10,10	10,58	10,81	11,10
95%-Quantil	12,44	17,78	14,79	12,83	12,46

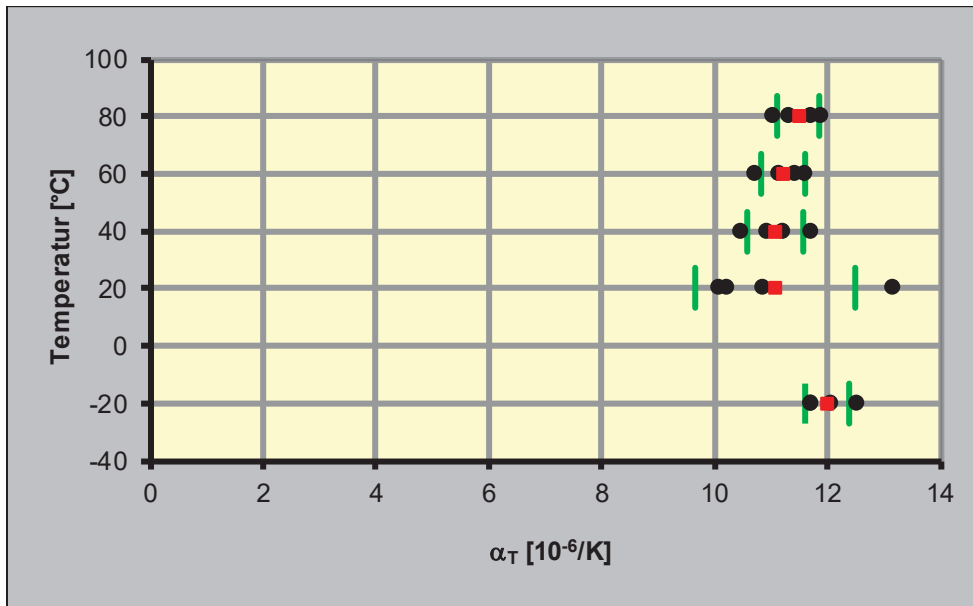


Abb. A- 34: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K6 in Abhängigkeit der Temperatur

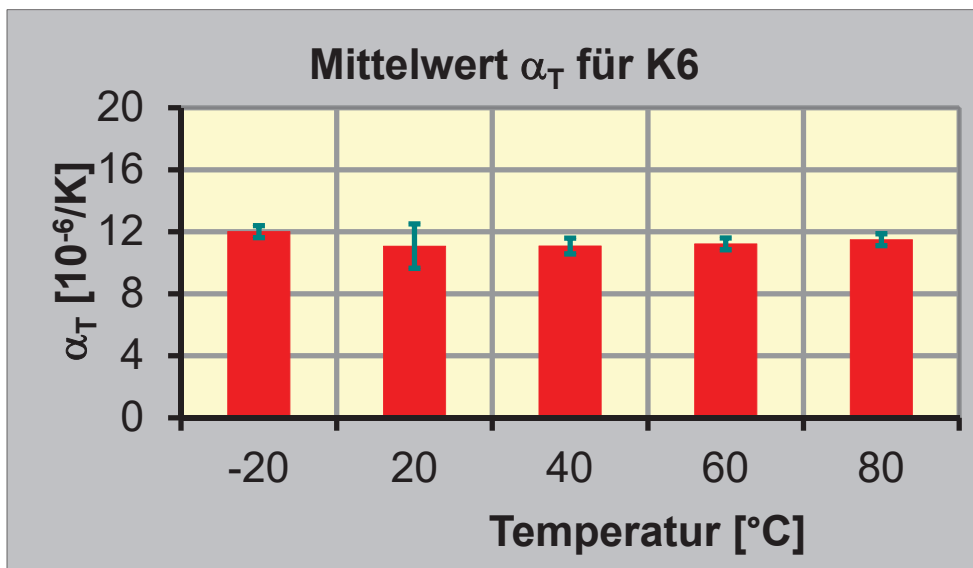


Abb. A- 35: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K6 in Abhängigkeit der Temperatur

K7



Abb. A- 36: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K7

Tab. A- 13: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K7 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Moränekies
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech (x ⁶ /K) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K7-1					
K7-1-KS	3,35	3,10	3,12	3,28	3,40
K7-2-KS	5,50	4,83	4,89	4,92	4,95
K7-3-Ks	9,30	6,80	7,94	8,68	9,19
K7-4-KS	5,19	4,42	4,31	4,39	4,51
K7-5-Qt	10,22	11,95	12,00	11,87	11,80
K7-6-Qt	11,19	9,99	9,31	9,16	9,06
K7-7-Gw	6,88	6,87	6,05	4,92	5,77
K7-8-Ks	7,95	7,85	7,96	8,25	8,66
K7-9-Ks	8,57	7,95	7,55	7,42	7,44
K7-10-Ks	8,71	8,25	8,46	8,80	9,07
K7-12-Qt	9,52	9,08	9,05	9,15	9,28
K7-13-Gw	4,27	4,32	4,38	4,61	4,80
K7-14-Gw	4,31	4,59	4,84	5,01	5,14
Mittelwert	7,30	6,92	6,91	6,96	7,16
Stabw	2,55	2,59	2,55	2,58	2,54
Varia-koeff.	34,95	37,41	36,85	37,05	35,46
5%-Quantil	4,29	4,38	4,35	4,52	4,68
95%-Quantil	10,61	10,77	10,39	10,24	10,29

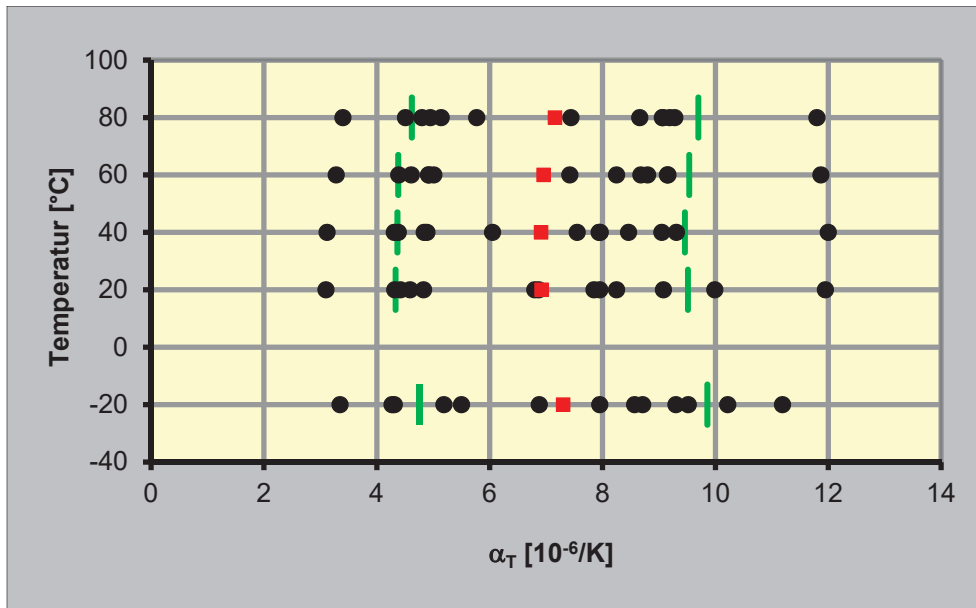


Abb. A- 37: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K7 in Abhängigkeit der Temperatur

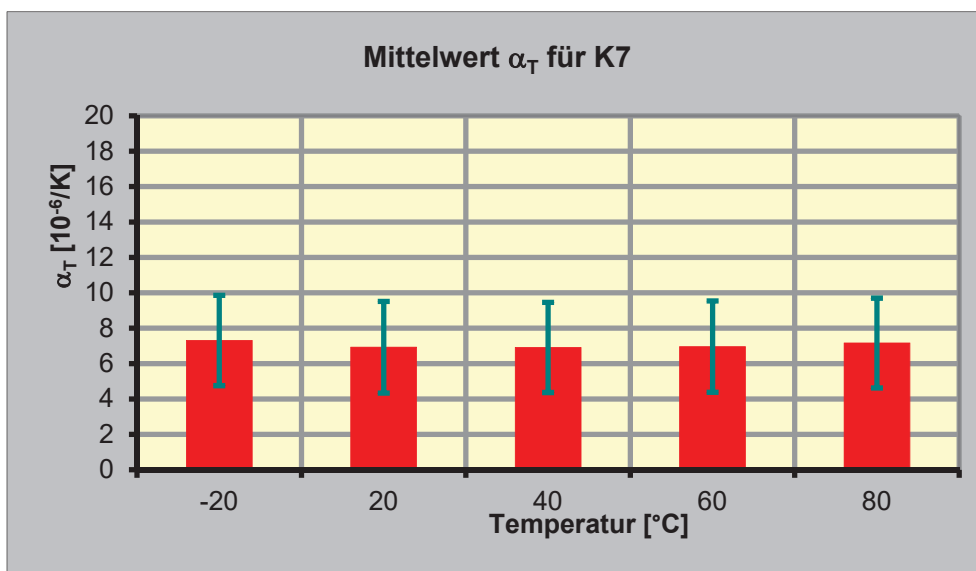


Abb. A- 38: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K7 in Abhängigkeit der Temperatur

K8



Quarz (Q)

Abb. A- 39: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K8

Tab. A- 14: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K8 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Tertiärkies
Datum	31.03.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K8					
K8-1	12,18	12,89	11,65	11,45	11,65
K8-2	13,25	12,76	13,04	12,91	12,80
K8-3	11,59	12,32	11,04	12,41	12,55
Mittelwert	12,34	12,66	11,91	12,26	12,33
Stabw	0,84	0,30	1,03	0,74	0,60
Varia-koeff.	6,82	2,36	8,61	6,05	4,90
5%-Quantil	11,67	12,35	11,13	12,27	12,36
95%-Quantil	13,14	12,88	12,90	12,86	12,78

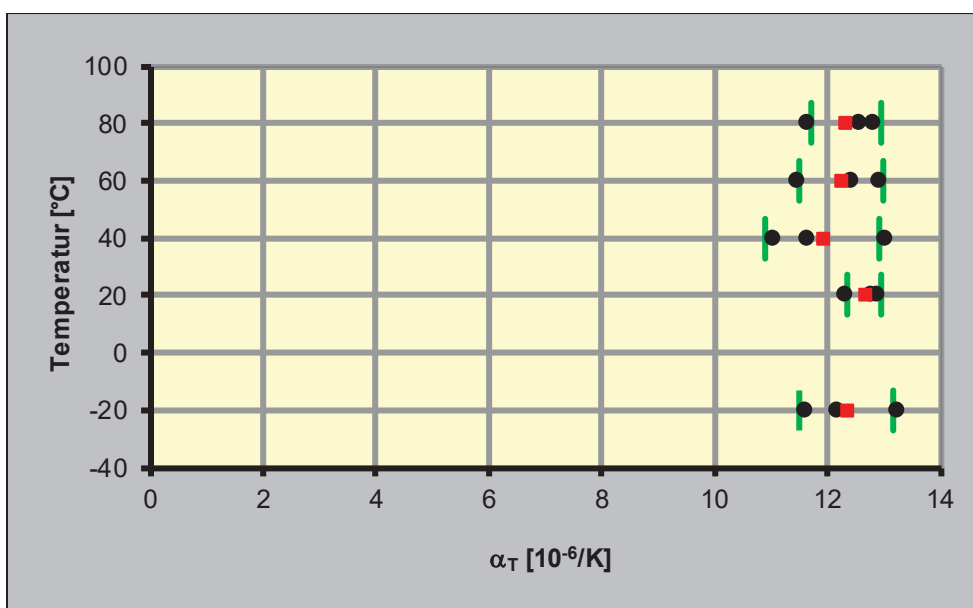


Abb. A- 40: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K8 in Abhängigkeit der Temperatur

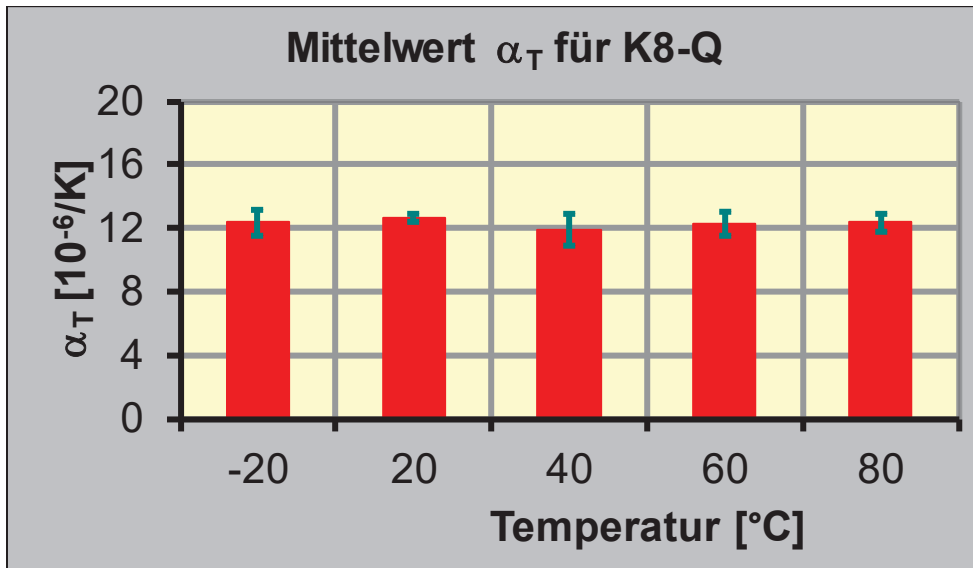


Abb. A- 41: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K8 in Abhängigkeit der Temperatur

K9



Abb. A- 42: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt $7 \times 7 \text{ mm}^2$) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K9

Tab. A- 15: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K9 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Zorgekies
Datum	01.04.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K9					
K9-1-P	10,71	6,60	7,39	8,29	8,81
K9-2-Gw	12,82	10,10	9,25	9,16	9,30
K9-3-Gw	10,44	9,86	9,74	9,85	9,98
K9-4-P	8,83	7,94	7,99	7,82	7,80
K9-5-Gw	12,06	8,16	8,88	9,06	9,24
K9-6-Gw	10,61	10,01	10,17	10,33	10,80
K9-7-P	8,21	7,80	7,95	7,95	8,02
K9-8-sQt	9,15	3,47	3,73	4,04	4,58
K9-9-Gw	13,09	12,07	10,18	9,69	9,55
K9-10-sQt	15,00	6,74	3,55	4,61	5,12
Mittelwert	11,09	8,28	7,88	8,08	8,32
Stabw	2,14	2,40	2,43	2,14	2,03
Varia-koeff.	19,29	29,01	30,81	26,55	24,39
5%-Quantil	8,49	4,94	3,63	4,30	4,82
95%-Quantil	14,14	11,18	10,18	10,11	10,43

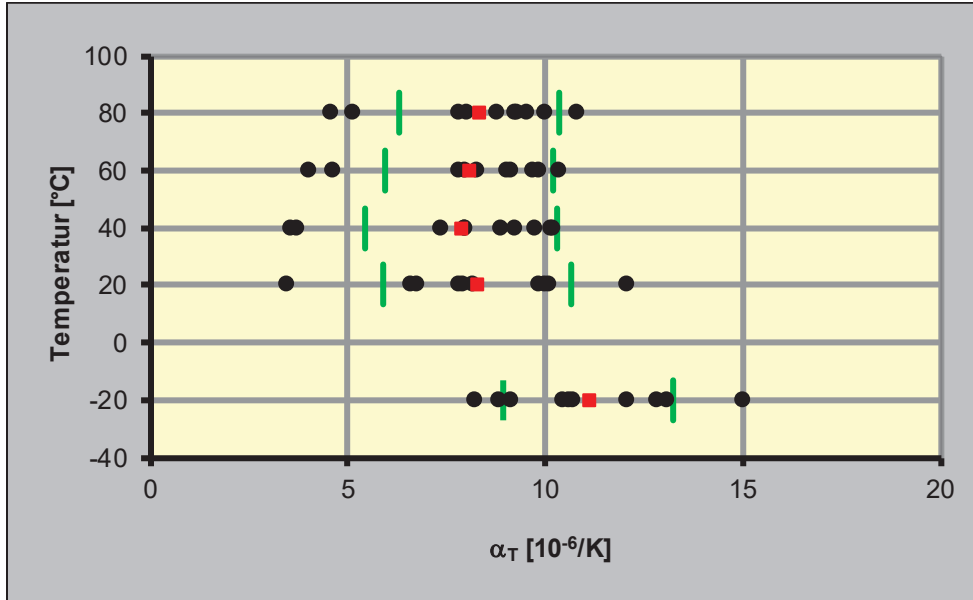


Abb. A- 43: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K9 in Abhängigkeit der Temperatur

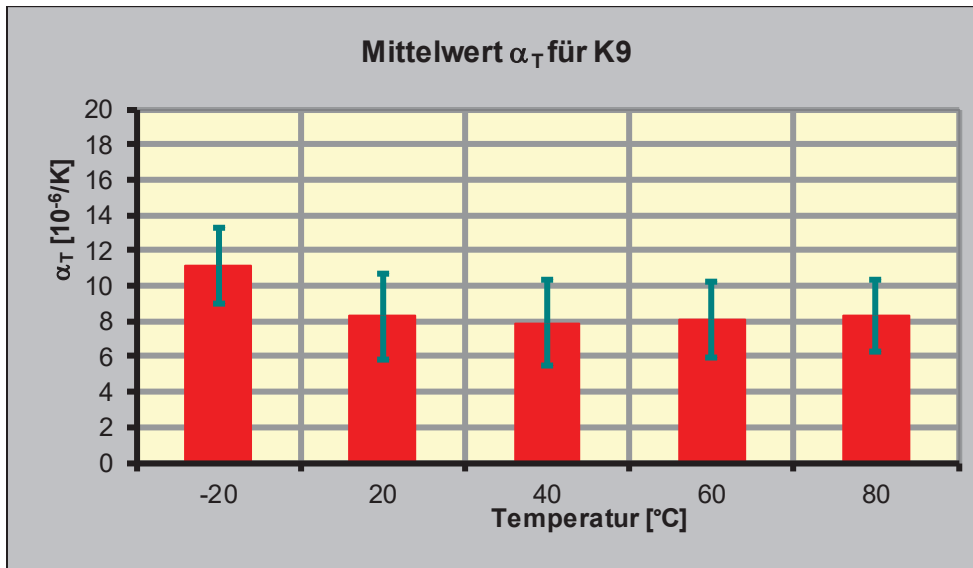


Abb. A- 44: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K9 in Abhängigkeit der Temperatur

K10

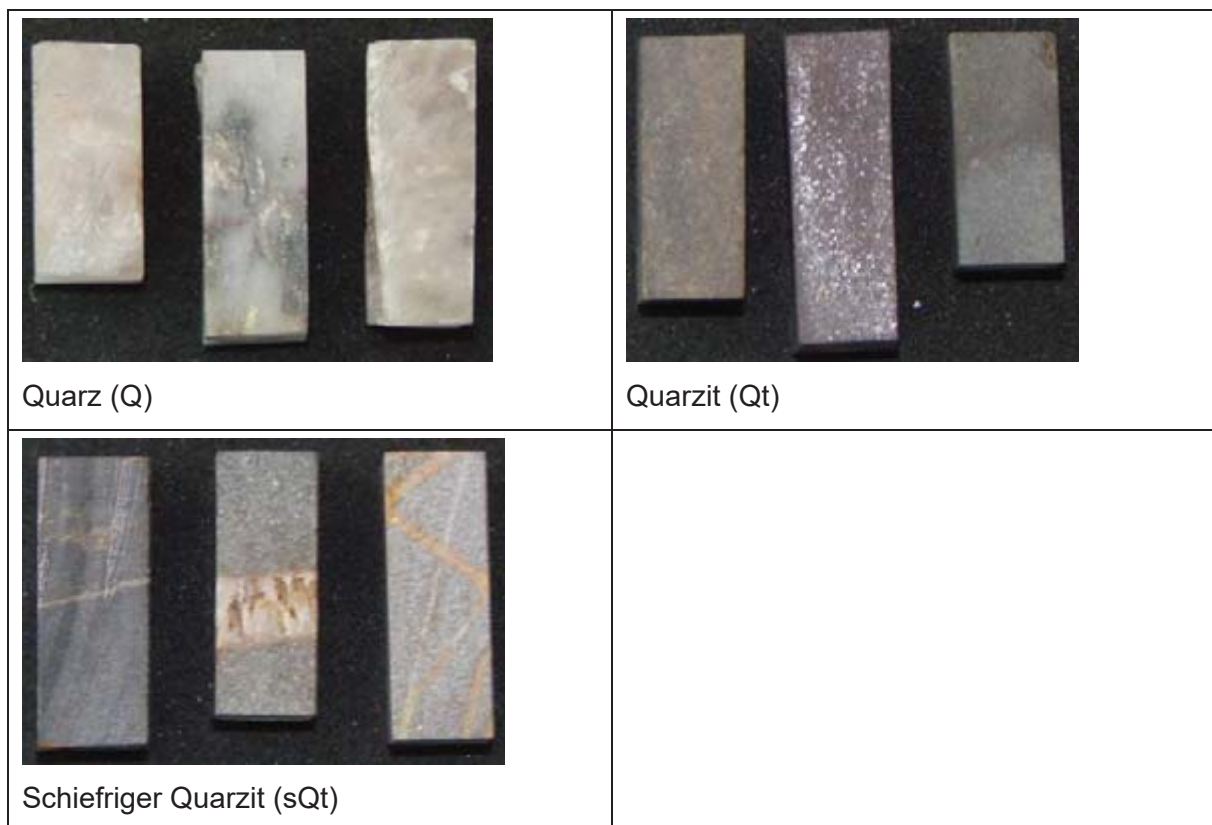


Abb. A- 45: Aufnahmen der Prismen (Querschnitt 7 x 7 mm²) für die Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K10

Tab. A- 16: Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für den Kies K10 in Abhängigkeit der Temperatur

Kies	Mainkies
Datum	01.04.2008

Bez.	Ausdehnungskoeffizient α tech ($\times 10^{-6}/K$) bezogen auf 20°C				
	-20	20	40	60	80
K10					
K10-1	12,49	9,88	9,82	10,15	10,31
K10-2	13,89	13,80	12,91	12,97	13,36
K10-3	11,94	8,45	8,84	9,23	9,54
K10-4	13,91	14,16	13,98	13,62	13,48
K10-5	12,10	12,41	12,93	13,20	13,44
K10-6	11,46	11,85	11,97	12,03	12,20
K10-7	12,25	11,93	11,64	11,87	12,03
K10-8	12,21	11,17	10,96	10,53	10,78
K10-9	12,58	10,19	10,66	11,16	11,49
Mittelwert	12,54	11,54	11,52	11,64	11,85
Stabw	0,84	1,85	1,63	1,49	1,44
Varia-koeff.	6,68	15,99	14,16	12,82	12,16
5%-Quantil	11,65	9,15	9,57	9,75	10,04
95%-Quantil	13,90	14,02	13,56	13,45	13,46

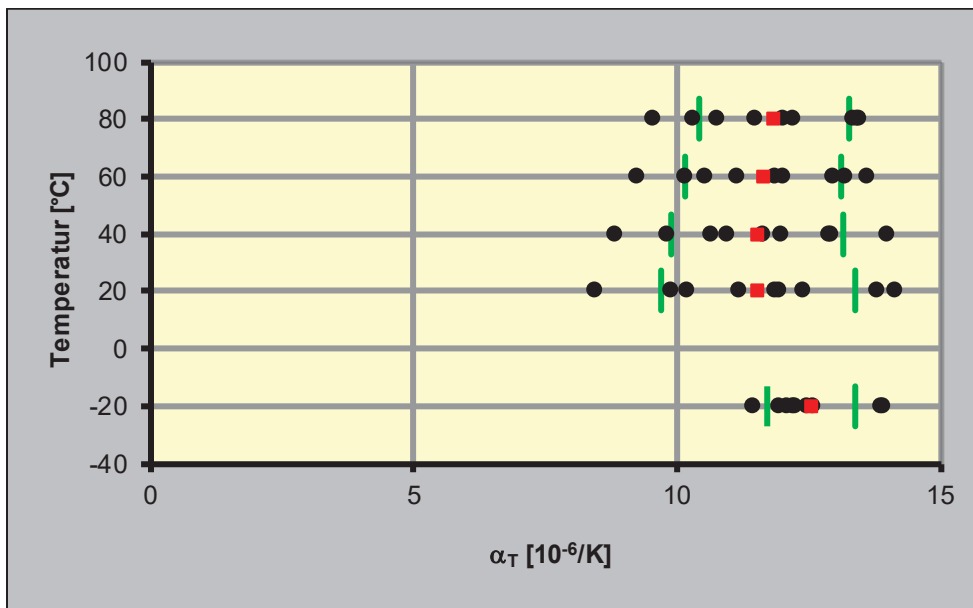


Abb. A- 46: grafische Darstellung der Einzelwerte des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T für K10 in Abhängigkeit der Temperatur

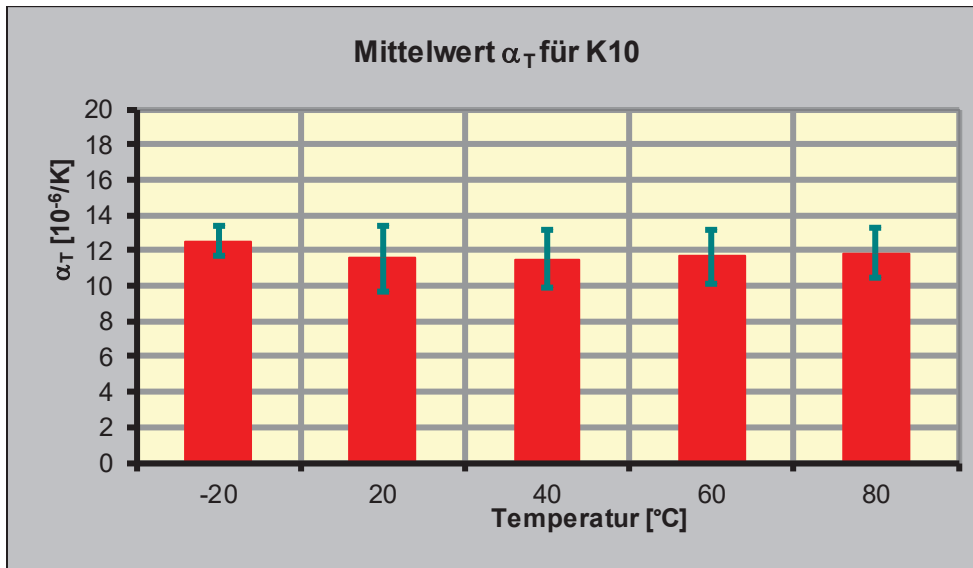


Abb. A- 47: mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für K10 in Abhängigkeit der Temperatur

Tabelle: N11 – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	N11		
Datum:	25.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input checked="" type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input checked="" type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input checked="" type="checkbox"/> glasig <input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input checked="" type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input checked="" type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Augit-Einsprenglinge in z.T. glasiger Grundmasse --> porphyrisches Gefüge - Druse mit Augitkristallen (punktuell) - Gefüge insgesamt sehr dicht, frei von Poren oder Hohlräumen - reich an Plagioklas (Basalt typisch) 		

Tabelle: N12 – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	N12		
Datum:	25.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input checked="" type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input checked="" type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Einsprenglingsfreier Quarzporphyr mit leichter Fließstruktur - vereinzelte Mikrorisse mit Kontakt zur Oberfläche - punktuell Feststellung von Verwitterungsprozessen, vorrangig im Bereich der Mikrorisse 		

Tabelle: N15 – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	N15		
Datum:	11.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input checked="" type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input checked="" type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> z.T. in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Hohlräume sind z.T. von sekundär gebildeten Kristallen (Calcit) ausgefüllt - die bestehende Sedimentstruktur wurde durch starke Umkristallisierung fast vollständig verwischt - Korngrenzen sind gelappt, daher unter dem POLMI nicht erkennbar - Nester des ehemals dichten, feinkörnigen Gesteins erkennbar - Def. von 3 Typen: <ul style="list-style-type: none"> a sehr dicht mit Schalenresten von Mikroorganismen b Calcitwachstum in Hohlräumen c deutliche Schichtstruktur (Hämatitlagen) als Folge der Sedimentation 		

Tabelle: N17 – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	N17		
Datum:	18.04.2008		
Gesteinsart:	<input checked="" type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral- zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input checked="" type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input checked="" type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input checked="" type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Feldspäte zeigen deutliche Spuren der Verwitterung (Serizitisierung) - Quarze mit undulöser Auslöschung (beanspruchter Granit???) - Gefüge zeigt Mikrorisse und Poren - Chloritbildung in Klüften 		

Tabelle: N19 – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	N19		
Datum:	21.04.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input checked="" type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input checked="" type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input checked="" type="checkbox"/> karbonatisch <input checked="" type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> in Nestern (Quarz)		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input checked="" type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - z.T. Fossilführung (Schneckengehäuse, Muschelschalen, ...) - Quarznester - Gefüge sehr dicht, Korngrenzen größten Teils nicht erkennbar - Unterteilung in 3 Typen: <ul style="list-style-type: none"> a mit Feinschichtung durch Tonminerale b mit Feinquarznestern und vereinzelt Poren c dichter Kalkstein mit Resten von Mikroorganismen, frei von Quarznestern 		

Tabelle: N22 – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	N22		
Datum:	21.04.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input checked="" type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input checked="" type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input checked="" type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input checked="" type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input checked="" type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<p>3 sehr dichte Kalksteinvarianten: a dichter, kohlenstoffhaltiger Kalkstein mit Resten von Mikroorganismen sowie teilweise Feinschichtung durch Ankeritnester b dichter Kalkstein mit groben Resten von Mikroorganismen sowie dein- bis mittelkörnigen Calcitkörnern c dichter, feinkörniger Kalkstein mit feinverteilten Kohlenstoffprodukten sowie Gängen aus gut kristallisierten Calcitkörnern (vergleichbar Calcitwachstum bei Marmorentstehung)</p>		

Tabelle: K3-Quarz – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K3-Q		
Datum:	14.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral- zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input checked="" type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	- Quarzkörner weisen charakteristische Merkmale von Druck- und Temperaturprozessen auf (sog. Stressquarz, metamorph überprägt)		

Tabelle: K3-Quarzit – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K3-Qt		
Datum:	18.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral- zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> z.T. in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input checked="" type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> (kugelig)		
Korngrenzen:	<input checked="" type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Gesteinskörner zeigen Eigenschaften von Quarzit und Grauwacke (Übergangsformen vorhanden) - z.T. Feinquarznester enthalten (Grauwacke typisch) - Quarzkörner z.T. stark gestreckt (Stressbeanspruchung) - Risse verlaufen an Subkorn Grenzen entlang 		

Tabelle: K3-Quarzit neben Grauwacke – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K3-Qt-2 (Gw)		
Datum:	18.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input checked="" type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input checked="" type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input checked="" type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input checked="" type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input checked="" type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input checked="" type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - 50% des Grauwackeanteils stellt sich als Quarzit heraus - Grauwackekörner geprägt von feinverteilten Quarznestern - Grauwackekörner durchzogen von Rissen, Hohlräume - Quarzit enthalten punktuell verteilte Poren 		

Tabelle: K4-Quarz – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K4-Q		
Datum:	19.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral- zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input checked="" type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<ul style="list-style-type: none"> - Quarzkörner weisen charakteristische Merkmale von Druck- und Temperaturprozessen auf (sog. Stressquarz, metamorph überprägt) - Quarzgefüge z.T. durchzogen von Rissen, punktuell Poren enthalten 		

Tabelle: K4-Quarzit/ Sandstein – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K4-Qt/ S		
Datum:	19.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:		Sandstein	Quarzit
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input checked="" type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input checked="" type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input checked="" type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> in Nestern (Feinquarz in Qt)		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input checked="" type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt (Qt) <input checked="" type="checkbox"/> kugelig (S)		
Korngrenzen:	<input checked="" type="checkbox"/> gerade (Qt) <input checked="" type="checkbox"/> gerundet (S) <input checked="" type="checkbox"/> eckig (Qt) <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren (Qt) <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume (S) <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	- Sandstein porös, offenporiges Gefüge - Quarzit (Sandstein+Quarzwachstum=Quarzit) enthält noch punktuell Poren		

Tabelle: K4-Flint/ Kieseliefer – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K4-Flint/ Kieseliefer		
Datum:	19.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral- zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input checked="" type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input checked="" type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	- Flint = kryptokristallin, Korngrenzen und Kornform mit Polmi nicht charakterisierbar - Kieseliefer enthält Radiolarien (Strahlentierchen)		

Tabelle: K5-Kalkstein – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K5-K		
Datum:	14.04.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input checked="" type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	- aus Mikroorganismen abgelagerte Kalke, keine Fossilkalke 3 Varianten a) dicht, feinkörnig b) porös, mit vielen org. Bestandteilen c) dicht, mit org. Bestandteilen		

Tabelle: K5-Quarz – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K5-Q		
Datum:	14.04.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input checked="" type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<p>- Quarzkörner weisen charakteristische Merkmale von Druck- und Temperaturprozessen auf (sog. Stressquarz, metamorph überprägt)</p> <p>- Quarzgefüge geprägt von Rissen und Hohlräumen</p>		

Tabelle: K6-Sandstein – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K6-S		
Datum:	12.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input checked="" type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input checked="" type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input checked="" type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input checked="" type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input checked="" type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	- 2 Varianten vorherrschend a) dicht, feinkörnig mit Feinschichtung b) grobkörnig, sehr porös (offenporig) ohne erkennbare Schichtung		

Tabelle: K8-Quarz – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K8-Q		
Datum:	14.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input checked="" type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input checked="" type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input checked="" type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	<p>- Quarzkörner weisen charakteristische Merkmale von Druck- und Temperaturprozessen auf (sog. Stressquarz, metamorph überprägt) - Gefügeentspannung durch Rekristallisation von Quarz an den Korngrenzen der Quarzsubkörner</p>		

Tabelle: K9-Grauwacke – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K9-Gw		
Datum:	20.03.2008		
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input type="checkbox"/> Vulkanit	<input checked="" type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input checked="" type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input checked="" type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input checked="" type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input checked="" type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input type="checkbox"/> gerade <input type="checkbox"/> gerundet <input checked="" type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:			

Tabelle: K9-Porphyr – Protokoll der Dünnschliffmikroskopie

Projektbezeichnung:	AiF "Verbundforschung Frost"		
Probenbezeichnung:	K9-P		
Datum:			
Gesteinsart:	<input type="checkbox"/> Plutonit <input checked="" type="checkbox"/> Vulkanit	<input type="checkbox"/> Sediment	<input type="checkbox"/> Metamorphit
Mineral-zusammensetzung:			
Korngefüge:	<input type="checkbox"/> körnig, mosaikartig <input checked="" type="checkbox"/> porphyrisch <input type="checkbox"/> eingeregelt <input type="checkbox"/> intersertal	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Feinschichtung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> knotig <input type="checkbox"/> Schrägschichtung <input type="checkbox"/> Kreuzschichtung <input type="checkbox"/> oolithisch	Textur/ Schichttyp <input type="checkbox"/> ebene Schieferung <input type="checkbox"/> flaserig <input type="checkbox"/> augenartig <input type="checkbox"/> stenglig <input type="checkbox"/> griffelig
Kornkontakte:		<input type="checkbox"/> Punktkontakt <input type="checkbox"/> suturierte Kontakte <input type="checkbox"/> korngestütztes Gefüge <input type="checkbox"/> matrixgestütztes Gefüge	
Grundmasse:	<input type="checkbox"/> glasig <input checked="" type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> hypokrist. <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> mikrokrist. <input type="checkbox"/> grobkörnig <input type="checkbox"/> entglast	<input type="checkbox"/> mikritisch <input type="checkbox"/> sparitisch <input type="checkbox"/> karbonatisch <input type="checkbox"/> kieselig	<input type="checkbox"/> sehr feinkörnig <input type="checkbox"/> feinkörnig <input type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig
Mineralverteilung:	<input type="checkbox"/> homogen <input type="checkbox"/> heterogen <input type="checkbox"/> in Lagen <input type="checkbox"/> in Nestern		
Korngröße:	<input type="checkbox"/> feinkörnig <input checked="" type="checkbox"/> mittelkörnig <input type="checkbox"/> grobkörnig		
Kornformen:	<input type="checkbox"/> tafelig <input checked="" type="checkbox"/> gestreckt <input type="checkbox"/> kugelig		
Korngrenzen:	<input checked="" type="checkbox"/> gerade <input checked="" type="checkbox"/> gerundet <input type="checkbox"/> eckig <input type="checkbox"/> suturiert		
Organogene Reste:	<input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein		
Unregelmäßigkeiten:	<input checked="" type="checkbox"/> Poren <input checked="" type="checkbox"/> Hohlräume <input checked="" type="checkbox"/> Risse <input type="checkbox"/> Klüfte		
Umwandlungen:	<input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> welche <input type="checkbox"/> Grad der Umwandlung: <input type="checkbox"/> nein		
Bemerkungen:	- Umwandlung der Feldspäte infolge Serizitisierung		

Fotodokumentation der polarisationsmikroskopischen Untersuchungen von Laborbetonen in Dünnschliffen

N11	2
N19-B0	4
N19-B1	7
N19-B3	9
N22	12
K3	16
K4	19
K5	22
K9	28

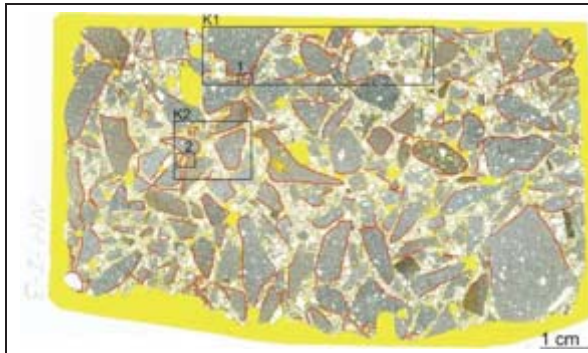
N11

Abb. C- 1: N11-I-3

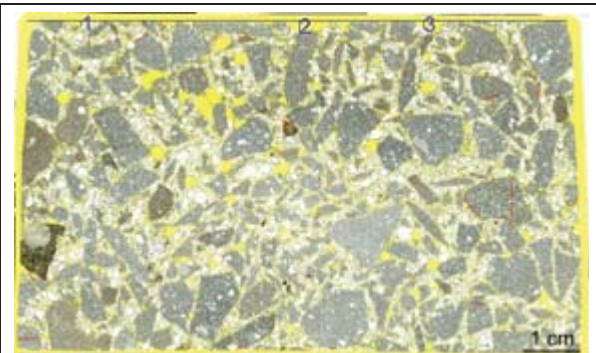


Abb. C- 2: N11-I-4

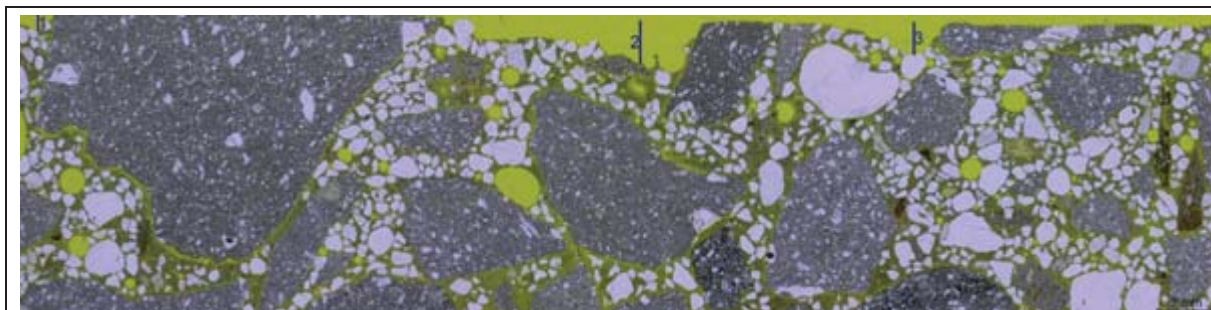


Abb. C- 3: N11-I-3_Bild K1

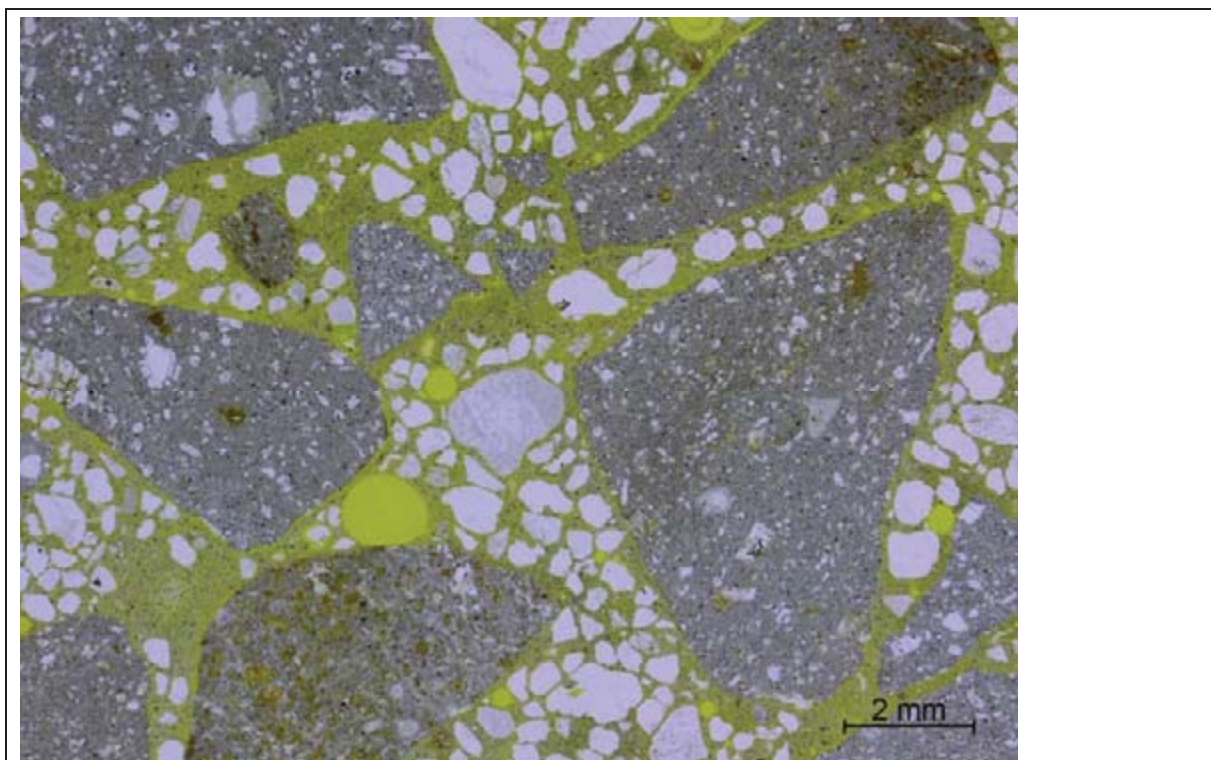


Abb. C- 4: N11-I-3_Bild K2

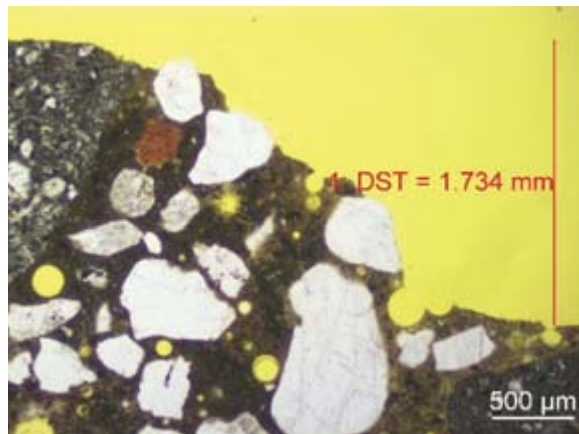


Abb. C- 5: N11-I-4

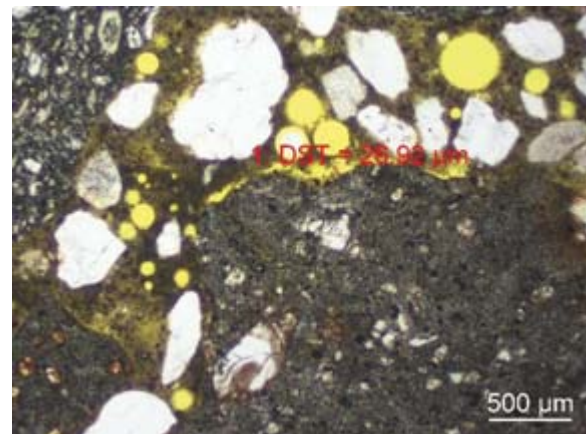


Abb. C- 6: N11-I-4

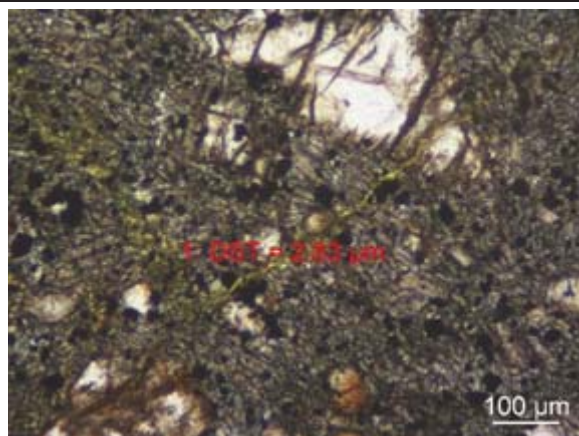


Abb. C- 7: N11-I-4

N19-B0

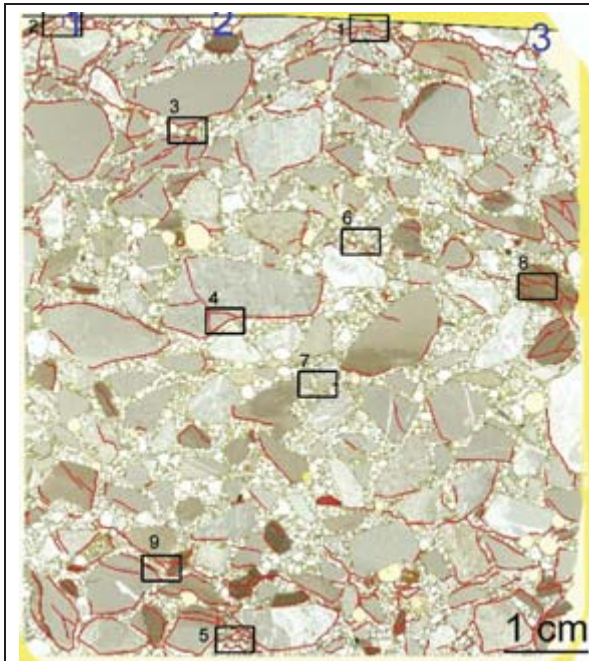


Abb. C- 8: N19-I-3

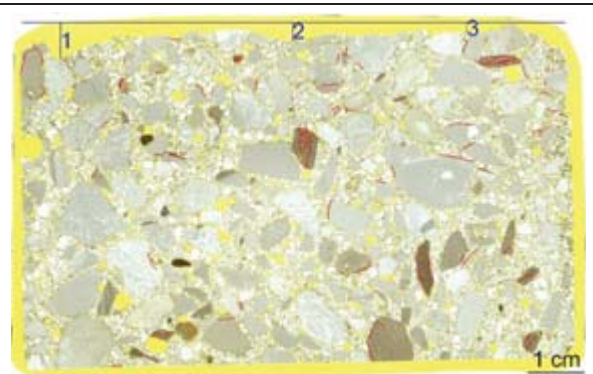


Abb. C- 9: N19-I-4

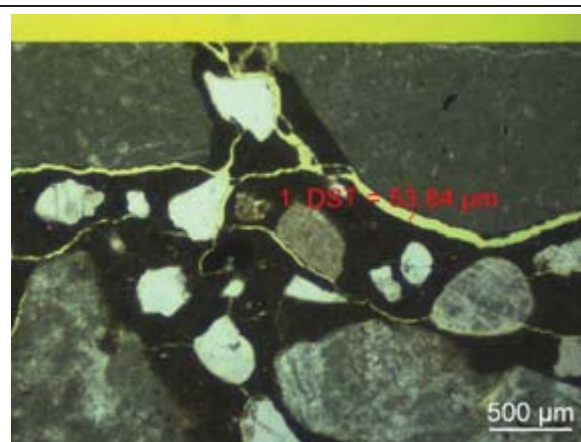


Abb. C- 10: N19-I-3

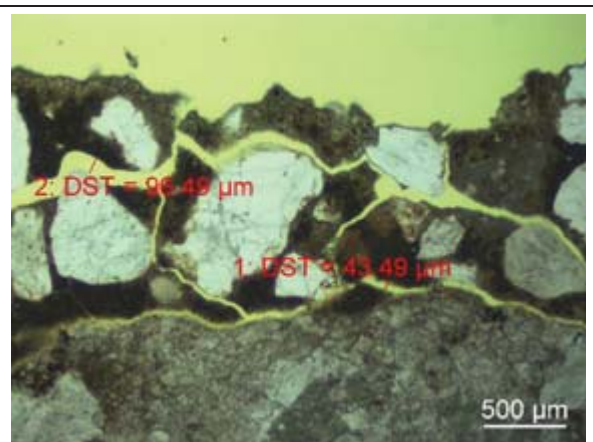


Abb. C- 11: N19-I-3

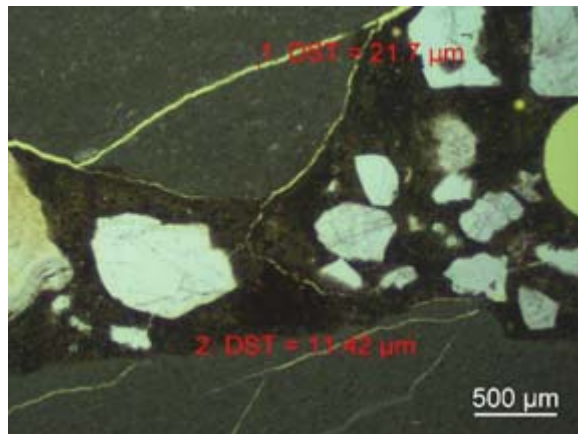


Abb. C- 12: N19-I-3

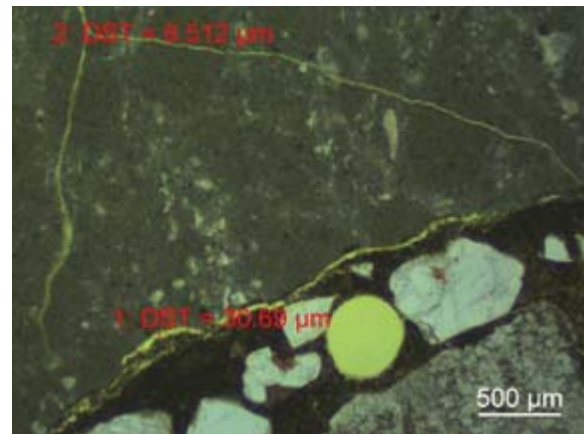


Abb. C- 13: N19-I-3

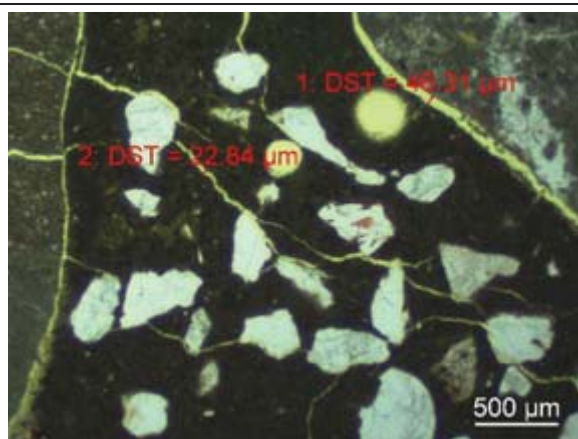


Abb. C- 14: N19-I-3



Abb. C- 15: N19-I-3

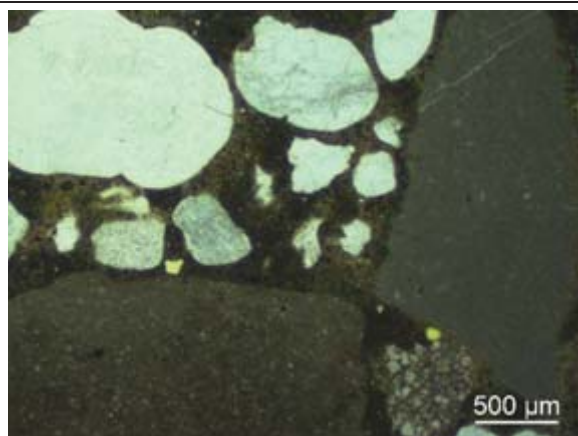


Abb. C- 16: N19-I-3

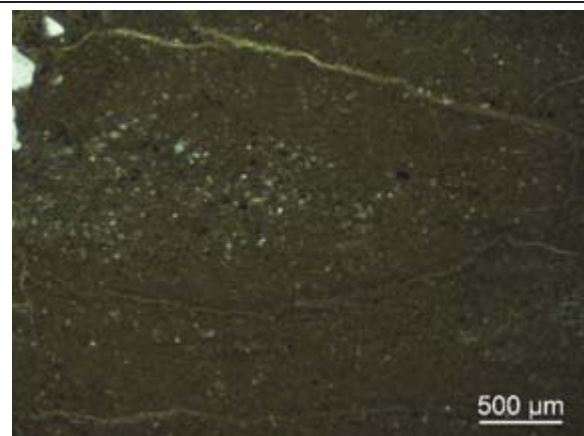


Abb. C- 17: N19-I-3

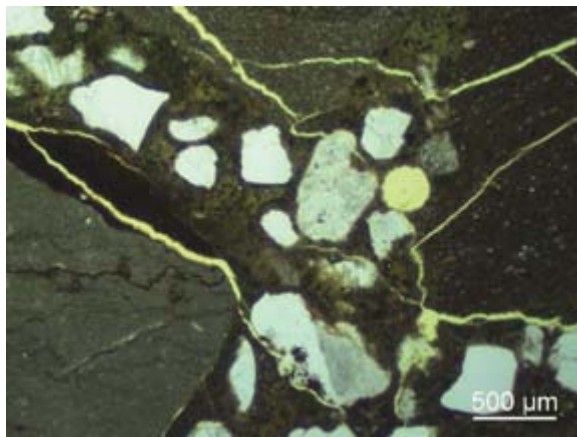


Abb. C- 18: N19-I-3

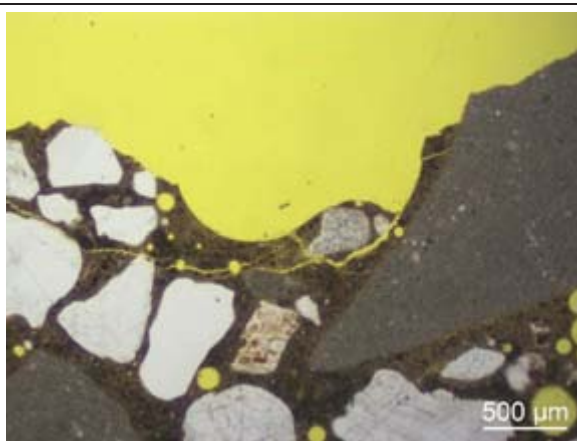


Abb. C- 19: N19-I-4

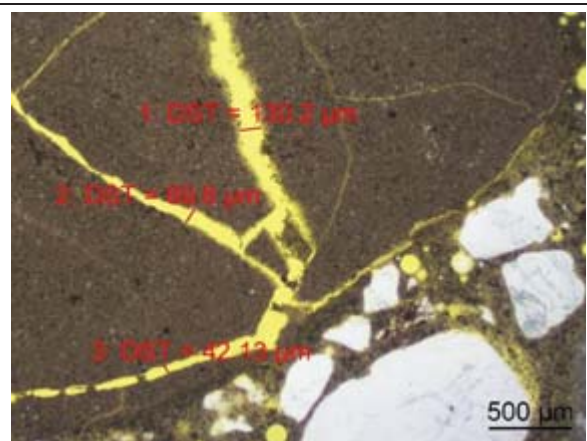


Abb. C- 20: N19-I-4

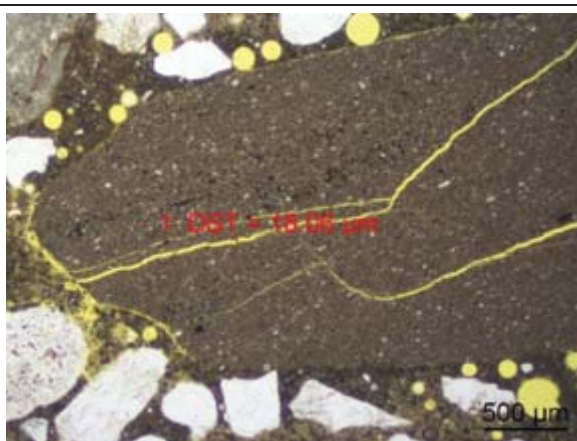


Abb. C- 21: N19-I-4

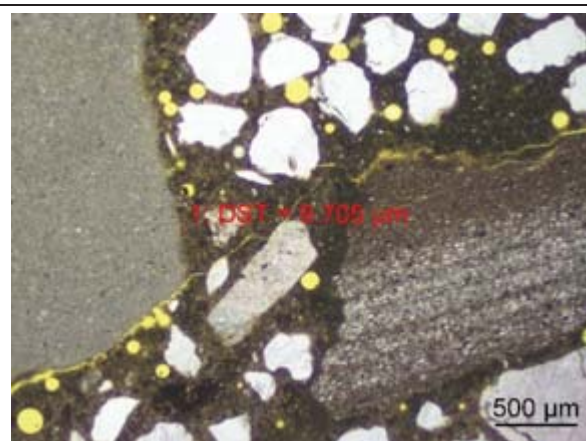


Abb. C- 22: N19-I-4

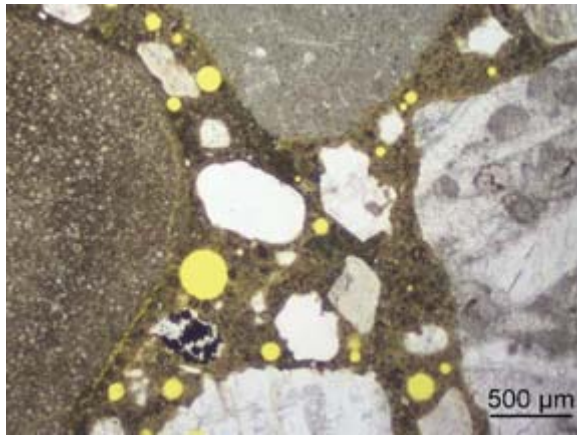


Abb. C- 23: N19-I-4

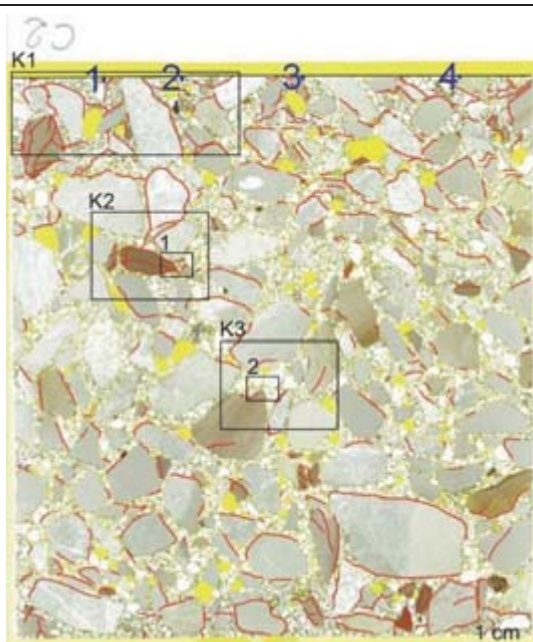
N19-B1

Abb. C- 24: B1-N19-I-3

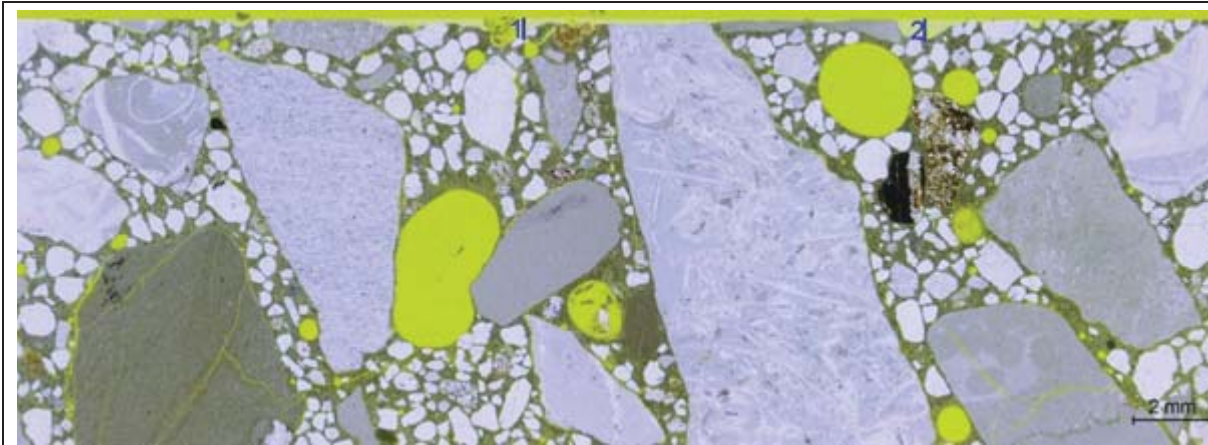


Abb. C- 25: B1-N19-I-3_Bild K1

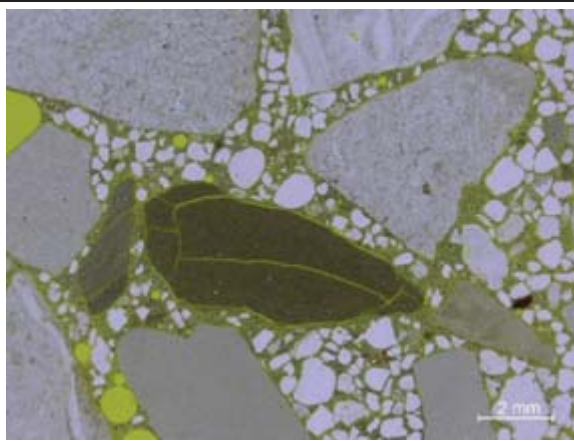


Abb. C- 26: B1-N19-I-3

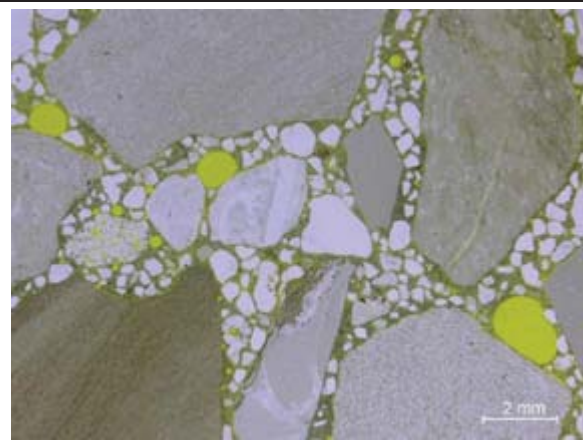


Abb. C- 27: B1-N19-I-3

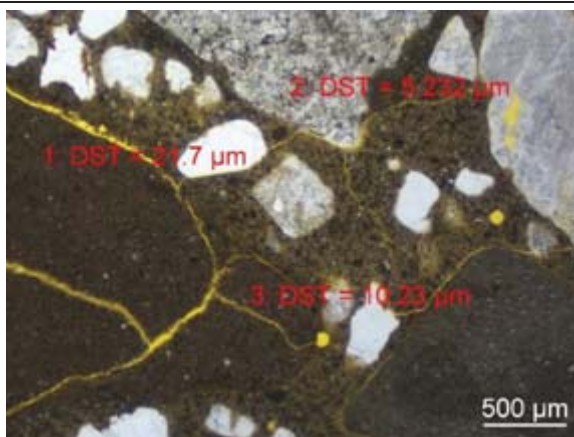


Abb. C- 28: B1-N19-I-3

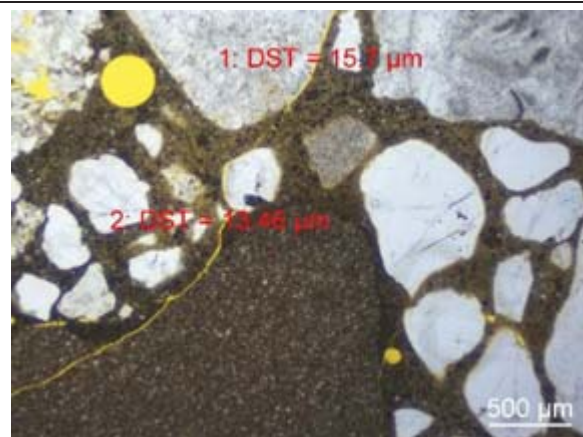
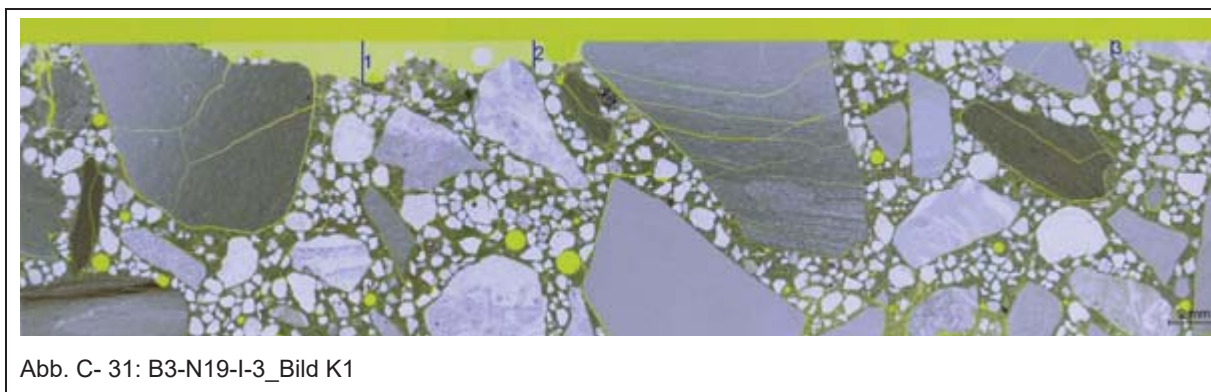
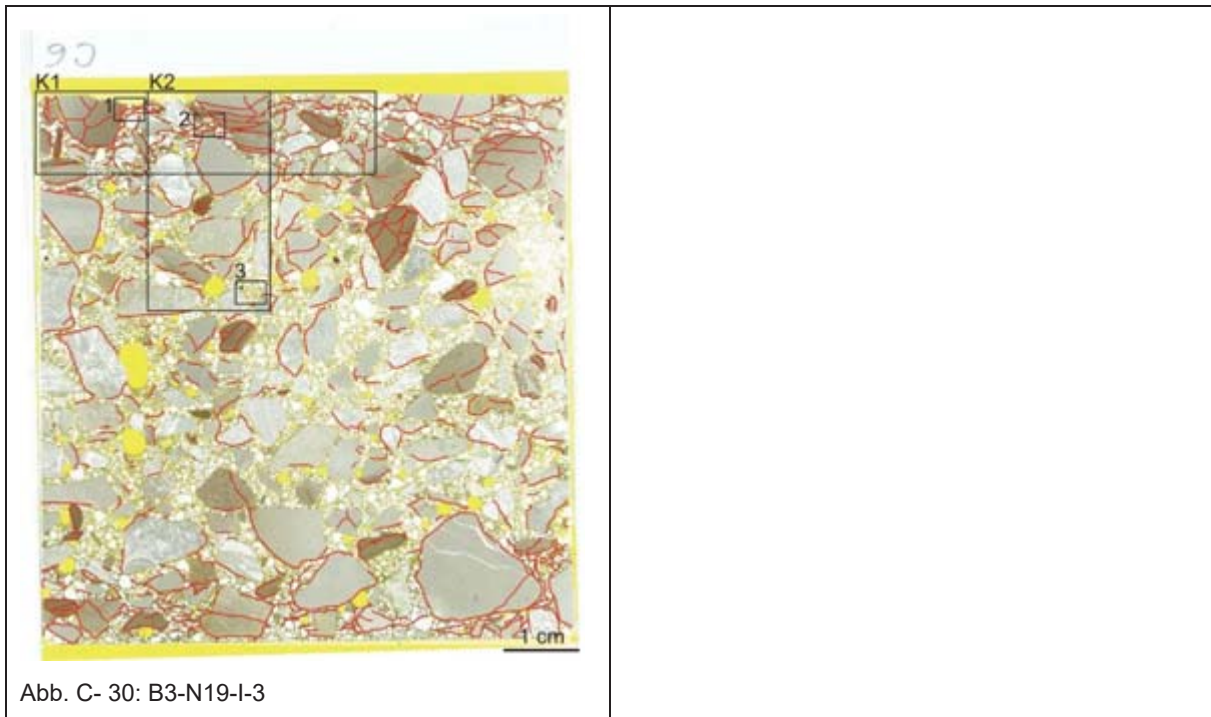


Abb. C- 29: B1-N19-I-3

N19-B3

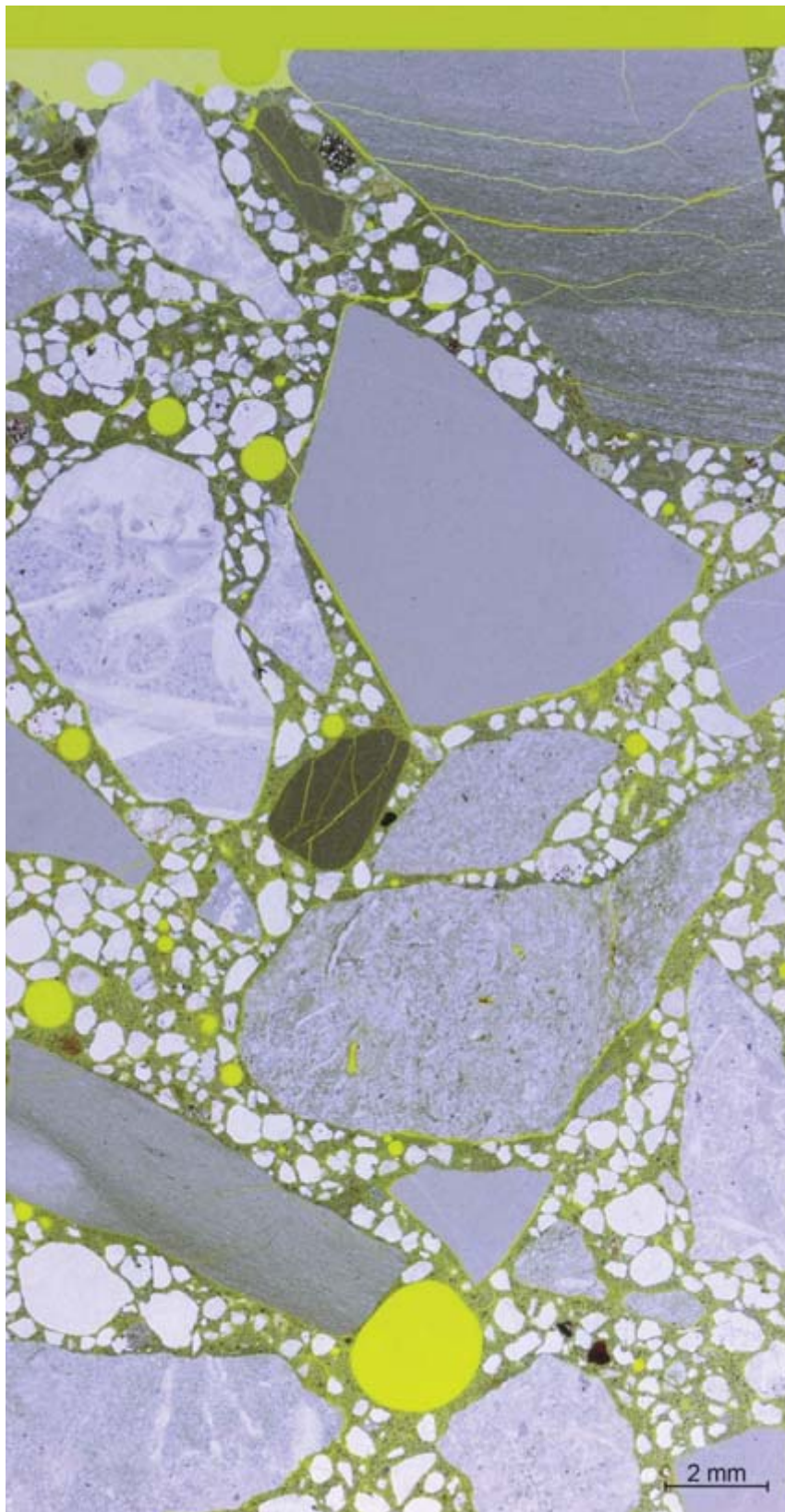


Abb. C- 32: B3-N19-I-3_Bild K2

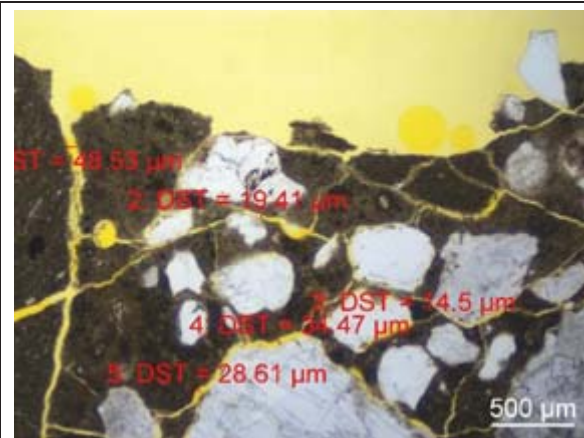


Abb. C- 33: B3-N19-I-3

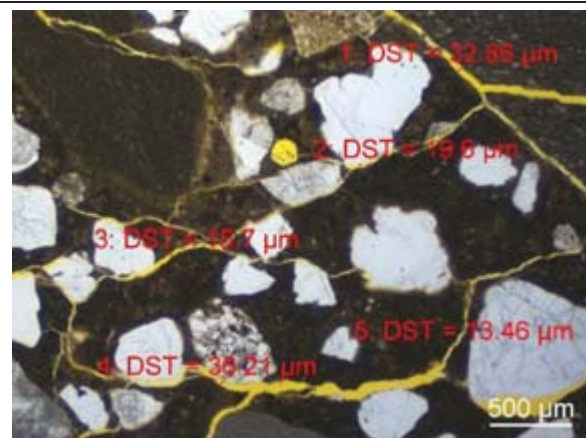


Abb. C- 34: B3-N19-I-3

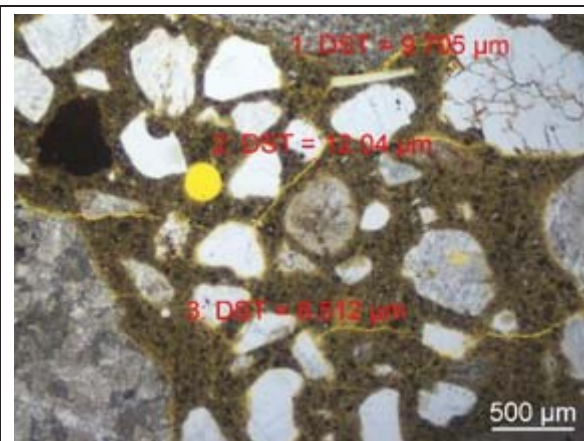
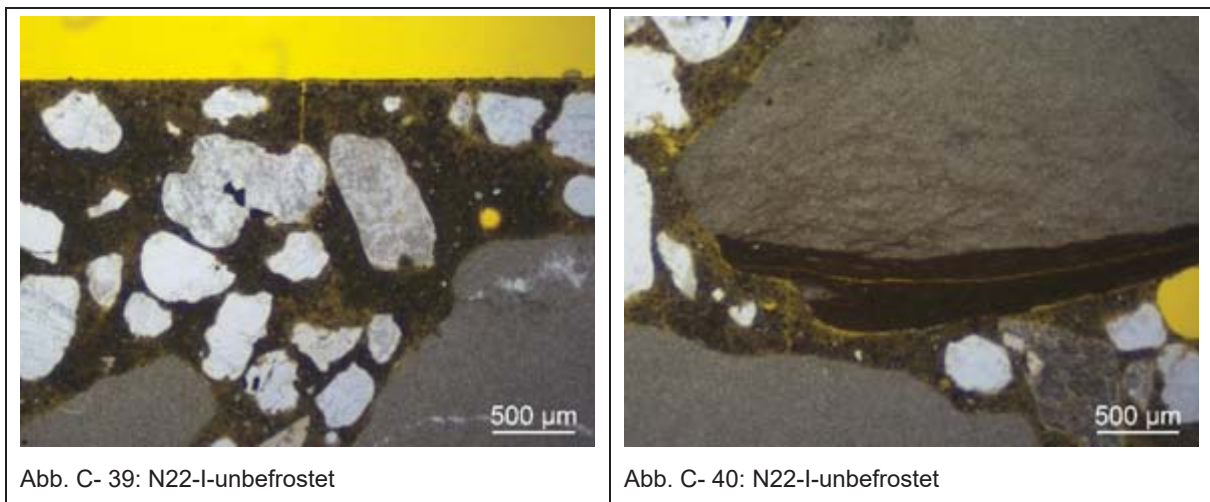
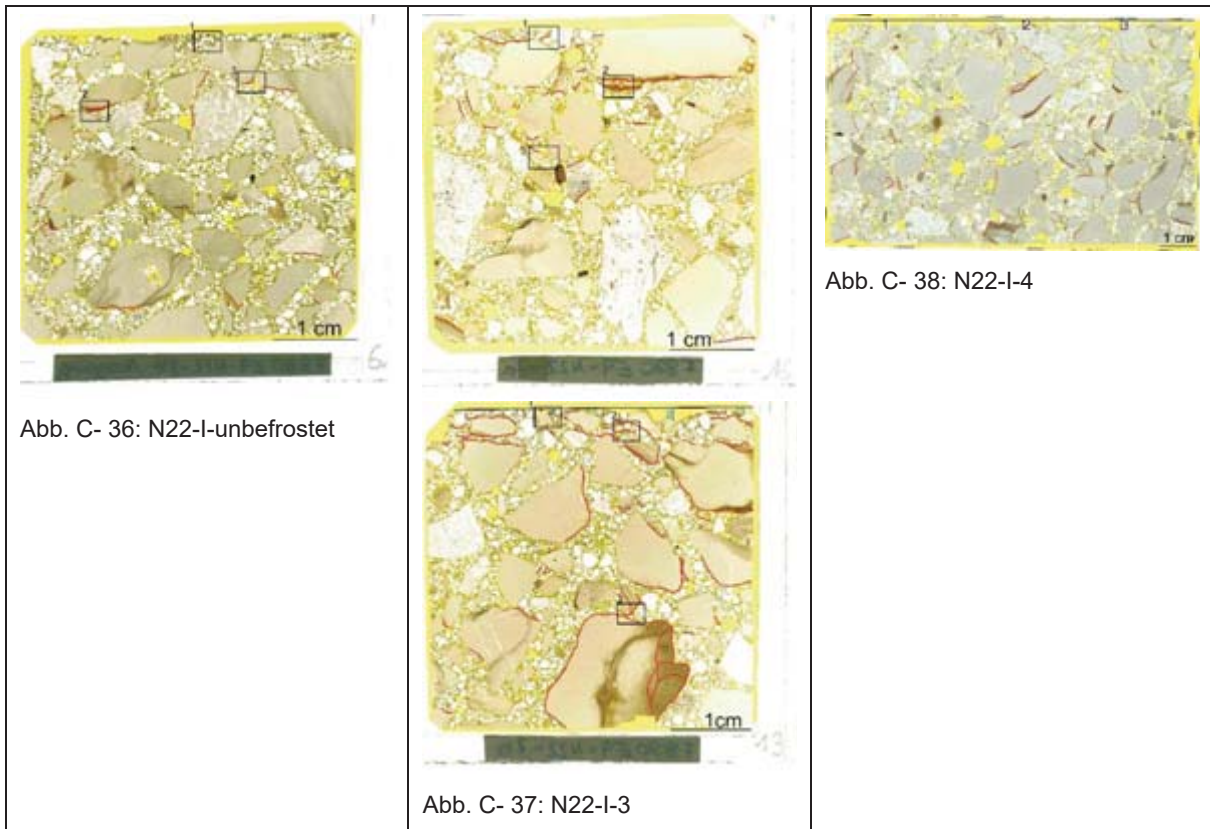


Abb. C- 35: B3-N19-I-3

N22

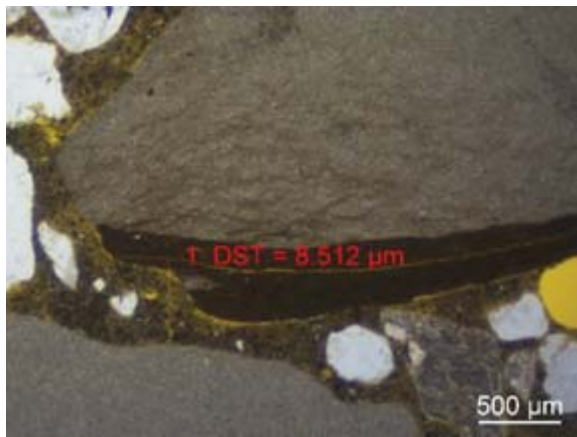


Abb. C- 41: N22-I-unbefrostatet

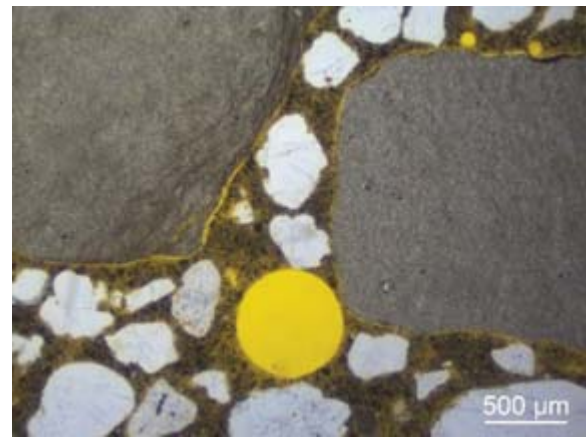


Abb. C- 42: N22-I-unbefrostatet

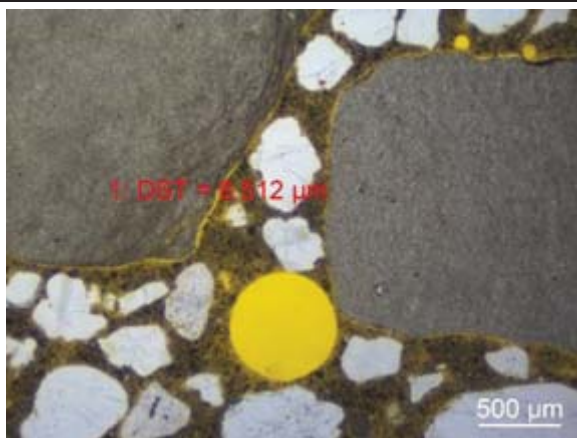


Abb. C- 43: N22-I-unbefrostatet

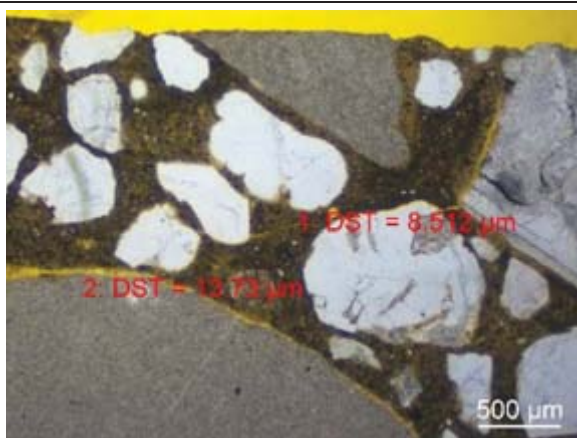


Abb. C- 44: N22-I-3

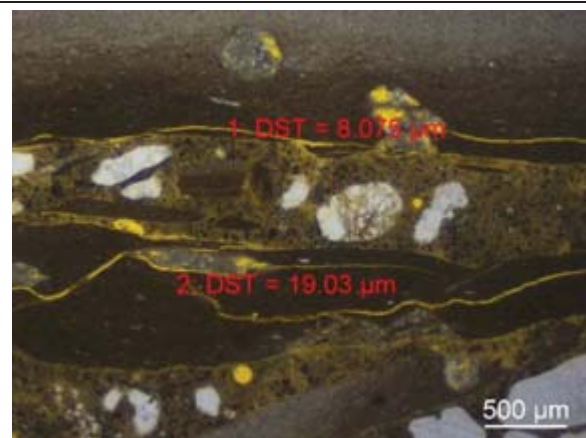


Abb. C- 45: N22-I-3

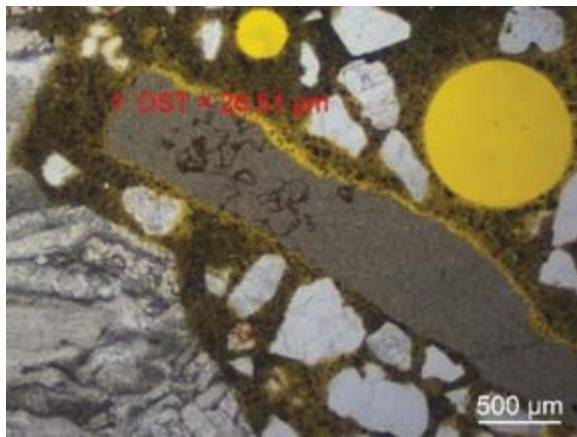


Abb. C- 46: N22-I-3

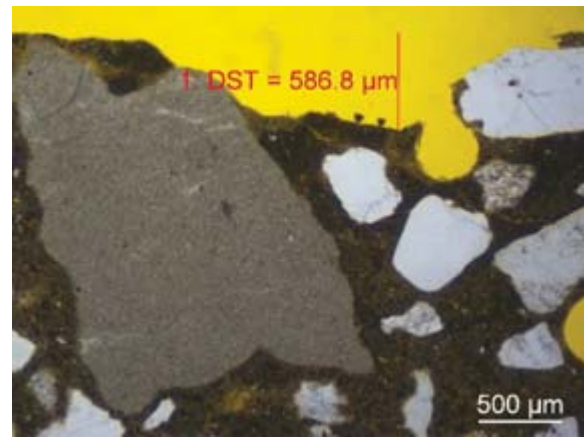


Abb. C- 47: N22-I-3

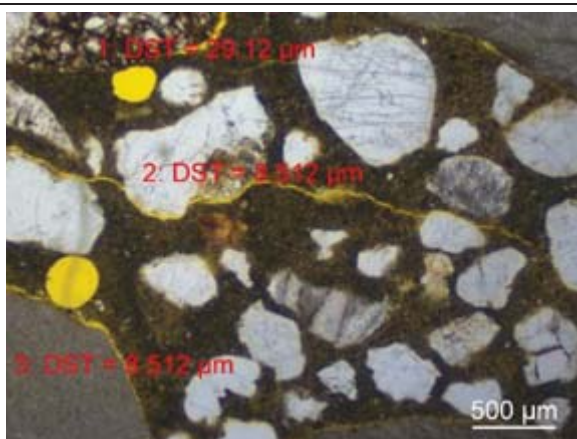


Abb. C- 48: N22-I-3

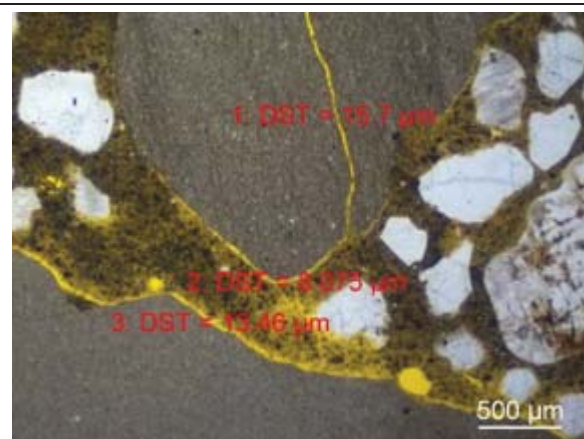


Abb. C- 49: N22-I-3

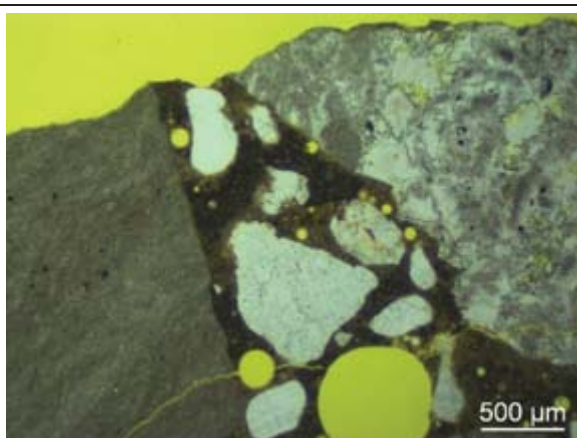


Abb. C- 50: N22-I-4

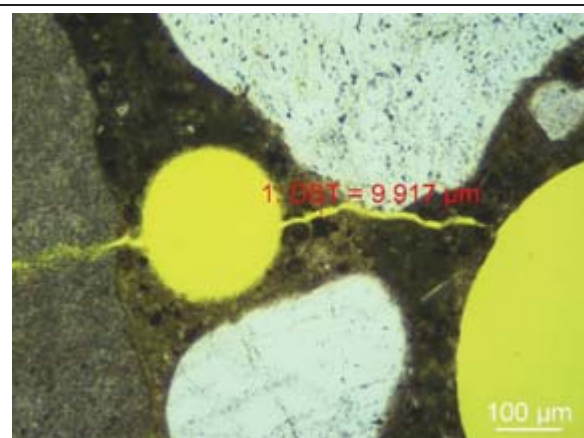


Abb. C- 51: N22-I-4

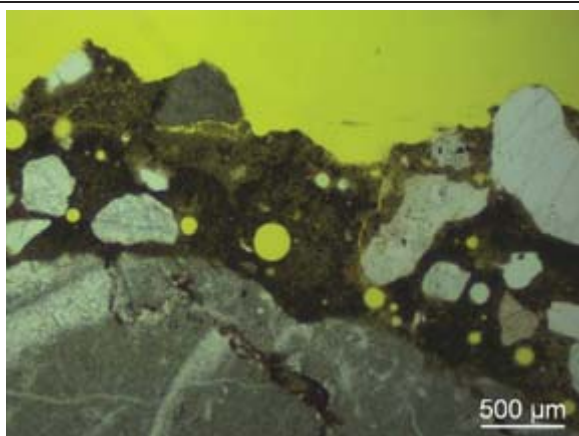


Abb. C- 52: N22-I-4

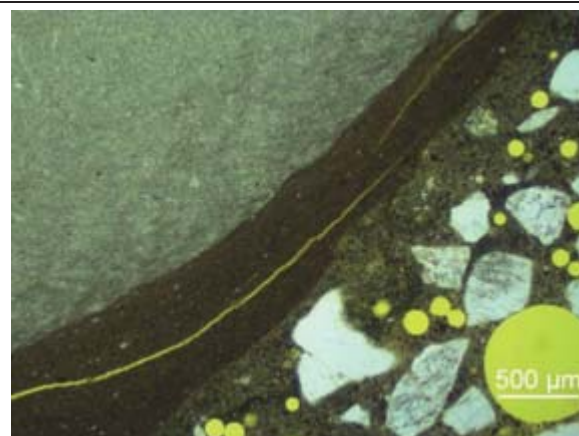


Abb. C- 53: N22-I-4

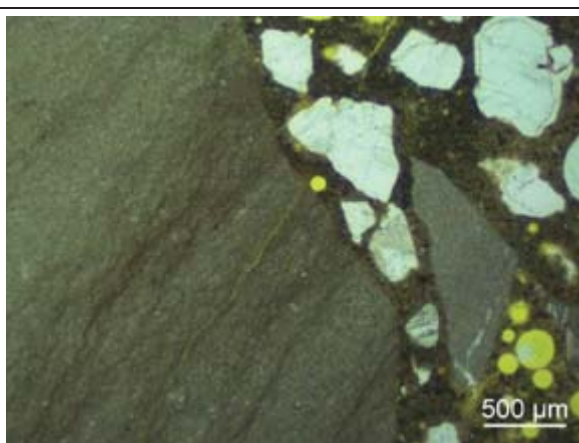


Abb. C- 54: N22-I-4

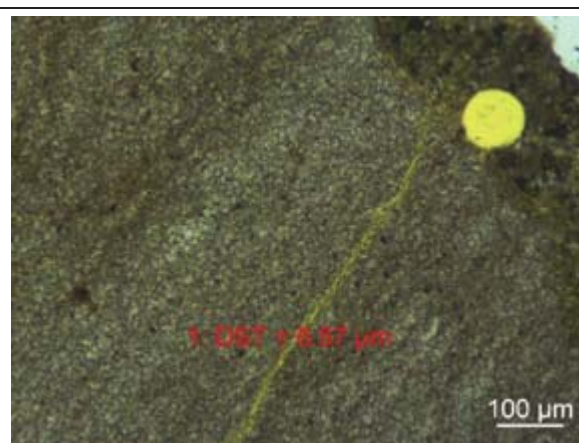


Abb. C- 55: N22-I-4

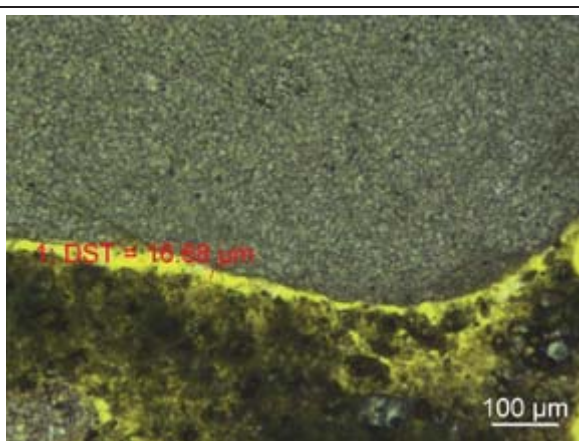


Abb. C- 56: N22-I-4

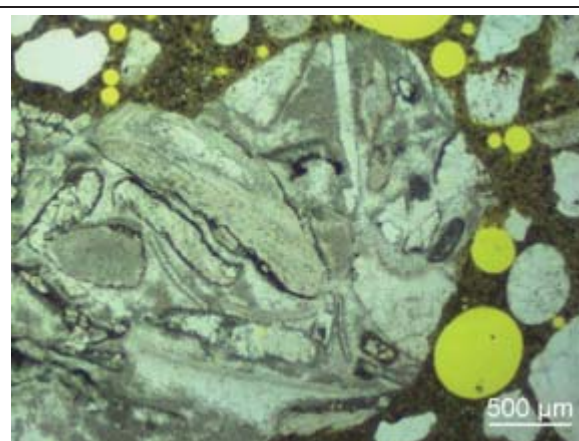
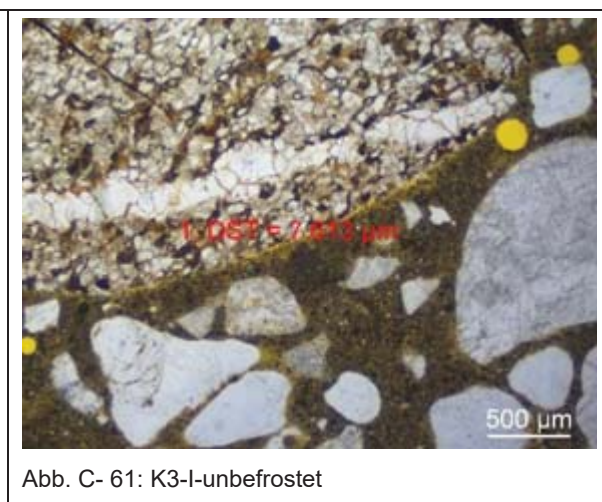
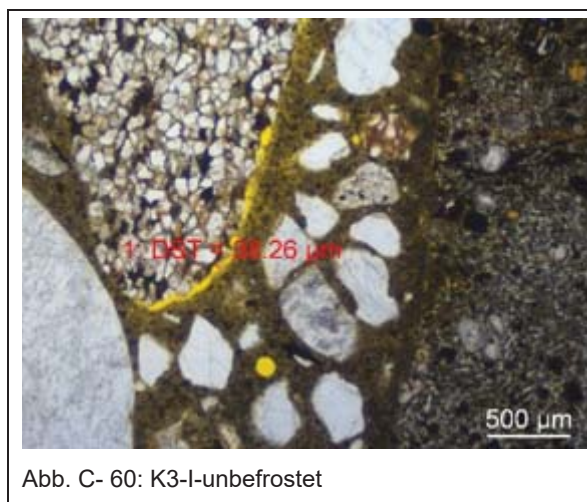
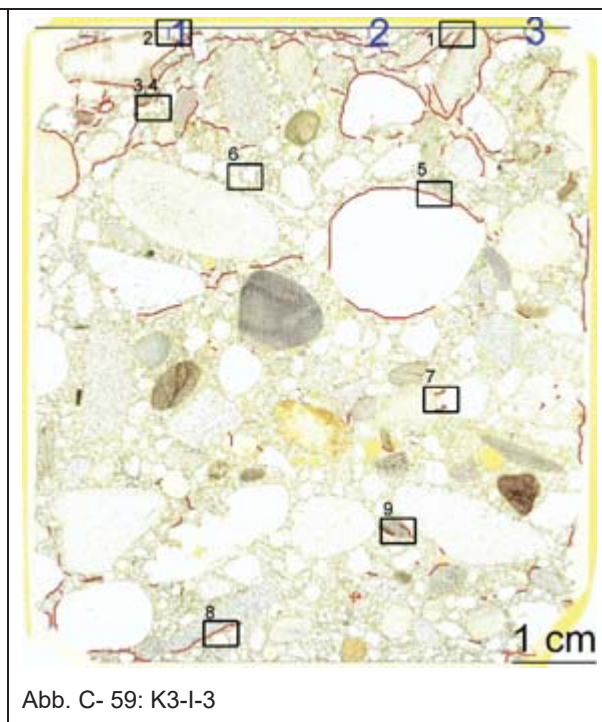
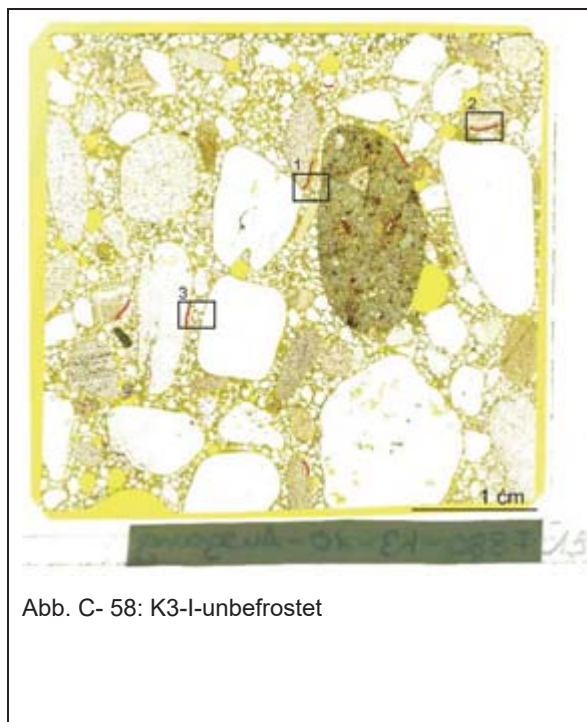


Abb. C- 57: N22-I-4

K3



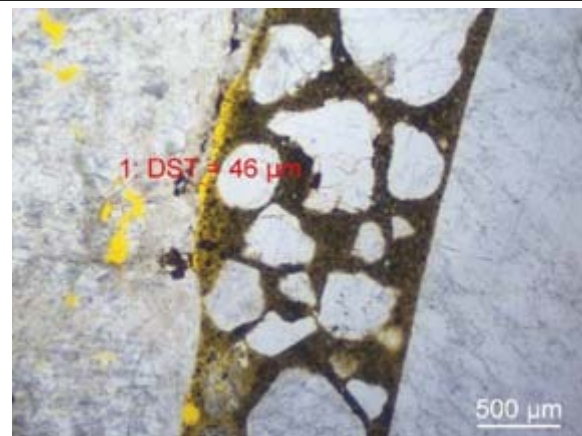


Abb. C- 62: K3-I-unbefrostat

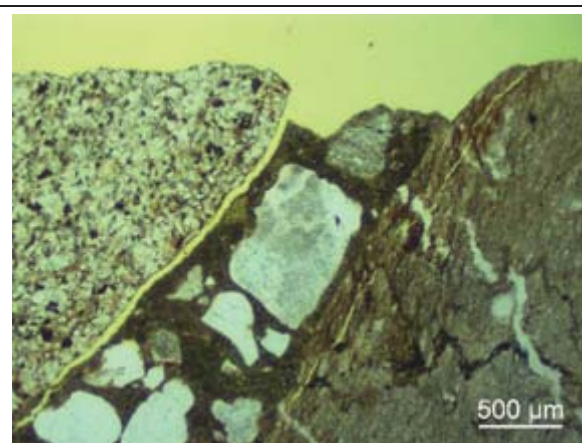


Abb. C- 63: K3-I-3_Bild 1

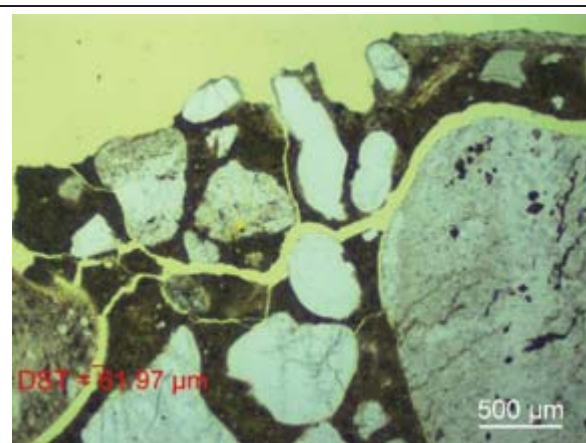


Abb. C- 64: K3-I-3_Bild 2

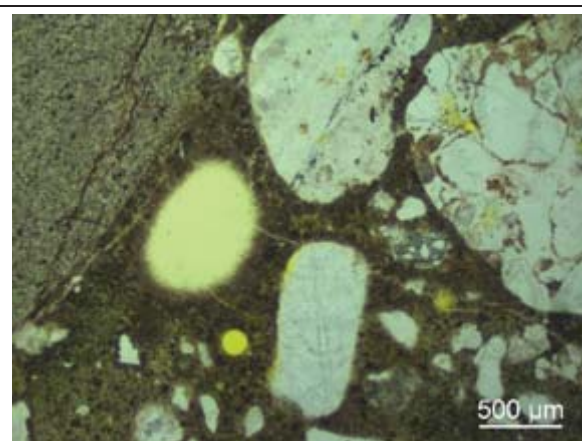


Abb. C- 65: K3-I-3_Bild 3

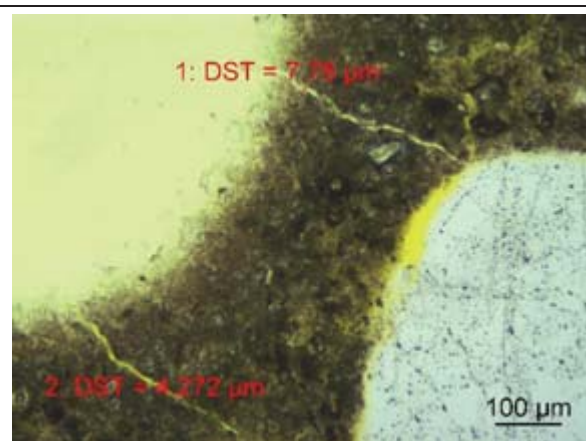


Abb. C- 66: K3-I-3_Bild 4

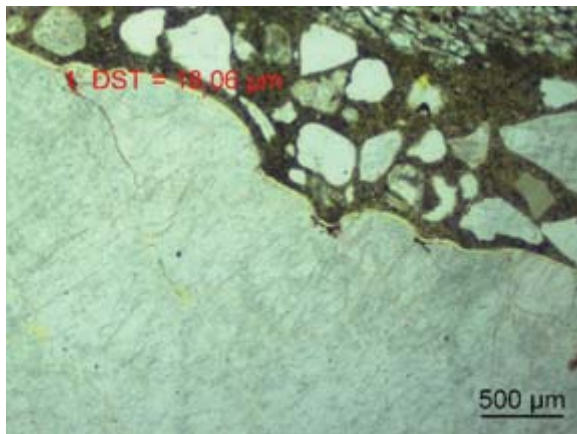


Abb. C- 67: K3-I-3_Bild 5

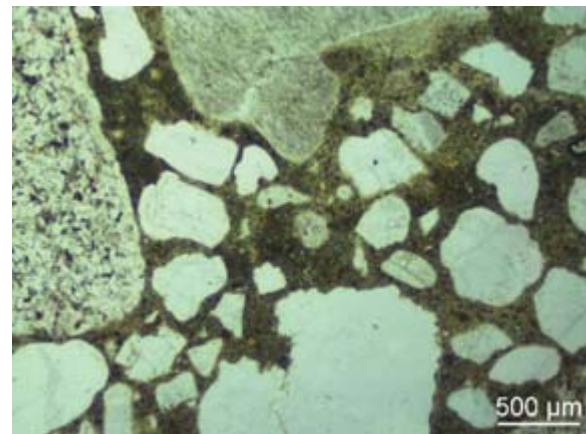


Abb. C- 68: K3-I-3_Bild 6

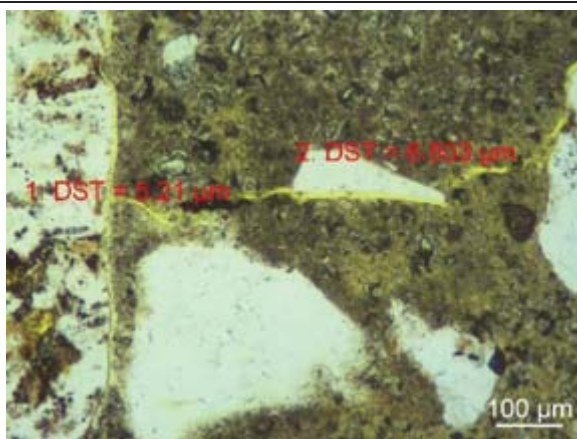


Abb. C- 69: K3-I-3_Bild 7

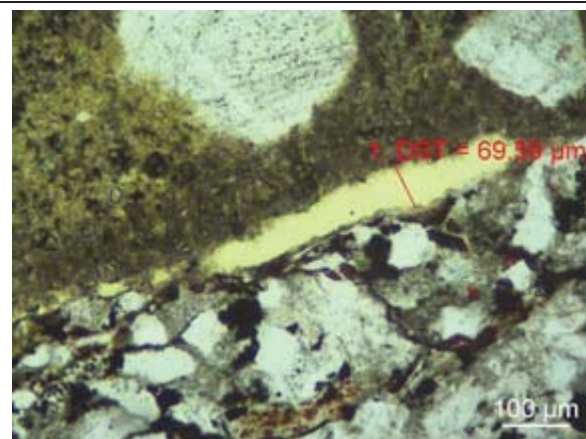


Abb. C- 70: K3-I-3_Bild 8

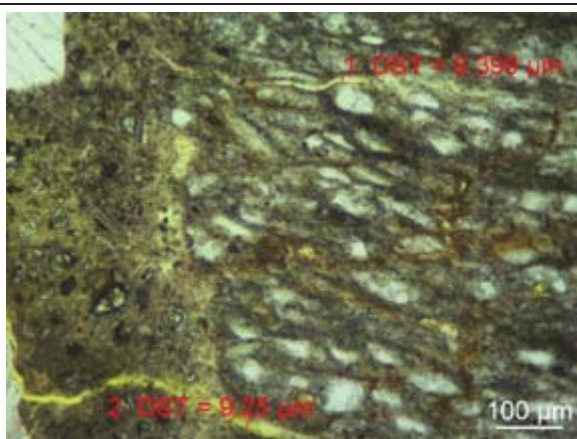


Abb. C- 71: K3-I-3_Bild 9



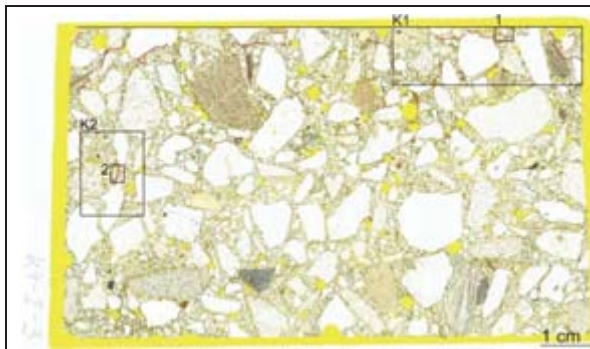
K4

Abb. C- 72: K4-I-3

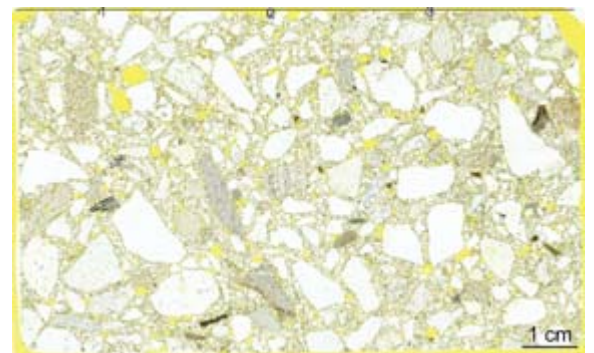


Abb. C- 73: K4-I-4

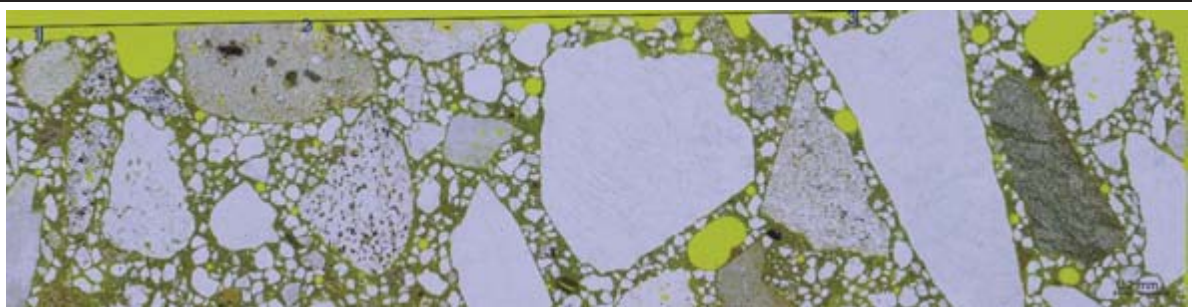


Abb. C- 74: K4-I-3_Bild K1

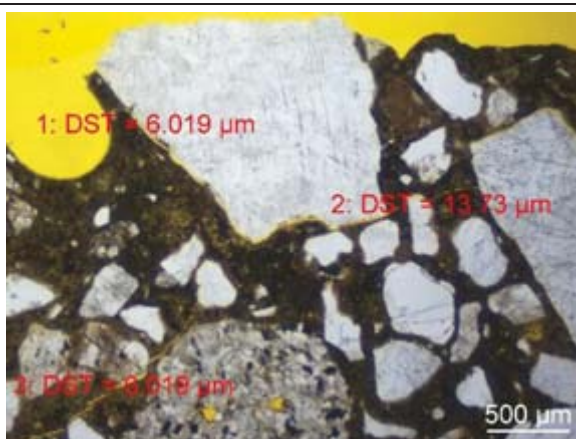


Abb. C- 75: K4-I-3_Bild 1

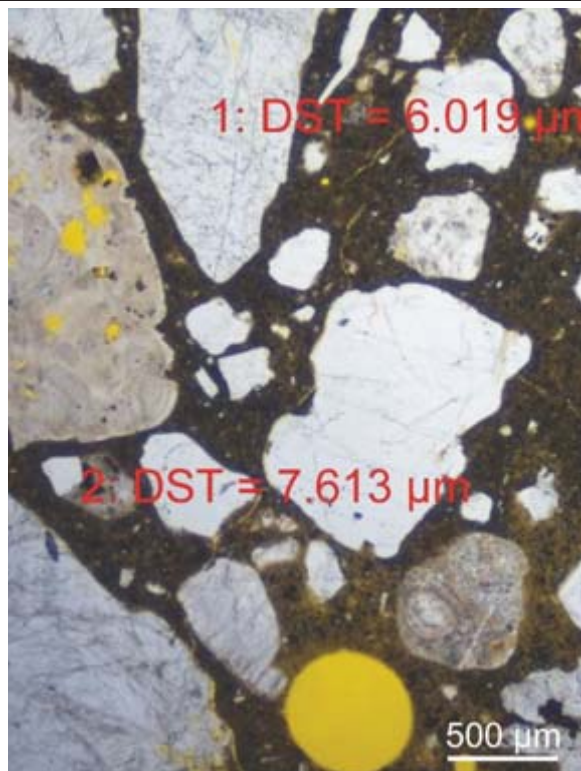


Abb. C- 76: K4-I-3_Bild K2

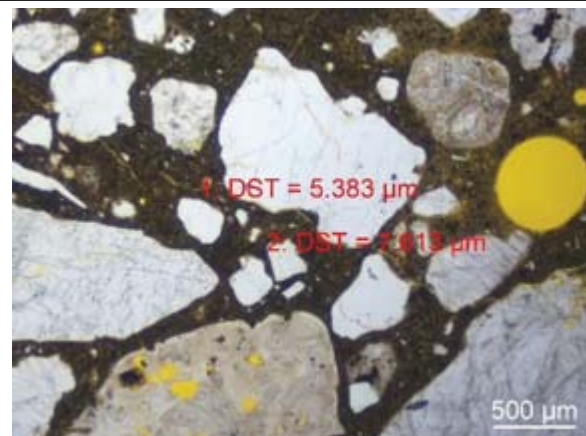


Abb. C- 77: K4-I-3_Bild 4

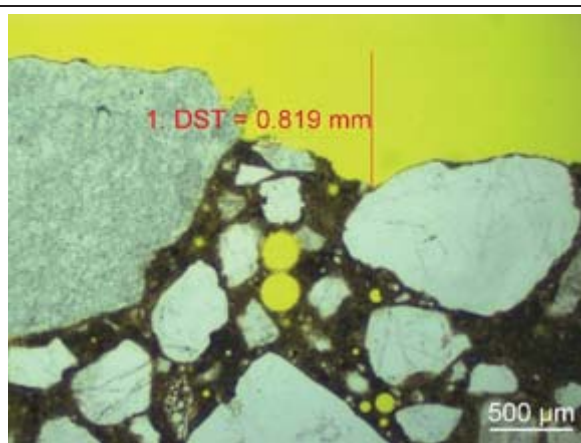


Abb. C- 78: K4-I-4_Bild 1

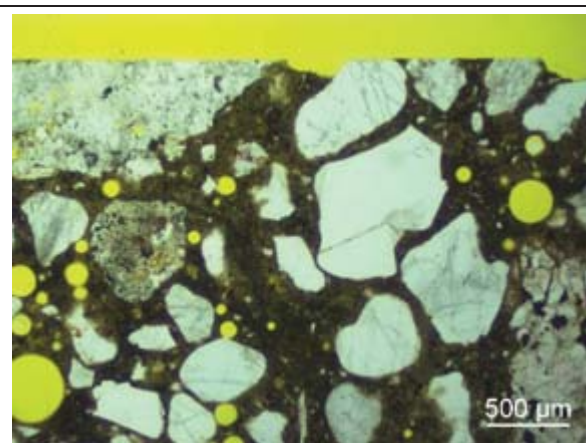


Abb. C- 79: K4-I-4_Bild 2

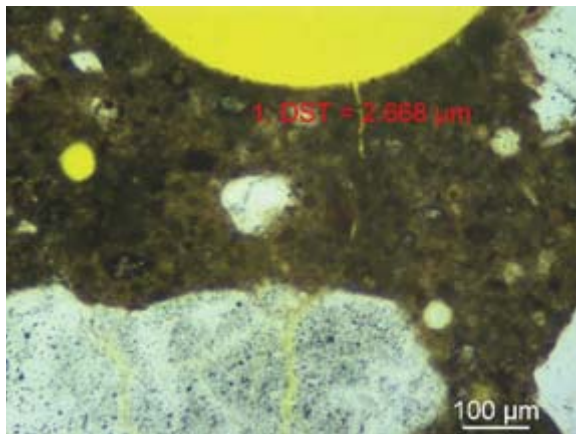


Abb. C- 80: K4-I-4_Bild 3

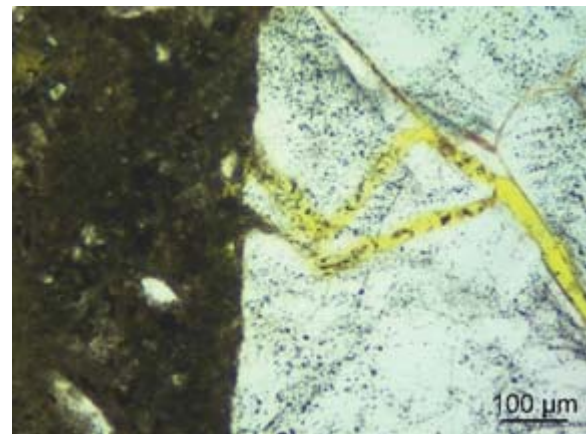


Abb. C- 81: K4-I-4_Bild 4

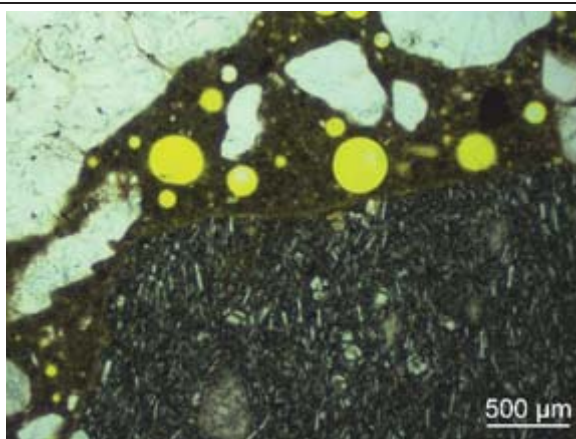


Abb. C- 82: K4-I-4_Bild 5

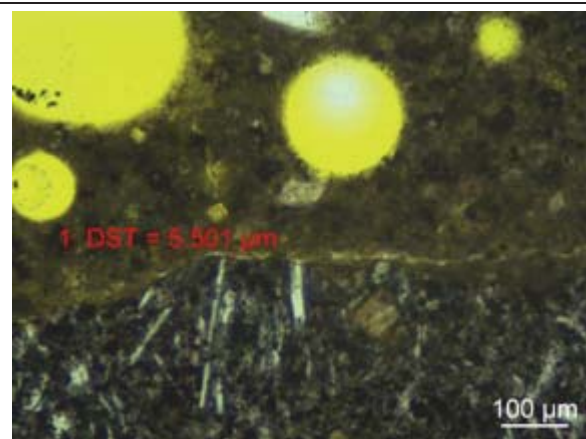


Abb. C- 83: K4-I-4_Bild 6

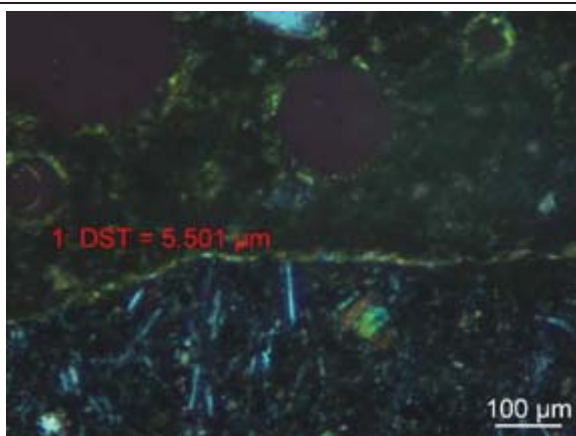


Abb. C- 84: K4-I-4_Bild 7

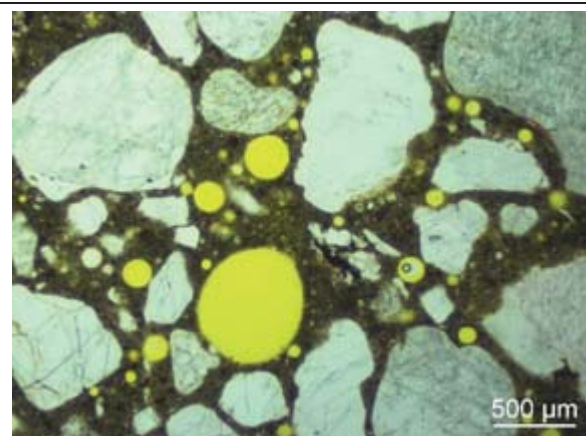


Abb. C- 85: K4-I-4_Bild 8

K5

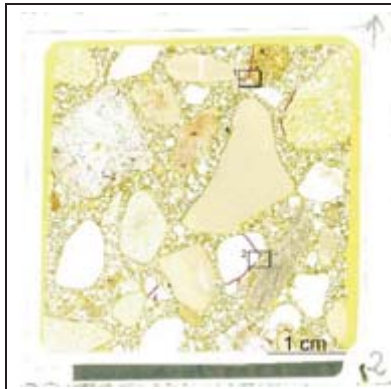


Abb. C- 86: K5-I-unbefrostat

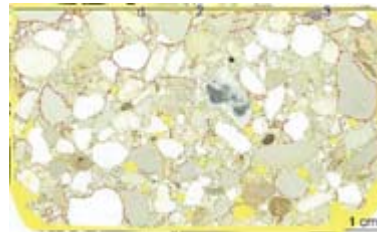


Abb. C- 87: K5-I-3

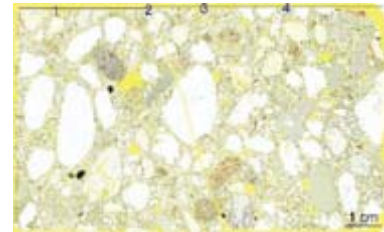


Abb. C- 88: K5-I-4

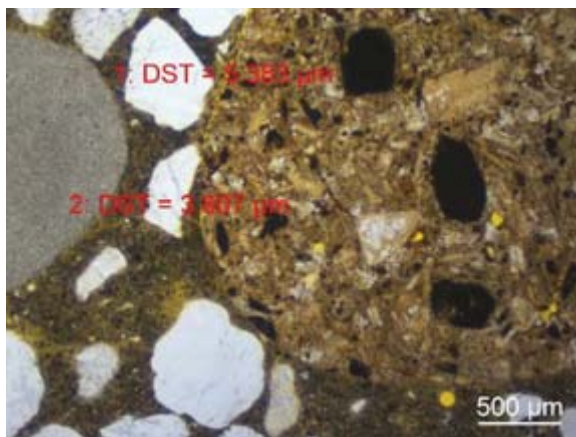


Abb. C- 89: K5-I-unbefrostat_Bild 1

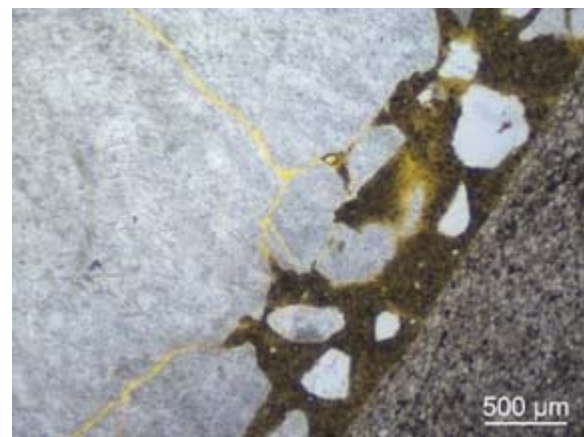


Abb. C- 90: K5-I-unbefrostat_Bild 2

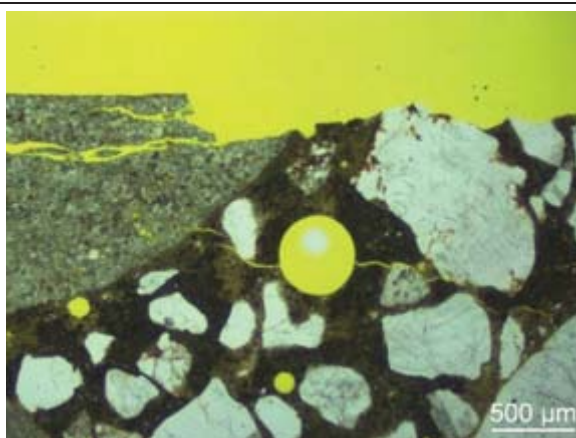


Abb. C- 91: K5-I-3_Bild 1

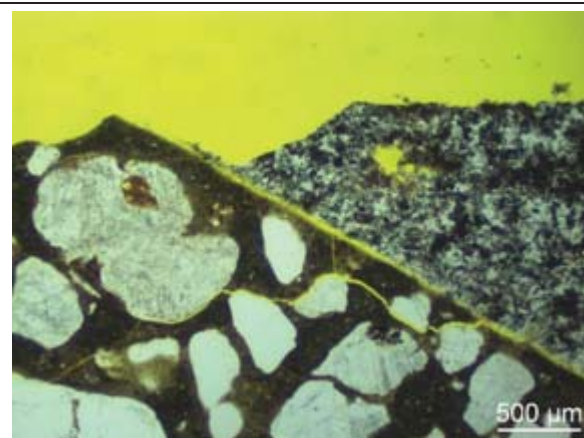


Abb. C- 92: K5-I-3_Bild 2

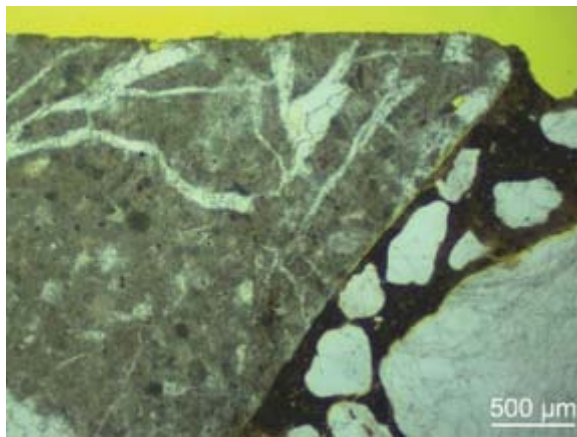


Abb. C- 93: K5-I-3_Bild 3

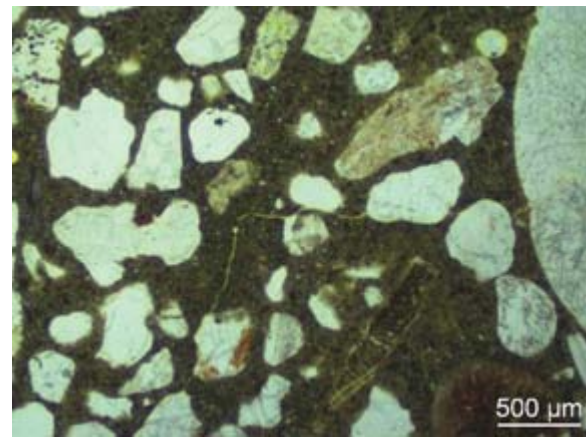


Abb. C- 94: K5-I-3_Bild 4

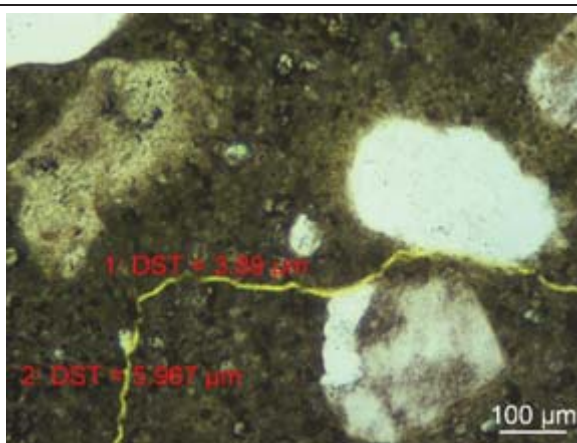


Abb. C- 95: K5-I-3_Bild 5

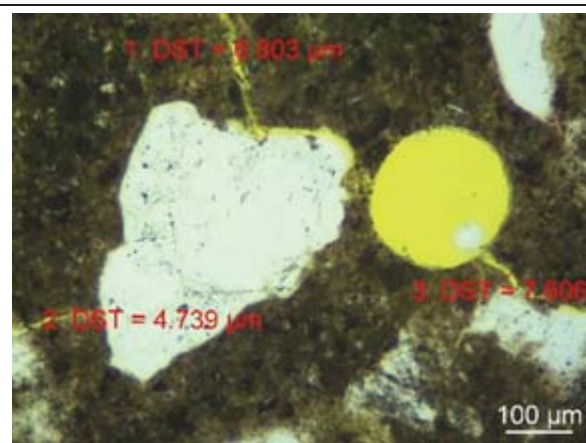


Abb. C- 96: K5-I-3_Bild 6

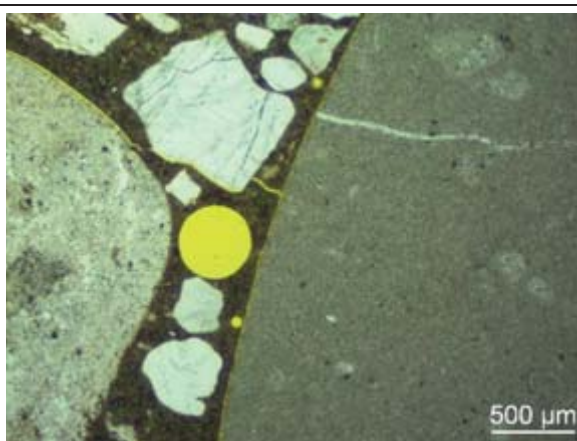


Abb. C- 97: K5-I-3_Bild 7

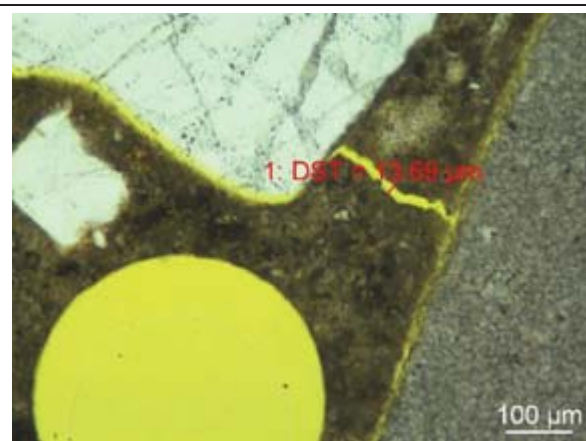


Abb. C- 98: K5-I-3_Bild 8

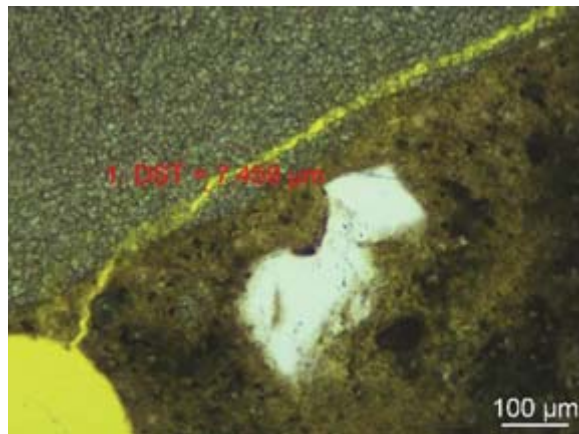


Abb. C- 99: K5-I-3_Bild 9

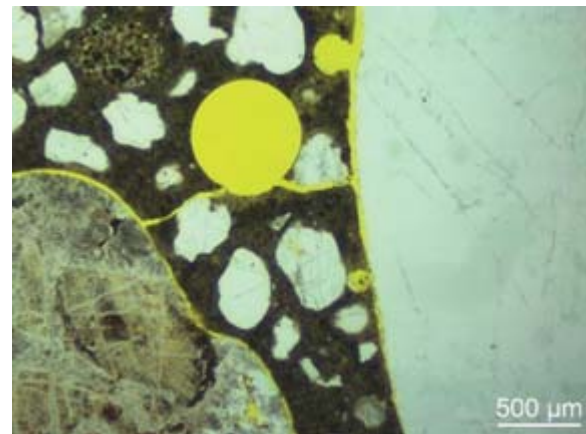


Abb. C- 100: K5-I-3_Bild 10

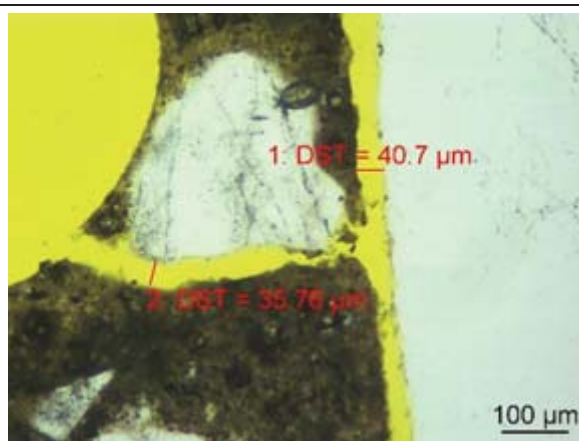


Abb. C- 101: K5-I-3_Bild 11

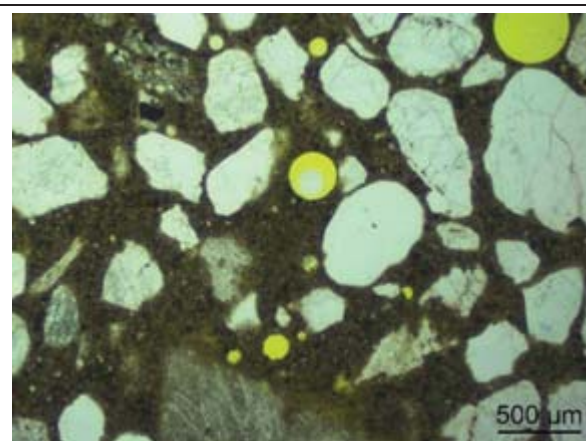


Abb. C- 102: K5-I-3_Bild 12

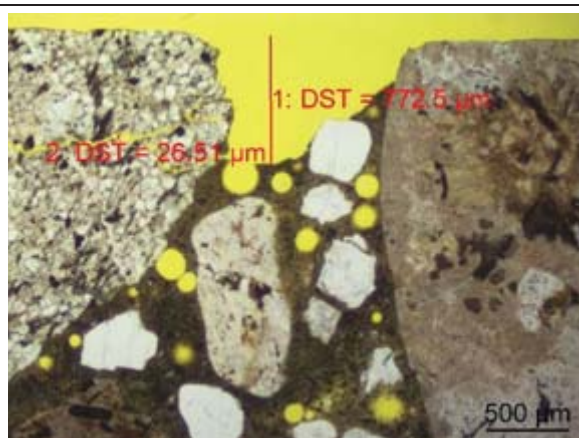


Abb. C- 103: K5-I-4_Bild 1

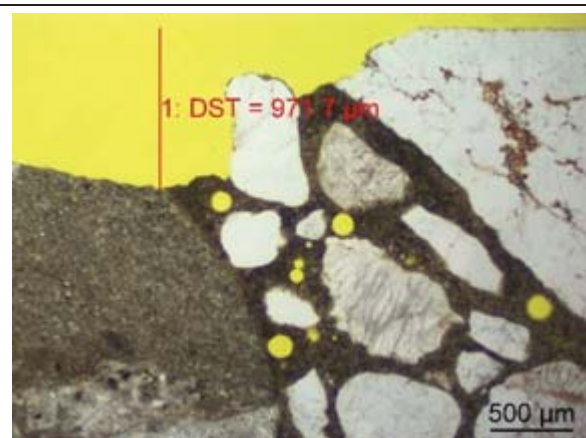


Abb. C- 104: K5-I-4_Bild 2

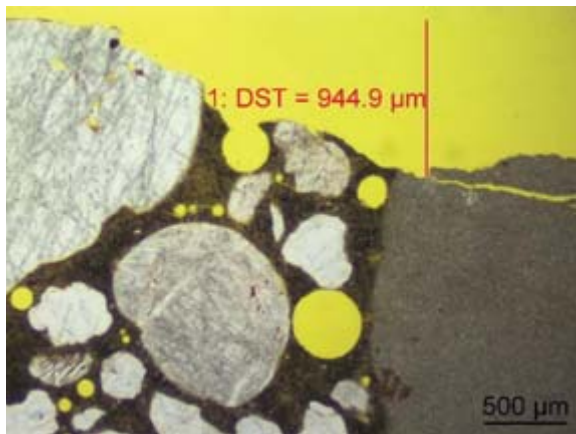


Abb. C- 105: K5-I-4_Bild 3

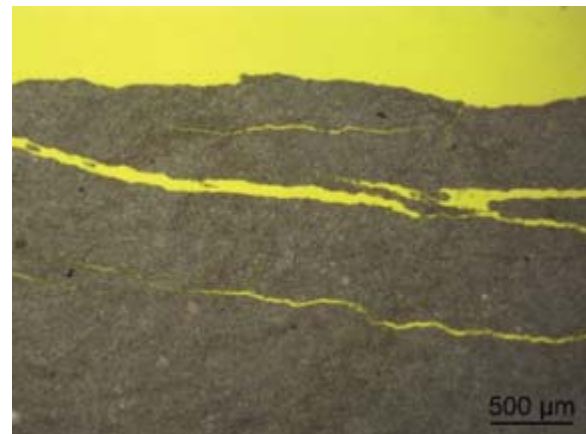


Abb. C- 106: K5-I-4_Bild 4

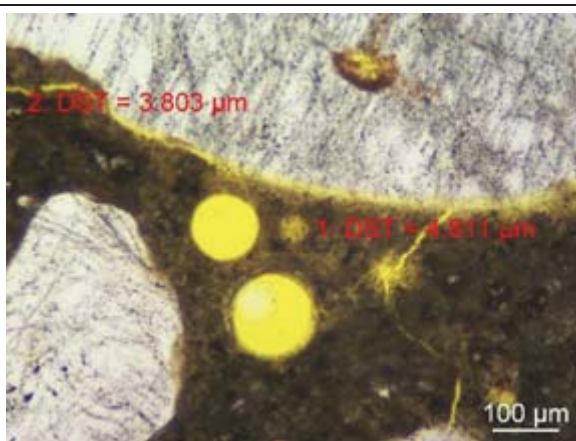


Abb. C- 107: K5-I-4_Bild 5

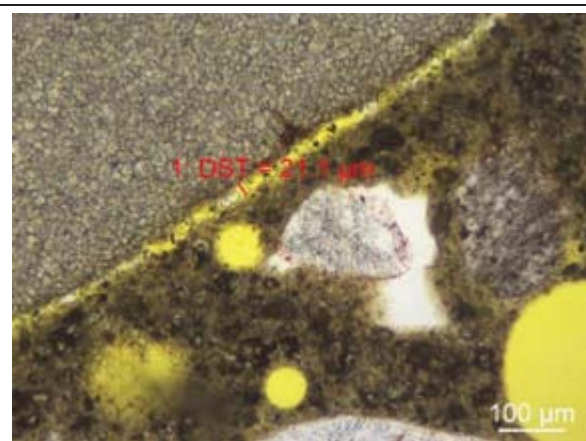


Abb. C- 108: K5-I-4_Bild 6

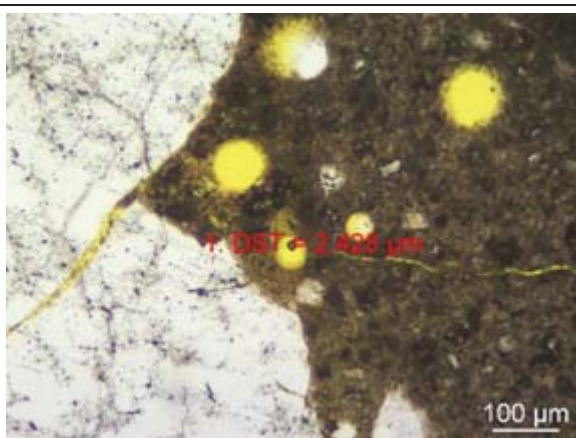


Abb. C- 109: K5-I-4_Bild 7

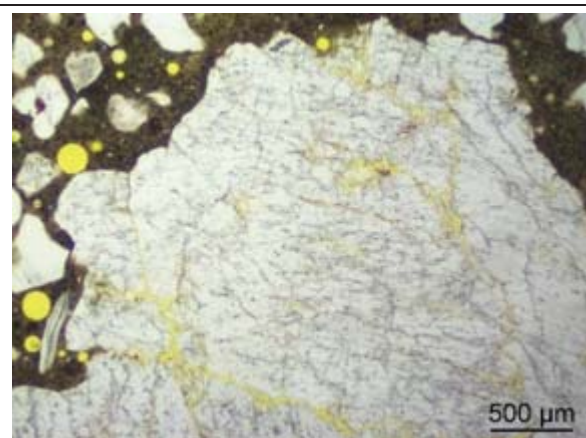


Abb. C- 110: K5-I-4_Bild 8

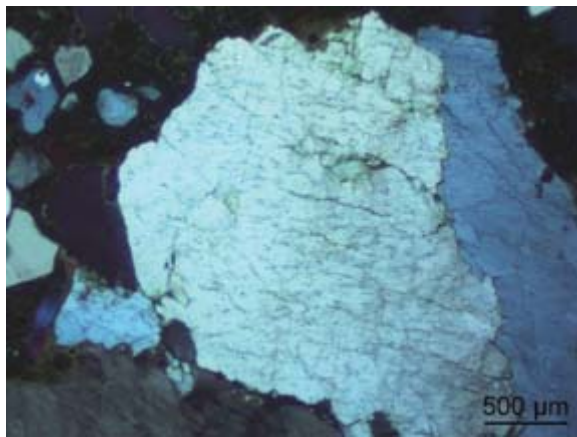


Abb. C- 111: K5-I-4_Bild 9

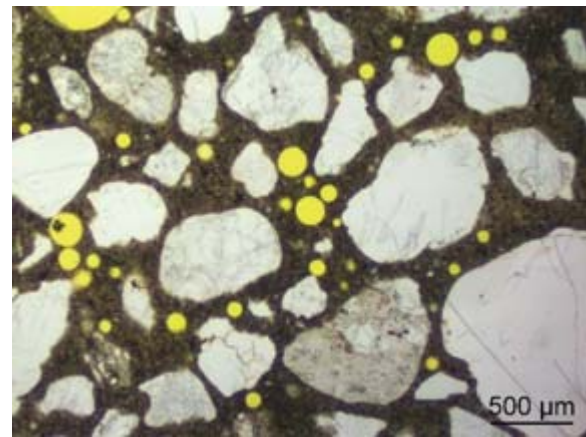


Abb. C- 112: K5-I-4_Bild 10

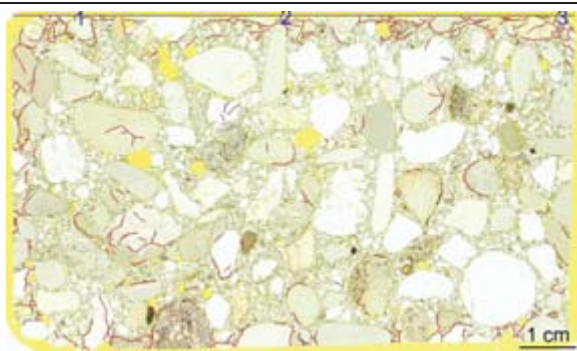


Abb. C- 113: K5-III-3

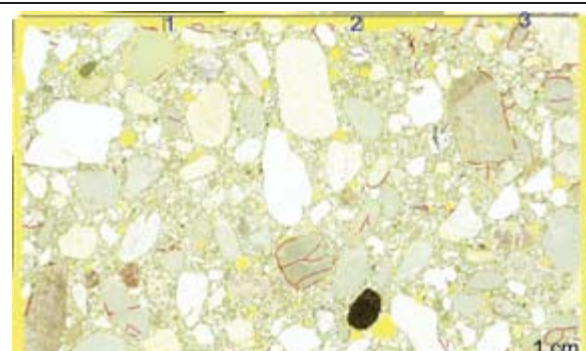


Abb. C- 114: K5-III-4

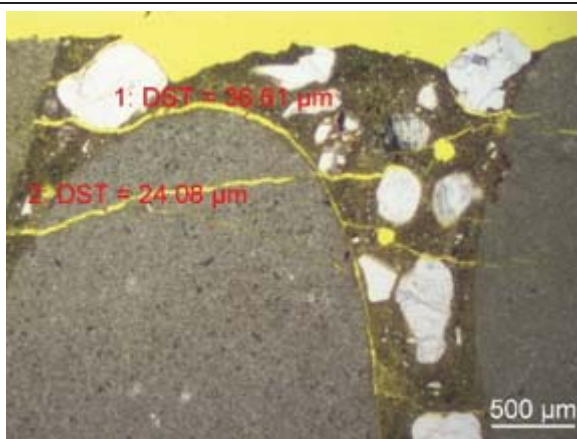


Abb. C- 115: K5-III-3_Bild 1

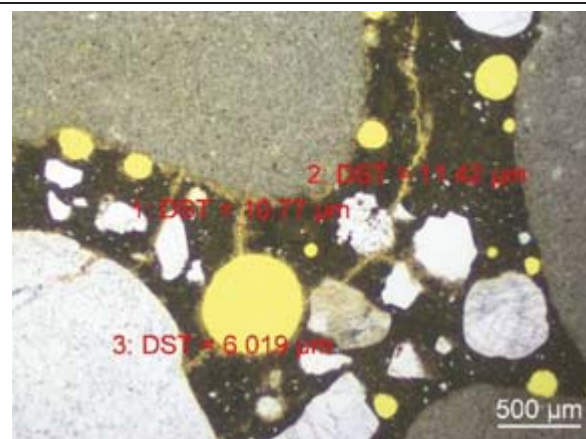


Abb. C- 116: K5-III-3_Bild 2

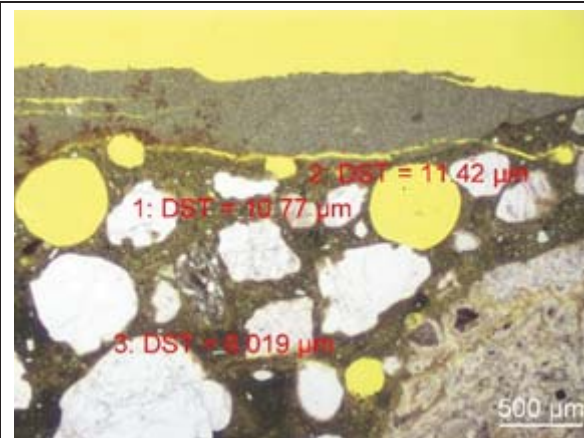


Abb. C- 117: K5-III-3_Bild 3

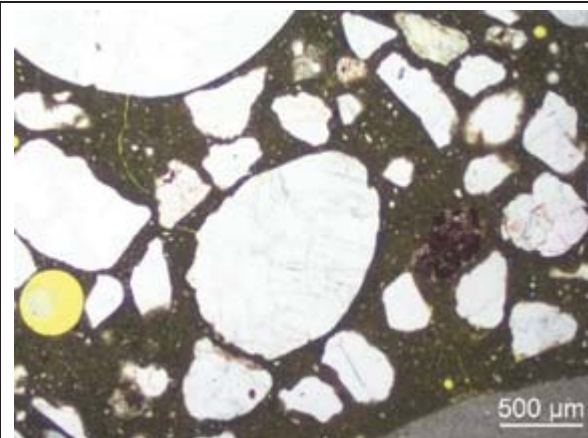


Abb. C- 118: K5-III-3_Bild 4

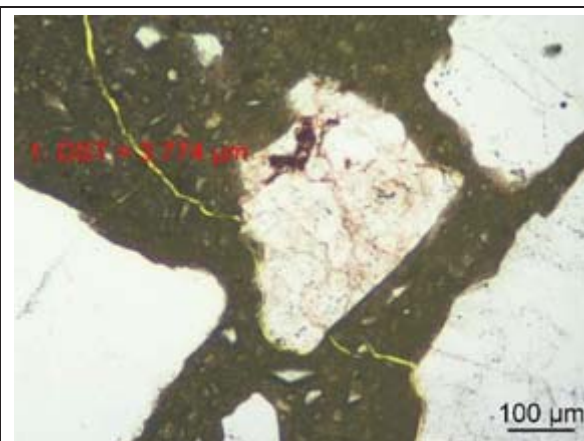


Abb. C- 119: K5-III-3_Bild 5

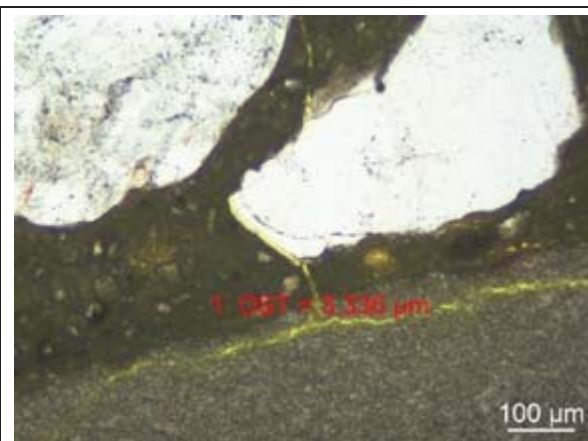


Abb. C- 120: K5-III-3_Bild 6



Abb. C- 121: K5-III-4_Bild 1

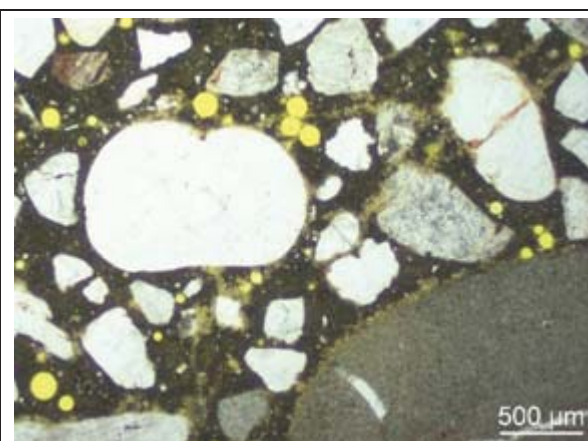


Abb. C- 122: K5-III-4_Bild 2

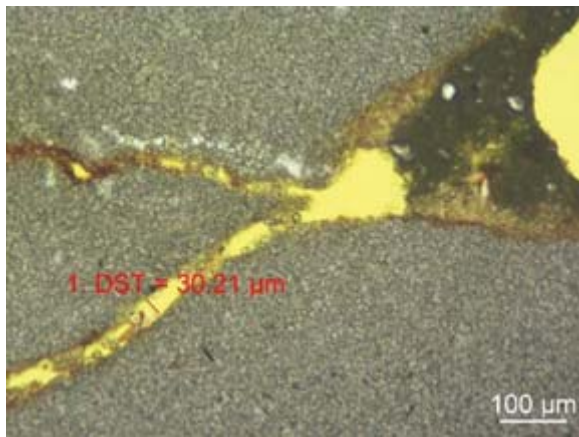


Abb. C- 123: K5-III-4_Bild 3

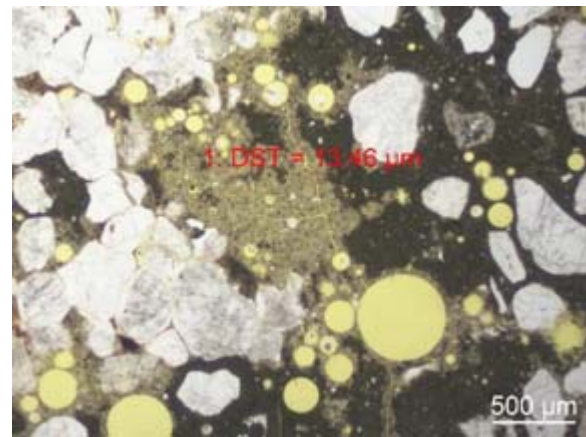


Abb. C- 124: K5-III-4_Bild 4

K9

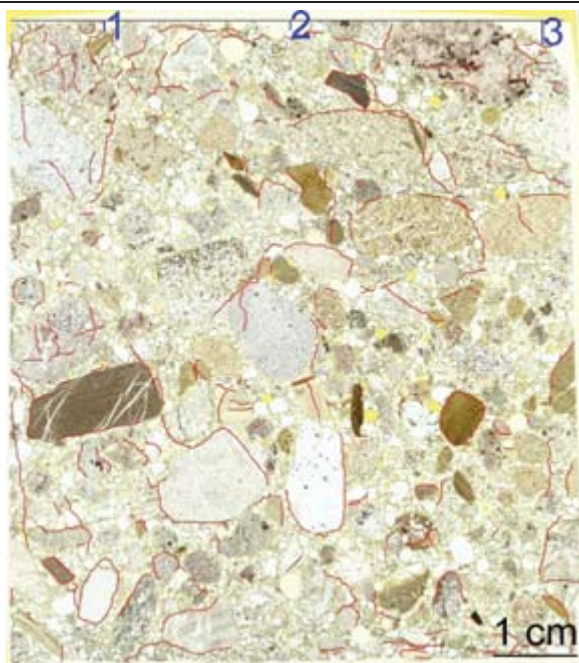


Abb. C- 125: K9-I-3



Abb. C- 126: K9-I-4

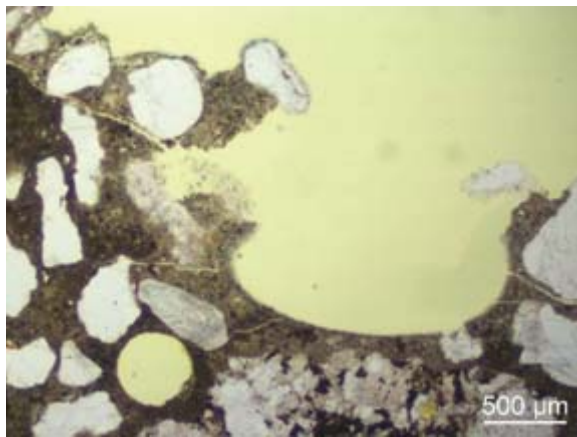


Abb. C- 127: K9-I-3_Bild 1

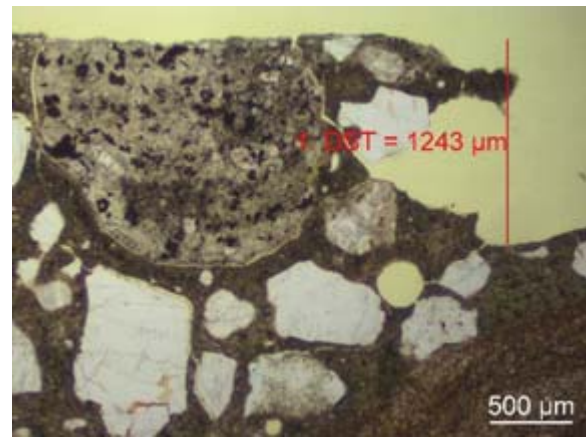


Abb. C- 128: K9-I-3_Bild 2

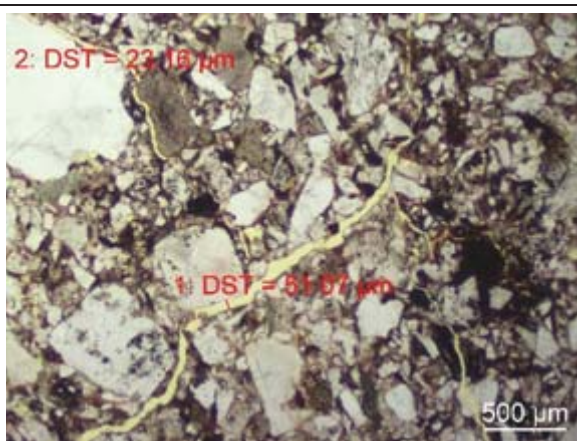


Abb. C- 129: K9-I-3_Bild 3

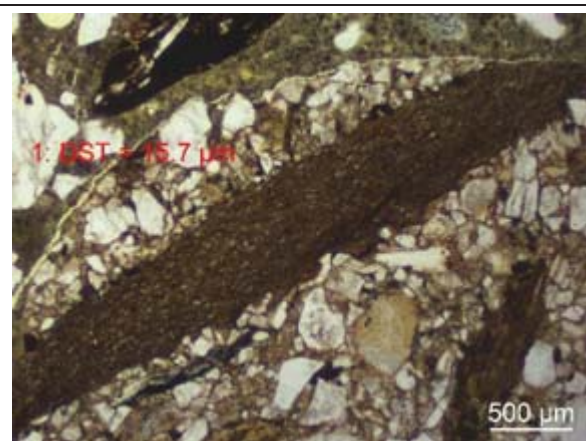


Abb. C- 130: K9-I-3_Bild 4

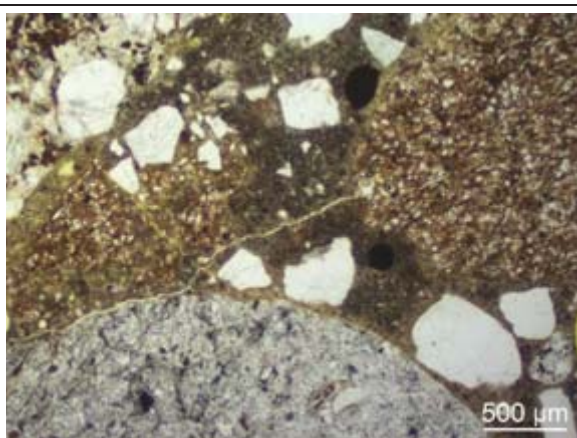


Abb. C- 131: K9-I-3_Bild 5

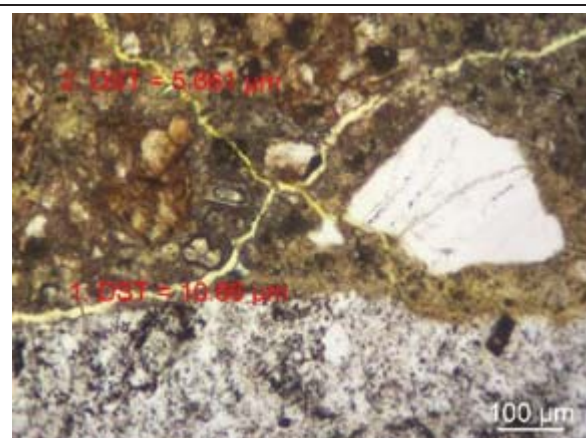


Abb. C- 132: K9-I-3_Bild 6

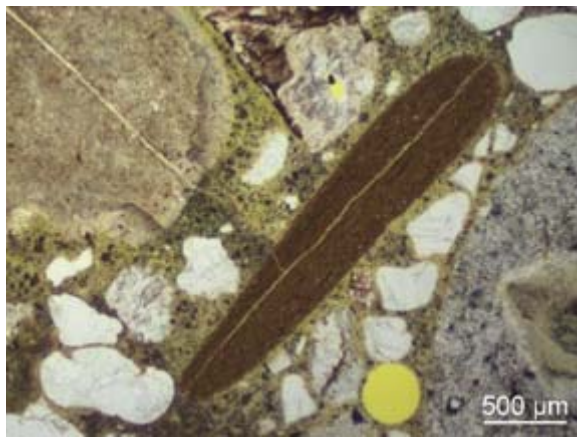


Abb. C- 133: K9-I-3_Bild 7

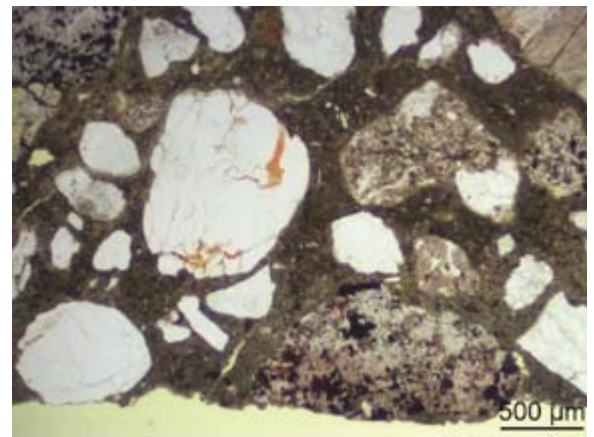


Abb. C- 134: K9-I-3_Bild 8

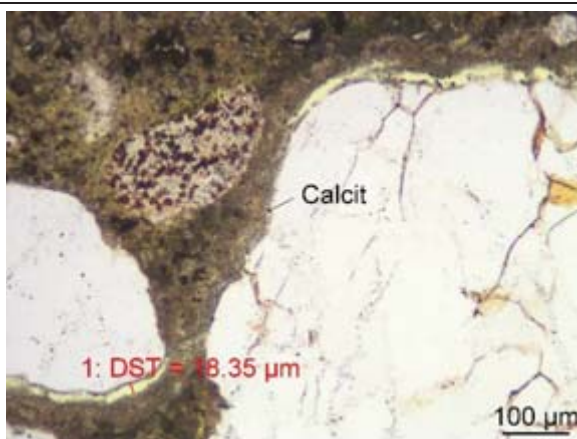


Abb. C- 135: K9-I-3_Bild 9

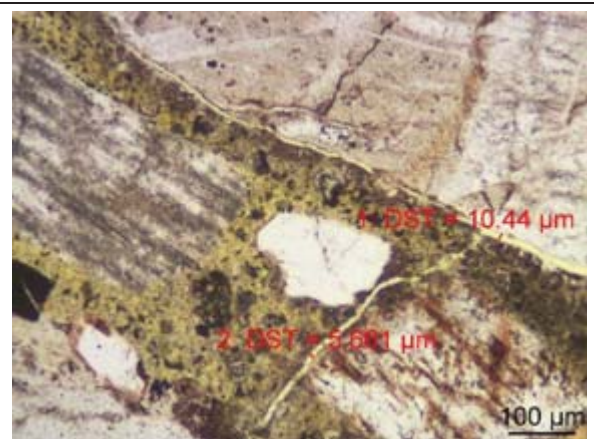


Abb. C- 136: K9-I-3_Bild 10

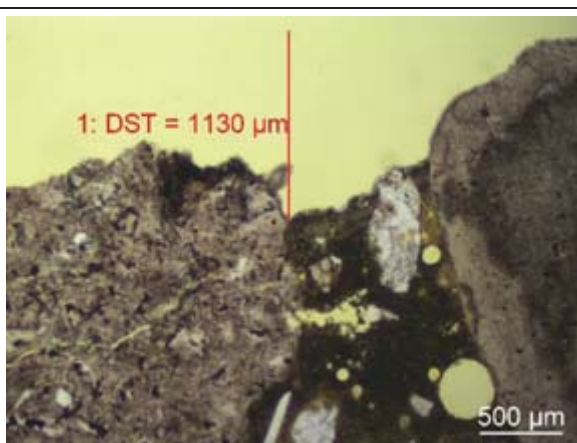


Abb. C- 137: K9-I-4_Bild 1

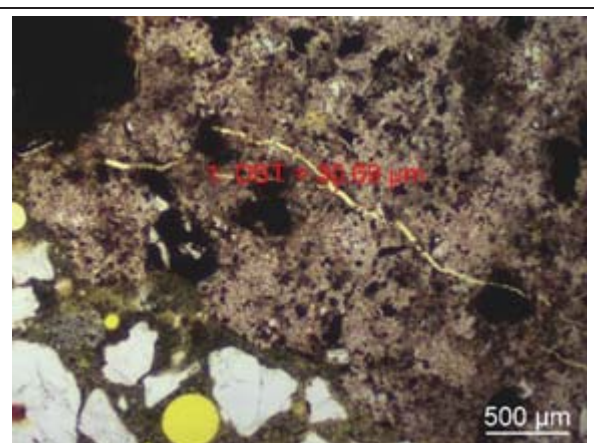


Abb. C- 138: K9-I-4_Bild 2

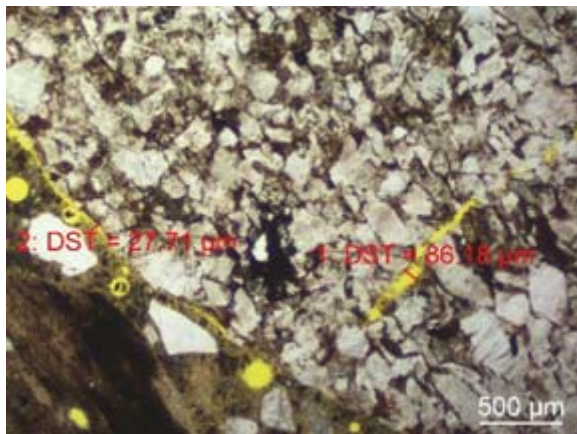


Abb. C- 139: K9-I-4_Bild 3

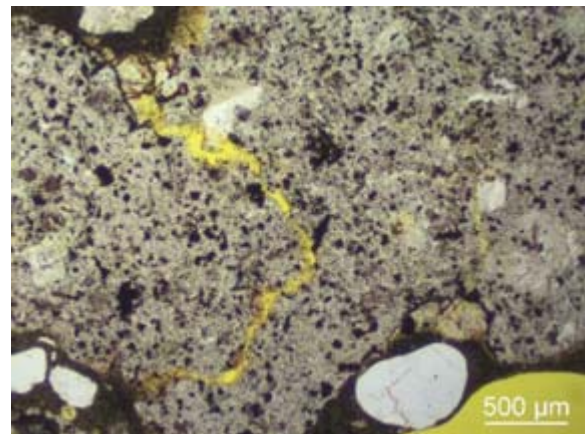


Abb. C- 140: K9-I-4_Bild 4

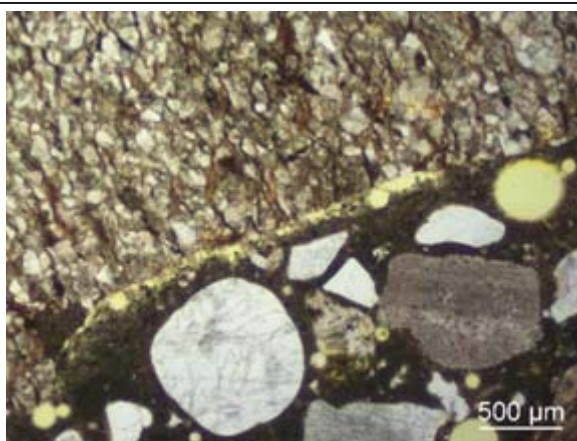


Abb. C- 141: K9-I-4_Bild 5

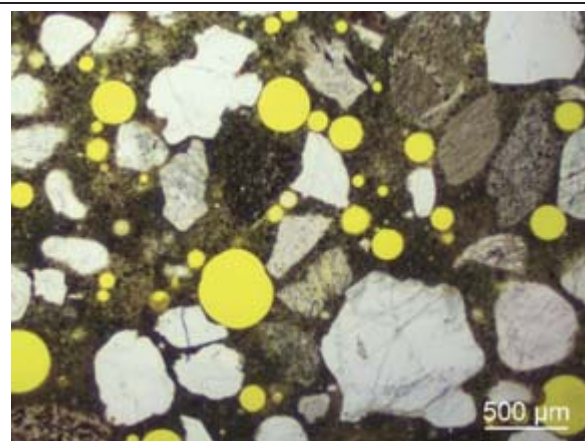


Abb. C- 142: K9-I-4_Bild 6

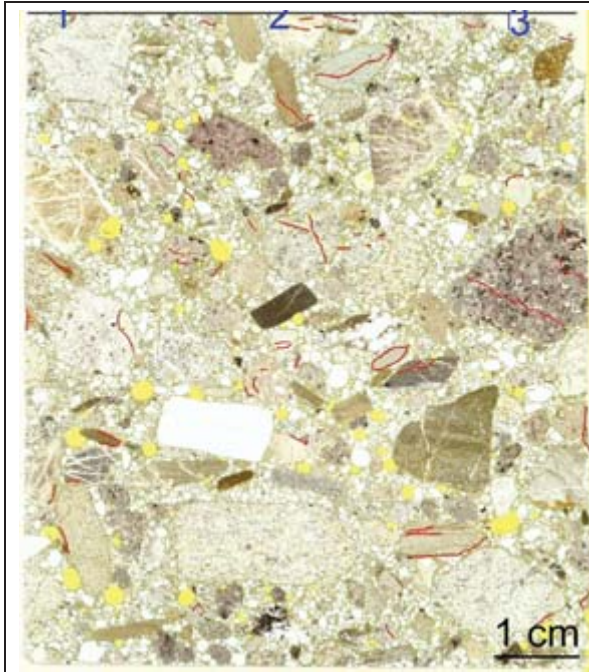


Abb. C- 143: K9-III-3

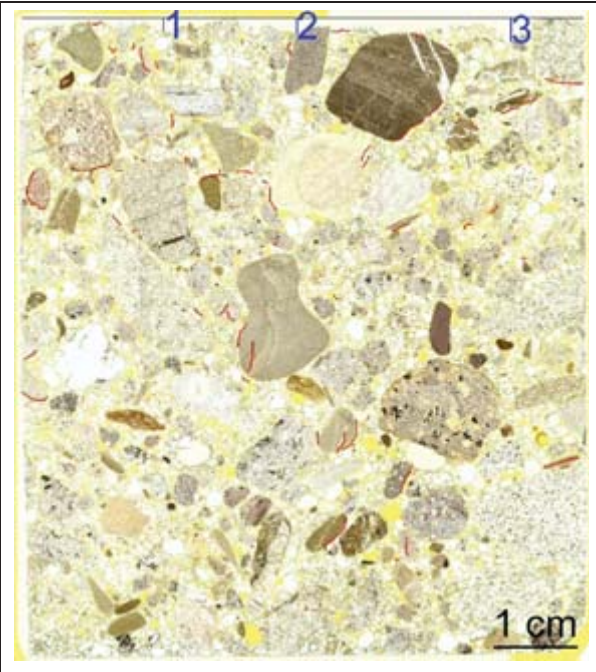


Abb. C- 144: K9-III-4

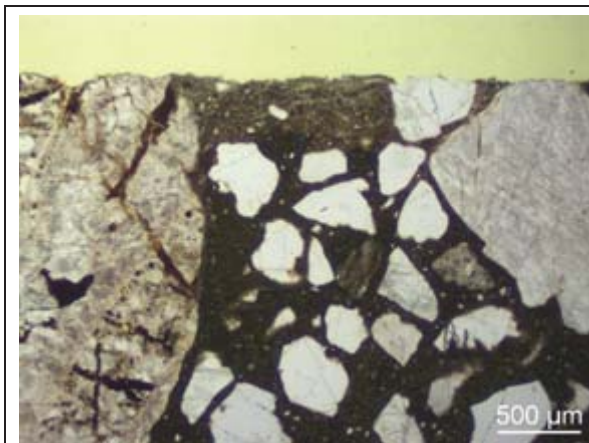


Abb. C- 145: K9-III-3_Bild 1

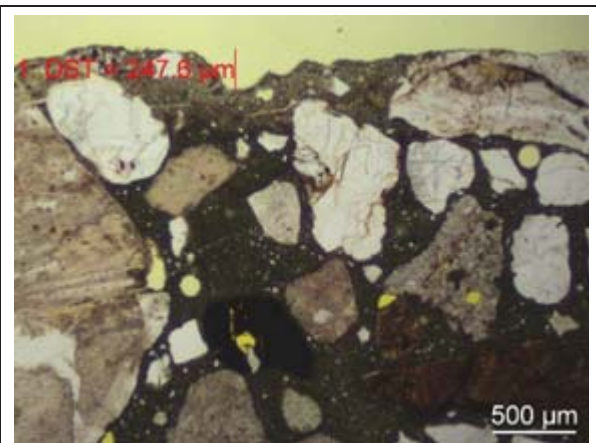


Abb. C- 146: K9-III-3_Bild 2

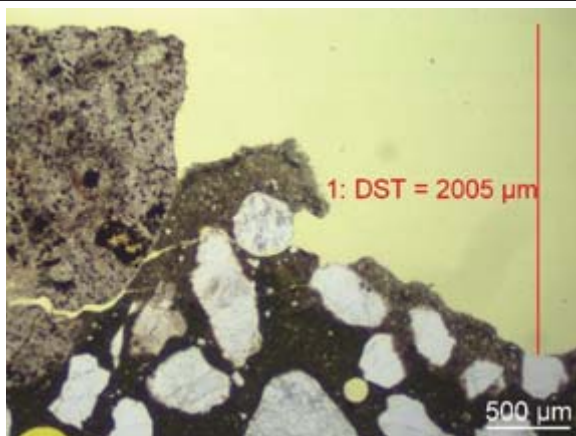


Abb. C- 147: K9-III-3_Bild 3

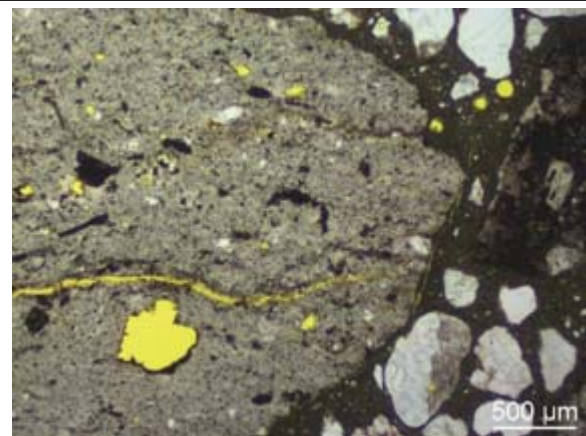


Abb. C- 148: K9-III-3_Bild 4

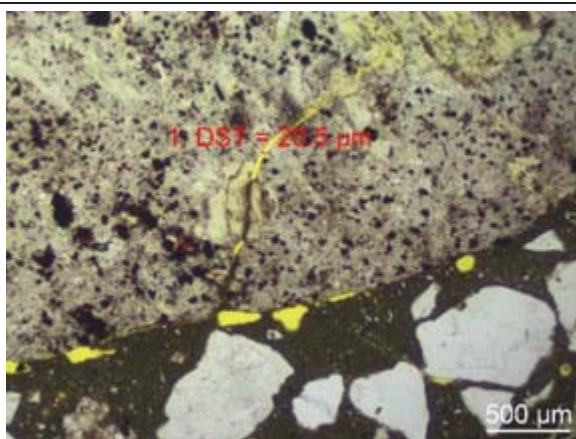


Abb. C- 149: K9-III-3_Bild 5

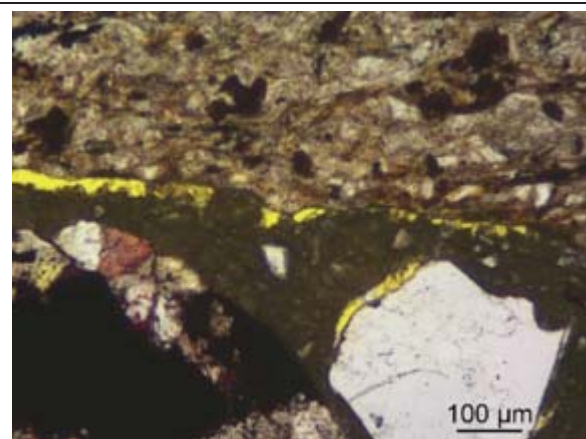


Abb. C- 150: K9-III-3_Bild 6

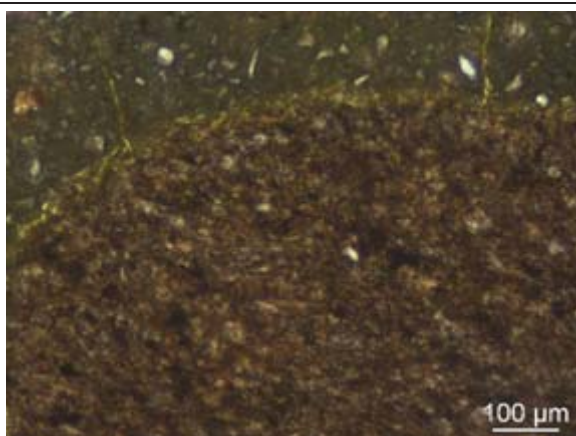


Abb. C- 151: K9-III-3_Bild 7

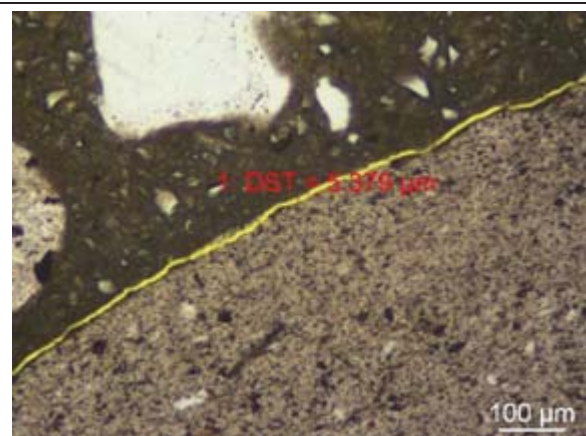


Abb. C- 152: K9-III-3_Bild 8

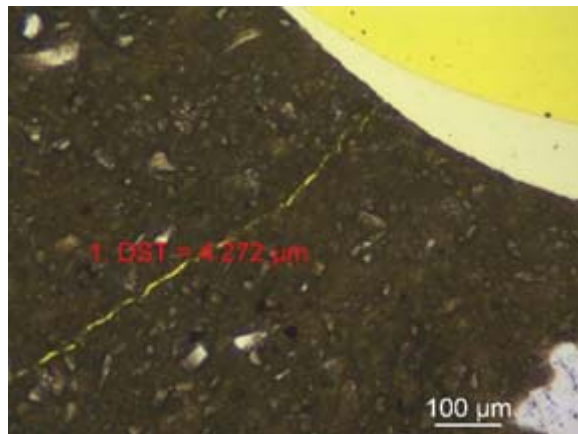


Abb. C- 153: K9-III-3_Bild 9

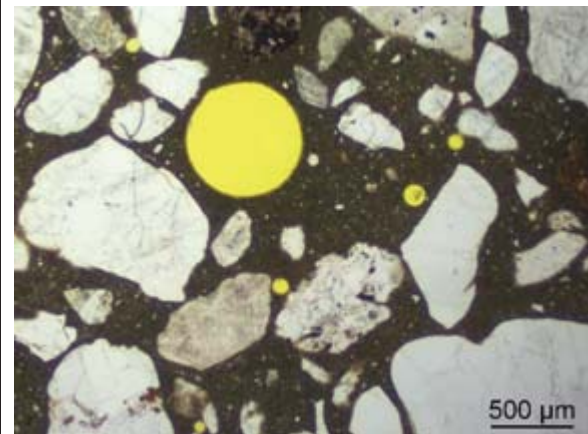


Abb. C- 154: K9-III-3_Bild 10

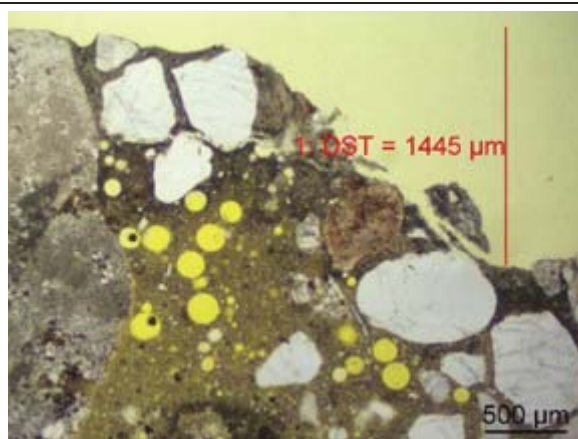


Abb. C- 155: K9-III-4_Bild 1

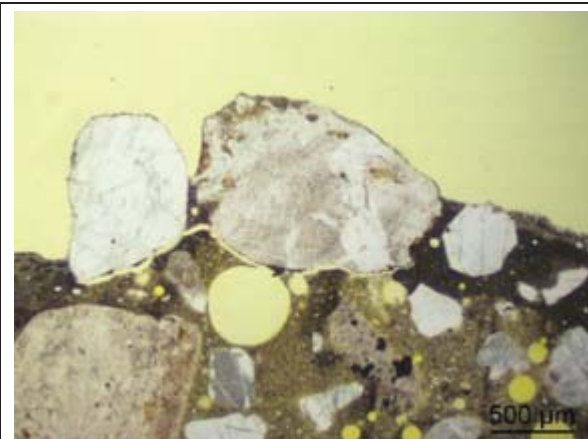


Abb. C- 156: K9-III-4_Bild 2

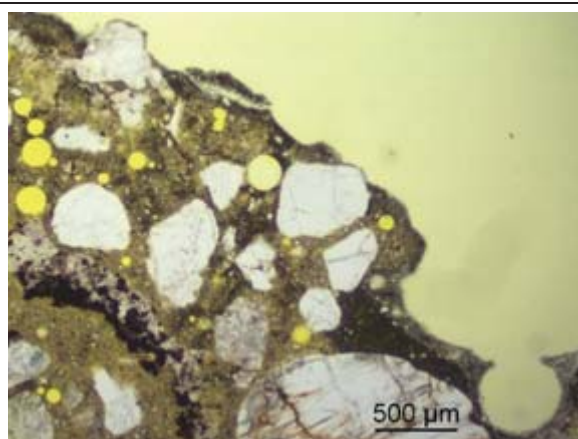


Abb. C- 157: K9-III-4_Bild 3

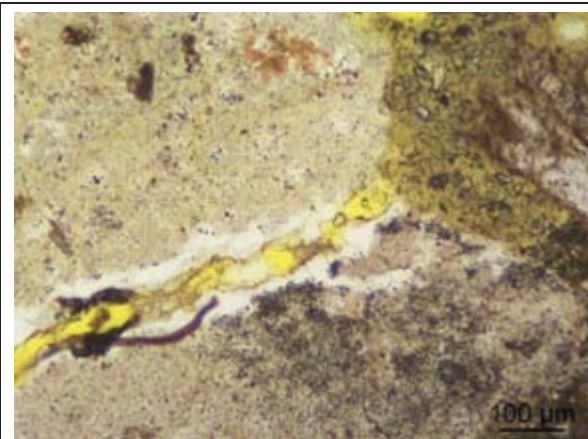


Abb. C- 158: K9-III-4_Bild 4

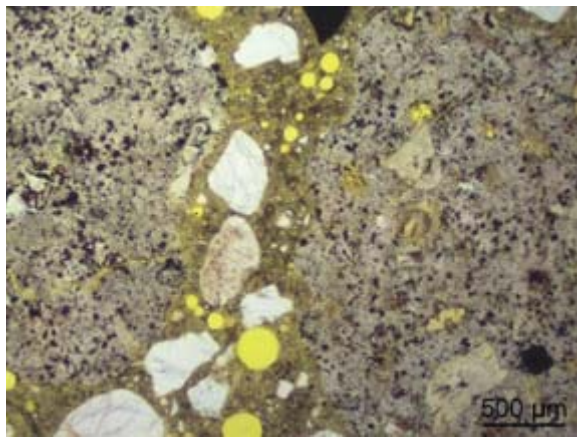


Abb. C- 159: K9-III-4_Bild 5

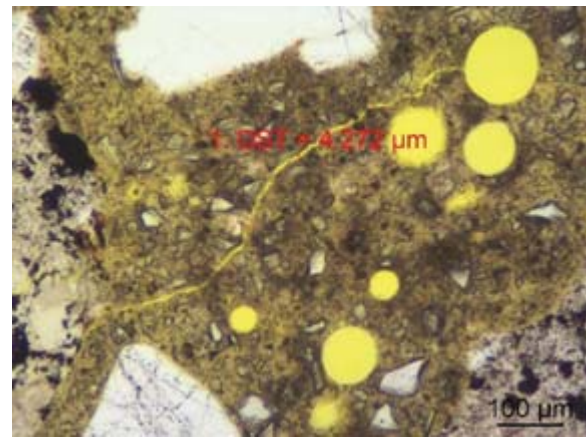


Abb. C- 160: K9-III-4_Bild 6

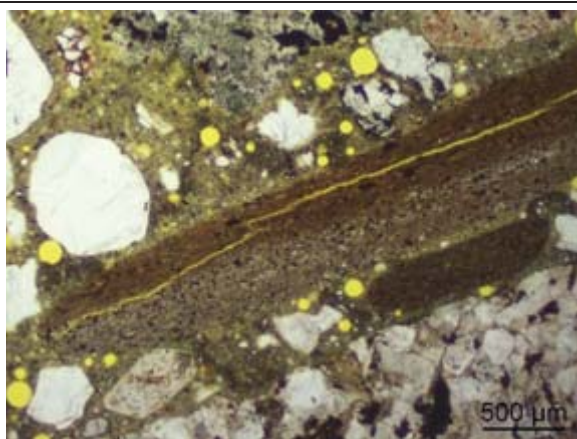


Abb. C- 161: K9-III-4_Bild 7

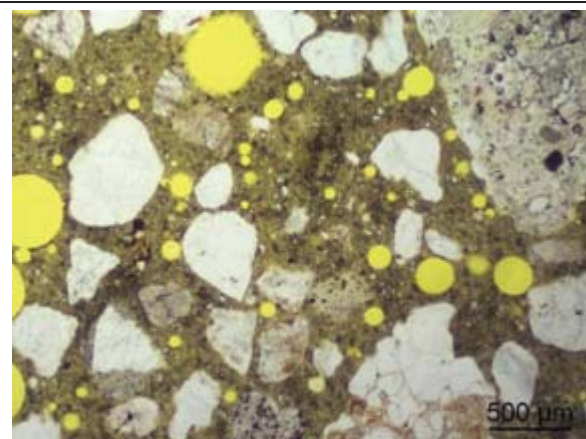
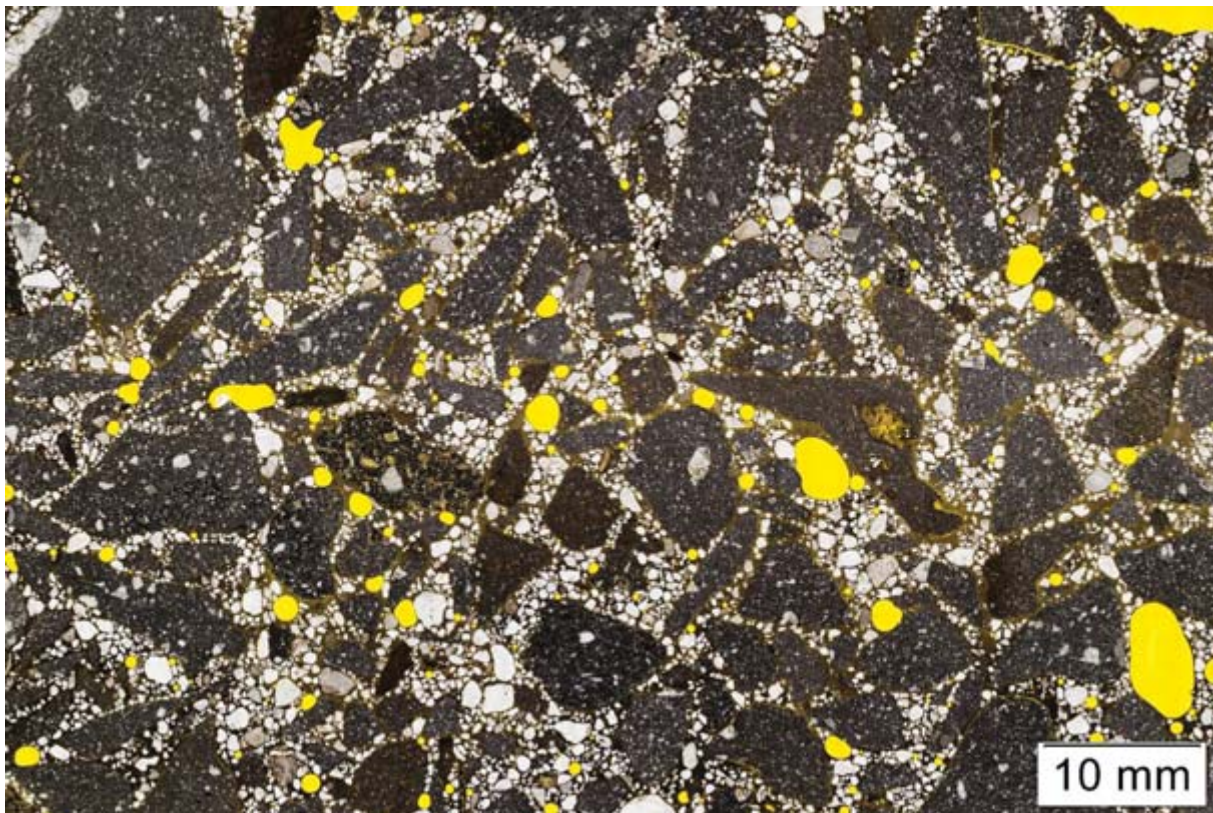


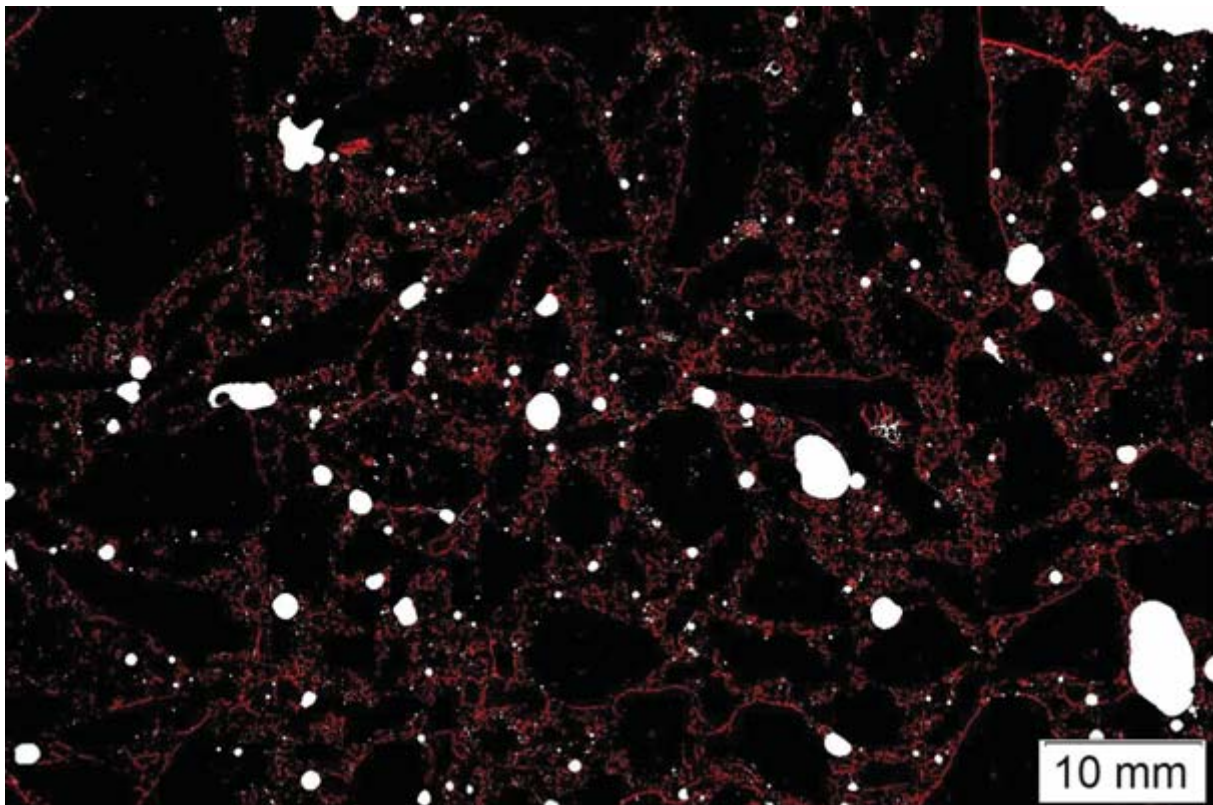
Abb. C- 162: K9-III-4_Bild 8

Computergestützte Bildanalyse der Dünnschliffe – Ansichten

Beton – B0-N11-I-0-XF3

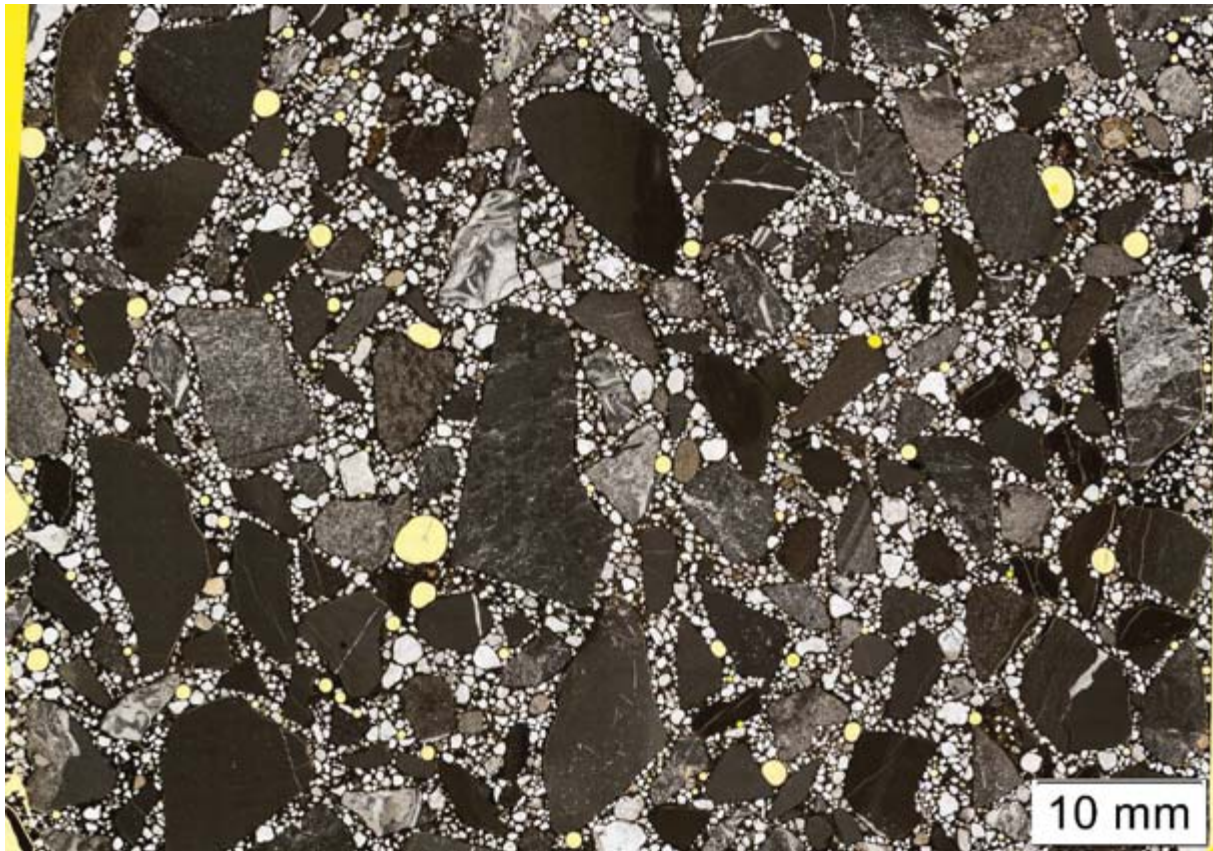


Ansicht der Aufnahme

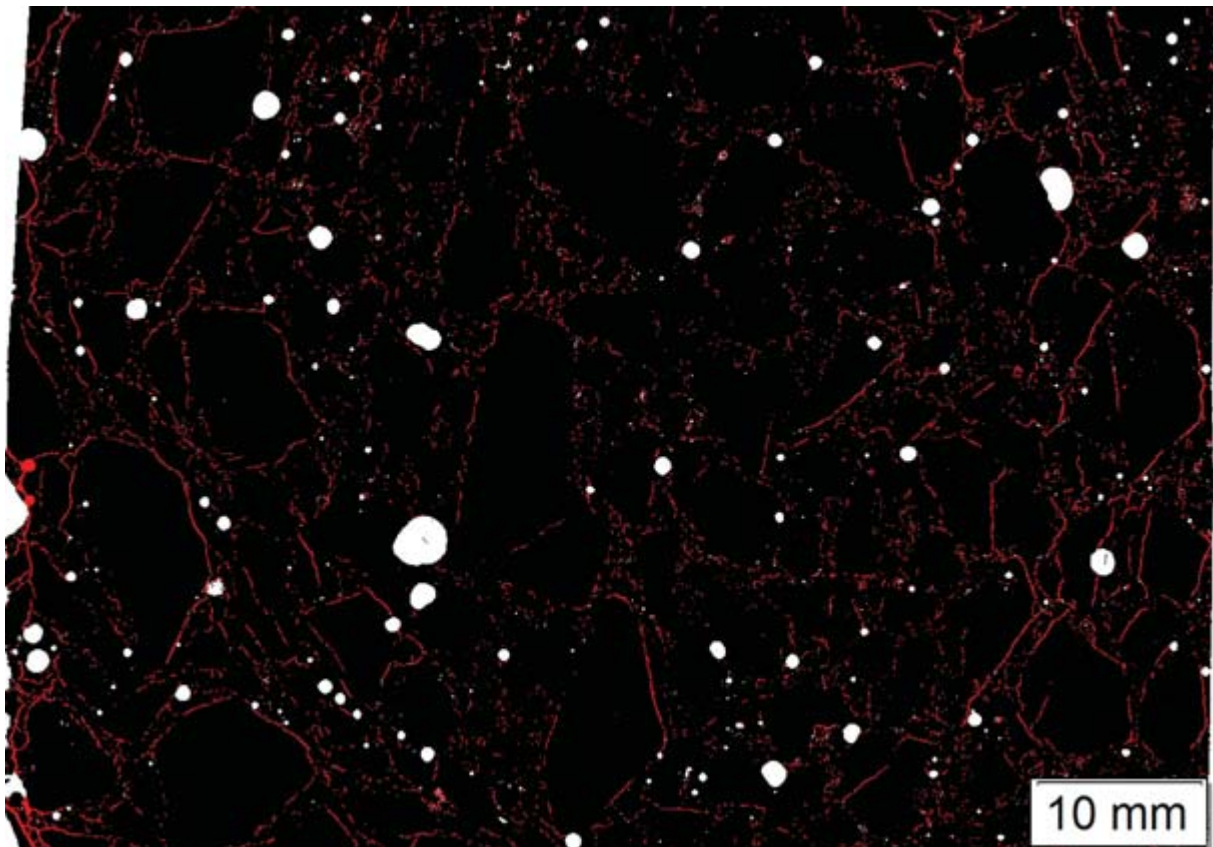


Resultat der Analyse

Beton – B0-N19-I-0-XF3

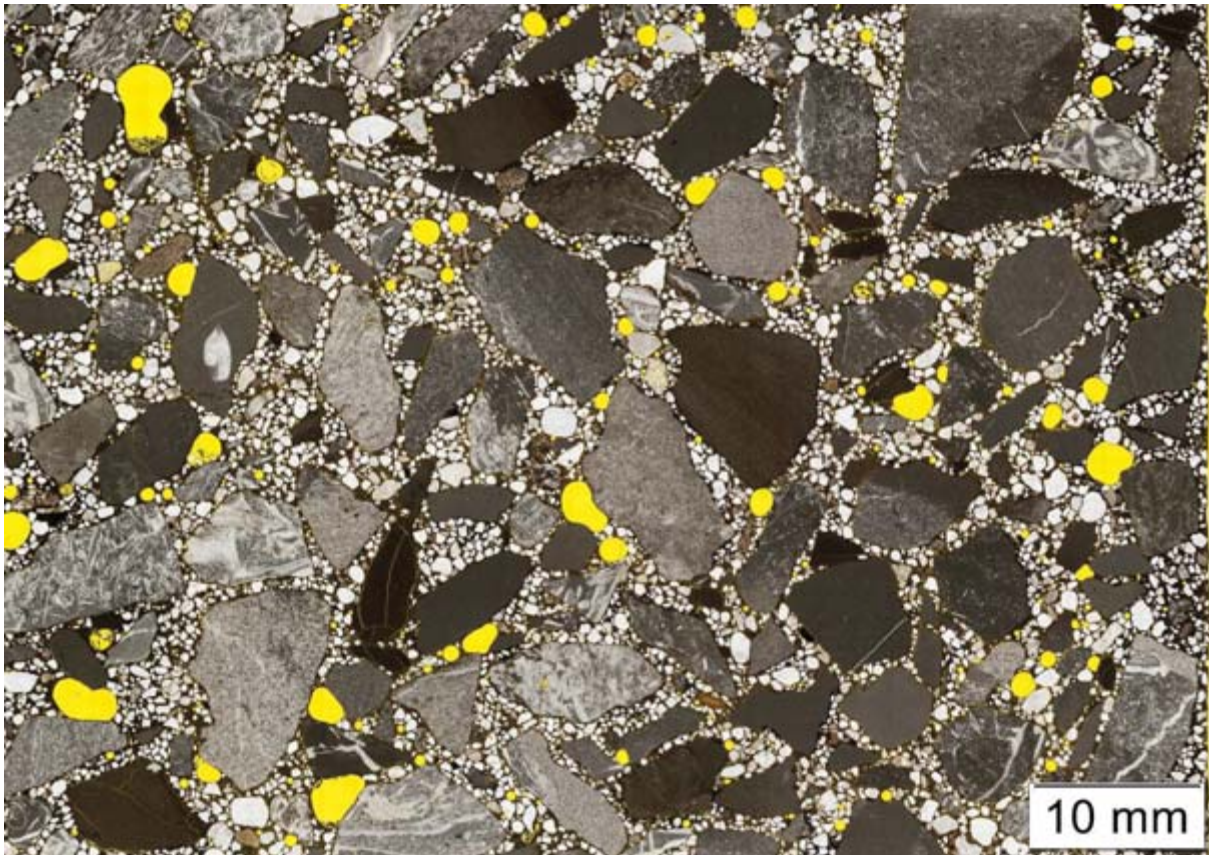


Ansicht der Aufnahme

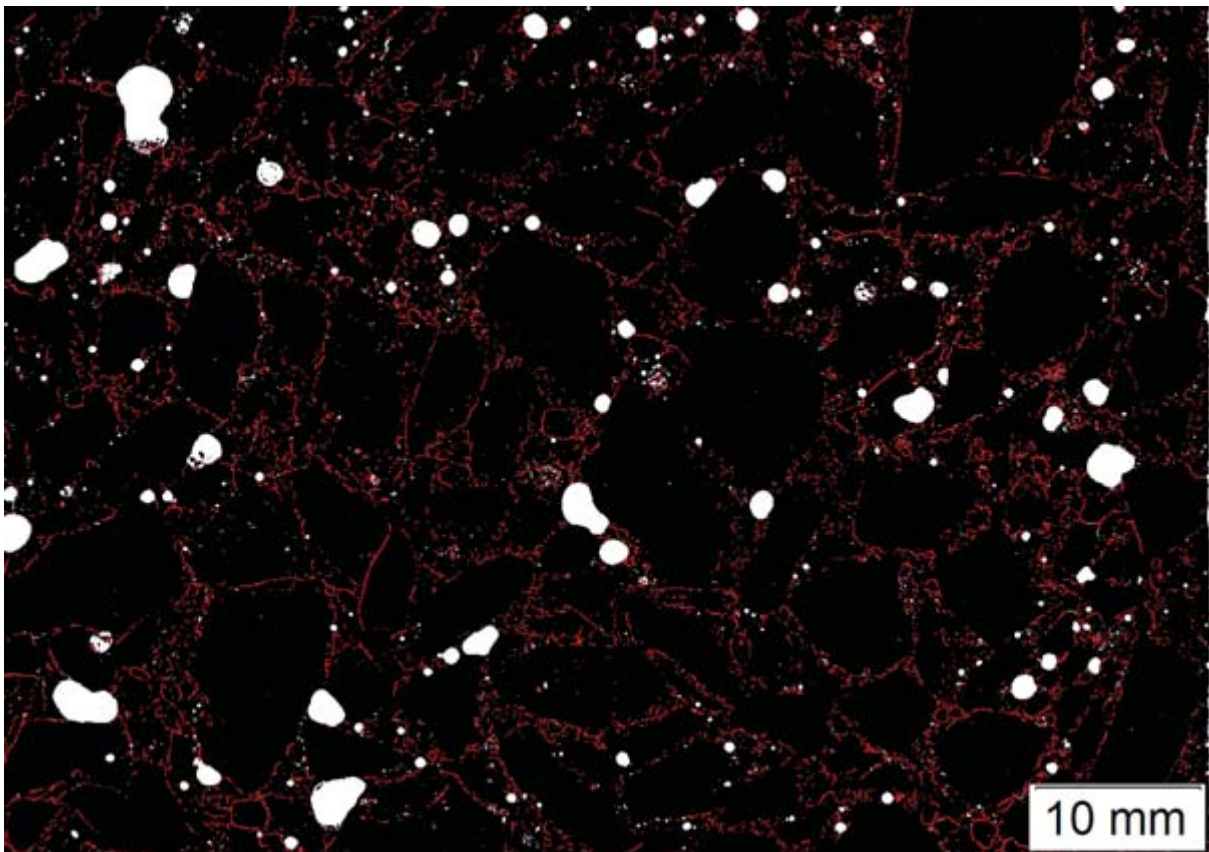


Resultat der Analyse

Beton – B1-N19-I-0-XF3

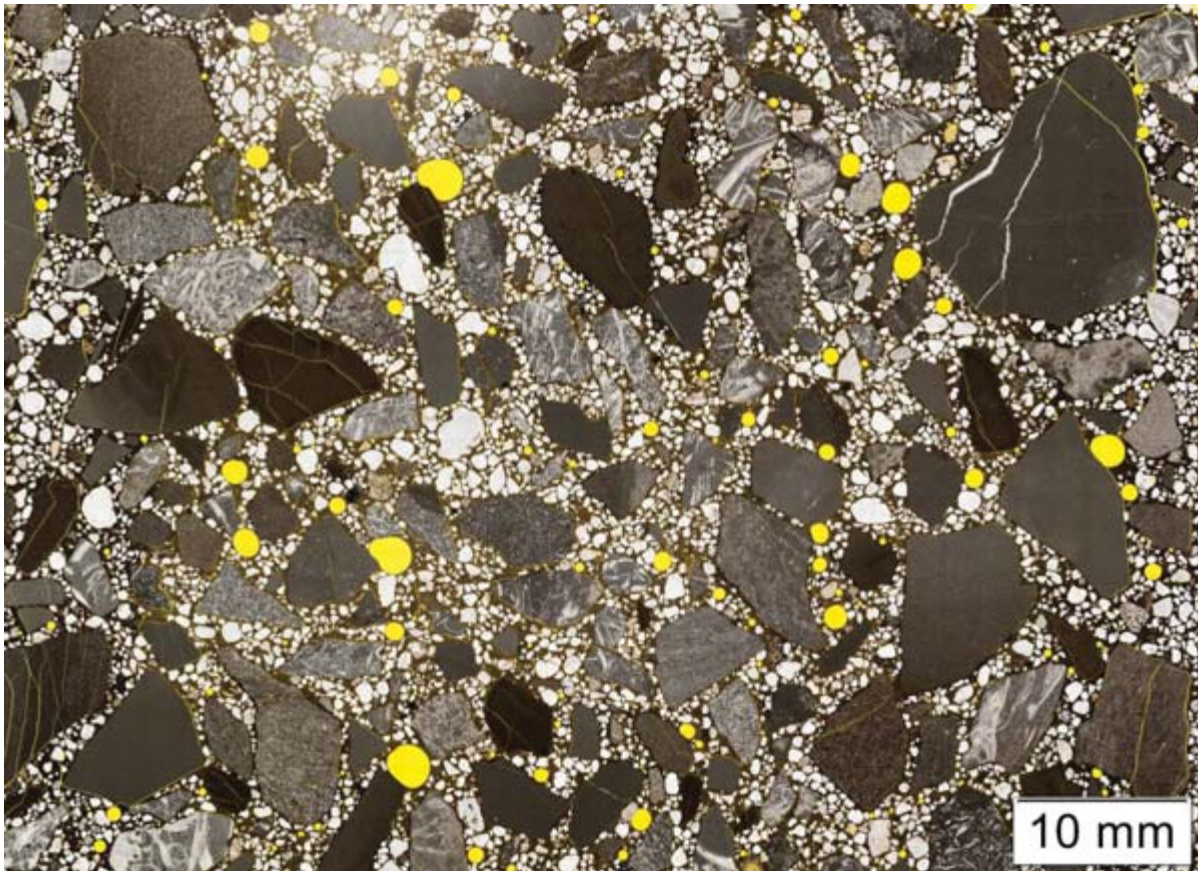


Ansicht der Aufnahme

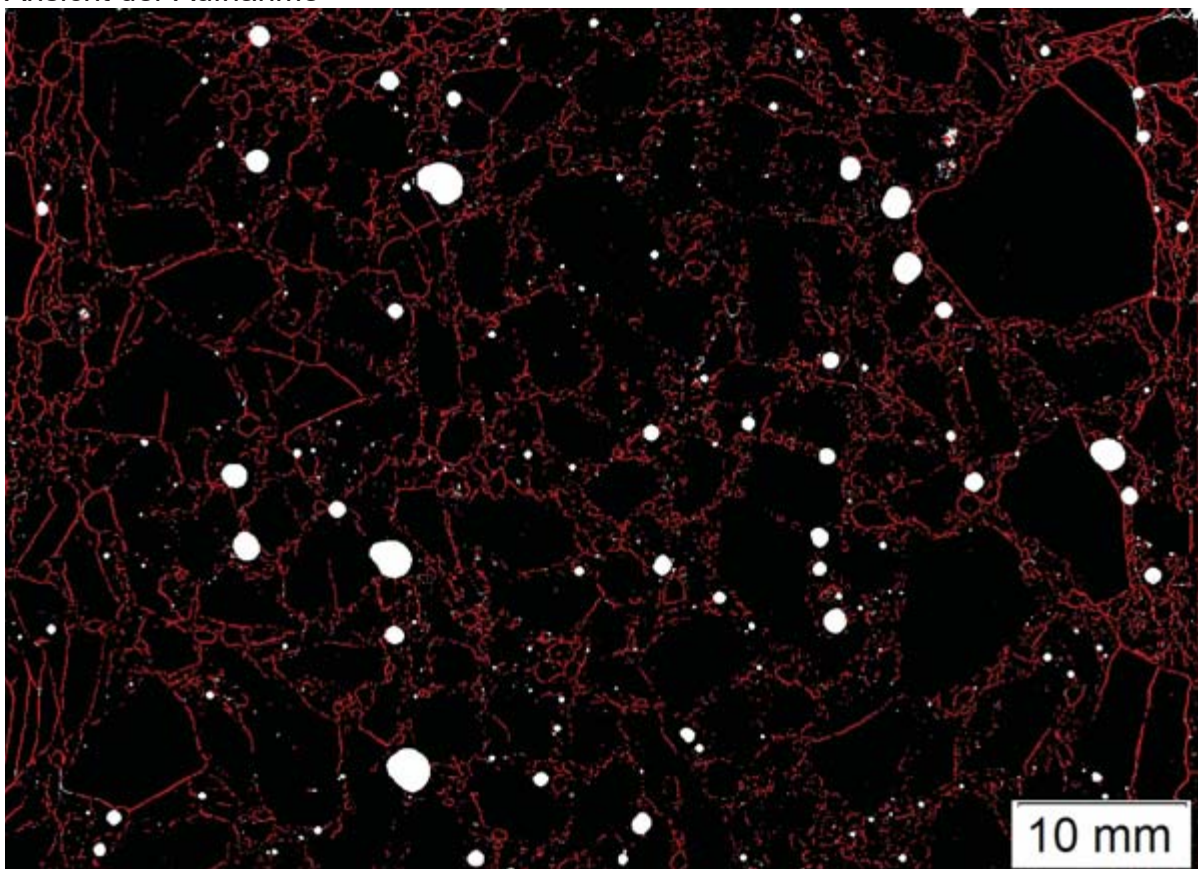


Resultat der Analyse

Beton – B3-N19-I-0-XF3



Ansicht der Aufnahme

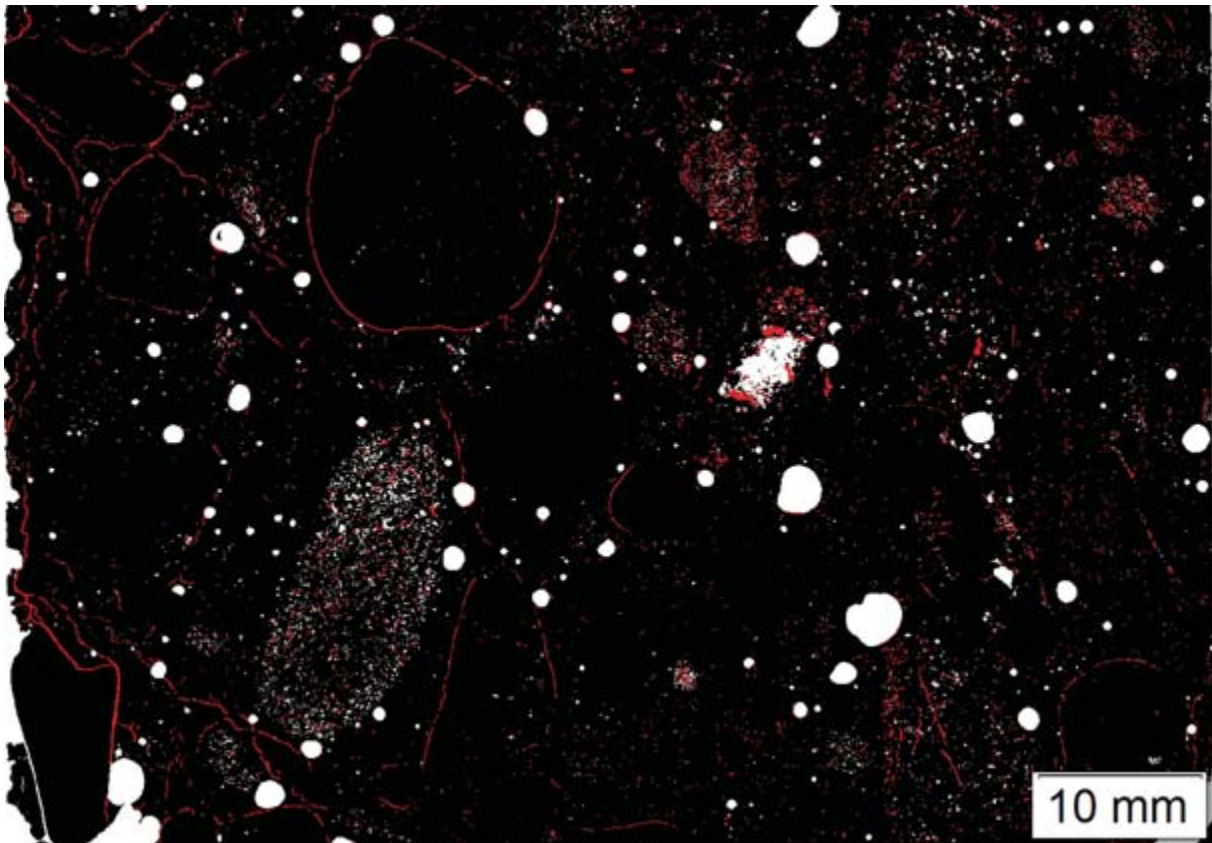


Resultat der Analyse

Beton – B0-K3-I-0-XF3

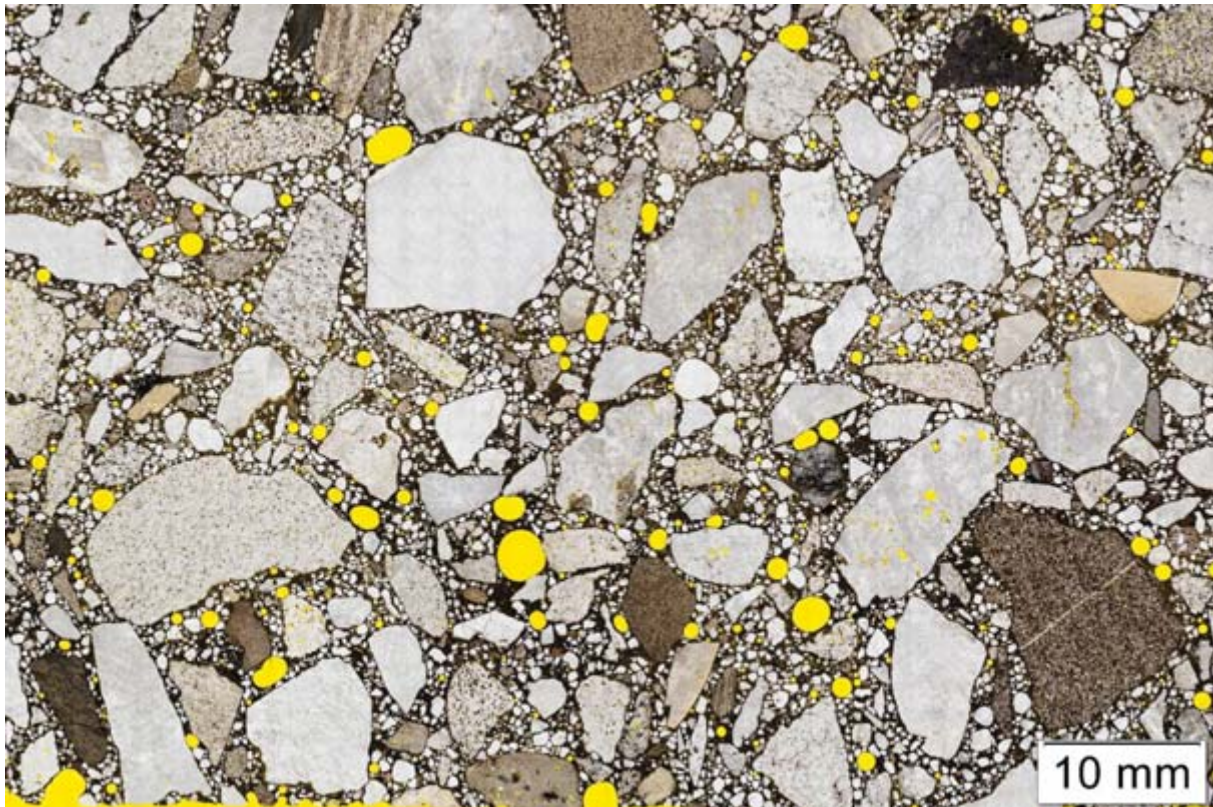


Ansicht der Aufnahme

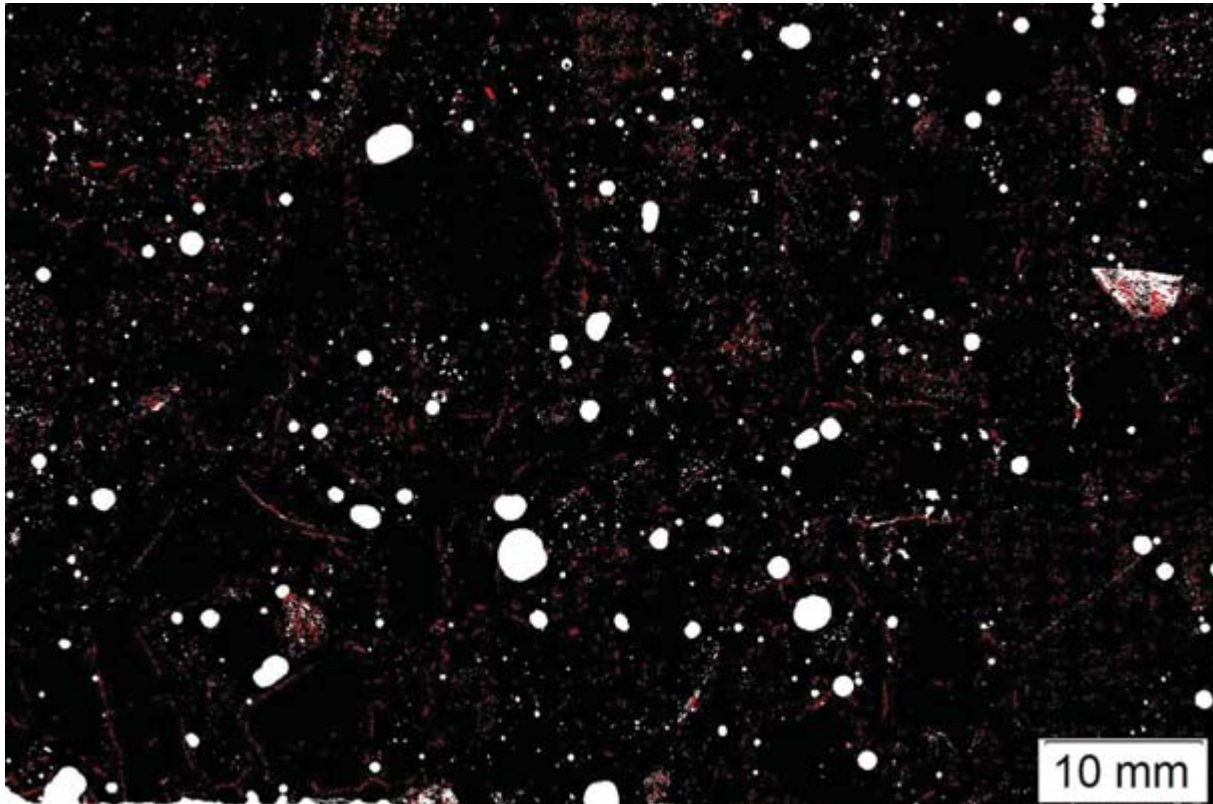


Resultat der Analyse

Beton – B0-K4-I-0-XF3

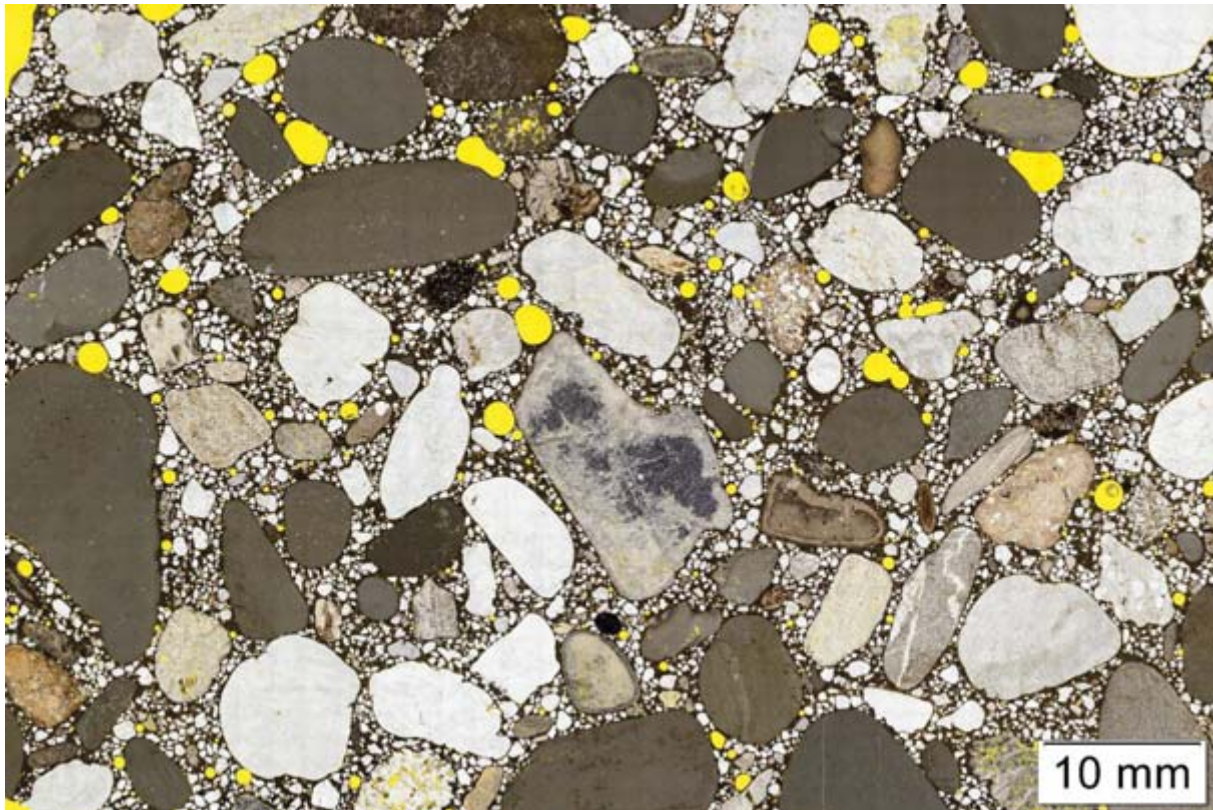


Ansicht der Aufnahme

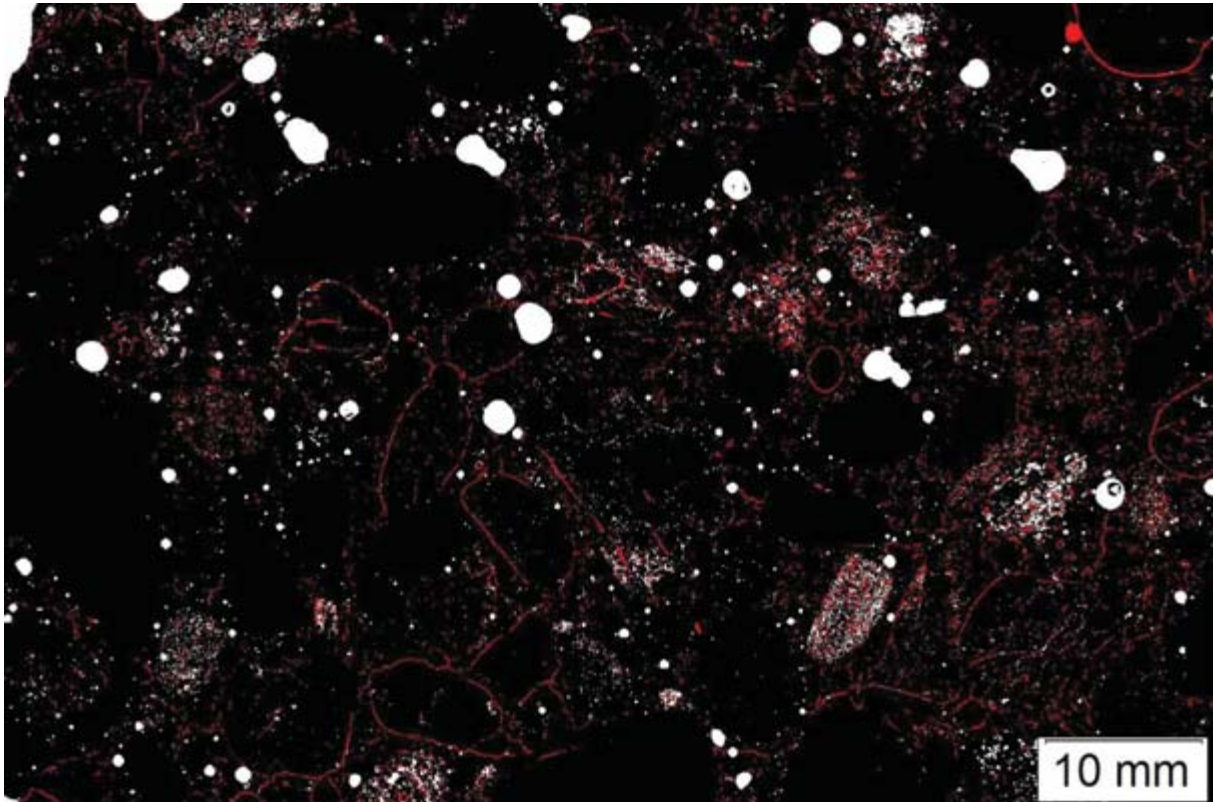


Resultat der Analyse

Beton – B0-K5-I-0-XF3



Ansicht der Aufnahme

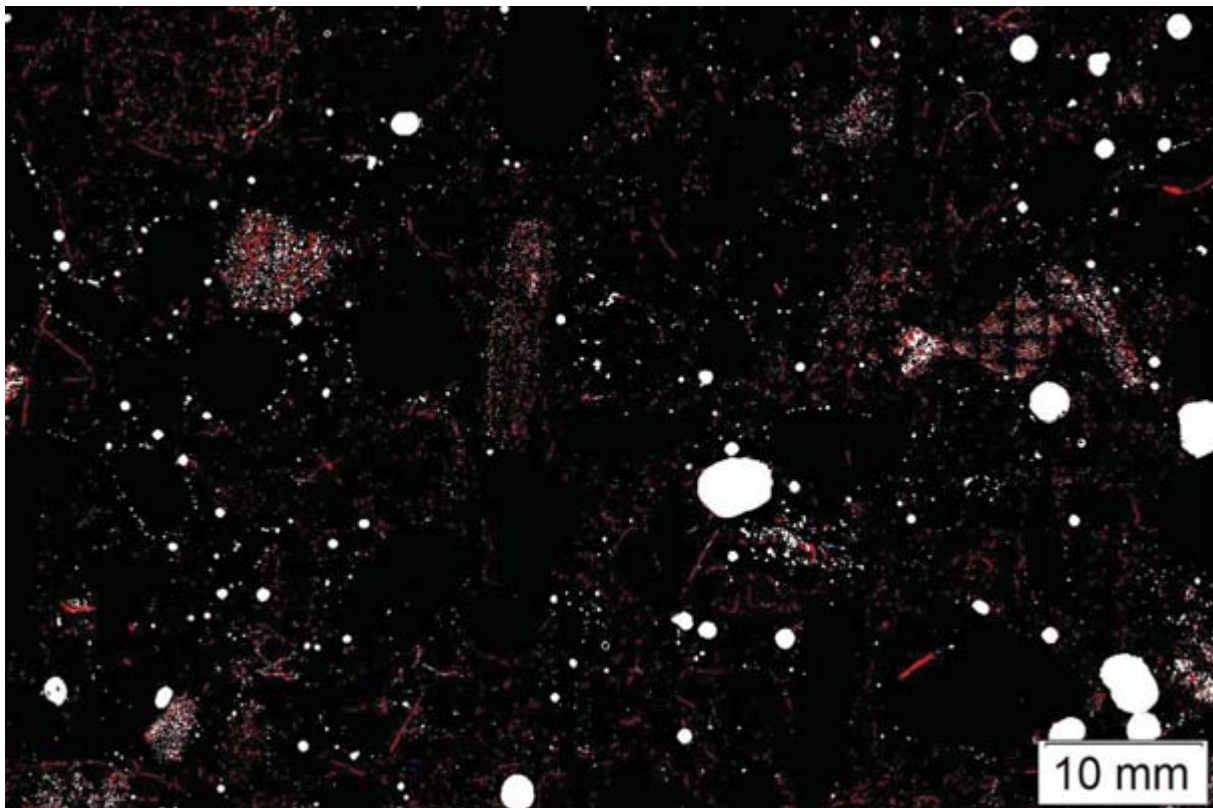


Resultat der Analyse

Beton – B0-K5-III-0-XF3

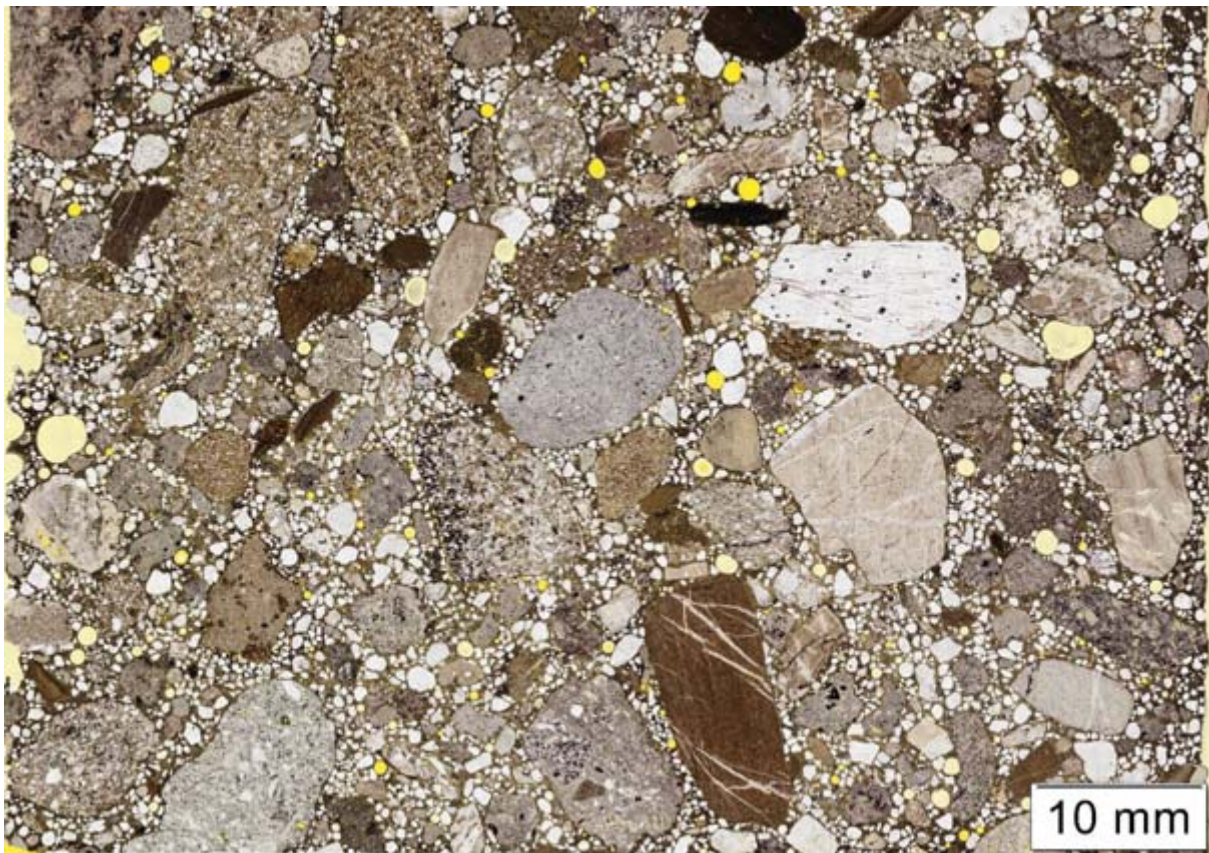


Ansicht der Aufnahme

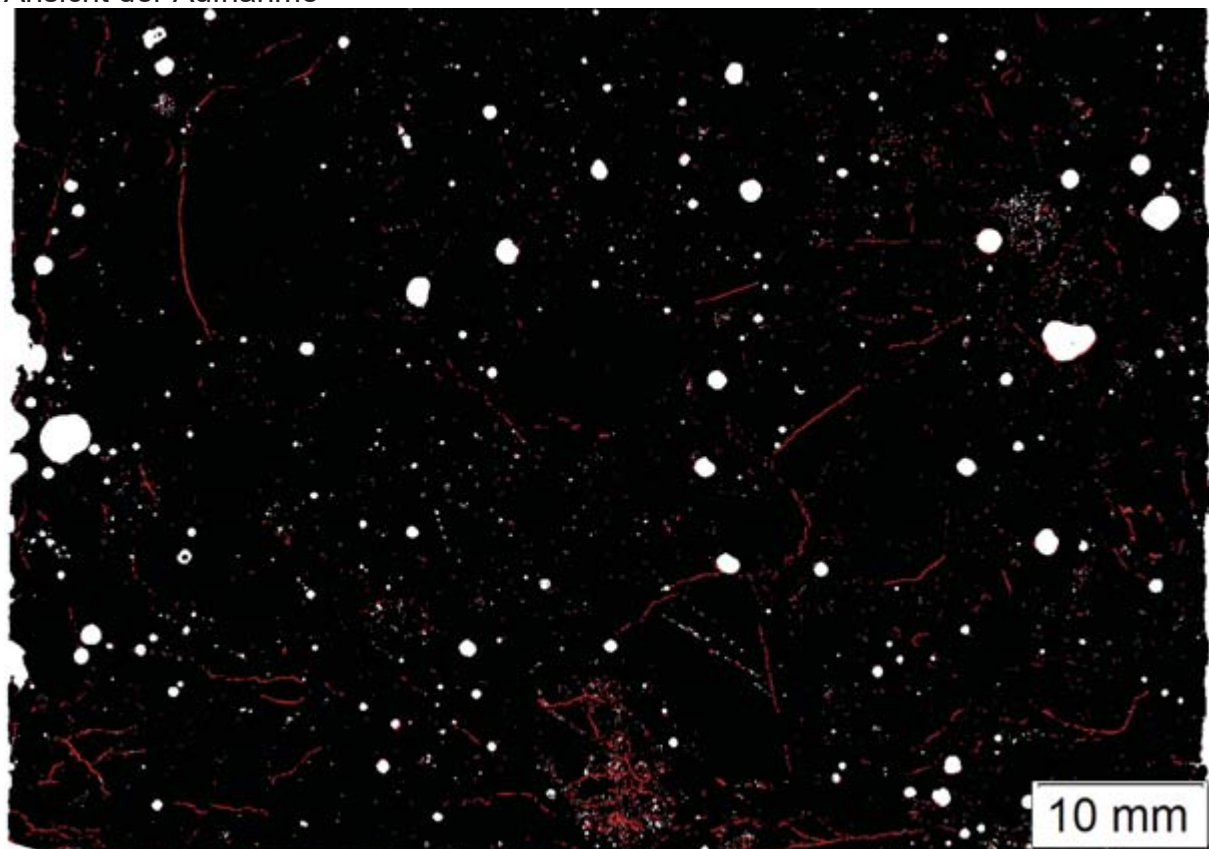


Resultat der Analyse

Beton – B0-K9-I-0-XF3



Ansicht der Aufnahme



Resultat der Analyse

AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

Teil II

Arbeitspaket 6: Auslagerung

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Technische Universität München
Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Gehlen

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG / 2

Thema: Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“
AP 6: Auslagerungsersuche zu Frost- bzw. Frost-Tausalzwiderstand der Gesteinskörnung im Beton

Auftraggeber: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)
Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Projektleitung: Dr.-Ing. T. Kränkel

Sachbearbeiterin: Dipl.-Ing. C. Thiel

München, 23.04.2019
Ort, Datum

Dr.-Ing. T. Kränkel
Name und Unterschrift des Projektleiters

TU München, cbm**15214 BG/2**

Namen der Forschungsstellen

IGF-Vorhaben-Nr.

01.06.2007 – 31.12.2018

Bewilligungszeitraum

Abschlussbericht

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

1 Forschungsthema

Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement – Petrographie – Auslagerung“

(Kurztitel: „Verbundforschung Frost: Projektmanagement – Petrographie – Auslagerung“)

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Dieses Forschungsvorhaben ist Teil des Verbundforschungsprojekts „Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen“, an dem fünf Forschungsstellen in Deutschland beteiligt sind. Die Gesamtproblematik und die von den jeweiligen Forschungsstellen zu bearbeitenden Aufgaben können dem Leitplan der Verbundforschung entnommen werden. Dieses Forschungsvorhaben entspricht Arbeitspaket 6 im Clusterantrag 3, in welchem die Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Praxisbedingungen durch Auslagerungsversuche untersucht wird. Dieses Arbeitspaket wird gemeinsam vom Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Gehlen, dem Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen und der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) unter der Leitung von Dr.-Ing. F. Weise bearbeitet. Dieser Bericht befasst sich mit der Auslagerung von Betonprobekörpern in der Expositionsklasse XF4.

3 Forschungsziel, Lösungsweg und Ergebnisse

3.1 Forschungsziel

Das übergeordnete Ziel der Verbundforschung ist, eine Systematik zur Klassifizierung von Gesteinskörnungen im Hinblick auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen abzuleiten. Dabei spielt insbesondere die Anbindung der Laborprüfungen an die Verhältnisse unter praxisnahen Bedingungen im Bauwerk eine bedeutende Rolle. Ziel dieses Teilprojekts war es daher, die Ergebnisse der Laborprüfungen durch Auslagerungsversuche unter praxisnahen Bedingungen zu validieren. Hierbei wurden die Betone für die Auslagerungen im Bereich XF3 und XF4 zentral am cbm der TU München hergestellt. Weiterhin wurde durch das cbm der TU München die Auslagerung im Bereich XF4 organisiert.

3.2 Lösungsweg

3.2.1 Allgemeines

Das übergeordnete Ziel soll mit Auslagerungsversuchen unterschiedlicher Betone in den Expositionsklassen XF3 und XF4 erreicht werden. Hierzu wurden für jede Expositionsklasse sieben Betone mit fünf verschiedenartigen Gesteinskörnungen ausgelagert. Die Auslagerung erfolgte im November 2008. Im Berichtszeitraum wurden die ausgelagerten Proben von der Forschungsstelle 3 (BAM) vor der Auslagerung als auch nach verschiedenen Winterperioden mittels Fotografie, Photogrammetrie und Ultraschallverfahren untersucht. Für diese Untersuchungen der Proben in der Expositionsklasse XF4 wurden die Auslagerungsproben an das cbm der TU München transportiert und dort von der Forschungsstelle 3 abgeholt. Die Koordination des Probentransports sowie der Transport selbst wurde vom cbm der TU München durchgeführt. Auch folgte die Messung der Temperatur in einem Auslagerungsprobekörper tiefengestaffelt über den gesamten Berichtszeitraum. Die Proben in der Expositionsklasse XF3 wurden vom ibac der RWTH Aachen in der Schleuse Hilpoldstein ausgelagert und vom ibac betreut.

3.2.2 Übersicht der hergestellten Betone

Eine Übersicht der hergestellten Betone ist in Tabelle 1 dargestellt. Einzelheiten zu den Gesteinskörnungen können dem Abschlussbericht des AP 3: Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand der Gesteinskörnungen (GK) des Forschungsvorhabens entnommen werden. Die gelieferten Gesteinskörnungen wurden nach ihrem Eintreffen am cbm getrocknet, gesiebt und die Dichte bestimmt. Nach einigen Tastmischungen zur Einstellung der Konsistenz und des LP-Gehaltes wurden gemäß den Absprachen der Betreuungssitzungen von August bis September 2008 Betone hergestellt. Alle Mischungen besaßen den gleichen Zementgehalt von 320 kg/m^3 und wurden mit einer Sieblinie A/B 16 hergestellt. Für alle Mischungen wurde derselbe Sand verwendet. Hierbei handelte es sich um Rheinsand, der aus dem gleichen Werk wie die Gesteinskörnung K3 stammt. Die Frischbetontemperatur lag bei allen Betonen zwischen 19 und 22° C .

Tabelle 1: Übersicht der hergestellten Betone (XF3 und XF4)

Zement	w/z	Kürzel Gestein	Bezeichnung	Gesteinsgruppe nach TL-Gestein-StB	Ergebnisse des FTS-Versuchs	Ergebnisse des MS-Versuchs
1	2	3	4	5	6	7
CEM I	0,45 + 0,50	N 19	Muschelkalk 2	Kalkstein, Dolomitstein	nicht erreicht (29,1)	erreicht (9,7)
CEM I	0,50	N 22	Muschelkalk 4n	Kalkstein, Dolomitstein	nicht erreicht (18,1)	erreicht (11,5)
CEM I	0,50	K 3	Rheinkies	Kies rund	erreicht (4,1)	erreicht (3,2)
CEM I + III	0,50	K 5	Saalekies	Kies rund	nicht erreicht (13,2)	erreicht (12,8)
CEM I	0,50	K 9	Zorgekies	Kies rund	nicht erreicht (30,6)	nicht erreicht (37,6)

Weitere Frischbetonergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Übersicht über die Frischbetoneigenschaften der hergestellten Betone

Nr.	Bezeichnung	Auslagerung	w/z-Wert	Zementart	Ausbreitmaß	LP-Gehalt
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[cm]	[Vol-%]
1	2	3	4	5	6	7
1	K3	XF4	0,5	CEM I 32,5 R	41,5	4,7
2	K5 CEM I	XF4	0,5	CEM I 32,5 R	41,0	5,0
3	K5 CEM III	XF4	0,5	CEM III 42,5 N	38,0	4,9
4	K9	XF4	0,5	CEM I 32,5 R	38,5	4,7
5	N19 0,5	XF4	0,5	CEM I 32,5 R	39,5	4,8
6	N19 0,45	XF4	0,45	CEM I 32,5 R	38,0	4,7
7	N22	XF4	0,5	CEM I 32,5 R	38,0	5,0
8	K3	XF3	0,5	CEM I 32,5 R	39,0	1,7
9	K5 CEM I	XF3	0,5	CEM I 32,5 R	43,0	2,0
10	K5 CEM III	XF3	0,5	CEM III 42,5 N	39,0	1,2
11	K9	XF3	0,5	CEM I 32,5 R	39,5	1,9
12	N19 0,5	XF3	0,5	CEM I 32,5 R	38,5	1,4
13	N19 0,45	XF3	0,45	CEM I 32,5 R	39,5	2,0
14	N22	XF3	0,5	CEM I 32,5 R	41,5	1,4

Die Druckfestigkeit ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Erwartungsgemäß ist die Druckfestigkeit der Betone im Bereich XF3 bedingt durch den geringeren Luftgehalt deutlich höher als die der Betone im Bereich XF4 (im Mittel um 9 N/mm²). Auch der Einfluss des w/z-Werts spiegelt sich deutlich wider. So ist die 28d-Druckfestigkeit bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,45 rund 20 % höher als bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 bei sonst gleicher Zusammensetzung. Infolge der höheren Mahlfineinheit (es wurde ein CEM III 42,5 N im Vergleich zu CEM I 32,5 R verwendet) weisen die Betone mit CEM III eine leicht höhere Druckfestigkeit auf (4 % (XF4) bzw. 12 % (XF3) höher). Auch die verwendete Gesteinskörnung wirkt sich deutlich auf die Druckfestigkeit aus. So fällt hier insbesondere der Beton mit K9 auf, dessen 28d-Druckfestigkeit mit 42 (XF4) bzw. 52 N/mm² (XF3) deutlich über dem sonstigen Druckfestigkeitsbereich von 29,0-35,5 N/mm² bzw. 39,5 – 41,0 N/mm² liegt. In denen vom vdz [2] und ibac [3] durchgeführten CIF-Tests zeigten die Muschelkalke einen deutlichen Abfall im relativen dynamischen E-Modul. Hier ergab sich für die beim vdz geprüften Betone folgende Reihung:

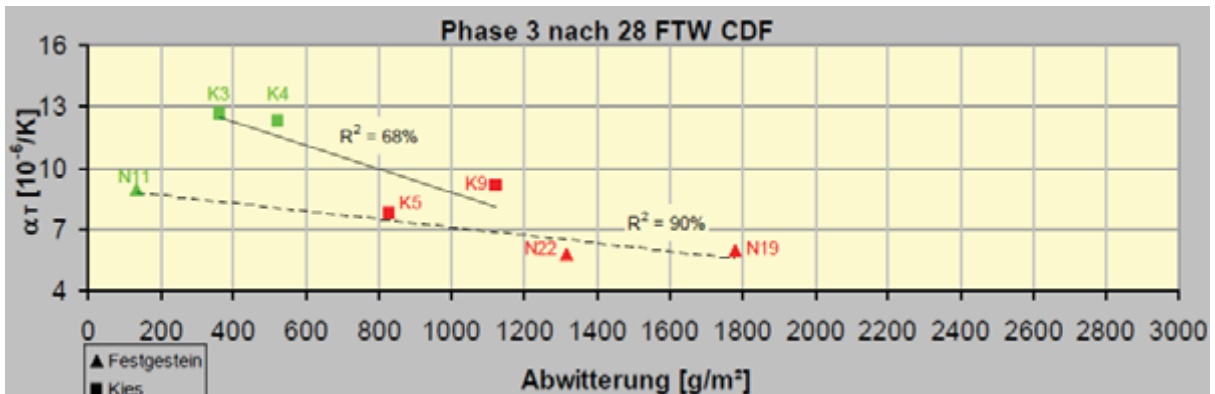
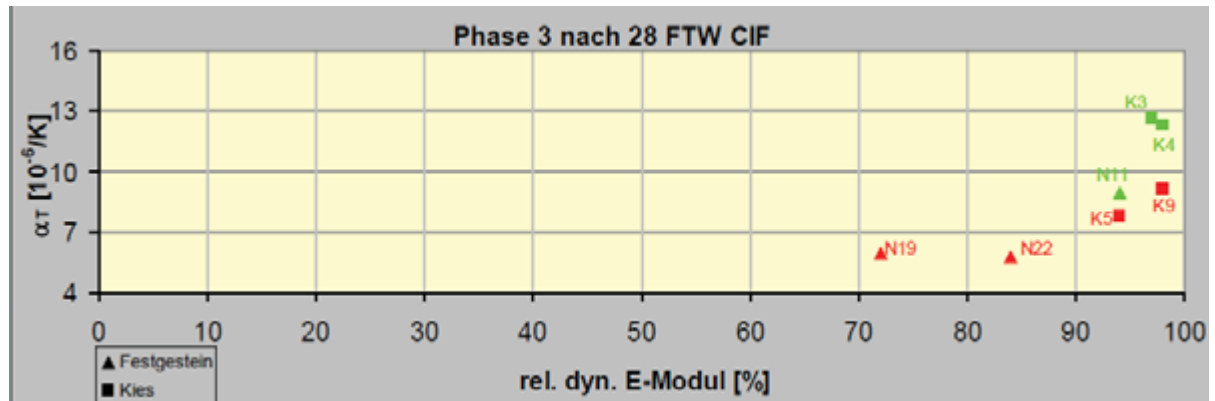
N19 < N22 < K5 < K3 < K9

Tabelle 3: Rohdichte, Druckfestigkeit der untersuchten Betone sowie mittlere aufsummierte Abwitterung nach dem CDF-Verfahren [1]

Nr.	Bezeichnung	Auslagerung	28d - Rohdichte	28d - Druckfestigkeit	-Abwitterung nach 28 FTW	-Abwitterung nach 56 FTW
[-]	[-]	[-]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[g/m ²]	[g/m ²]
1	2	3	4	5	6	7
1	K3	XF4	2240	29,0	690	1310
2	K5 CEM I	XF4	2260	31,5	1000	2760
3	K5 CEM III	XF4	2250	32,5	2050	n. b.
4	K9	XF4	2260	42,0	500	1470
5	N19 0,5	XF4	2320	35,5	1050	2990
6	N19 0,45	XF4	2330	42,5	1250	3160
7	N22	XF4	2300	34,0	680	1420
8	K3	XF3	2360	41,0	n. b.	n. b.
9	K5 CEM I	XF3	2330	39,5	n. b.	n. b.
10	K5 CEM III	XF3	2280	45,0	n. b.	n. b.
11	K9	XF3	2280	52,0	n. b.	n. b.
12	N19 0,5	XF3	2350	41,0	n. b.	n. b.
13	N19 0,45	XF3	2390	51,5	n. b.	n. b.
14	N22	XF3	2390	39,5	n. b.	n. b.

Beim ibac wies der Beton mit der Gesteinskörnung N22 den höchsten Abfall im relativen dynamischen E-Modul auf [3]. Die Betonherstellung erfolgte beim vdz mit analogen Zusammensetzungen.

Zudem wurden die XF4-Betone auch nach dem CDF-Verfahren [1] geprüft. Während hier der w/z-Wert zwischen 0,45 und 0,50 nur eine untergeordnete Rolle hatte, war der Einfluss der Zementart am stark ausgeprägt. So erfüllte der Beton K5 CEM III als einziger die Anforderungen an das CDF-Verfahren (Abwitterung < 1500 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln) nicht. Hier ergeben sich deutliche Unterschiede zu den Versuchen beim vdz [2], bei denen bereits der Beton mit dem Muschelkalk N19 die Anforderungen der Performance-Prüfung für den Bereich XF4 nicht erfüllte, siehe Bild 1. Sollte sich bestätigen, dass Betone mit der Gesteinskörnung N19 einen niedrigeren Frost-Tausalz-Widerstand in der Praxis aufweisen, könnte sich die Prüfung mit geschalteten Flächen eignen, den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen zuverlässig zu bewerten.



Gesteine		Ergebnisse der Frostprüfung der Gesteinskörnungen (AiF 15212 und AiF 15214)			Abwitterungen in g/m^2														
					CEM I 32,5 R														
Kürzel		FTW-Wert, FTS-Wert, MS-Wert			Luftgehalt: 0 Vol.-%					Luftgehalt: $\geq 4,5$ Vol.-%									
					Expositionsklasse: XF3					Expositionsklasse: XF4									
		in M.-%			Prüfverfahren														
					CF/CIF				Referenz			CDF				Referenz			
					Geschalte Fläche T		Gesägte Fläche S		Slab			Geschalte Fläche T		Gesägte Fläche S		Slab			
					28FTW	56FTW	28FTW	56FTW	56FTW	28FTW	56FTW	28FTW	56FTW	28FTW	56FTW	28FTW	56FTW		
Kiese	K26	0,3	3,5	1,8	130	299	98	186	36	326	560	362	589	116					
	K4	0,3	2,4	7,1	n.b.	n.b.	169	196	18	n.b.	n.b.	522	799	193					
	K5	0,5	13,2	12,8	n.b.	n.b.	228	342	116	579	999	829	1389	689					
	K9	0,7	30,6	37,6	93	204	75	195	34	1030	n.b.	1121	n.b.	1076					
Festgesteine	N11	0,6	1,2	4,6	n.b.	n.b.	75	192	3	n.b.	n.b.	134	256	87					
	N19	1,0	29,1	9,7	150	740	108	604	85	692	1292	1781	2795	1846					
	N22	2,7	18,1	11,5	n.b.	n.b.	95	380	70	n.b.	n.b.	1316	2226	400					

Bild 1: Vergleich der linearem Wärmedehnung α_T (FIB) mit dem CIF-Verfahren (oben) und dem CDF-Verfahren an gesägten Flächen (Mitte) [2] und tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Frostuntersuchungen in Abhängigkeit der Gesteinskörnung [4]

3.2.2 Auslagerung im Bereich XF4

Für die Auslagerung entsprechend der Expositionsklasse XF4 wurde ein Gebiet zwischen den Richtungsfahrbahnen der B2 zwischen dem Autobahnende der A95 bei Eschenlohe und Garmisch-Partenkirchen am Südende des Tunnel Farchant ausgewählt (vgl. Zwischenbericht AiF 15214 BG/2&4, 01.01.08-31.12.08). Die Auslagerungsstätte eignet sich besonders für die Versuche aufgrund der hohen Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag, Bild 2. Frosttage mit Niederschlag sind Tage an denen Temperaturhub innerhalb eines Tages den Gefrierpunkt überschreitet und gleichzeitig Niederschlag vorhanden ist (d. h. die Maximaltemperatur liegt oberhalb und die Minimaltemperatur unterhalb 0 °C bei simultanem Feuchteangebot). Diese Tage sind für die Frostschädigung von Beton besonders relevant, vgl. [5].

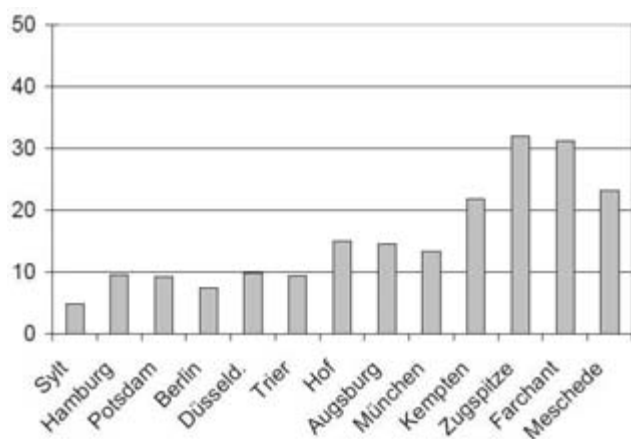


Bild 2: Durchschnittliche Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag im Zeitraum von 1996-2005 an verschiedenen Orten in Deutschland [6]

3.2.3 Temperaturen der Betonproben und der Auslagerung XF4

In den Beton „N19.CEM I.0,50“ wurden Temperatursensoren in drei Tiefenlagen einbetoniert. Der erste Sensor befindet sich an der Betonoberfläche, der zweite in 2,5 cm Tiefe und der dritte in 5,0 cm Tiefe. Da vor Ort keine Stromversorgung vorhanden ist, wurde eine Stromversorgung basierend auf einer Brennstoffzelle und einem Solarmodul zusammen mit weiterer Messtechnik in einer witterungsbeständigen Kunststoffbox untergebracht. In dieser Kunststoffbox befinden sich auch die Brennstoffzelle, der zugehörige Treibstofftank sowie der Solarakku, Bild 3.



Bild 3: Kunststoffbox mit fest angebrachtem Solarmodul (links) und Brennstoffzelle, Treibstofftank sowie Solarakku (rechts)

Die gemessenen Temperaturen der ersten Winterperioden können den jeweiligen Zwischenberichten entnommen werden und sind exemplarisch für den Zeitraum Dez. 2008 bis Jan. 2010 in Bild 4 dargestellt. Über die beobachteten zehn Winterperioden lagen die Temperaturen an der Oberfläche zum gleichen Zeitpunkt im Schnitt um $0,5^{\circ}\text{C}$ über den Temperaturen in 2,5 cm Tiefe und rd. $1,0^{\circ}\text{C}$ über den Temperaturen in 5,0 cm Tiefe. Im Sommer vergrößern sich diese Unterschiede tagsüber um bis zu $11,0^{\circ}\text{C}$. Die Oberflächen des Betons kühlen demnach schneller ab und erwärmen sich schneller als das Betoninnere, was durch die Sonneneinstrahlung zu begründen ist

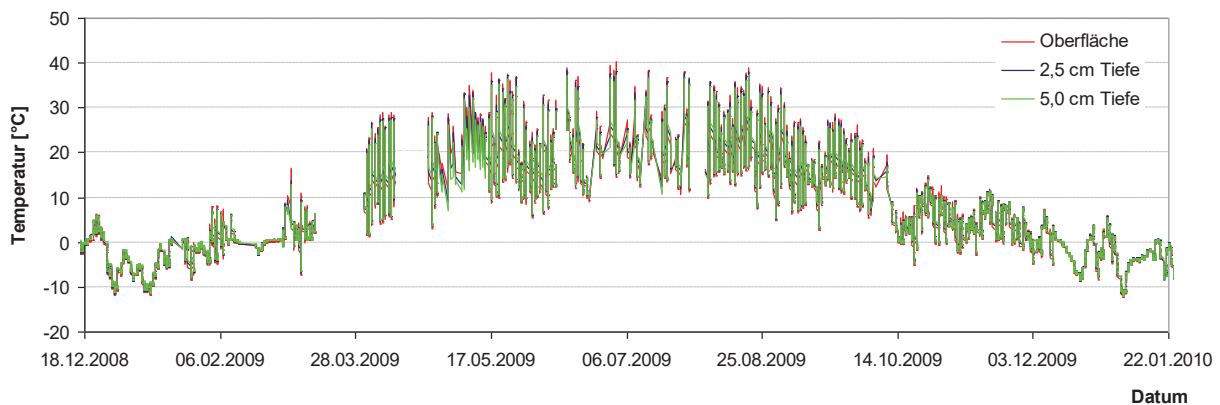


Bild 4: Temperaturen, von Dezember 2008 bis Januar 2010, im Beton „N19.CEM I.0,50“ mit der Gesteinskörnung N19, gemessen in den Tiefenlagen von 0cm (Oberfläche), 2,5 cm sowie 5 cm

In Tabelle 4 ist die Auswertung der Temperaturmessungen dargestellt. In den Winterperioden 2012/2013, 2013/2014 und 2015/2016 waren in der Messstation so große Perioden ohne Datenaufzeichnung vorhanden, dass auf die Darstellung der wenigen Messdaten hier verzichtet wurde. Deutlich wird der Unterschied zwischen Frost-Tau-Wechseln (FTW) mit und ohne Niederschlag. Bedenkt man allerdings die Tatsache, dass die Proben im Mittelstreifen ausgelagert waren, der nicht geräumt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass an nahezu allen FTW ein hoher Sättigungsgrad vorhanden war, vgl. Bild 5.

Tabelle 4: Auswertung der Temperaturmessungen

Winterperiode	Anzahl an FTW in 2,5 cm Tiefe	Anzahl an FTW in 5 cm Tiefe	Anzahl an FTW laut Wetterstation*	Anzahl an FTW mit Niederschlag*	Minimaltemperatur
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[° C]
1	2	3	4	5	6
2008/2009	49	45	100	49	-17
2009/2010	45	43	90	43	-18
2010/2011	44	40	89	29	-14
2011/2012	48	42	94	46	-16
2012/2013	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
2013/2014	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
2014/2015	40	39	77	34	-13
2015/2016	n.b.	n.b.	117	48	-16
2016/2017	51	44	102	34	-18
2017/2018	50	44	98	64	-18

* Wetterstation Farchant



Bild 5: Bild der Auslagerungsstände im Winter 2008/2009 (links) und mit Schnee bedeckte Proben (rechts)

Daniel Weger [7] wertete in seiner Bachelorarbeit Wetterdaten über einen Zeitraum von 15 Jahren (1996-2011) aus. Hierbei traten in der damals vom Auslagerungsort am nächsten liegenden Wetterstation Garmisch-Partenkirchen im Mittel 44 FTW mit Niederschlag (NL) auf, von denen im Mittel nur 7 auch eine Minimaltemperatur von -5°C hatten und somit als schädigungsrelevant einzustufen sind, vgl [5]. Aufgrund dieser Diskrepanz wurde die Anzahl an FTW mit NL und gleichzeitig einer Minimaltemperatur

exemplarisch für drei Winterperioden ausgewertet, Tabelle 5. Erwartungsgemäß sind die Oberflächen größeren Extremen ausgesetzt, dennoch bleibt die Anzahl an schadensrelevanten FTW pro Winterperiode gering und schwankt zwischen 9 und 14, was erklärt, weshalb bei XF4 auch mit keiner inneren Schädigung zu rechnen ist, da die Mikroeislinsepumpe erst bei Temperaturen $< -5^{\circ}\text{C}$ aktiviert wird [5]. Nur über die wenigen, schadenswirksamen FTW ist mit einer kontinuierlichen Aufsättigung der Betonproben ins Innere zu rechnen.

Tabelle 5: Auswertung der Temperaturmessungen

Winterperiode	Anzahl an FTW mit NL und $T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$: Oberfläche	Anzahl an FTW mit NL und $T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$: 2,5 cm Tiefe	Anzahl an FTW mit NL und $T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$: 5 cm Tiefe	Anzahl an FTW mit NL und $T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$: Wetterstation*
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
2008/2009	9	7	7	18
2016/2017	14	11	10	14
2017/2018	12	10	10	29

Zudem ist über die 10 Winterperioden hinweg ein Trend hin zu extremeren Wetterereignissen zu verzeichnen, was zukünftig weiterhin beobachtet werden sollte. Im Berichtszeitraum wurden 49 Frost-Tau-Wechsel an der Oberfläche und 46 in 2,5 cm Tiefe des Betons „N19.CEM I.0,50“ gemessen, von denen allerdings nur ein Bruchteil als schadenswirksam einzustufen ist. Dies könnte, die geringen, im Teilprojekt der BAM gefunden, Abwitterungen erklären. Die bisherigen Ergebnisse zeigen keine belastbaren Korrelationen untereinander. Um daher eine zuverlässige Aussage über den Einfluss der Gesteinskörnung auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand treffen zu können, wird eine Fortführung der Auslagerung dringend empfohlen. Die aktuellen Ergebnisse stellen alle eingesetzten Laborprüfverfahren in Frage.

3.2.4 Nachweis über die Verwendung der Zuwendungen

Forschungsstelle 2 (cbm der TUM)

Der Projektleiter übernahm die wissenschaftliche Gesamtleitung des Projekts. In regelmäßigen Abständen wurde ihm über den Stand der Arbeit berichtet. Des Weiteren überprüfte er die Zwischenberichte und beteiligte sich an den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses in Eigenleistung. Der Sachbearbeiter überwachte die Auslagerung der Probekörper. Er tauschte in regelmäßigen Abständen den Methanoltank, der die Brennstoffzelle vor Ort speist, aus. Zudem erfasste er die Klimadaten der Auslagerungsstelle und wertete sie aus. Zudem koordinierte er den Transport der Proben. Der Probentransport für die Untersuchungen der Forschungsstelle 3 sowie die Instandhaltung der Auslagerungsstände wurde durch Labormitarbeiter ausgeführt.

4 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

Siehe „Leitplan der Verbundforschung Frost- und Frosttausalz-Widerstand von Beton“.

5 Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Siehe „Leitplan der Verbundforschung Frost- und Frosttausalz-Widerstand von Beton“.

6 Durchführende Forschungsstelle

6.1 Name und Anschrift der Forschungsstelle

Forschungsstelle 2: Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München
Baumbachstr. 7
81245 München

6.2 Leiter der Forschungsstelle

Forschungsstelle 2: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Gehlen

6.3 Projektleiter

Forschungsstelle 2: Dr.-Ing. Dirk Lowke, Dr.-Ing. T. Kränkel

7 Literatur

[1] BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton (MFB), Ausgabe 2012; [online] https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Frostpruefung_Beton_MFB_2012.pdf (aufgerufen am 20.02.2019)

[2] Erfurt, D.: Verbundforschung Frost: Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung AiF-Nr. 15214 BG. Präsentation der 7. Betreuungsgruppensitzung vom 13.10.2014, Berlin

[3] Rahimi, A.: Verbundforschung Frost: AP5: Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix – Interfacial transition Zone (ITZ). Präsentation der 6. Betreuungsgruppensitzung vom 29.11.2010, Düsseldorf

[4] Müller, C., Weise, F.: Schlussbericht der Forschungsstellen Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) und Bundesanstalt für Materialprüfung

[5] Hartmann, V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton, CDF-Test. Dissertation, Univ. Gesamthochschule Essen (1993).

[6] Brandes, C.: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Betone nach dem Performance Concept für die Anwendung der Expositionsklasse XF2 und Korrelation mit der Praxis. Abschlussbericht (2006).

[7] Weger, D.: Charakterisierung der Einflussparameter Temperatur und Niederschlag auf den Frost-Tau-Widerstand von Betonen in Deutschland (2011).

AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

Teil III

Arbeitspaket 6: Auslagerung

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Dr.-Ing. Frank Weise

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

**Bundesanstalt für Materialforschung und
-prüfung (BAM)**

**Abteilung 7.0: Bauwerkssicherheit
Fachbereich 7.1: Baustoffe**

BAM Berlin

Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Telefon: (030) 8104 1715
Telefax: (030) 8104 71719

www.bam.de

Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG / 3

ein aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



gefördertes IGF-Forschungsvorhaben

Thema:	Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt: „Projektmanagement – Petrographie - Auslagerung“ Arbeitspaket 6: Auslagerungsversuche zum Frost- und Frost-Tausalz-widerstand der Gesteinskörnung im Beton
Auftraggeber:	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)
Bewilligungszeitraum:	01.06.2007-31.12.2018
Aktenzeichen:	AiF-Vorhaben-Nr.: 15214 BG
Projektleitung:	Dr.-Ing. Frank Weise
Sachbearbeiter:	Dr.-Ing. Frank Weise
Abgabe des Berichts:	01.03.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema	3
2	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Auslagerungsversuche (AP6)	4
3	Forschungsziel und Lösungsweg	4
4	Übersicht über ausgelagerte Betonprüfkörper und Vorgehensweise bei der Beurteilung des äußeren und inneren Gefügestandes	5
5	Ergebnisse und deren Auswertung	14
5.1	Auslagerungsprüfkörper im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3)	14
5.2	Auslagerungsprüfkörper auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant (XF4)	34
6	Literatur	51
7	Anlagen A1 und A2	51

1 Forschungsthema

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement – Petrographie - Auslagerung“

2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

2.1 Allgemeines

Dieses Forschungsvorhaben war Teil der Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“. Die Gesamtproblematik der beantragten Forschung zum Thema „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“ und die an den jeweiligen Forschungsstellen zu bearbeitenden Aufgaben wurden in dem Leitplan abgeleitet. Der Leitplan zeigte die Kooperation und die Abgrenzung der Teilforschungen und ging auf die wirtschaftliche Bedeutung des Verbundforschungsprogramms und die beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse ein. Dieser Forschungsvorhaben bezieht sich auf Arbeitspaket 6 der Verbundforschung, die schematisch im Bild 1 gezeigt wird.

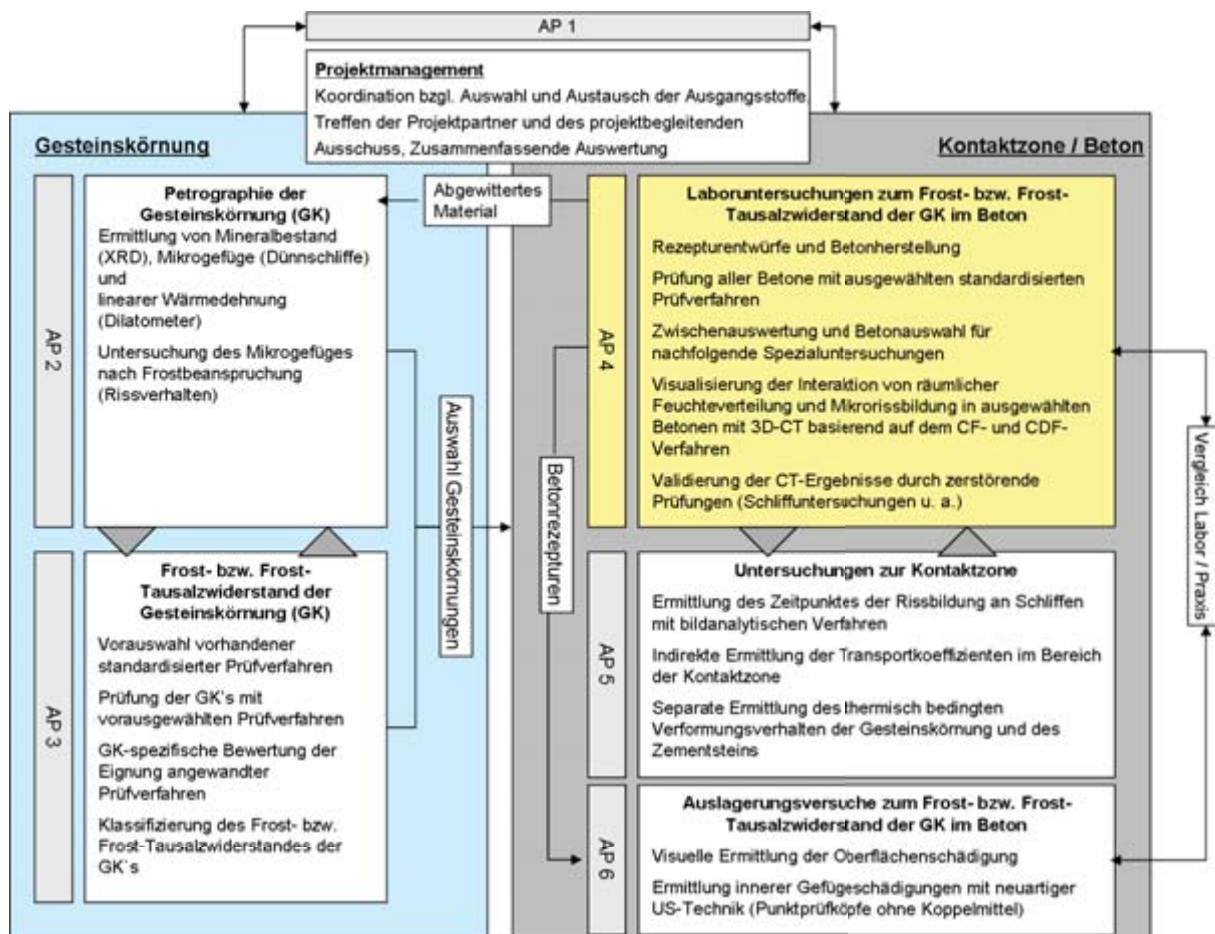


Bild 1: Struktur der Verbundforschung „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“ – Arbeitspakete (AP), Abgrenzung und Kooperation der Einzelforschungen

2.2 Auslagerungsversuche (AP6)

Bis heute gibt es keine allgemeingültige Laborprüfung, die das Verhalten der losen Gesteinskörnung separat und im Beton bei Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung realitätsnah abbildet. So ist u. a. die Übertragbarkeit der Ergebnisse der diesbezüglichen Laborprüfungen am Beton auf die Praxisverhältnisse bisher nicht geklärt. Das nun abgeschlossene aus drei Clustern bestehende Verbundforschungsvorhaben sollte hier den Erkenntnisstand deutlich verbessern.

3 Forschungsziel und Lösungsweg

Das Ziel der hier im Vordergrund stehenden Auslagerungsversuche bestand darin, die im Labor gewonnenen Ergebnisse der normativen Frost- bzw. Frost-Tausalzprüfungen an den separaten Gesteinskörnungen und an den aus ihnen hergestellten Betonen in der Praxis zu verifizieren. Als Expositionsclassen wurden hierfür XF3 und XF4 gewählt. Realisiert wurde die XF3-Exposition durch Lagerung der Prüfkörper in der Wasserwechselzone des Sparbeckens der Schleuse Hilpoltstein. Begleitet wurde die Auslagerung an diesem Ort durch das Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen. Die Auslagerung der Prüfkörper in der Expositionsclassen XF4 erfolgte auf dem Mittelstreifen der Bundesstraße B2 in unmittelbarer Nähe des Tunnels Farchant. Die Federführung hatte hier das Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München inne. Dies schloss auch die Erfassung und Auswertung der Klimadaten in der nun mehr zehnjährigen Auslagerungszeit ein.

Zur Vermeidung verfälschender Einflüsse wurden alle Prüfkörper für beide Expositionsclassen zentral am cbm hergestellt. Das schloss auch die jeweiligen Rezepturenwürfe in Absprache mit dem VDZ und die damit verbundenen Eignungsuntersuchungen ein. Alle hier ermittelten Frisch- und Festbetoneigenschaften sind dem Teilbericht des cbm zu entnehmen. Das gilt auch für alle verwendeten Rezepturen. Die Charakterisierung des inneren und äußeren Gefügestandes aller ausgelagerten Betonprüfkörper erfolgte durch die BAM. Die Darstellung der hierbei gewonnenen Ergebnisse ist der Hauptgegenstand dieses Teilberichts.

Einen zusammenfassenden Überblick über die einzelnen Teilaufgaben der Auslagerungsversuche mit den dazugehörigen verantwortlichen Forschungsstellen gibt die Tabelle 1.

Tabelle 1: Teilaufgaben (TA) mit verantwortlichen Forschungsstellen für die Auslagerungsversuche

Forschungsstelle:	3 (cbm der TUM), 4 (BAM), 5 (ibac der RWTH Aachen)	
Teilaufgaben 1	Herstellen (cbm der TUM) und Auslagern (cbm der TUM, ibac der RWTH Aachen) von Betonen mit den verschiedenen Gesteinskörnungen in - Zusammensetzung entsprechend der Expositionsklasse XF3 bzw. XF4 - Zusammensetzung entsprechend Arbeitspaket 4	
Teilaufgabe 2	Erfassung und Auswertung der Klimadaten während der Auslagerung (cbm der TUM, ibac der RWTH Aachen)	
Teilaufgabe 3	Beurteilung des Betons bei anwendungsspezifischen Auslagerungen hinsichtlich seines Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes (BAM)	
	TA 3.1	Ermittlung des äußeren Gefügestandes durch - visuelle Beurteilung der Betonoberflächen vor, während und nach der Auslagerung; - Bestimmung der Abwitterung bei Betonoberflächen durch photogrammetrische Analyse der Oberflächentextur vor und nach Auslagerung
	TA 3.2	Zerstörungsfreie und zerstörende Ermittlung des inneren Gefügestandes durch - Messung der Ultraschalllaufzeit vor und nach der Auslagerung parallel zur Prüffläche - Bestimmung der Biegezugfestigkeit an zusätzlich hergestellten- und nicht für die Auslagerung vorgesehenen Prüfkörpern sowie vergleichend an Prüfkörpern nach Beendigung der Auslagerung bei beiden Orten (Verzicht aufgrund der geplanten weiteren Fortführung der Auslagerungsversuche)

4 Übersicht über ausgelagerte Betonprüfkörper und Vorgehensweise bei der Beurteilung des äußeren und inneren Gefügestandes

Einen Überblick über alle an beiden Expositionsklassen ausgelagerten Betonprüfkörper mit ihrer jeweiligen Kurz- und Langbezeichnung gibt die Tabelle 2. Insgesamt wurden 13 Prüfkörper mit den Abmessungen 35 cm x 20 cm x 15 cm in der Expositionsklasse XF3 und sieben Prüfkörper mit den Abmessungen 30 cm x 15 cm x 15 cm in der Expositionsklasse XF4 ausgelagert. Als Gesteinskörnungen fanden in beiden Expositionsklassen die Kiese K3, K5 und K9 sowie die Muschelkalke N19 und N22 als gebrochene Festgesteine Einsatz. Zusätzlich sei angemerkt, dass bei der Anwendung des Kieses K5 der Portlandzement CEM I 32,5R durch den Hochofenzement CEM III/A 42,5N ersetzt wurde. Weiterhin wurde beim Einsatz der Gesteinskörnung N19 auch der w/z-Wert von 0,50 auf 0,45 abgesenkt. Der Hauptunterschied zwischen den XF3- und XF4-Betonen besteht darin, dass bei letzteren ein Luftporenbildner zur Sicherstellung des normativen Mindestluftporengehalt im Frischbeton Anwendung fand. Es ist ersichtlich, dass bei der XF3-Exposition in der Regel zwei Prüfkörper für jede Betonart ausgelagert wurden. Bei der Expositionsklasse XF4 hingegen beschränkte sich die Prüfkörperanzahl auf einen. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass mit Ausnahme der beaufschlagten Prüffläche alle Seiten der Prüfkörper vor der Auslagerung mit einem Alu-Butyl-Klebeband zur Vermeidung eines externen Feuchte- und ggf. Tausalzeintrags am cbm abgedichtet wurden.

Unmittelbar vor der Auslagerung der Prüfkörper im Herbst 2008 und zu definierten Auslagerungszeitpunkten im Jahr 2009, 2010, 2012, 2014, 2016 und 2018 wurden der innere und äußere Gefügestand aller Prüfkörper durch die BAM analysiert. Zu diesem Zweck wurden alle Prüfkörper an beiden Auslagerungsorten durch das ibac und das cbm aus den jeweiligen Auslagerungsvorrichtungen entnommen und zur Abholung bereitgestellt. Die Abholung und der Rücktransport aller Prüfkörper erfolgte durch die BAM. Die Untersuchungen selbst wurden im Dauerhaftigkeitslabor des Fachbereichs 7.1 Baustoffe der BAM durchgeführt.

Tabelle 2: Übersicht über alle an den jeweiligen Expositionsorten ausgelagerten Prüfkörper mit Kurz- und Langbezeichnung

Exposition	Kurz-	Lang-
	bezeichnung der Prüfkörper	
XF3 (Sparbecken Schleuse Hil- poltstein)	K3 XF3 PK1	XF3-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	K3 XF3 PK2	XF3-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)
	K5 CEMI XF3 PK1	XF3-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	K5 CEMI XF3 PK2	XF3-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)
	K5 CEMIII XF3 PK1	XF3-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK1)
	K5 CEMIII XF3 PK2	XF3-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK2)
	K9 XF3 PK1	XF3-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	K9 XF3 PK2	XF3-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)
	N19 0,5 XF3 PK1	XF3-N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	N19 0,5 XF3 PK2	XF3-N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)
	N19 0,45 XF3 PK2	XF3-N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK2)
	N22 XF3 PK1	XF3-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	N22 XF3 PK2	XF3-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)
XF4 (B2 bei Tunnel Farchant)	K3 XF4 PK1	XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	K5 CEMI XF4 PK1	XF4-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	K5 CEMIII XF4 PK1	XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK1)
	K9 XF4 PK1	XF4-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	N19 0,5 XF4 PK1	XF4-N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)
	N19 0,45 XF4 PK1	XF4-N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK1)
	N22 XF4 PK1	XF4-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)

Nach Eingang der Prüfkörper in der BAM wurde wie folgt vorgegangen:

- Reinigung der Prüfkörper
- mindestens sechswöchige Konditionierung der Prüfkörper bei Normklima ((20 ± 2) °C und (65 ± 5) %rel. LF.)
- Wägung der Prüfkörper
- visuelle Begutachtung und fotografische Dokumentation der Prüffläche der Prüfkörper
- photogrammetrische Analyse
- Ultraschallmessungen

Insbesondere wiesen die im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Prüfkörper starke Verschmutzungen auf. Aus diesem Grunde bedurften die dort ausgelagerten Prüfkörper einer besonders intensiven Reinigung. Diese erfolgte zunächst mechanisch und an-

schließlich mittels Druckluft. Einen visuellen Eindruck von der Lagerung, dem Ausbau und der Reinigung der Prüfkörper der Expositionsklasse XF3 vermitteln die Bilder 2a bis 2d.



Bild 2: Impressionen von der Lagerung, dem Ausbau und der Reinigung der Prüfkörper des Spärbeckens der Schleuse Hilpoltstein

Bei den an der Autobahn beim Tunnel Farchant ausgelagerten Prüfkörpern (Bild 3) genügte aufgrund ihrer deutlich geringeren Verschmutzung eine Reinigung mit Druckluft. Nach der Reinigung wurden die Prüfkörper mindestens sechs Wochen bei Normklima hygrometrisch vorkonditioniert. Dies geschah vor dem Hintergrund der Schaffung möglichst einheitlicher Feuchtezustände in der Randzone der exponierten Prüffläche der Prüfkörper. Danach wurden die Prüfkörper zur Verifizierung des integralen Feuchtezustandes gewogen. Einen zusammenfassenden Überblick über die ermittelten Massen der Prüfkörper vor der Auslagerung und zu definierten Auslagerungszeitpunkten gibt die Tabelle 3. Es ist erkennbar, dass die Prüfkörper an beiden Auslagerungsorten gegenüber dem Ursprungszustand 2008 eine geringe Massezunahme und damit einen geringen Feuchteeintrag erfahren. Dieses Erkenntnis wiederum ist für die Diskussion der Ergebnisse der Ultraschallmessungen von zentraler Bedeutung, da sich die Ultraschallgeschwindigkeit im Beton mit zunehmendem Feuchtegehalt erhöht.

Tabelle 3: Übersicht über ermittelte Massen der Prüfkörper vor der Auslagerung und zu bestimmten Auslagerungszeitpunkten

Exposition	Prüfkörperbezeichnung	Masse [g]						Masseänderung [%] ¹⁾					
		2008	2010	2012	2014	2016	2018	2010	2012	2014	2016	2018	
XF3 (Sparbaken Schleuse Hilpoltstein)	K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	25623	25653,4	25706,1	25682,6	25703	25688,5	0,12	0,32	0,23	0,31	0,25	
	K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)	25857	25865,6	25910,8	25895,2	25915	25901,7	0,03	0,21	0,15	0,22	0,17	
	K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	25336	25409,2	25468,7	25437,8	25499	25489,2	0,29	0,52	0,40	0,64	0,60	
	K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)	25371	25437	25502,5	25476,8	25510	25527,3	0,26	0,52	0,42	0,55	0,61	
	K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK1)	25466	25553,9	25603	25642	25618	25636	0,35	0,54	0,69	0,59	0,66	
	K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK2)	25641	25733,1	25792,1	25766,1	25805	25795,9	0,36	0,59	0,49	0,64	0,60	
	K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	24963	25019,5	25035,6	25041,4	25083	25059,8	0,23	0,29	0,31	0,48	0,39	
	K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)	25160	25214,3	25269,2	25228,4	25254	25233,4	0,22	0,43	0,27	0,37	0,29	
	N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	25803	25852,8	25915,1	25932,9	25941	25968,9	0,19	0,43	0,50	0,53	0,64	
	N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)	25987	26064,8	26145,4	26127,9	26140,6	26169,2	0,30	0,61	0,54	0,59	0,70	
	N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK2)	26572	26601	26663,5	26649,6	26670	26680,8	0,11	0,34	0,29	0,37	0,41	
	N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	25736	25768,3	25838,4	25805,1	25836	25828,5	0,13	0,40	0,27	0,39	0,36	
	N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)	25955	25988	25991,2	25959,1	25987	25976,5	0,13	0,14	0,02	0,12	0,08	
	XF4 (B2 bei Tunnel Far-chant)	K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	15226	15256,1	15259,8	15267,7	15282	15258	0,20	0,22	0,27	0,37	0,21
K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)		15360,2	15491,3	15456,9	15496,3	15504	15488,8	0,85	0,63	0,89	0,93	0,83	
K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK1)		15089,4	15133,4	15134	15135,7	15132	15108,2	0,29	0,30	0,31	0,28	0,12	
K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)		15450,9	15474,2	15471,9	15477,4	15479	15476,7	0,15	0,14	0,17	0,18	0,17	
N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)		15478,8	15567,7	15565,7	15565,7	15599	15580,2	0,57	0,56	0,56	0,77	0,65	
N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK1)		15909,6	15964,8	15966,1	15966,1	15978	15975,7	0,35	0,36	0,36	0,43	0,41	
N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)	15561,4	15605,6	15600,4	15608,4	15616	15611,3	0,28	0,25	0,30	0,35	0,32		
1) bezogen auf die unmittelbar vor der Auslagerung 2008 ermittelte Prüfkörpermasse													



Bild 3: Impressionen von der Auslagerung der Prüfkörper auf dem Mittelstreifen der B2 in der Nähe des Tunnels Farchant

Nach erfolgter Massebestimmung wurden die Prüfkörper visuell begutachtet. Von zentralem Interesse war hierbei die Bemusterung der Prüffläche hinsichtlich des Vorhandenseins von Abwitterungen. Dies schloss auch deren fotografische Dokumentation ein. Zusätzlich wurden alle Prüfkörper auf das Vorhandensein von Kanten- und Eckabplatzungen und die Funktionstüchtigkeit der Abdichtung überprüft.

Zur objektiven quantitativen Beschreibung der Veränderungen der Oberflächentextur der Prüffläche wurden alle Prüfkörper vor der Auslagerung und zu verschiedenen Auslagerungszeitpunkten photogrammetrisch analysiert. Die Photogrammetrie gestattet eine orts aufgelöste Beurteilung der äußeren Gefügeveränderung der frei bewitterten Prüffläche der Prüfkörper. Bisher wurde dieses Verfahren vor allem zur Erfassung der äußeren Gestalt von Objekten im Maschinenbau und in der Denkmalpflege eingesetzt. Aus diesem Grund musste das Verfahren für den vorliegenden Anwendungsfall erst ertüchtigt werden. Die Photogrammetrie [1, 2, 3] basiert auf der dreidimensionalen Vermessung und Digitalisierung von Oberflächen. Die zu vermessende Betonoberfläche wird dabei mittels Projektor mit strukturierten Streifenlichtsequenzen definiert beleuchtet (Bild 4a). Die aufprojizierten Streifenlichtsequenzen werden an Unebenheiten der Betonoberfläche deformiert und von mindestens einer Digitalkamera erfasst. Die so aufgenommenen projizierten Lichtstrukturen gestatten eine Bildauswertung nach dem Triangulationsprinzip, in deren Ergebnis für jeden Bildpunkt ein Höhenwert berechnet wird. Das so ermittelte Höhenprofil wird als virtuelle Fläche nachmodelliert. Mithilfe von Referenzmarken auf der Prüffläche ist es möglich, die zu verschiedenen Zeiten erstellten Aufnahmen auszurichten, miteinander zu vergleichen und voneinander abzuziehen. Die Differenzbildung gestattet so eine genaue Quantifizierung und Lokalisierung der durch eine Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung verursachten Abwitterung auf der Betonoberfläche. Einen optischen Eindruck von der in der Praxis verwendeten Messanordnung vermittelt das Bild 4b. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde das Messsystem ATOS III der Firma GOM mbH verwendet. Die Auswertung erfolgte partiell mit eigener Software.

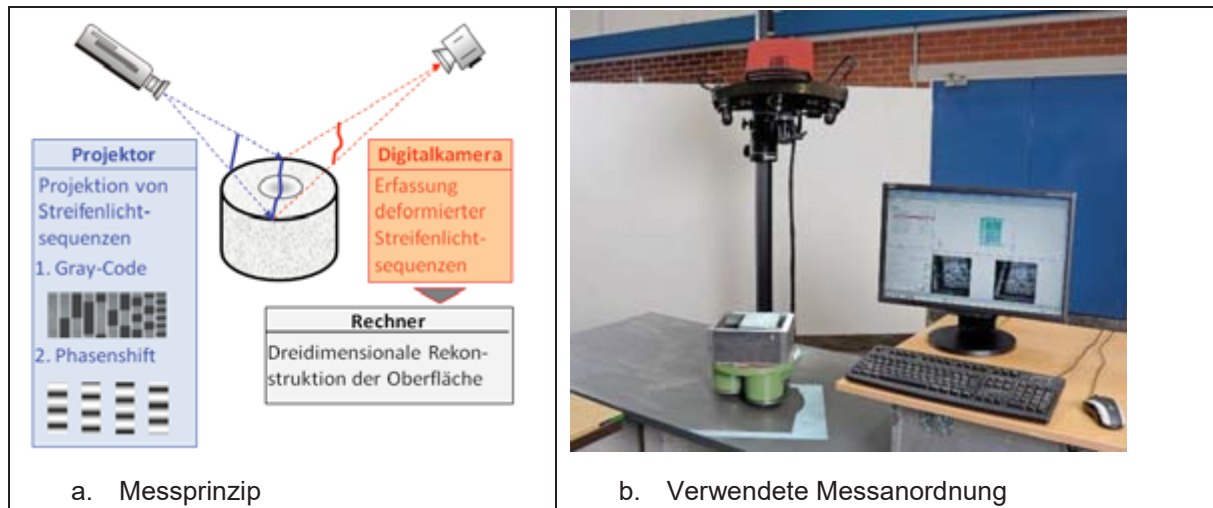


Bild 4: Messaufbau der Photogrammetrie für die Visualisierung der Abwitterung auf der Betonprüf- fläche

Als problematisch erwies sich bei der vorstehend beschriebenen verfahrensspezifischen Vorgehensweise in der Praxis, dass die auf der Prüffläche der Prüfkörper applizierten Referenzmarker durch die Erhöhung der ursprünglich vorgesehenen Inspektionsintervalle von einem auf zwei Jahre abgewittert wurden. Deshalb war es nicht möglich, wie ursprünglich vorgesehen, die zu den einzelnen Inspektionszeitpunkten nachmodellierten virtuellen Oberflächentexturen der Prüffläche direkt zueinander auszurichten. Aus diesem Grunde wurde alternativ eine Best-Fit-Ebene durch die Oberfläche der Prüffläche gelegt und der Abstand jedes einzelnen Bildpunktes der Prüffläche zu dieser Ebene ermittelt und farbcodiert über der Fläche dargestellt. Dies ermöglicht zu mindestens eine quantitative Analyse der Oberflächentopografie der frei bewitterten Prüffläche. Das wiederum erlaubt Rückschlüsse auf die Veränderung der Rauigkeit der Prüffläche. Einen Eindruck vom so erreichten Erkenntnisgewinn vermittelt das Bild 5 exemplarisch für den auf dem Mittelstreifen der B2 ausgelagerten Betonprüfkörper XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1) im Auslagerungszeitraum von 2010 bis 2018. So ermöglicht das zusätzlich zur Fotografie photogrammetrisch ermittelte 3D-Oberflächenprofil im jeweiligen Inspektionsjahr eine bessere Lokalisierung der abgewitterten Bereiche der Prüffläche. So ist erkennbar, dass sich deren Anzahl und laterale Ausdehnung signifikant von 2010 bis 2018 erhöhte. Zusätzlich erlaubt die lokale farbcodierte Angabe des Abstands der Oberfläche der Prüffläche zur Best-Fit-Ebene und ihre Häufigkeitsverteilung links neben der Farbskala eine halbquantitative Tiefenabschätzung der Oberflächentopografie. Es ist erkennbar, dass der Betonabtrag in den abgewitterten Bereichen ungleichmäßig ist und lokal Höhendifferenzen von bis zu 2 mm erreicht werden.


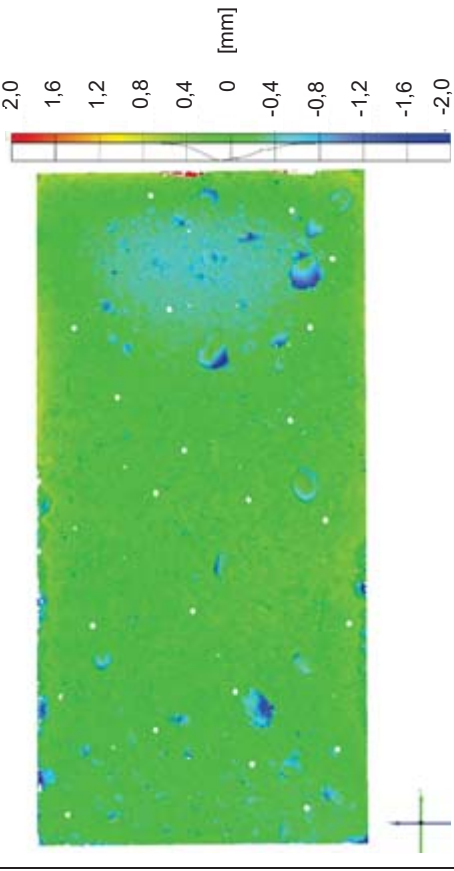


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		

Bild 5: Quantitative Bewertung der Veränderung der Oberflächentopografie der Prüfläche mittels Photogrammetrie am Beispiel des auf dem Mittelstreifen der B2 ausgelagerten Betonprüfkörpers XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1) im Auslagerungszeitraum von 2010 bis 2018

Nach der visuellen und photogrammetrischen Beurteilung der Abwitterung der Prüffläche wurde der innere Gefügestand der Prüfkörper mittels Ultraschallmessungen in Transmissionsanordnung untersucht (Bild 6). Hierfür gelangte das Ultraschallmesssystem UKS-D der Firma GEOTRON ELEKTRONIK zum Einsatz. Gemessen wurde mit den Dehnwellenprüfköpfen UPG-D (Sender) und UPE-D (Empfänger) im Frequenzbereich von 20 bis 80 kHz. Die Ultraschallmessungen am Prüfkörper erfolgten in vier Messebenen parallel zur Prüffläche (Bild 7). Der Abstand der jeweiligen Messebene zur Prüffläche betrug dabei 20, 40, 75 und 110 mm. In der jeweiligen Messebene erfolgte die Durchschallung an mehreren Messpunkten in Quer- und Längsrichtung. So wurden in jeder Messebene in Querdurchschallung sieben bzw. fünf Einzelmessungen (XF3- und XF4-Prüfkörper) durchgeführt. In Längsrichtung beschränkten sich bei den XF3- und XF4-Prüfkörpern die Einzelmessungen auf drei. Die in den einzelnen Messebenen in Quer- und Längsdurchschallung gewonnenen Einzelergebnisse wurden, wie in den Tabellen 4.1 und 4.2 exemplarisch dargestellt, jeweils gemittelt und bilden die Basis für die im nachstehenden Abschnitt 5 dargestellten Diagramme.

Die Ankopplung der Prüfköpfe an den abgedichteten Seitenflächen der Prüfkörper erfolgte ohne Koppelmittel. Zur Schaffung reproduzierbarer Verhältnisse bei der Ankopplung wurden die Prüfköpfe mit einer definierten Anpresskraft an den Prüfkörper gedrückt. Realisiert wurde dies mit einer speziellen pneumatischen Anpressvorrichtung. Die reproduzierbare Positionierung der Ultraschallprüfköpfe wurde mit Schablonen sichergestellt.

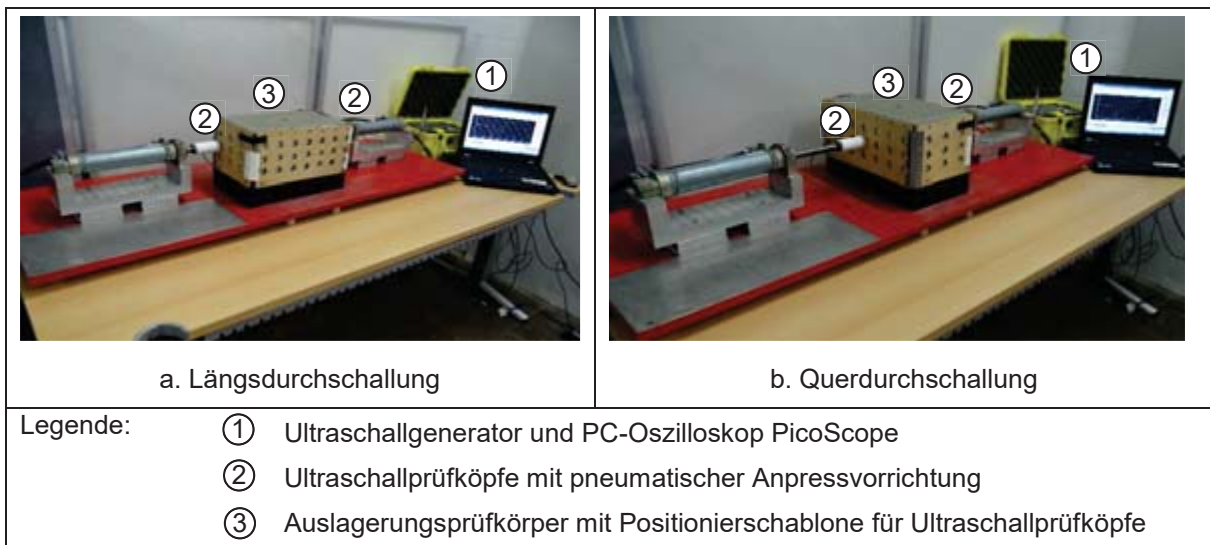


Bild 6: Ultraschallmessanordnung

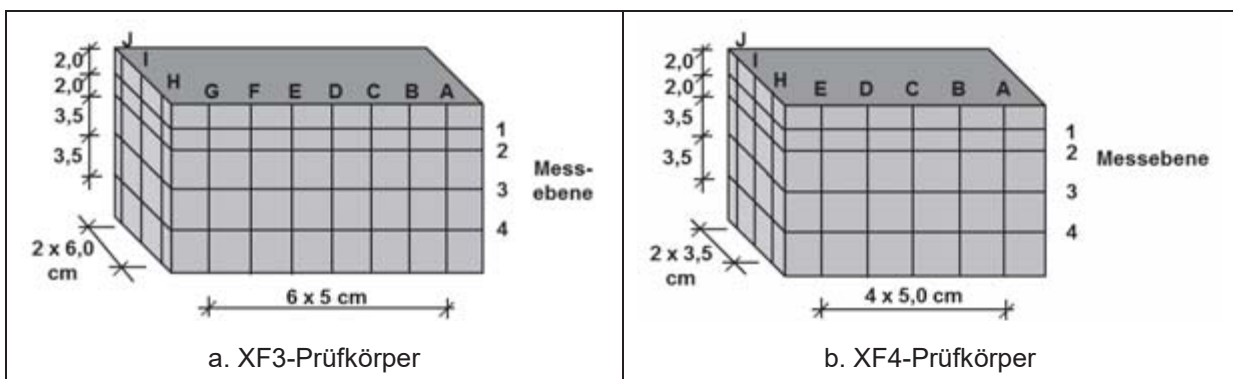


Bild 7: Positionierung der Ultraschallprüfköpfe bei Einzelmessungen an Auslagerungsprüfkörpern

Tabelle 4.1: Ergebnis der Ultraschallmessungen am Auslagerungsprüfkörper XF3-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1) in Querdurchschallung unmittelbar vor der Auslagerung



Messanordnung		Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]							Mittelwert
Durchschallungsrichtung	Messebene	Einzelmessung bei							
		A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F	G-G	
 Querdurchschallung	1	4819,3	4773,3	4807,7	4773,3	4773,3	4773,3	4802,0	4788,9
	2	4807,7	4750,6	4728,1	4750,6	4717	4819,3	4842,6	4773,7
	3	4728,1	4672,9	4694,8	4694,8	4717	4784,7	4705,9	4714,0
	4	4587,2	4618,9	4597,7	4597,7	4535,1	4566,2	4587,2	4584,3

Tabelle 4.2: Ergebnis der Ultraschallmessungen am Auslagerungsprüfkörper XF3-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1) in Längsdurchschallung unmittelbar vor der Auslagerung

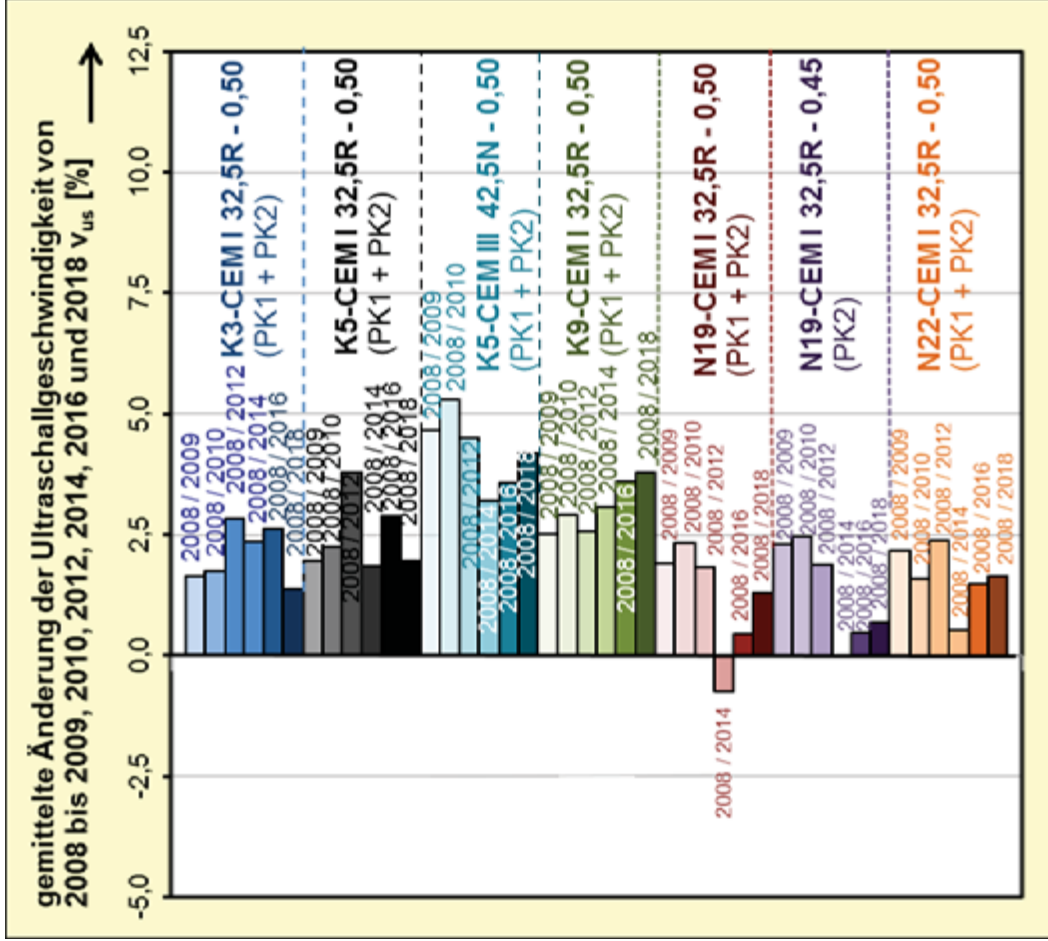
Messanordnung		Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]			
Durchschallungsrichtung	Messebene	Einzelmessung bei			Mittelwert
		H-H	I-I	J-J	
 Längsdurchschallung	1	4477,6	4437,9	4518,1	4477,9
	2	4424,8	4392,4	4418,3	4411,8
	3	4379,6	4418,3	4379,6	4392,5
	4	4243,3	4418,3	4245,9	4302,5

5 Ergebnisse und deren Auswertung

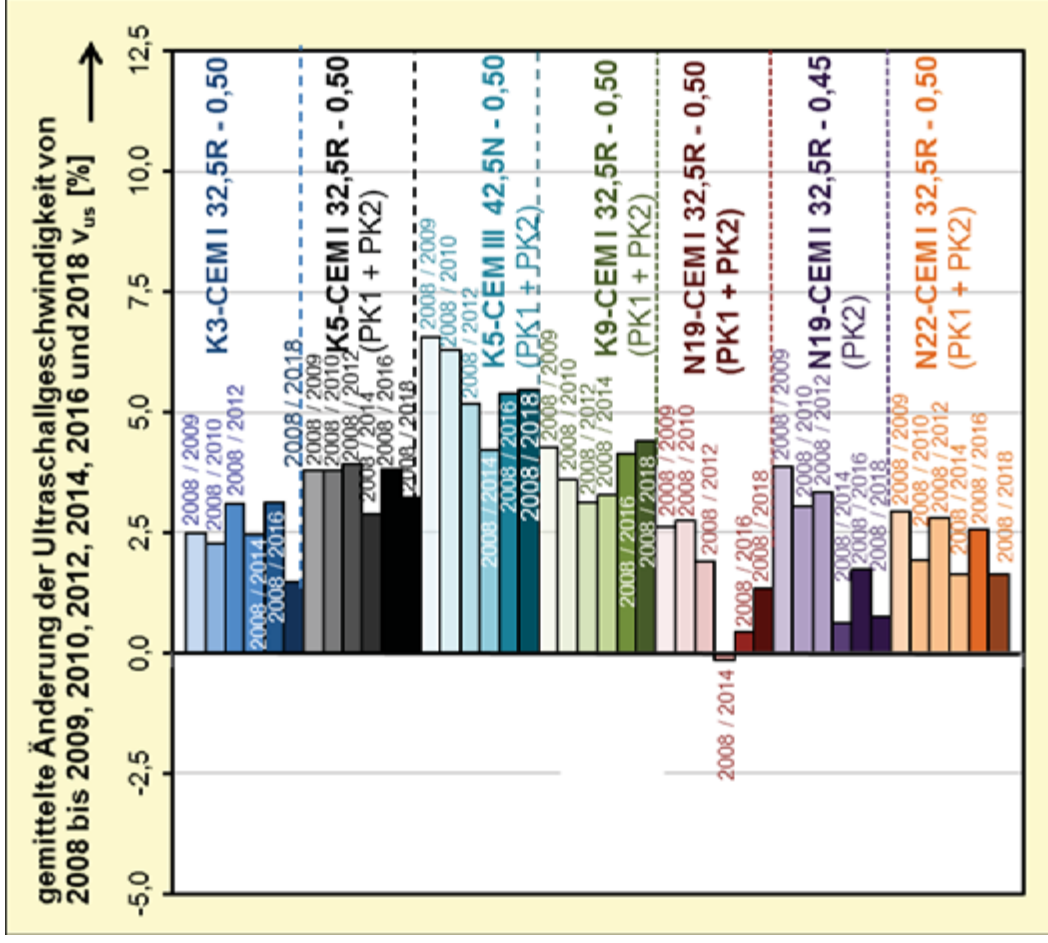
5.1 Auslagerungsprüfkörper im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3)

Das maßgebende Bewertungskriterium ist bei dieser Expositionsklasse die innere Gefügeschädigung. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Ultraschallmessungen vorangestellt. So sind in den Bildern 8.1 bis 8.4 jeweils die prozentualen Veränderungen der mittleren Ultraschallgeschwindigkeit in den Jahren 2009, 2010, 2012, 2014, 2016 und 2018 gegenüber den jeweiligen Bezugswerten von 2008 für alle ausgelagerten Betonarten, in der Regel gemittelt über zwei Prüfkörper, dargestellt. Dabei werden jeweils vergleichend die Ergebnisse der Quer- und Längsdurchschallung in den einzelnen Messebenen betrachtet. Eine vergleichende Betrachtung der Ultraschallergebnisse in allen Messebenen und Durchschallungsrichtungen zeigt, dass die Ultraschallgeschwindigkeit bei allen Betonarten gegenüber den Referenzmessungen 2008 in den ersten Jahren der Auslagerung eine Zunahme erfährt. Ursächlich ist hierfür neben der moderaten Feuchtezunahme vor allem die Nachhydratation des Zementes. Die Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeit ist erwartungsgemäß bei den Auslagerungsprüfkörpern K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK1 + PK2) aufgrund des verwendeten Hochofenzements mit einem Maximalwert von ca. 5 % am stärksten ausgeprägt. Besonders bemerkenswert ist jedoch, dass die Ultraschallgeschwindigkeit bei allen ausgelagerten Prüfkörpern unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung im bisher betrachteten Auslagerungszeitraum von 10 Jahren in allen vier Messebenen und Durchschallungsrichtungen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit bei den Ultraschallmessungen keine signifikante Verminderung erfährt. Dies lässt den Schluss zu, dass alle hier ausgelagerten Prüfkörper

im betrachteten Auslagerungszeitraum keine signifikanten inneren Gefügeschädigungen erfahren haben.

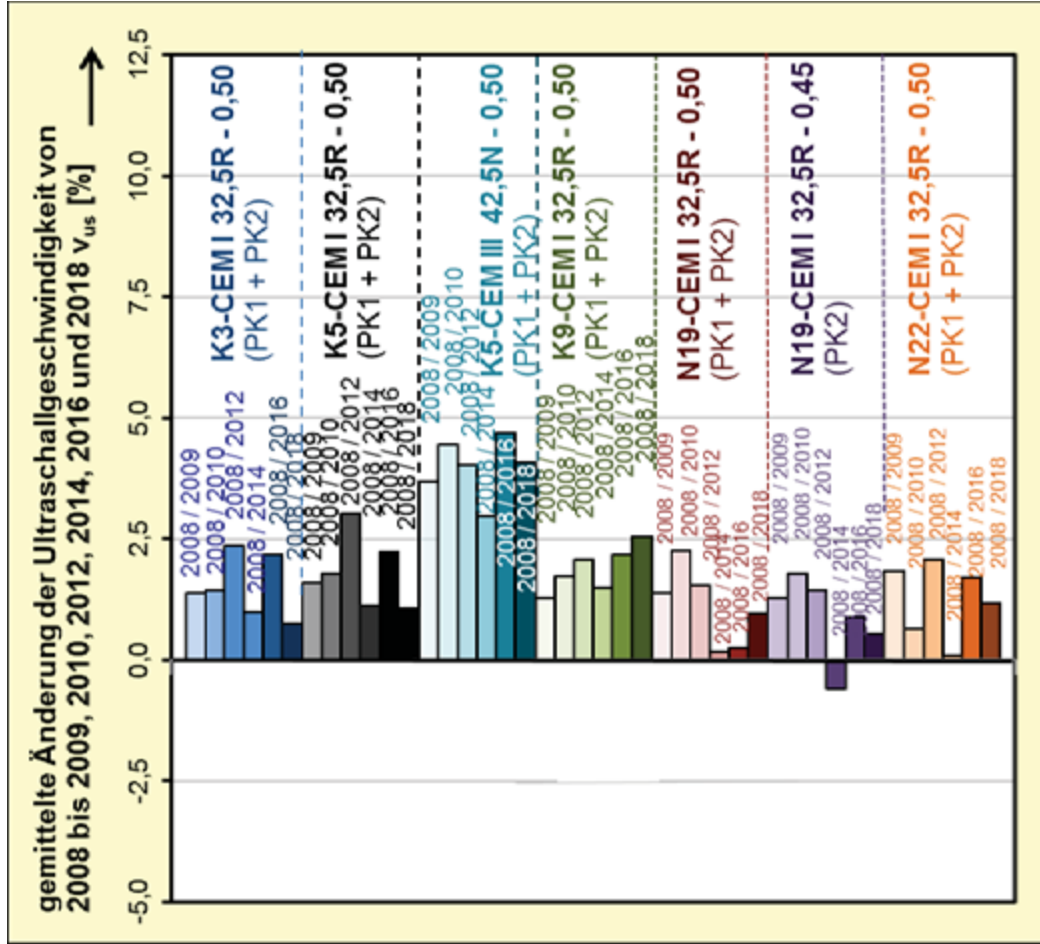


a. Querdurchschallung

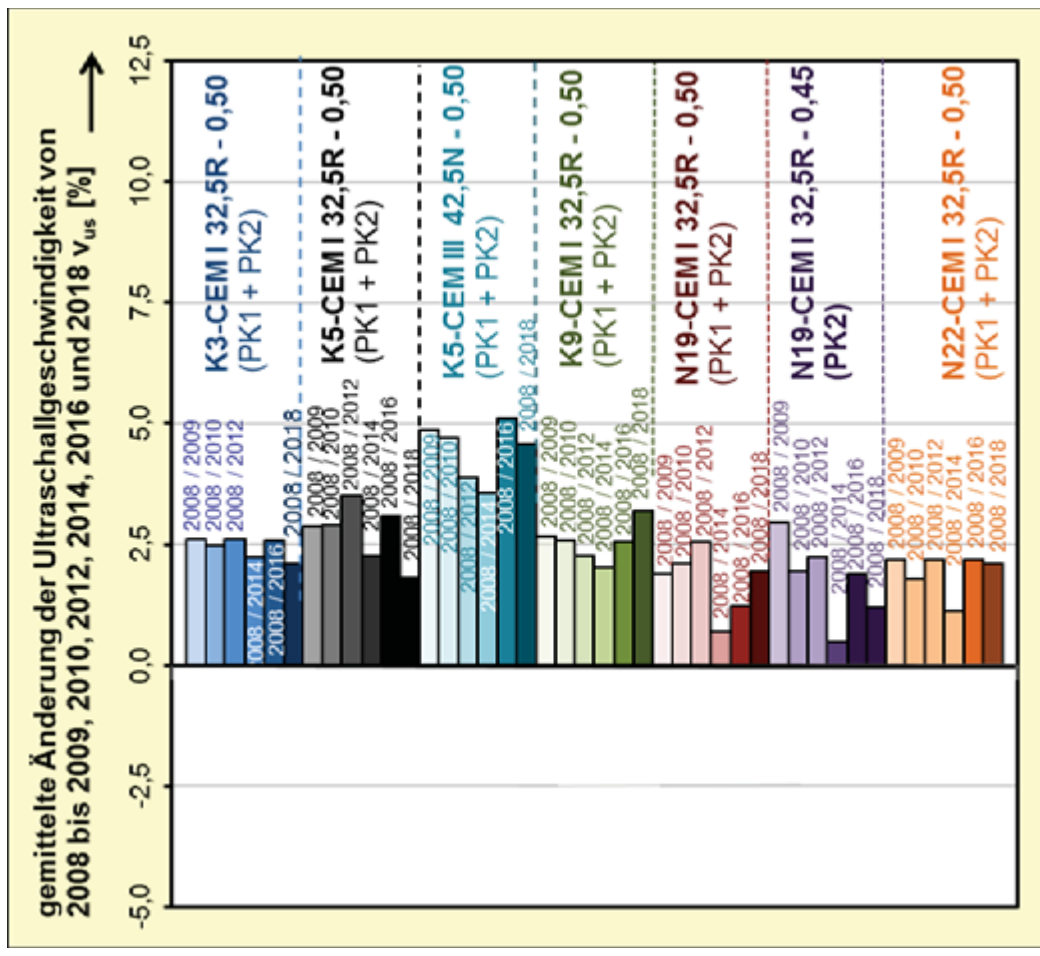


b. Längsdurchschallung

Bild 8.1: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben der Schleuse Hilpoltstein (XF3) in der Messebene in 20 mm Tiefe

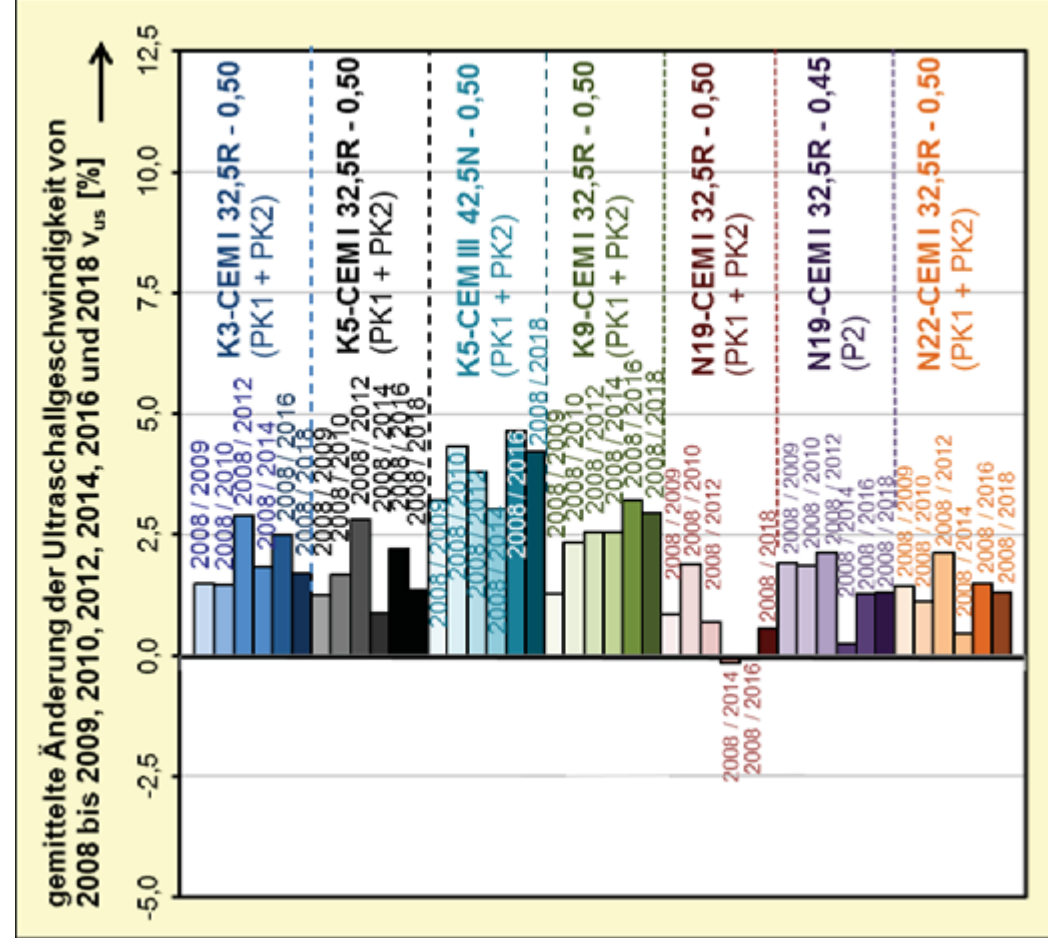


c. Querdurchschallung

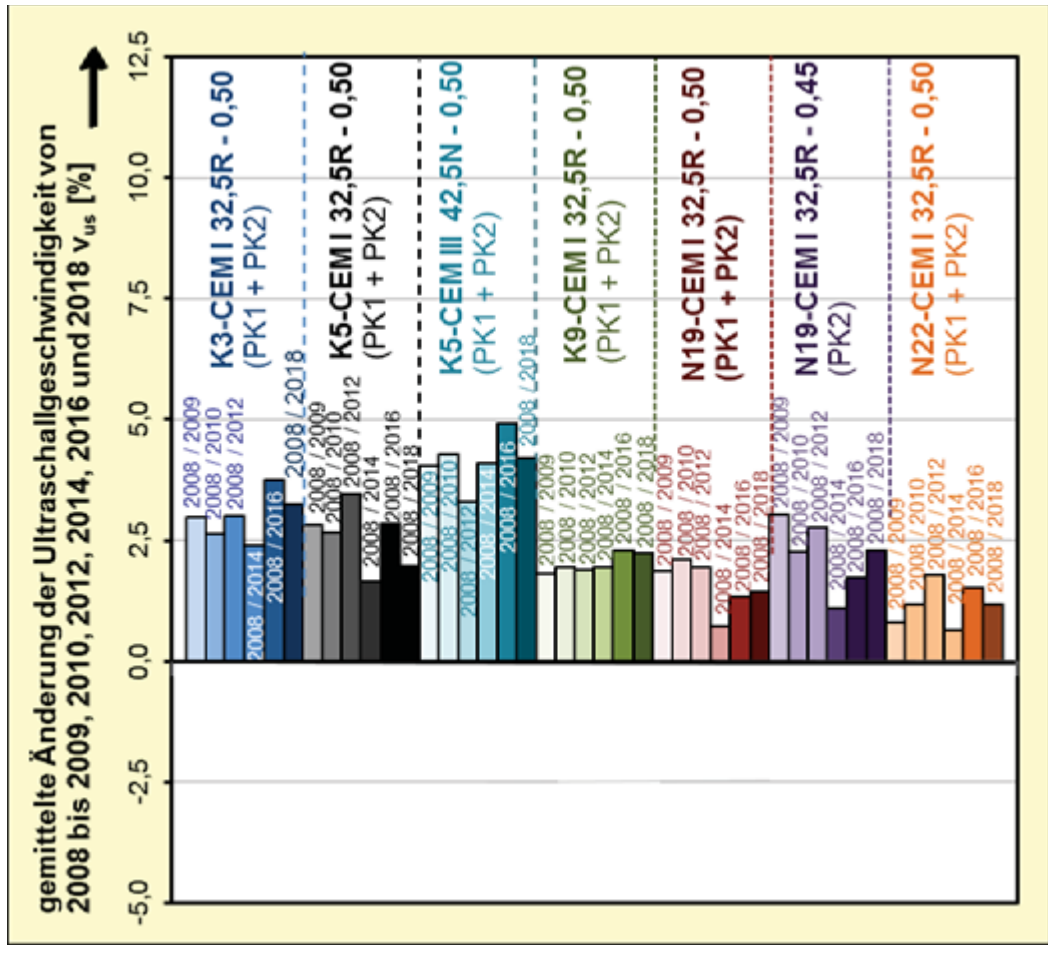


d. Längsdurchschallung

Bild 8.2: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben der Schleuse Hilpoltstein (XF3) in der Messebene in 40 mm Tiefe

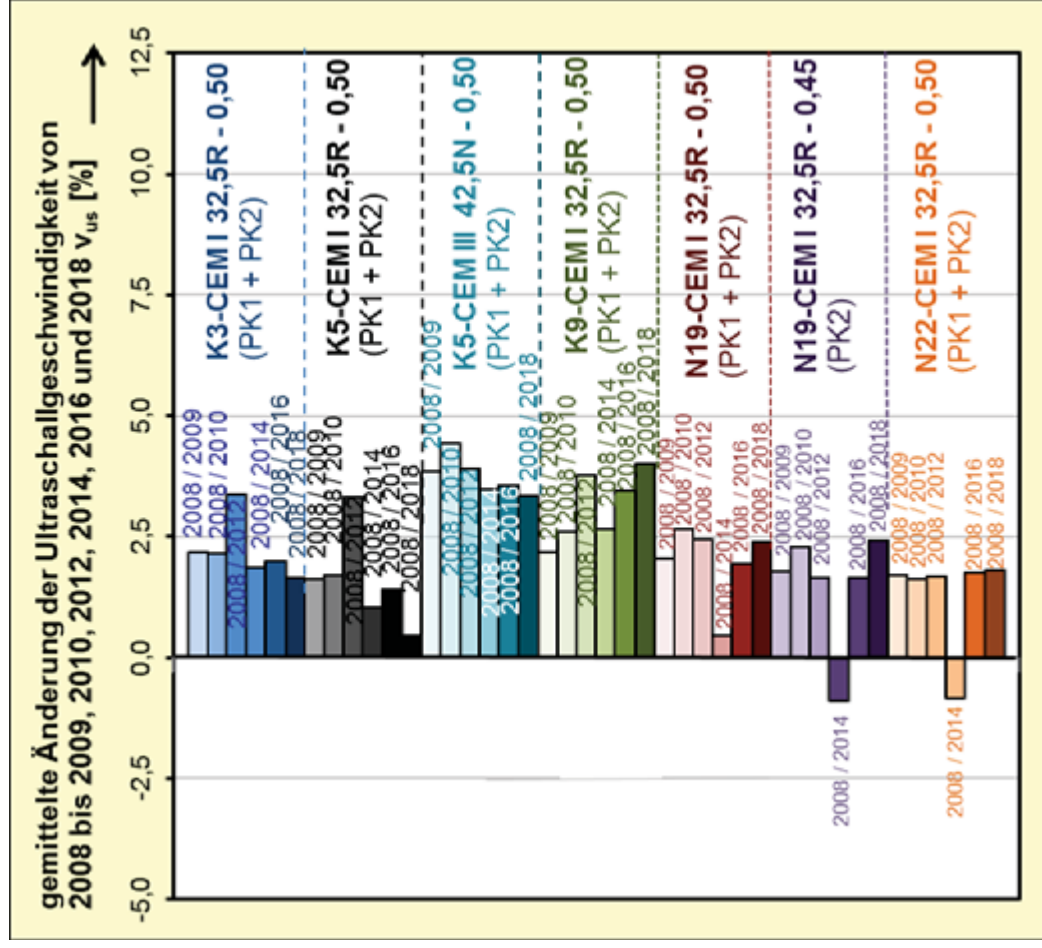


a. Querdurchschallung

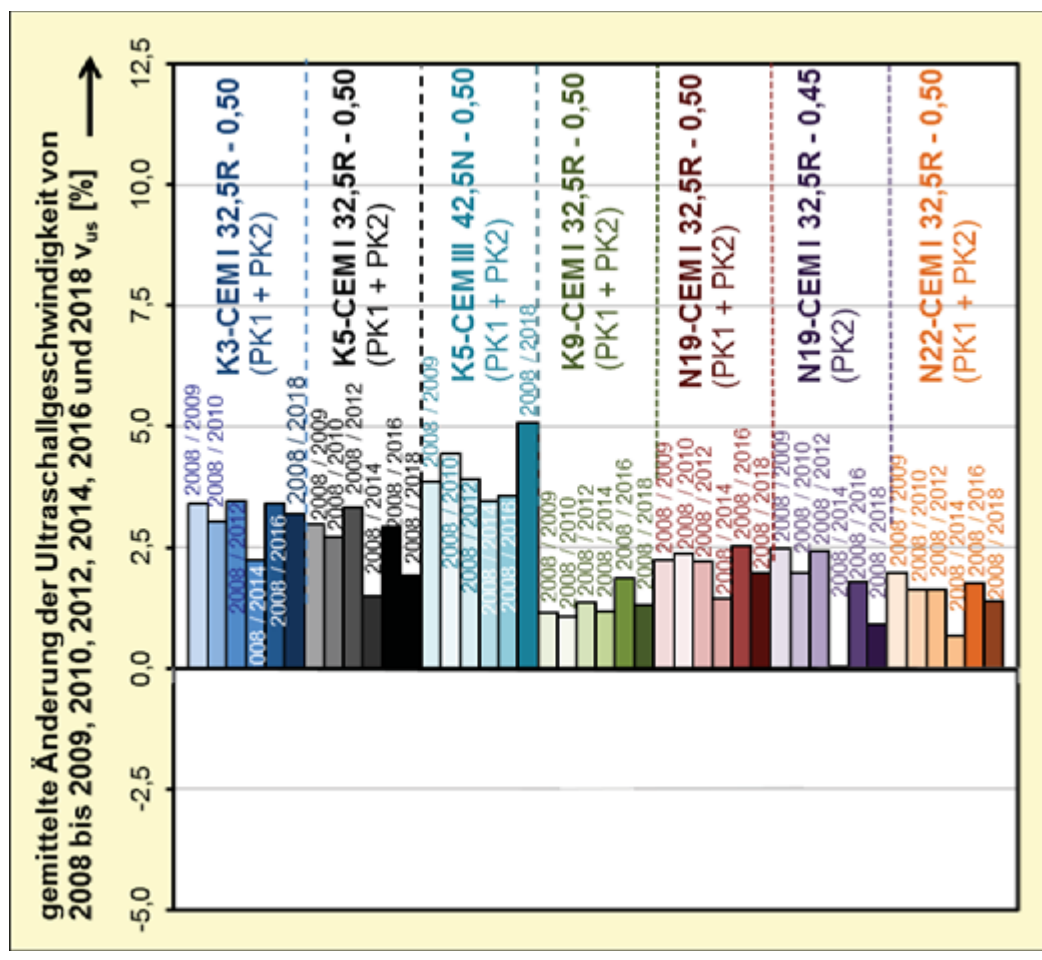


b. Längsdurchschallung

Bild 8.3: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben der Schleuse Hilpoltstein (XF3) in der Messebene in 75 mm Tiefe



a. Querdurchschallung



b. Längsdurchschallung

Bild 8.4: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben der Schleuse Hilpoltstein (XF3) in der Messebene in 100 mm Tiefe

Als sekundäres Bewertungskriterium wurde bei den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörpern (XF3) die äußere Gefügeschädigung der Prüffläche betrachtet. So zeigen die Bilder 9.1 bis 9.13 vergleichend die Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche für jeden hier ausgelagerten Betonprüfkörper exemplarisch für das Jahr 2010 und 2018. Zusätzlich ist in der Anlage A1 die zeitliche Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche jeder Auslagerungsprobe detailliert fotografisch dokumentiert. Eine vergleichende Betrachtung aller vorstehend aufgeführter Bilder im Haupttext sowie die Fotodokumentation in der Anlage A1 zeigen, dass bei allen ausgelagerten Betonprüfkörpern keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüffläche der einzelnen Betonprüfkörpern erkennbar ist.

Basierend auf den vorstehenden dargestellten Ergebnissen kann zu den in der Expositions-klasse XF3 ausgelagerten Betonprüfkörpern das Fazit gezogen werden, dass im bisher betrachteten Auslagerungszeitraum von zehn Jahren unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung, der Substitution der Zementart und dem abgesenkten w/z-Wert keine signifikanten inneren und äußeren Gefügeschädigungen auftreten. Dies steht partiell im Widerspruch zu den Ergebnissen der Frostprüfungen an der reinen Gesteinskörnung und am Beton im Labor. Deshalb stellt sich nun hinsichtlich der Übertragbarkeit der Laborprüfungen auf die Praxis die Frage, ob der bisher betrachtete Auslagerungszeitraum der Betonprüfkörper die Frostbeanspruchung im Labor hinreichend widerspiegelt. Zur Beantwortung dieser Frage sollten die Auslagerungsversuche der Betonprüfkörper in der Expositions-klasse XF3 fortgeführt werden.

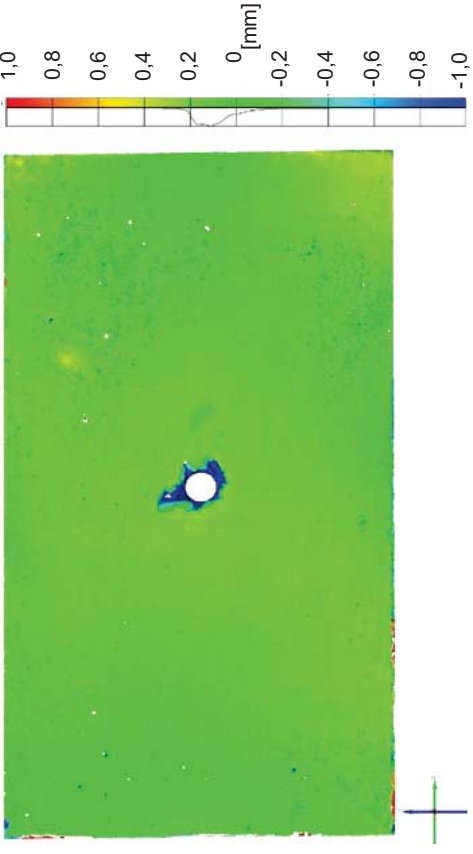
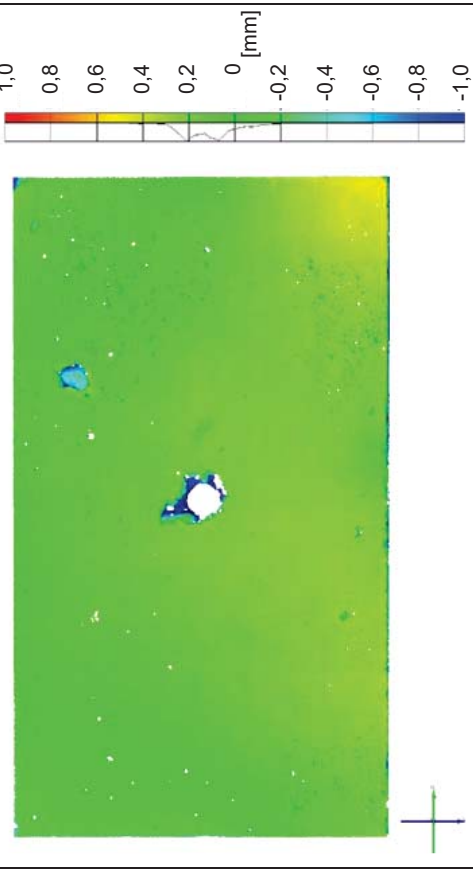


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.1: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **X3-K3-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1)

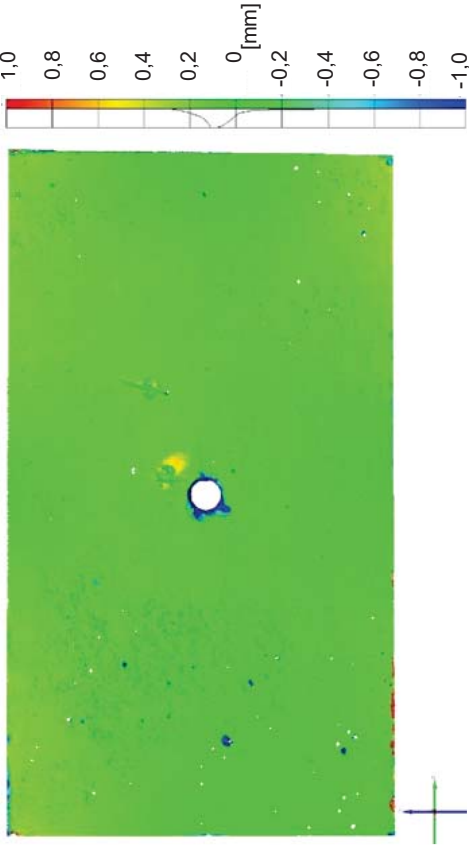
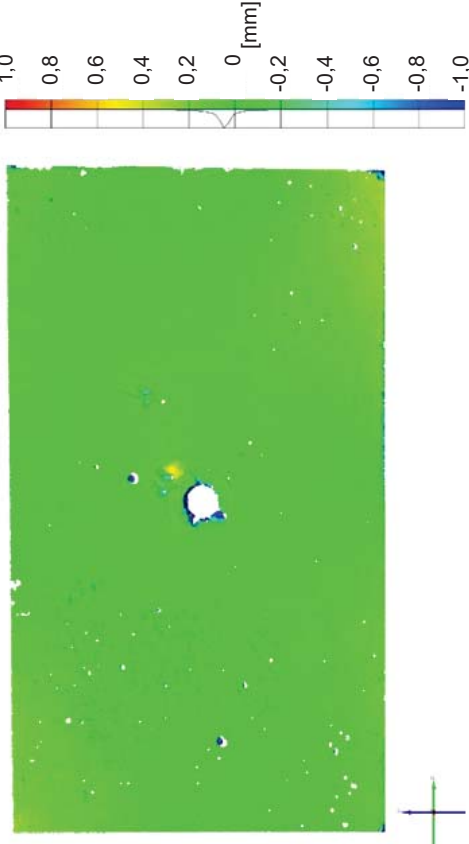


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüffläche im betrachteten Auslagerungszeitraum		

Bild 9.2: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 2)**

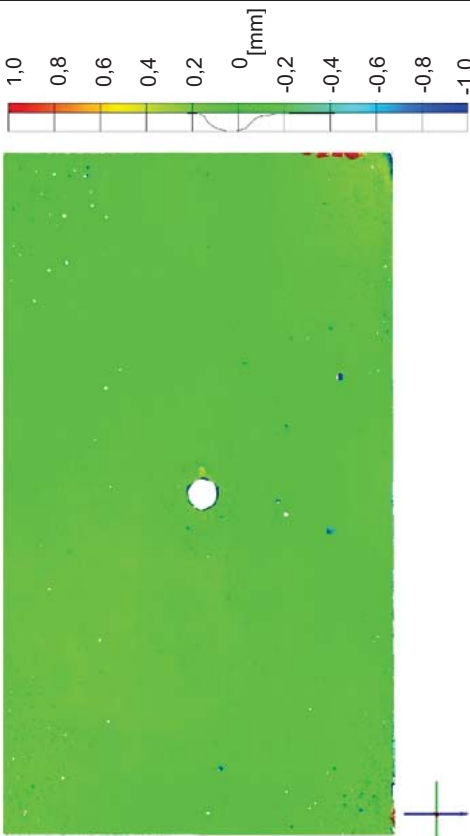
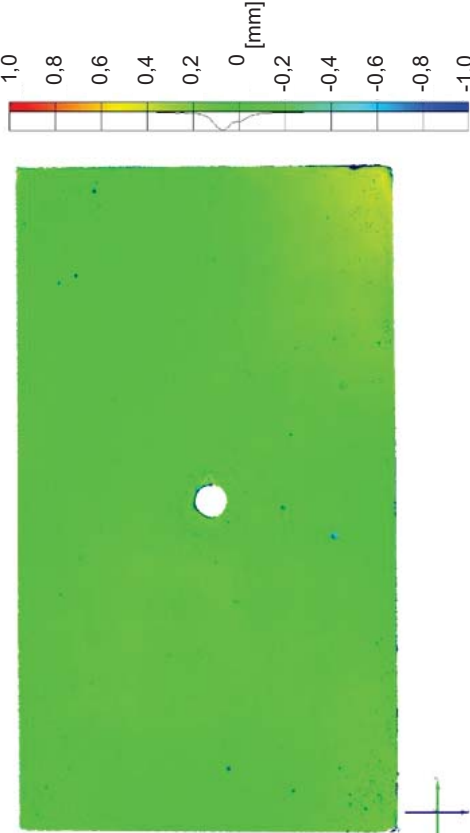






	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum		

Bild 9.3: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1)**

	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene	 <p>3D surface profile of the hole in 2010. The image shows a circular hole with a depth of approximately 0.2 mm. A color scale on the right indicates height in millimeters, ranging from -1.0 (blue) to 1.0 (red). A small crosshair is visible in the bottom right corner.</p>	 <p>3D surface profile of the hole in 2018. The image shows a circular hole with a depth of approximately 0.2 mm. A color scale on the right indicates height in millimeters, ranging from -1.0 (blue) to 1.0 (red). A small crosshair is visible in the bottom right corner.</p>
Fotografie	 <p>Photograph of the hole in 2010. The hole is circular and appears to be filled with a dark material. A ruler is visible on the right side of the image for scale.</p>	 <p>Photograph of the hole in 2018. The hole is circular and appears to be filled with a dark material. A ruler is visible on the right side of the image for scale.</p>
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p> <p>Bild 9.4: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper XF3-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 2)</p>		

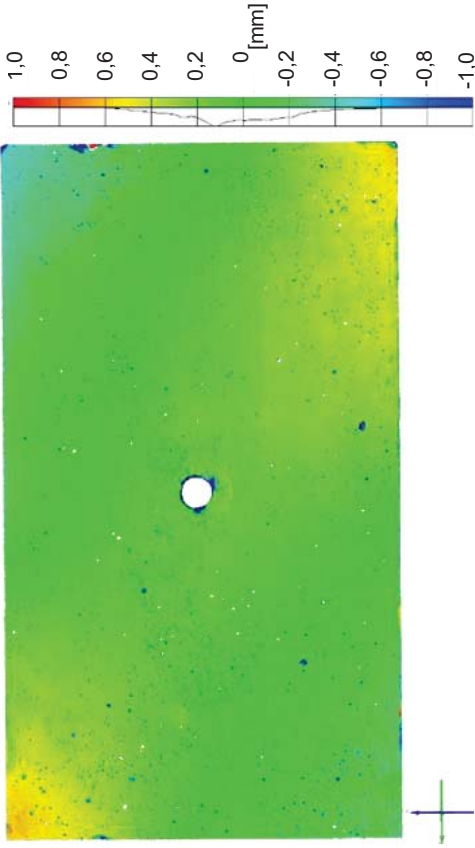
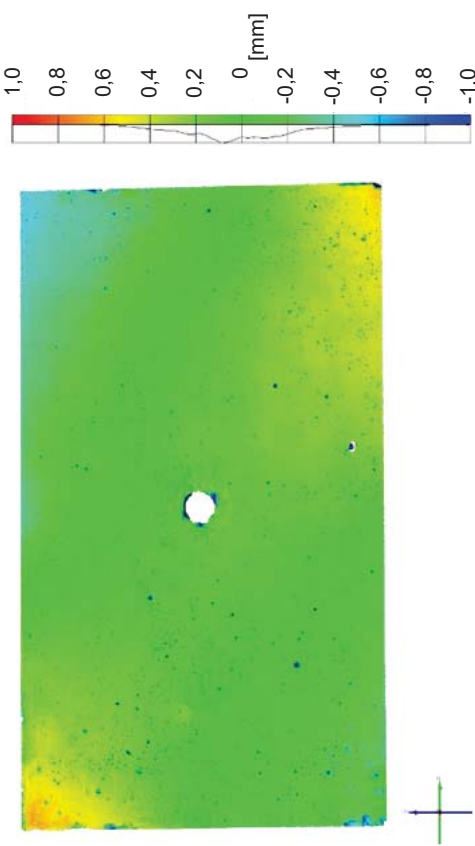

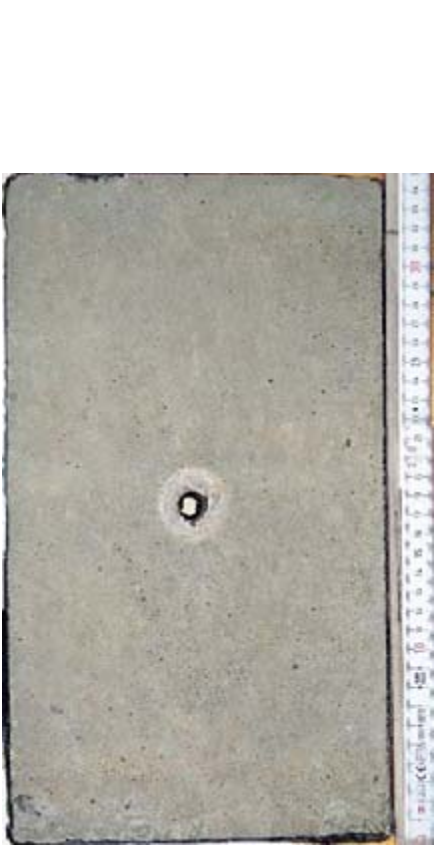
	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum		

Bild 9.5: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK 1)**

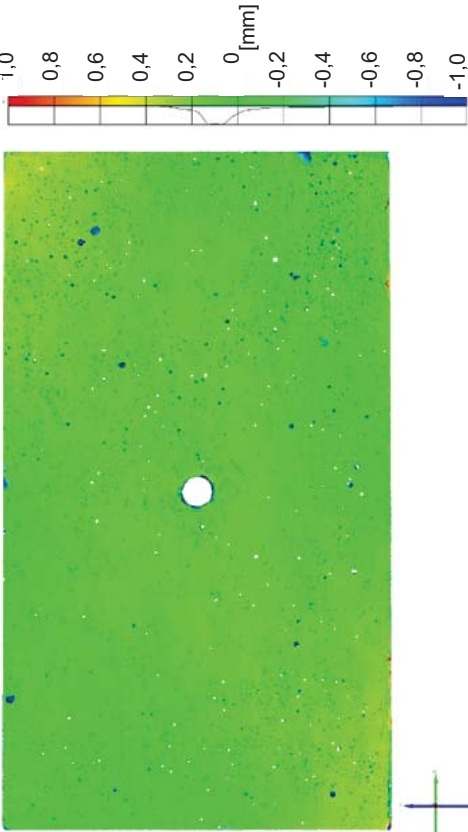
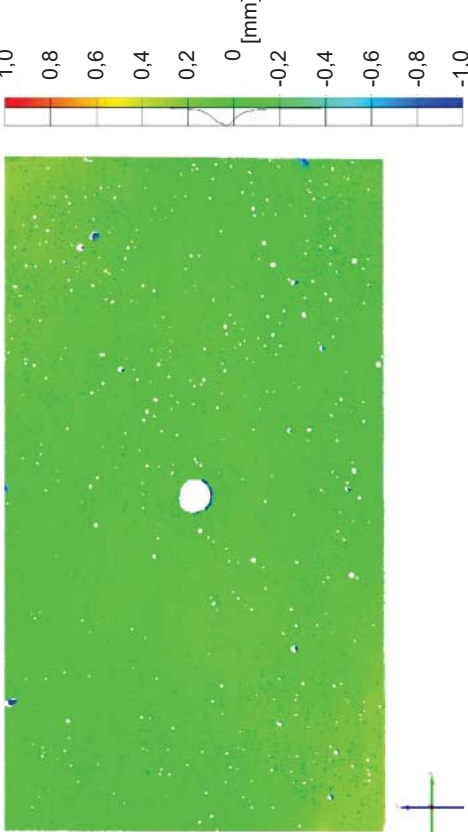


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum		

Bild 9.6: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK 2)**

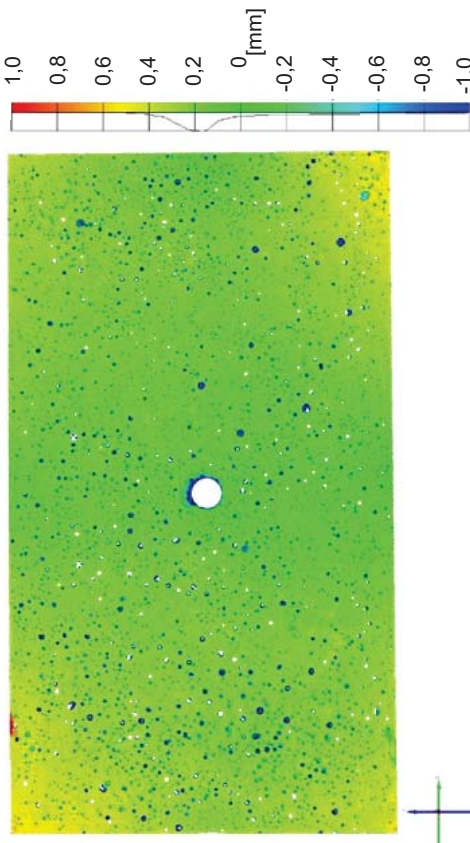
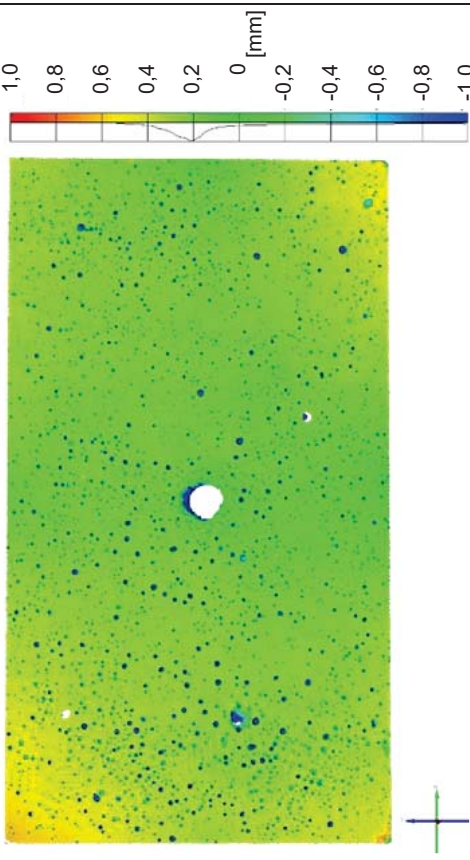


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.7: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)**

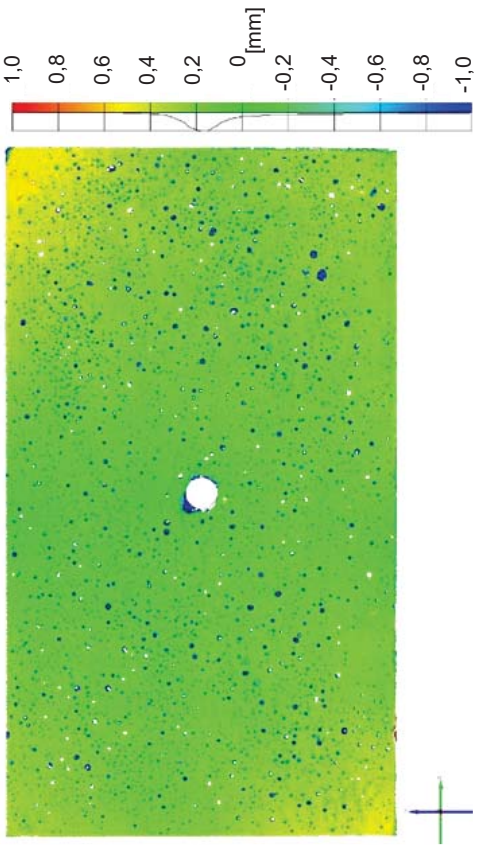
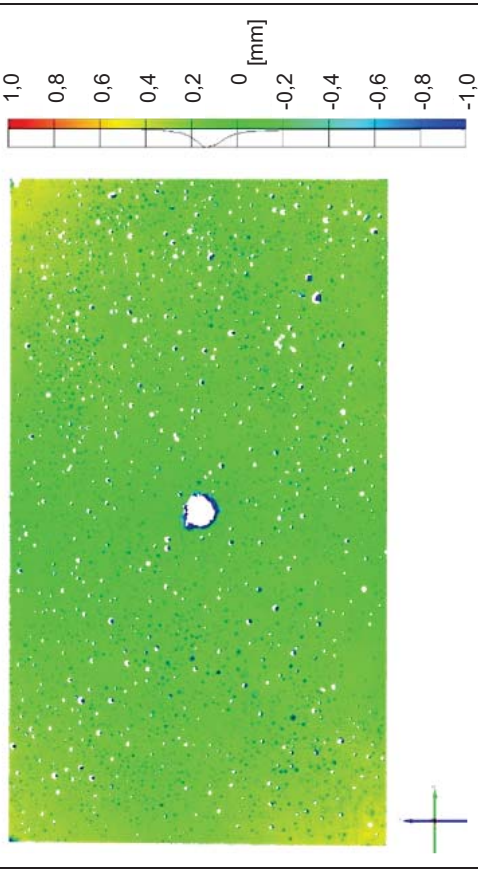


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüffläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.8: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)**

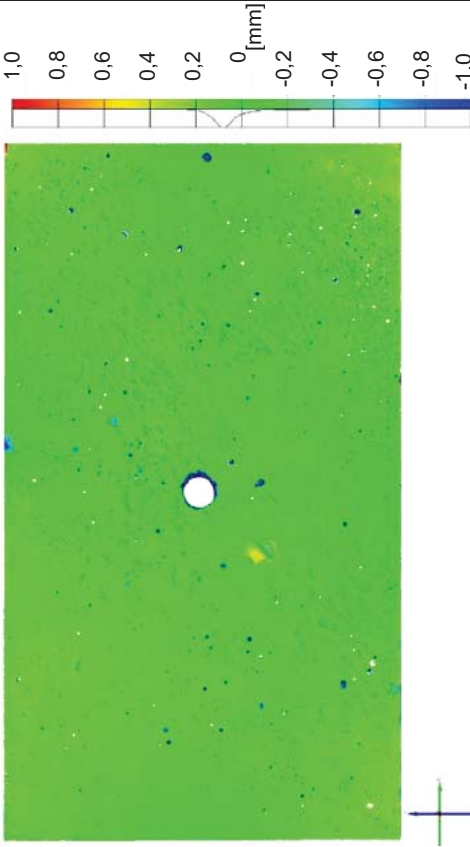
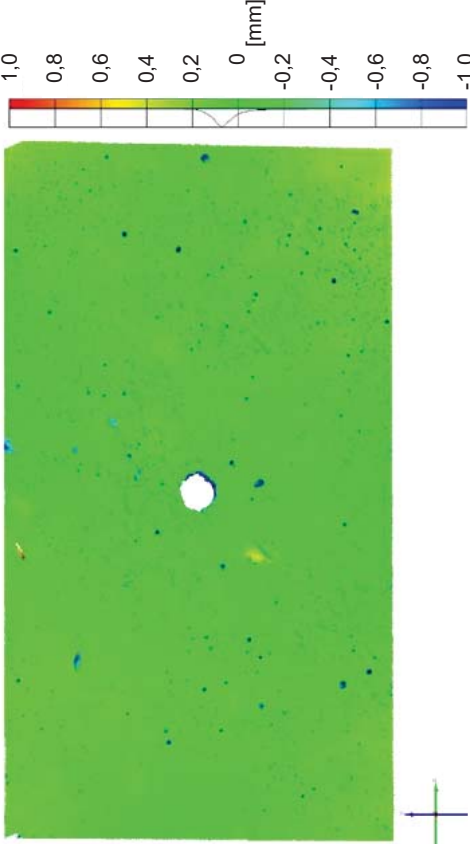


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.9: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)**

	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüffläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.10: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)**

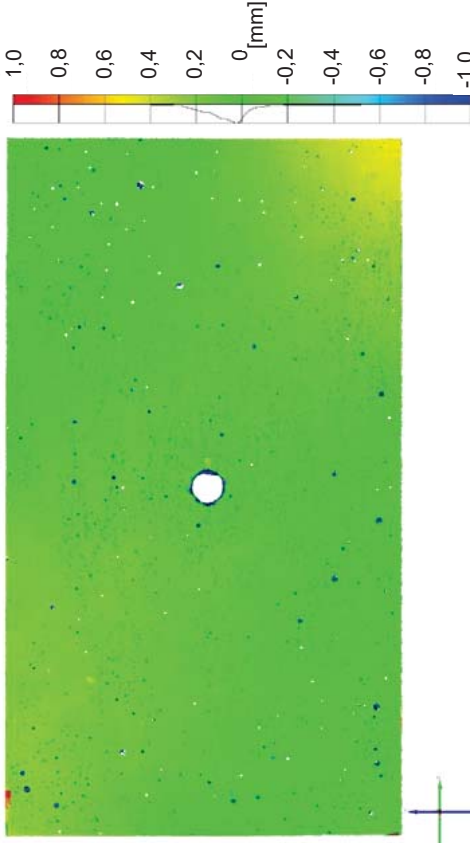
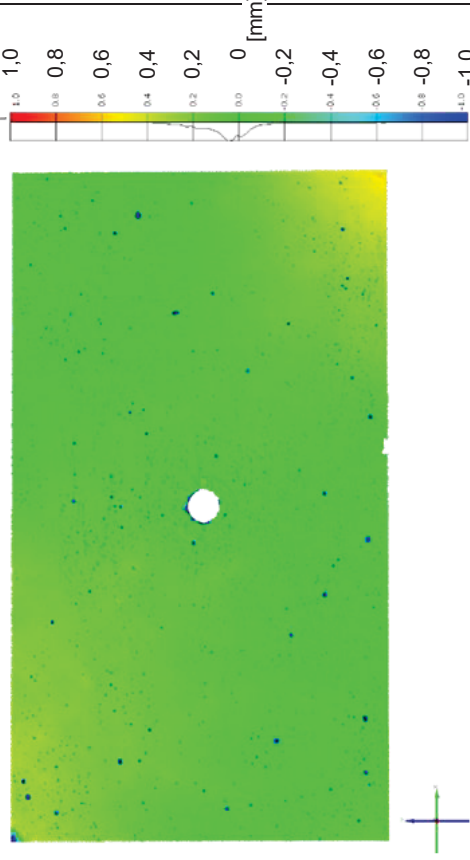


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüffläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.11: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-N19-CEM I 32,5R - 0,45 (PK2)**

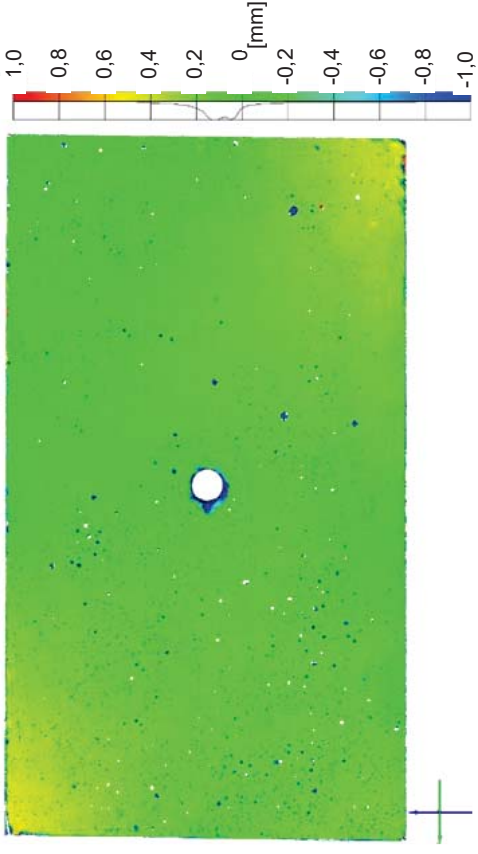
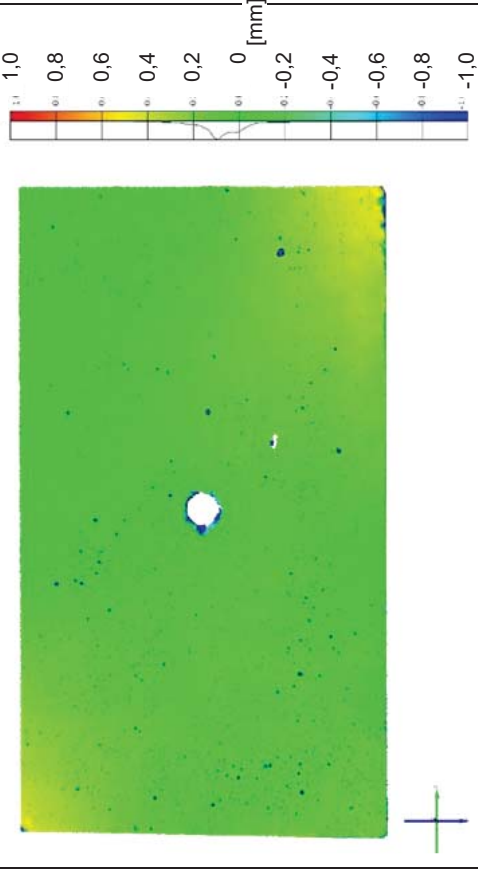
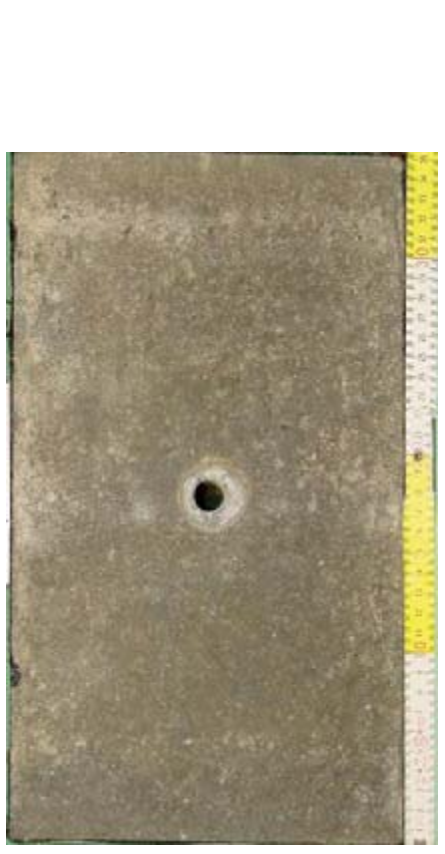

	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.12: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)**

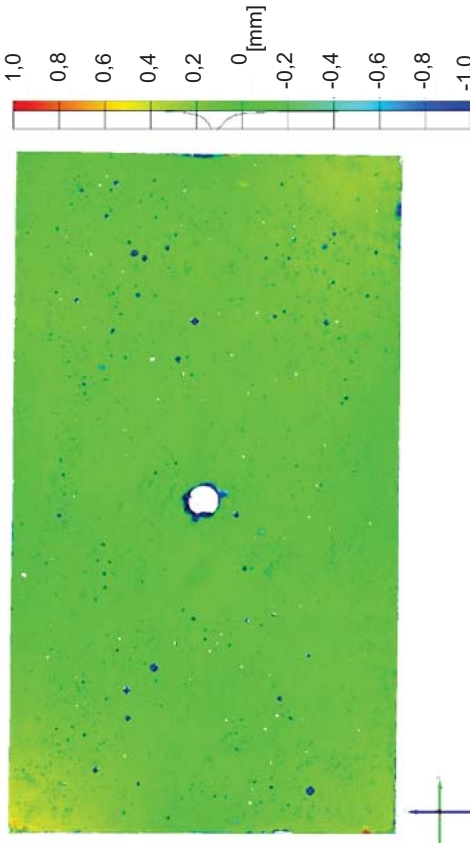
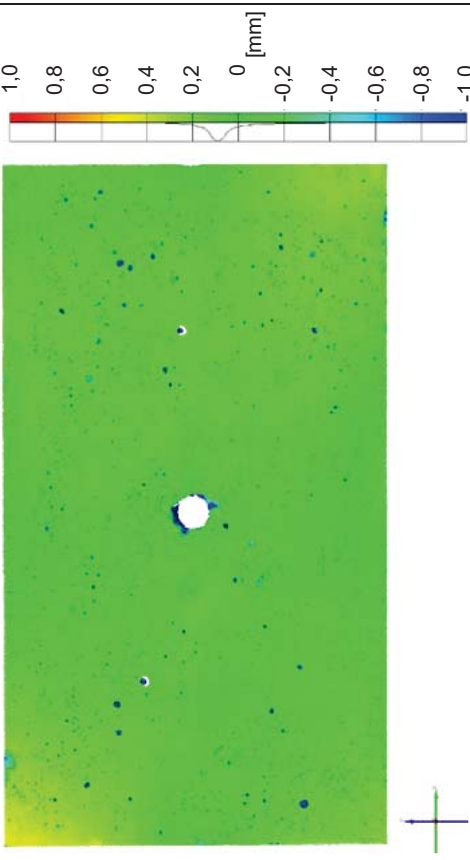


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: keine signifikanten Abwitterungen auf der Prüfläche im betrachteten Auslagerungszeitraum</p>		

Bild 9.12: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüfläche im Jahr 2010 / 2018 für den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörper **XF3-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK2)**

5.2 Auslagerungsprüfkörper auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant (XF4)

Das maßgebende Bewertungskriterium ist in dieser Expositionsklasse die äußere Gefügeveränderung. Aus diesem Grund wird zunächst die Abwitterung der Prüffläche bei den hier ausgelagerten Betonprüfkörpern betrachtet. Aufschluss über die Abwitterung der einzelnen Prüfkörper im Auslagerungszeitraum von 2008 bis 2018 geben die Bilder 10.1 bis 10.7. So ist dort jeweils vergleichend das Ergebnis der photogrammetrischen Analyse und das Foto der Prüffläche des Betonprüfkörpers für das jeweilige Inspektionsjahr dargestellt. In der Regel werden dabei vergleichend die Inspektionsjahre 2010 und 2018 betrachtet. Das geschieht vor dem Hintergrund, dass bei den ausgelagerten Betonprüfkörpern XF4-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1), XF4-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1), XF4-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1), XF4-N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1), XF4-N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK 1) und XF4-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1) die Abwitterungen über den ganzen Auslagerungszeitraum so gering sind, dass eine höhere zeitliche Auflösung der Abwitterung keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringt. Anders ist dies bei den Betonprüfkörper XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1) und XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK 1). So ist bei diesen in den zweijährigen Inspektionsintervallen eine zunehmende moderate Abwitterung über den Auslagerungszeitraum erkennbar. Sie ist gekennzeichnet durch einen partiellen Abtrag des Zementsteins bzw. Feinmörtels auf der Prüffläche mit einer teilweisen Freilegung der oberflächennahen Gesteinskörnung. Es zeigt sich, dass der Abtrag des Zementsteins bzw. Feinmörtels in den abgewitterten Bereichen ungleichmäßig ist und lokal maximale Höhendifferenzen von 2 mm erreicht werden. Ursächlich für die gegenüber den anderen ausgelagerten Betonprüfkörpern erhöhte moderate Abwitterung liegt bei den Betonprüfkörper XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK 1) in der Substitution des Portlandzementes durch einen Hochofenzement begründet. Bei den anderen Betonprüfkörper XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1) hingegen konnte die Ursache für die erhöhte moderate Abwitterung bei der Auslagerung nicht ermittelt werden. So verhielt sich der Kies K3 gegenüber K5 und K9 in den reinen Gesteinskörnungsprüfungen mittels Kristallisationsversuchen und dem Frost-Tausalz-Versuch im Labor unauffällig [4]. Analoges gilt für sein Verhalten in dem mit dem Portlandzement hergestellten Beton beim CDF-Versuch [5].

Abschließend sei zu dem Bewertungskriterium Abwitterung bei den ausgelagerten Betonproben darauf verwiesen, dass ergänzend die zeitliche Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüffläche jeder Auslagerungsprobe in der Anlage A2 auf je einer Seite zusammenfassend fotografisch dokumentiert wurde.


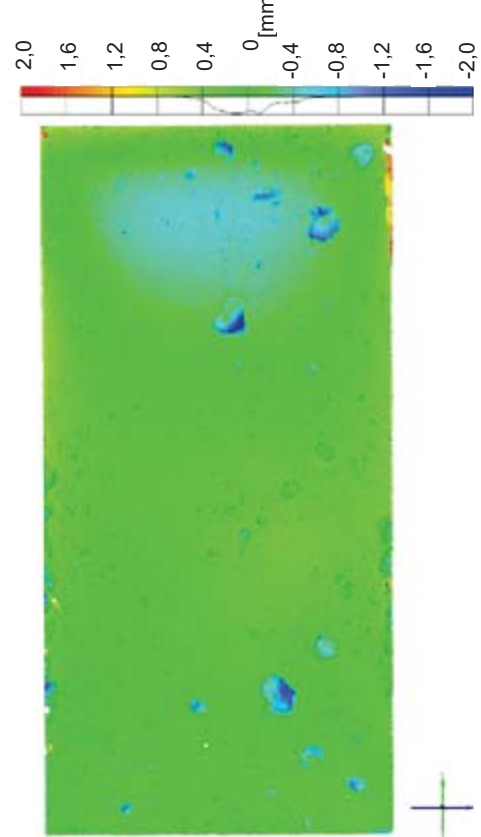


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2012
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: moderate partielle Abwitterung des Zementsteins/Feinmörtels der Prüffläche mit teilweiser Freilegung oberflächennaher Gesteinskörnung von 2008 - 2012		

Bild 10.1a: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2012 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1)

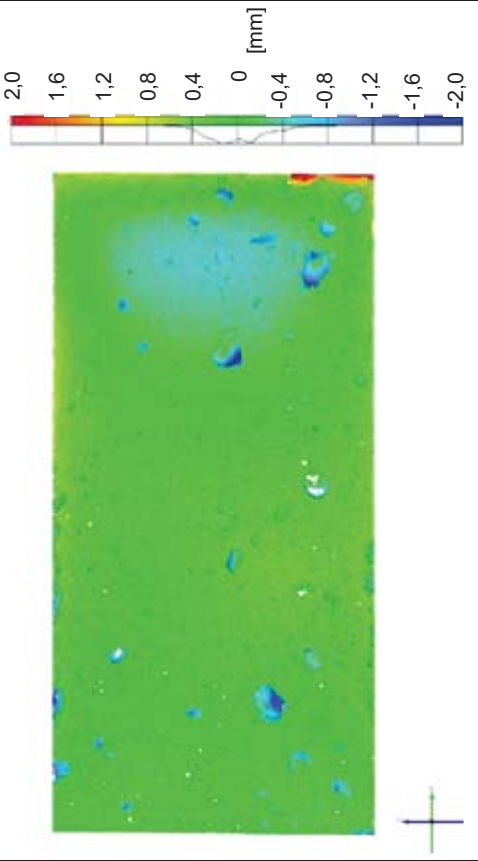
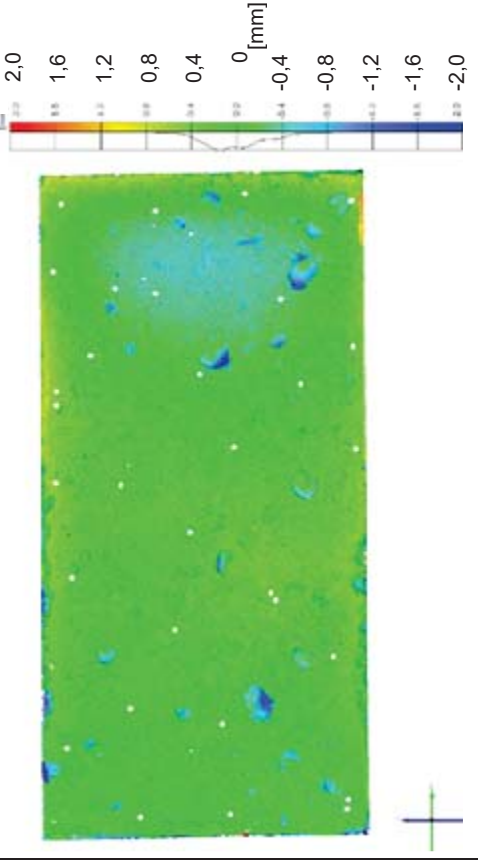


	Aufnahmejahr 2014	Aufnahmejahr 2016
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen:	moderate partielle Abwitterung des Zementsteins/Feinmörtels der Prüffläche mit teilweiser Freilegung oberflächennaher Gesteinskörnung von 2008 - 2016	

Bild 10.1b: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2014 / 2016 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1)

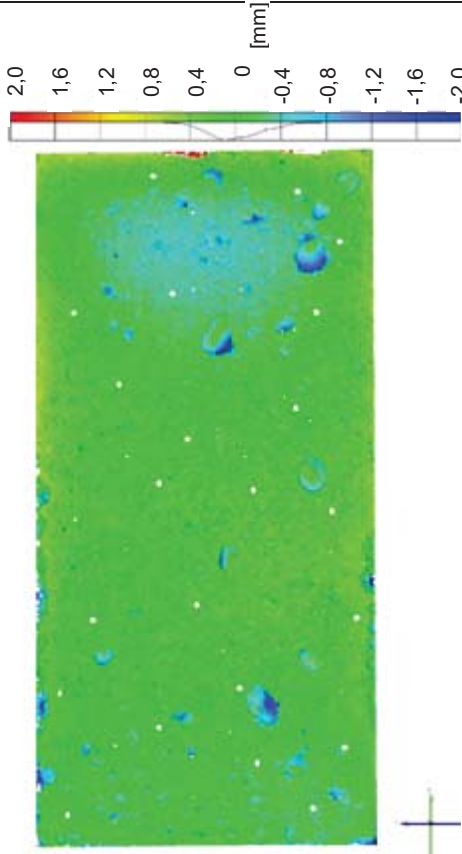

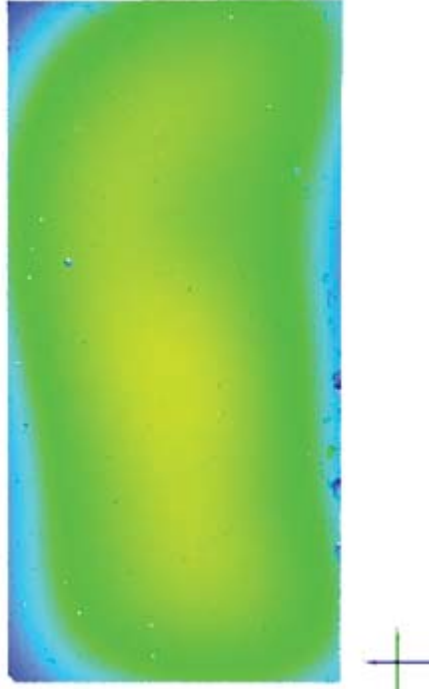
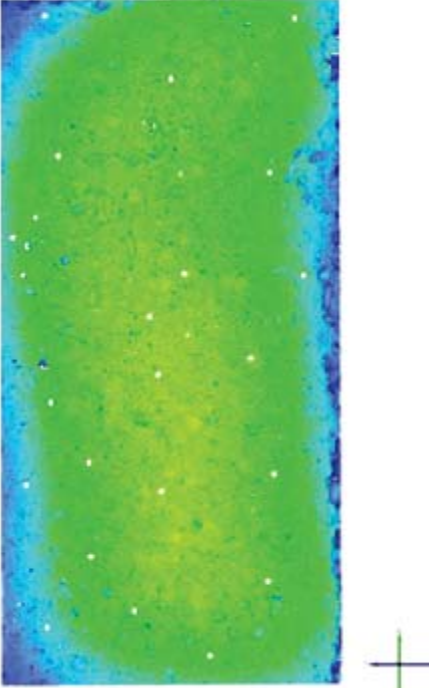


<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>	<p>Aufnahmejahr 2018</p> 	
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: moderate partielle Abwitterung des Zementsteins/Feinmörtels der Prüffläche mit teilweiser Freilegung oberflächennaher Gesteinskörnung von 2008 - 2018</p>		

Bild 10.1c: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1)

	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
<p>Bemerkungen: geringe partielle Abwitterung oberflächennahen Zementsteins/Feinmörtels auf der Prüffläche im Auslagerungszeitraum von 2008 - 2018</p> <p>Bild 10.2: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper XF4-K5-CEM I 32,5R - 0,50 (PK 1)</p>		

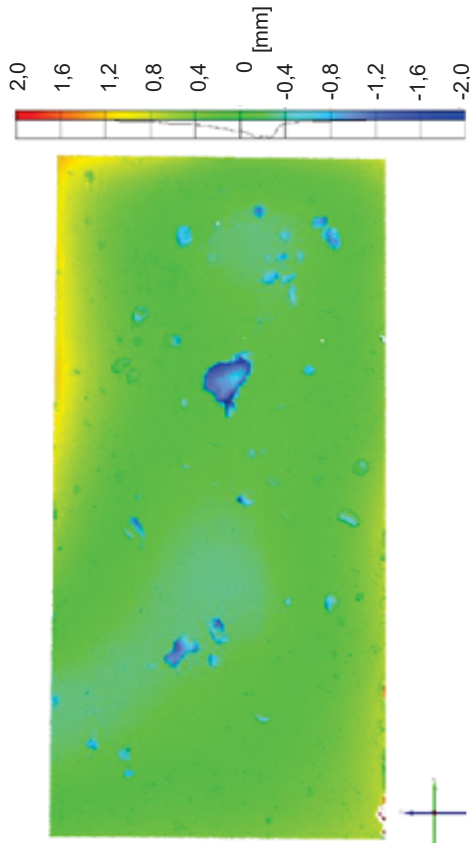
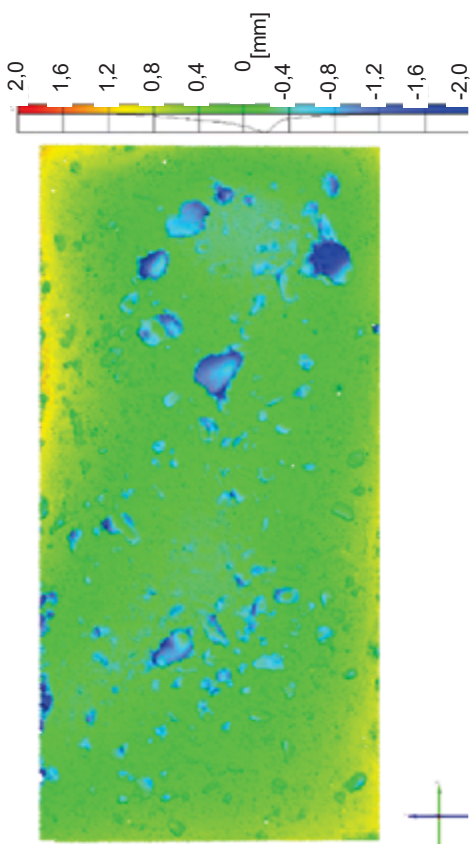


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2012
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: moderate partielle Abwitterung des Zementsteins/Feinmörtels der Prüffläche mit teilweiser Freilegung oberflächennaher Gesteinskörnung von 2008 - 2012</p>		

Bild 10.3a: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2012 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50** (PK 1)

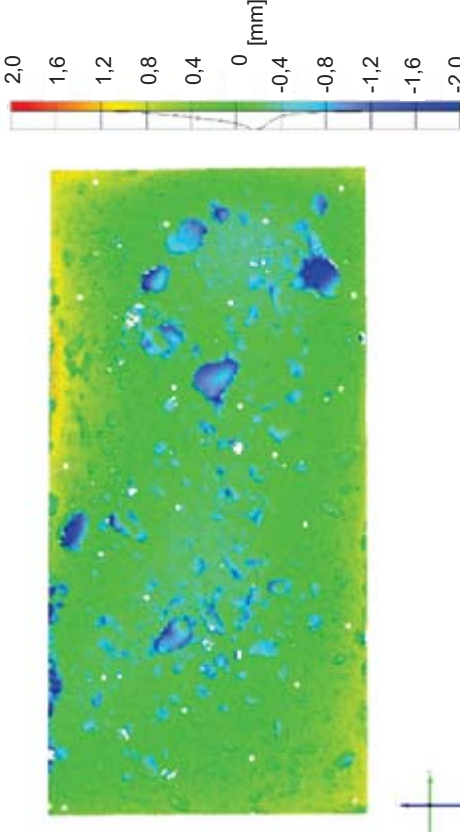
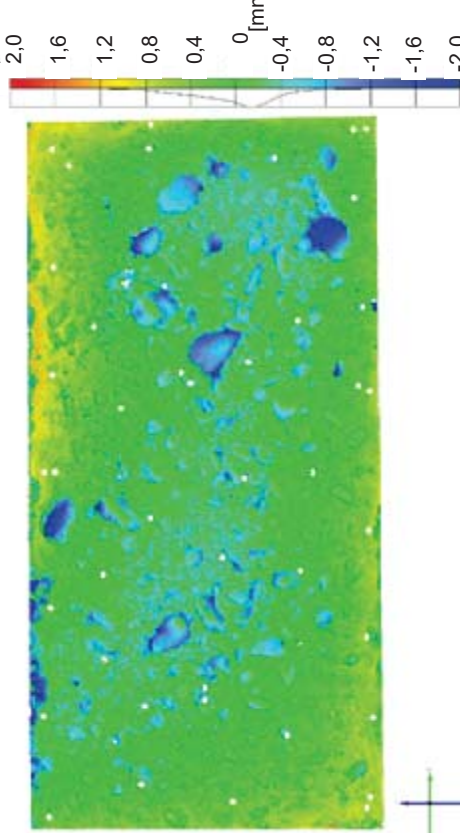


	Aufnahmejahr 2014	Aufnahmejahr 2016
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: moderate partielle Abwitterung des Zementsteins/Feinmörtels der Prüffläche mit teilweiser Freilegung oberflächennaher Gesteinskörnung von 2008 - 2016</p>		

Bild 10.3b: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2014 / 2016 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50** (PK 1)

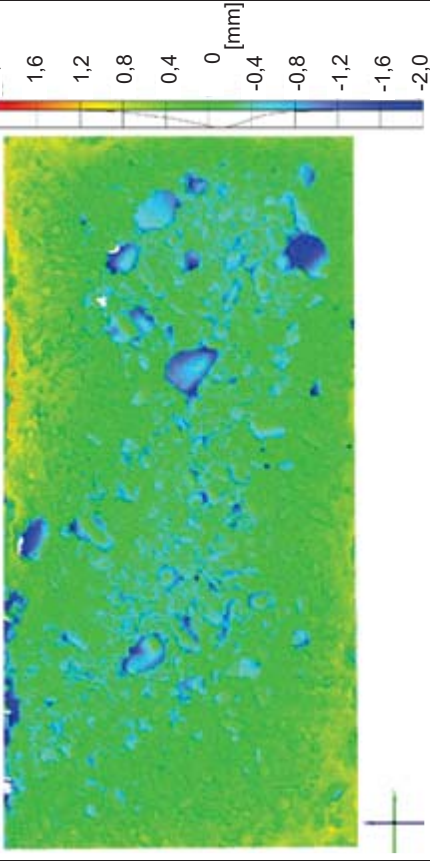

3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: moderate partielle Abwitterung des Zementsteins/Feinmörtels der Prüffläche mit teilweiser Freilegung oberflächennaher Gesteinskörnung von 2008 - 2018		

Bild 10.3c: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50** (PK 1)


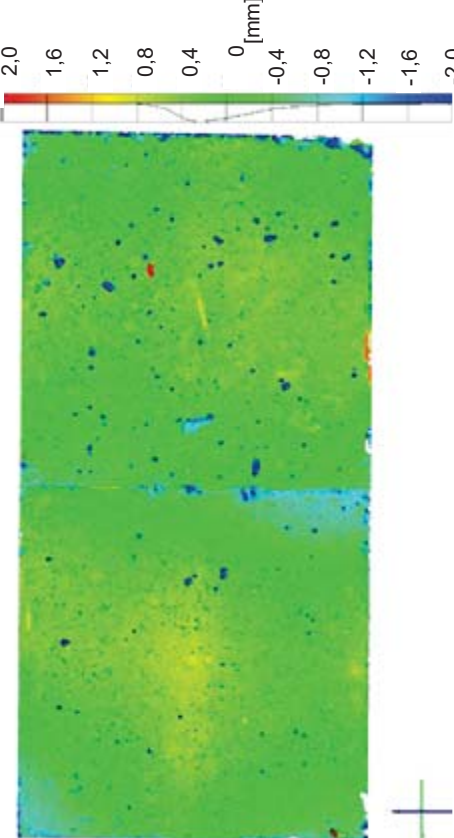


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
<p>3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene</p>		
<p>Fotografie</p>		
<p>Bemerkungen: geringe partielle Abwitterung oberflächennahen Zementsteins/Feinmörtels auf der Prüffläche im Auslagerungszeitraum von 2008 - 2018</p>		

Bild 10.4: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-K9-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1)

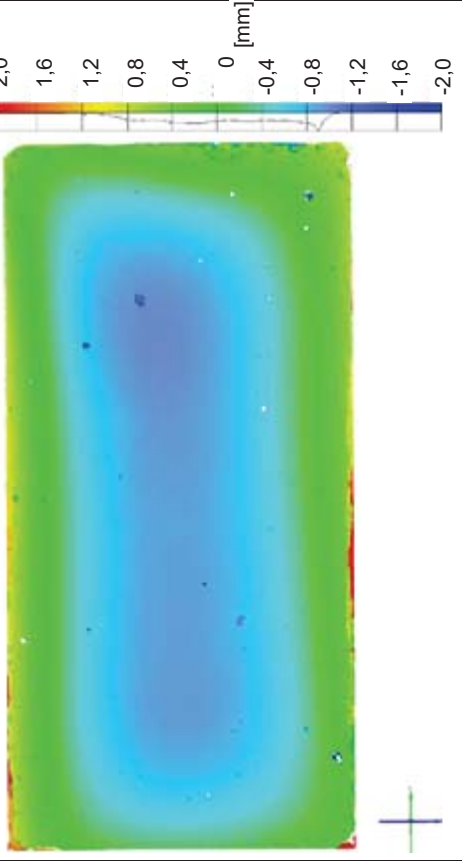
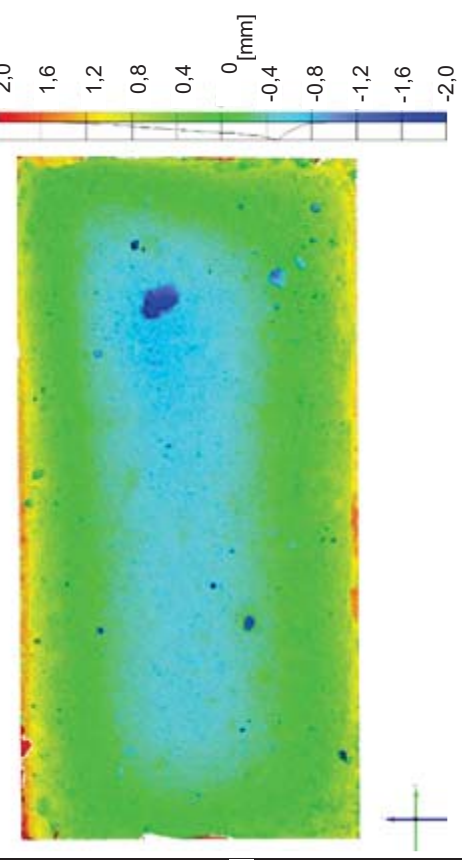


	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: geringe partielle Abwitterung oberflächennahen Zementsteins/Feinmörtels auf der Prüffläche im Auslagerungszeitraum von 2008 - 2018		

Bild 10.5: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-N19-CEM I 32,5R - 0,50** (PK 1)





	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: geringe partielle Abwitterung oberflächennahen Zementsteins/Feinmörtels auf der Prüffläche im Auslagerungszeitraum von 2008 - 2018		

Bild 10.6: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-N19-CEM I 32,5R - 0,45 (PK 1)**

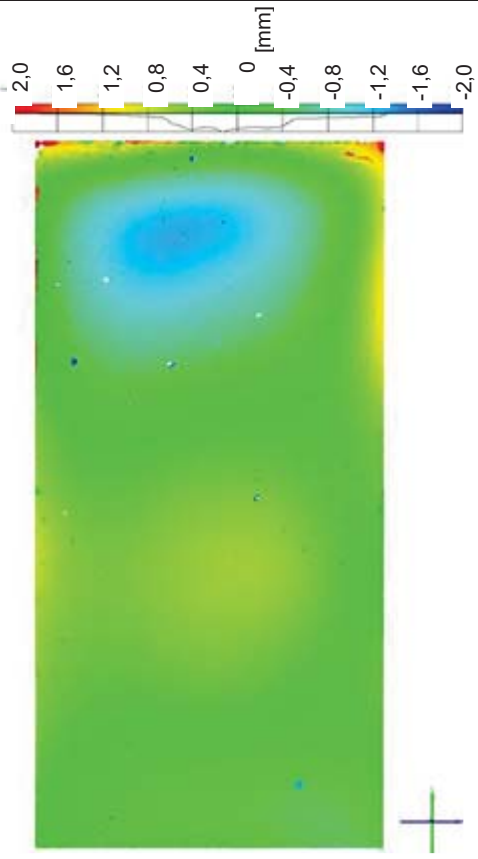
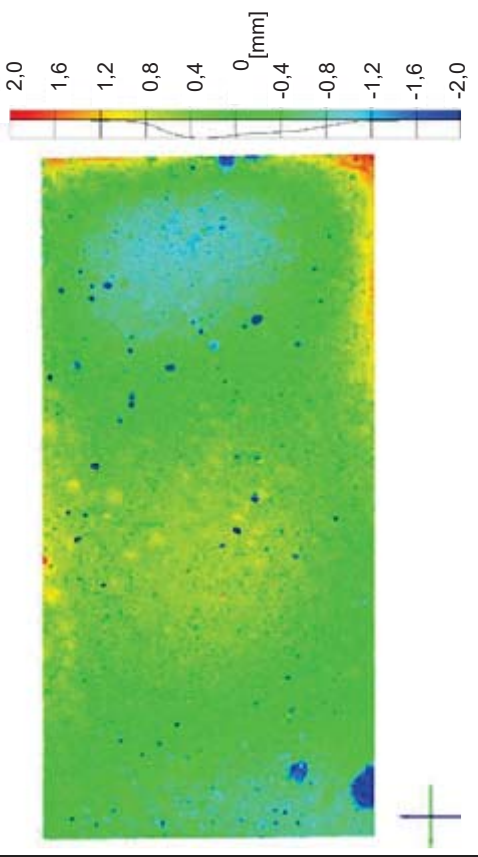


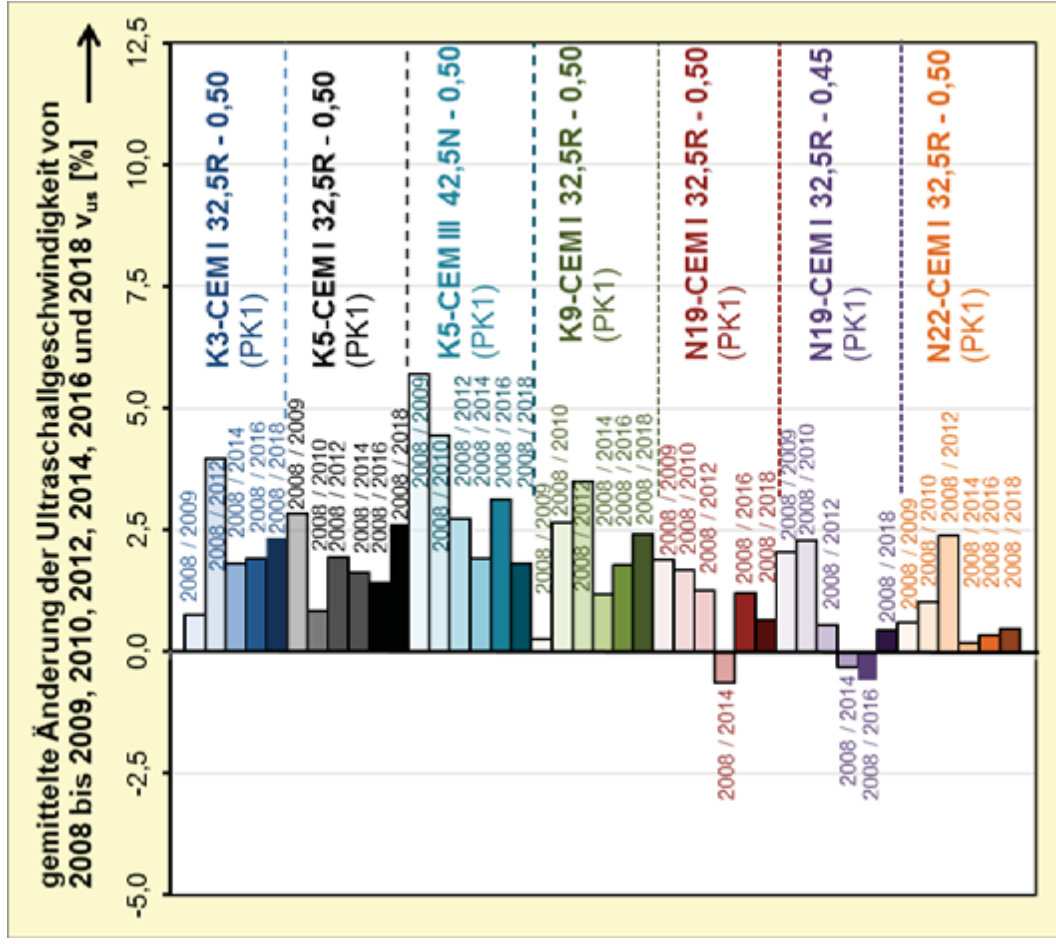
	Aufnahmejahr 2010	Aufnahmejahr 2018
3D-Oberflächenprofil, bezogen auf die Best-Fit-Ebene		
Fotografie		
Bemerkungen: geringe partielle Abwitterung oberflächennahen Zementsteins/Feinmörtels auf der Prüffläche im Auslagerungszeitraum von 2008 - 2018		

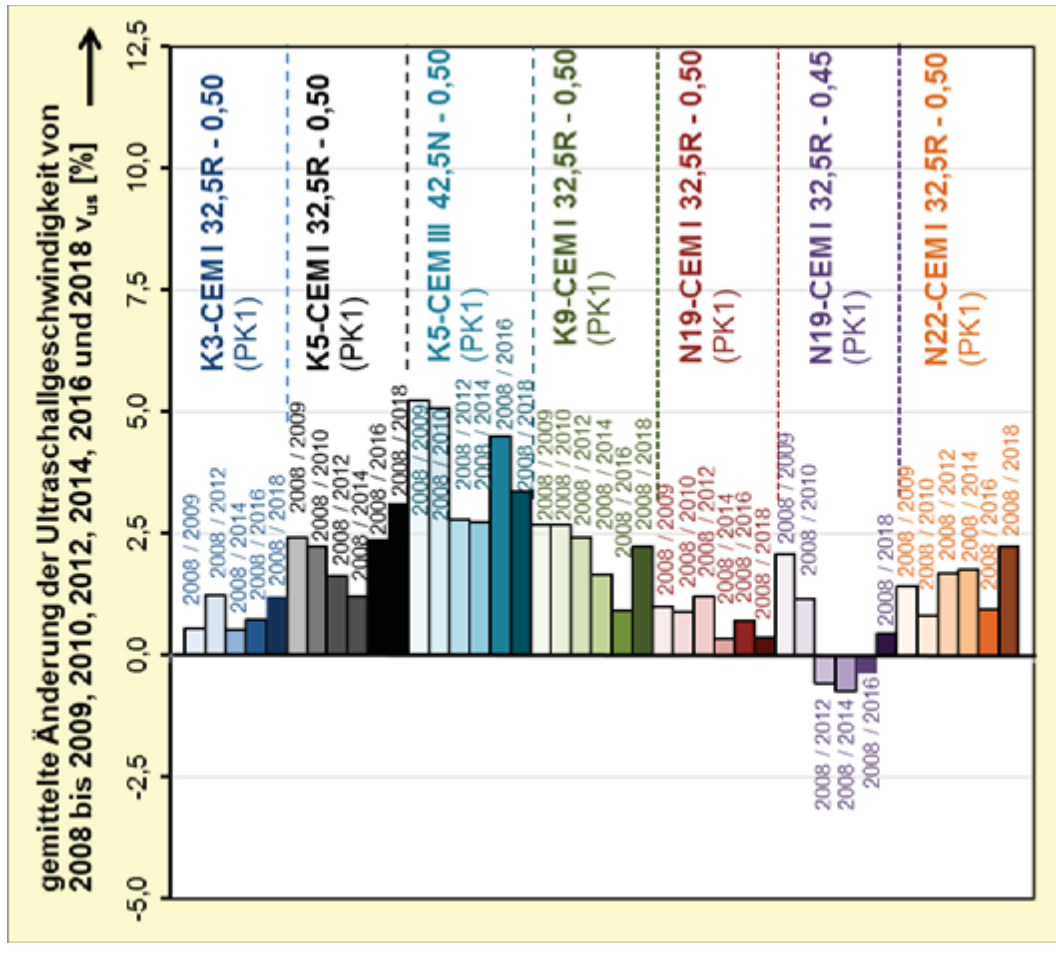
Bild 10.7: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Analyse und der Fotodokumentation der Prüffläche im Jahr 2010 / 2018 für den auf dem Mittelstreifen der B2 beim Tunnel Farchant ausgelagerten Betonprüfkörper **XF4-N22-CEM I 32,5R - 0,50 (PK 1)**

Als sekundäres Bewertungskriterium wurde bei den in der Nähe des Tunnels Farchant ausgelagerten Betonprüfkörpern auch der innere Gefügestand in vier parallel zur Prüffläche verlaufenden horizontalen Messebenen mit Ultraschall untersucht. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse sind den Bildern 11.1 bis 11.4 zu entnehmen. Auch hier ist analog zu den im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Betonprüfkörpern in den ersten Jahren tendenziell bei der Quer- und Längsdurchschallung der Betonprüfkörper in den einzelnen Messebenen eine prozentuale Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeit gegenüber den entsprechenden Bezugswerten von 2008 erkennbar. Ursächlich dürfte auch hier neben dem moderaten Feuchteeintrag vor allem die Nachhydratation des Zementes sein. Diese Feststellung wird nochmals dadurch bekräftigt, dass die Ultraschallgeschwindigkeit bei den Betonprüfkörpern mit dem Hochofenzement mit ca. 5 % die höchste Zunahme infolge seiner naturgemäß stärkeren Nachhydratation erfährt. Unverkennbar ist aber auch, dass die Ultraschallgeschwindigkeit bei allen ausgelagerten Prüfkörpern unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung im bisher betrachteten Auslagerungszeitraum von 10 Jahren in allen vier Messebenen und Durchschallungsrichtungen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit bei den Ultraschallmessungen sich nicht signifikant vermindert. Dies lässt den Schluss zu, dass alle hier ausgelagerten Prüfkörper im betrachteten Auslagerungszeitraum keine signifikanten inneren Gefügeschädigungen erfahren haben.

Basierend auf den vorstehenden dargestellten Ergebnissen kann zu den in der Expositions-klasse XF4 ausgelagerten Betonprüfkörpern das Fazit gezogen werden, dass im bisher betrachteten Auslagerungszeitraum von zehn Jahren lediglich zwei von sieben Betonprüfkörpern eine moderat erhöhte Abwitterung zeigen. Ursächlich hierfür ist bei dem einen Betonprüfkörper die Substitution des Portlandzements durch einen Hochofenzement. Bei dem anderen Prüfkörper konnte die Ursache für die erhöhte Abwitterung nicht ermittelt werden. Generell ist der in den Laborversuchen partiell erkennbare Einfluss der verschiedenartigen Gesteinskörnungen auf das Frost-Tausalz-Verhalten der Betone in den Auslagerungsversuchen im bisher betrachteten Zeitraum nicht erkennbar. Deshalb sollten auch hier wie bei der Expositions-klasse XF3 die Auslagerungsversuche weiter fortgeführt werden.

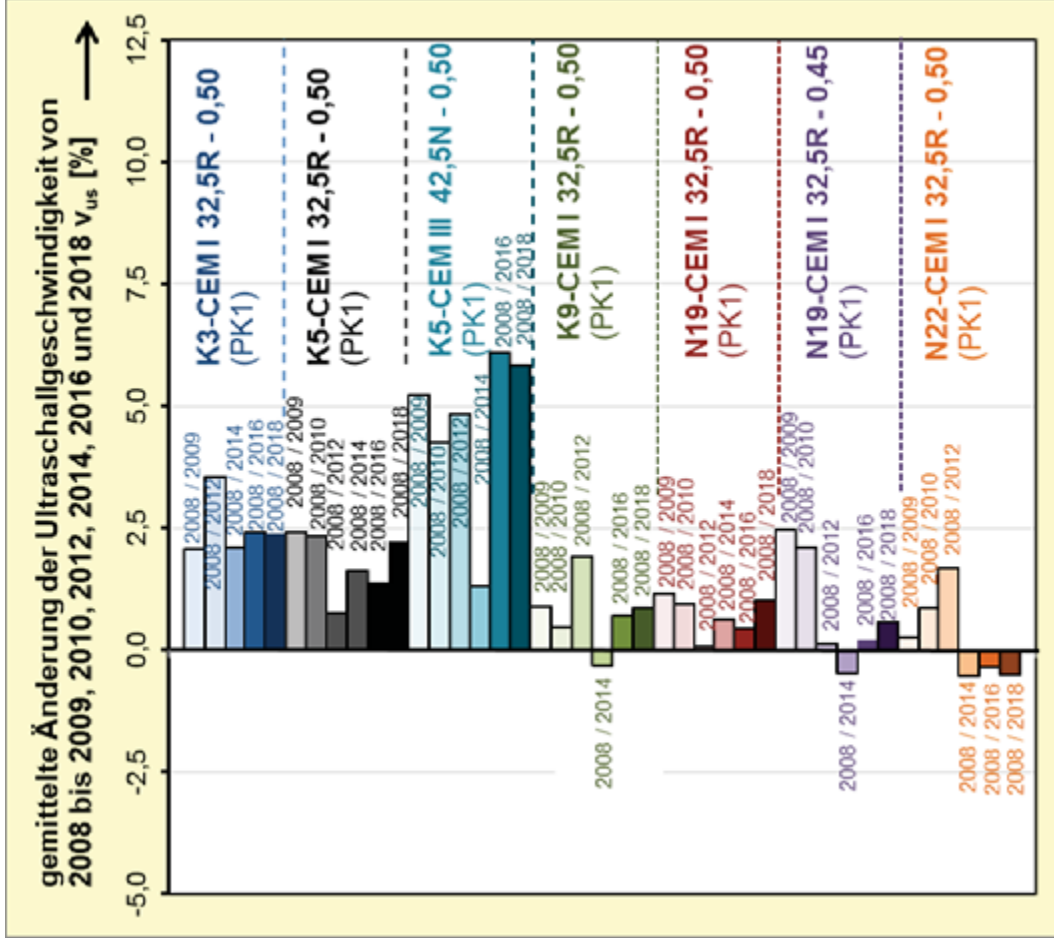


a. Querdurchschallung

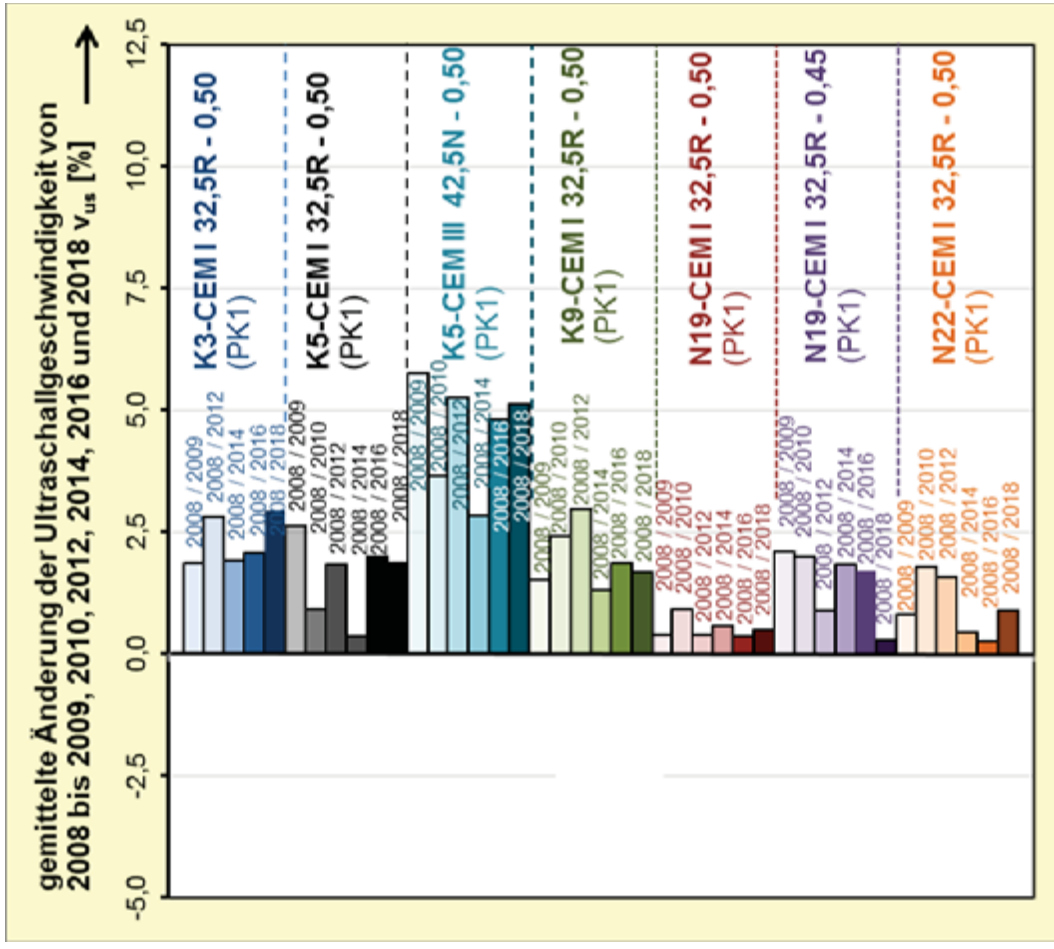


b. Längsdurchschallung

Bild 11.1: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben des Tunnels Farchant (XF4) in der Messebene in 20 mm Tiefe

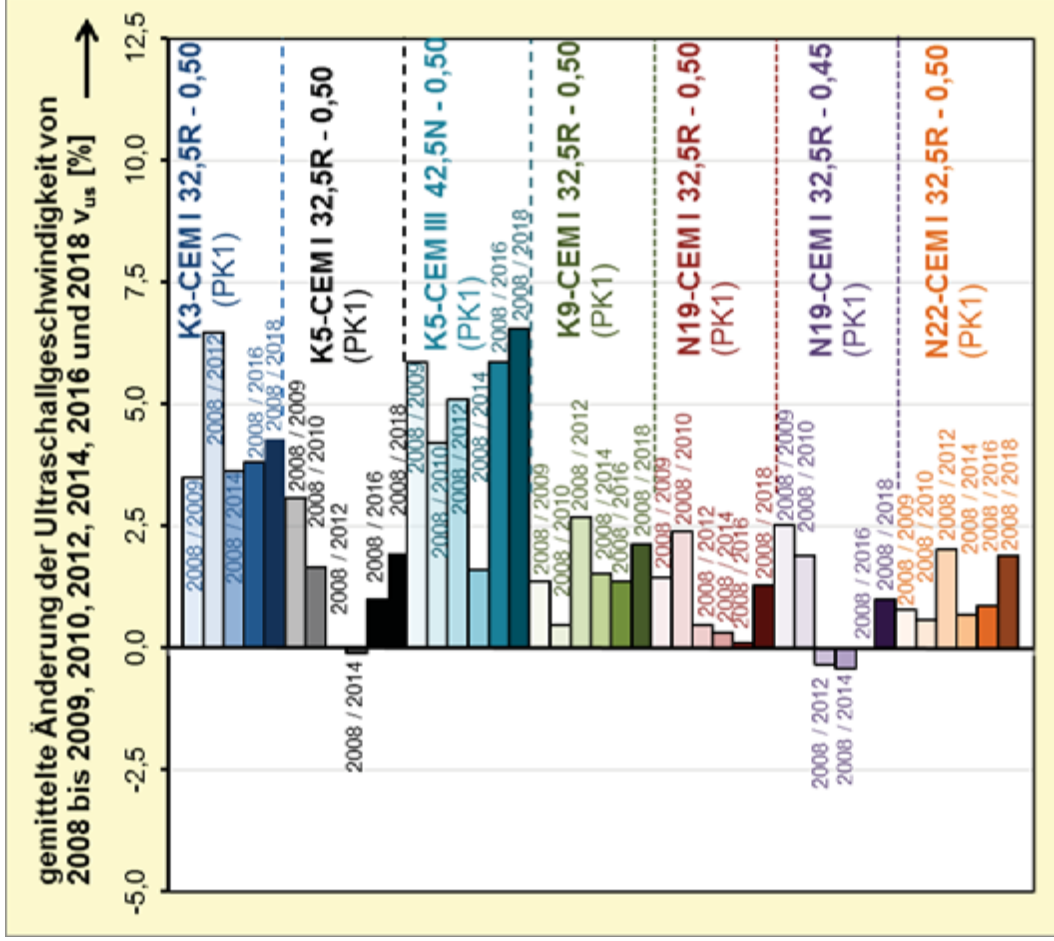


a. Querdurchschallung

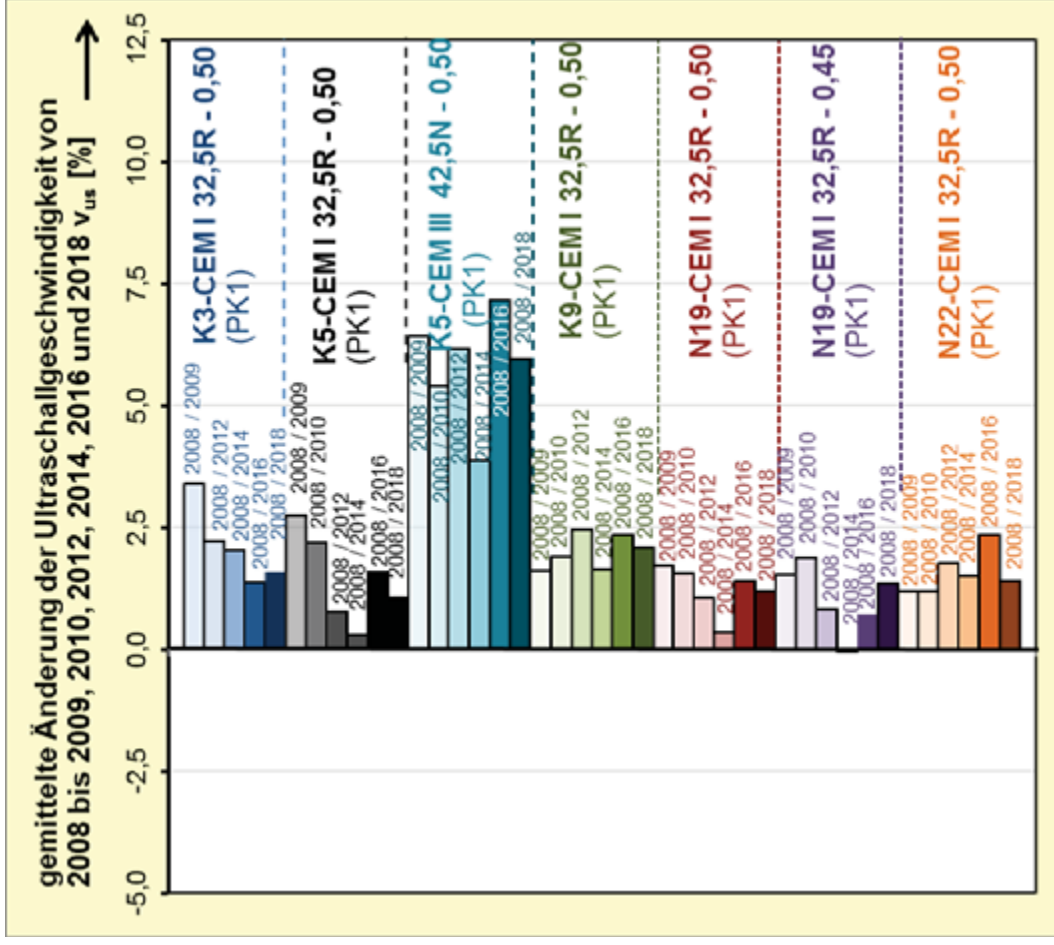


b. Längsdurchschallung

Bild 11.2: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben des Tunnels Farchant (XF4) in der Messebene in 40 mm Tiefe

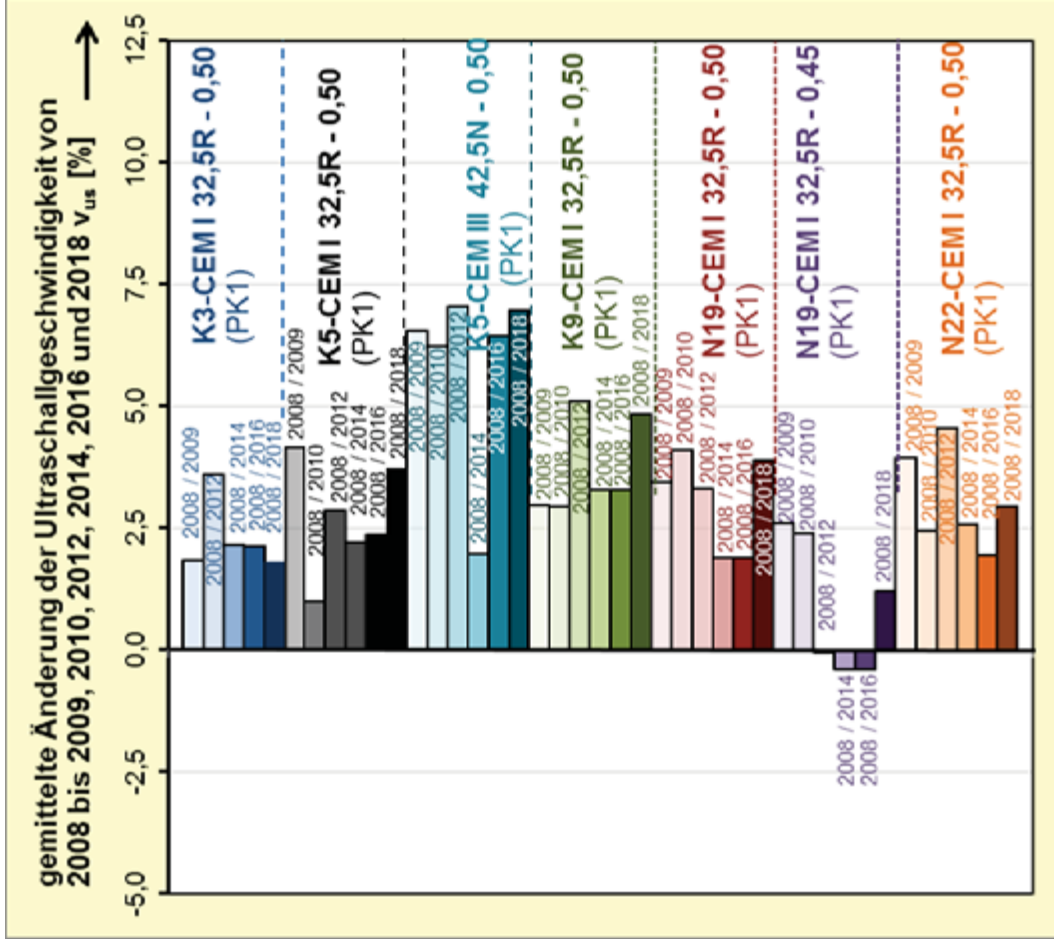


a. Querdurchschallung

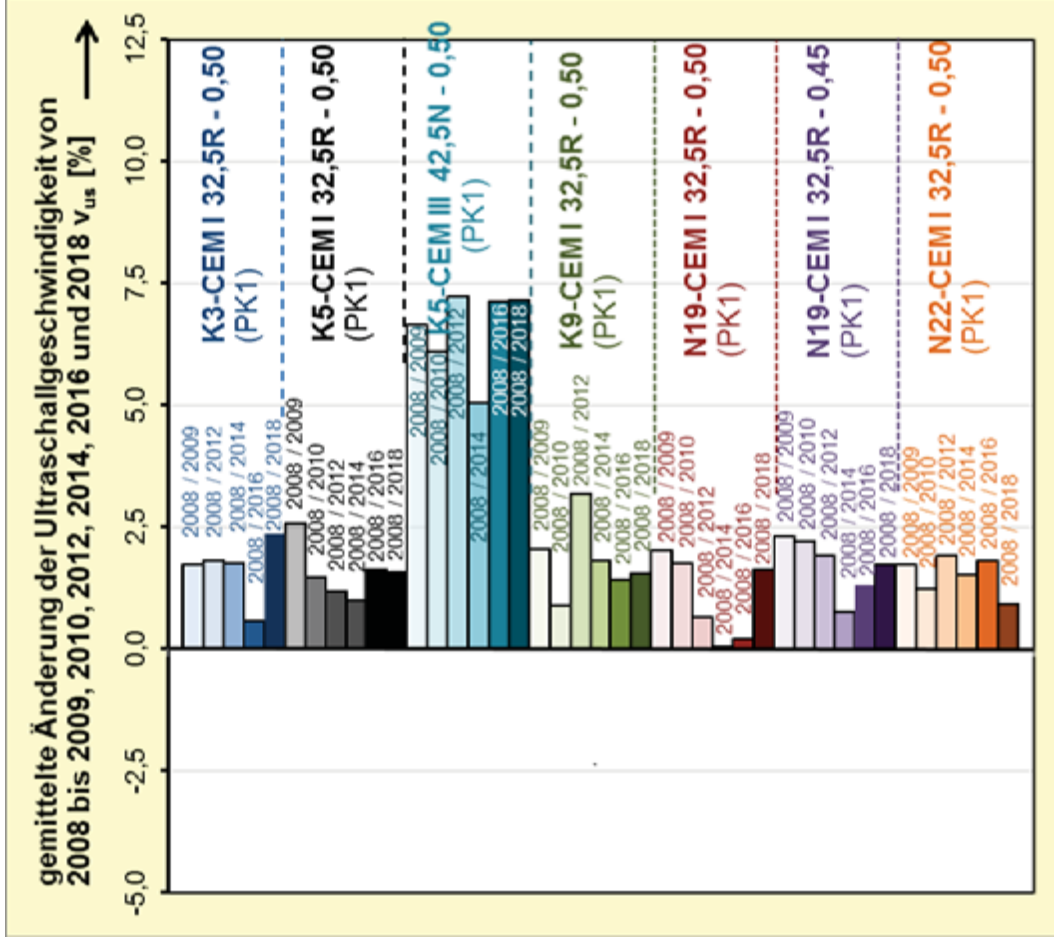


b. Längsdurchschallung

Bild 11.3: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben des Tunnels Farchant (XF4) in der Messebene in 75 mm Tiefe



a. Querdurchschallung



b. Längsdurchschallung

Bild 11.4: Ergebnis der Ultraschallmessungen an den Auslagerungsproben des Tunnels Farchant (XF4) in der Messebene in 110 mm Tiefe

6 Literatur

- [1] Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Anwendungen. 3. Auflage, Wichmann Verlag, Berlin, 2010.
- [2] Wiora, G.: Optische 3D-Messtechnik. Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Dissertation, Heidelberg, 2001.
- [3] Weise, F., Maier, B. und K. Ehrig: Analyse der durch Frost- und Frost-Tausalz-Wechsel induzierter Schädigungsprozesse in Beton - Einsatz innovativer Prüftechniken.
In: Beton und Stahlbetonbau, 107 (2012), Heft 12, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 816-823.
- [4] Neidinger, S., Wörner, Th., Westiner, E. und Ch. Gehlen: Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt 15212 N/1, Oktober 2010.
- [5] Thiel, Ch. und Ch. Gehlen: Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt 15214 BG/2, Februar 2019.

7 Anlagen A1 und A2

Anlage A1

**Fotografische Dokumentation der Prüffläche der im Sparbecken
der Schleuse Hilpoltstein ausgelagerten Prüfkörper (XF3)**






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-1: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüflfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K3-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1) -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-2: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüflfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K3-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 2) -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-3: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K5-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1) -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-4: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüflfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K5-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 2) -

2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-5: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüflfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K5-CEM III/A 42,5N – 0,50** (PK 1) -



2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-6: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüflfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK 2)** -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-7: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K9-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 1) -

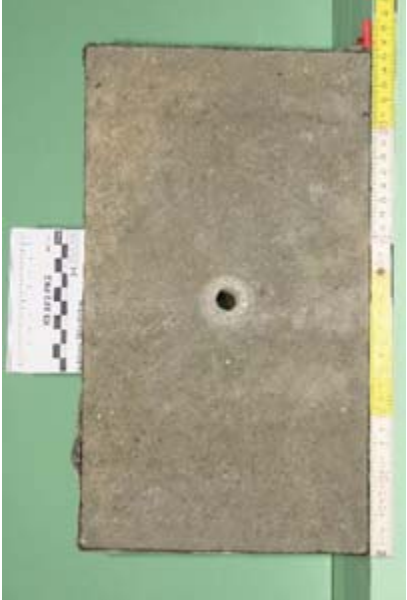




2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-8: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **K9-CEM I 32,5R – 0,50** (PK 2) -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-9: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüfläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1)** -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-10: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **N19-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 2)** -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-11: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK 2)** -

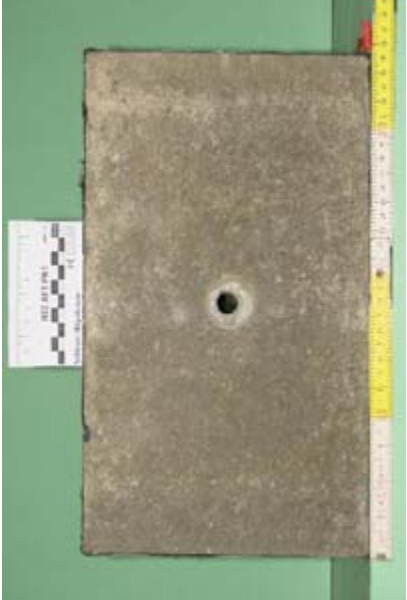




2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-12: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 1)** -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A1-13: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe vom Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein (XF3) – **N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK 2)** -

Anlage A2

**Fotografische Dokumentation der Prüffläche der auf dem Mittelstreifen der B2
beim Tunnel Farchant ausgelagerten Prüfkörper (XF4)**



2008	2010	2012
kein Foto	 <p>A rectangular concrete specimen, light grey in color, showing a relatively smooth surface with some minor dark spots. It is placed on a green background next to a yellow ruler and a white identification tag labeled 'K3 XF4 PK1' and 'Tunnel Farchant'.</p>	 <p>A rectangular concrete specimen, similar to the 2010 one but with a slightly darker and more textured surface. It is placed on a green background next to a white ruler and a white identification tag labeled 'K3 XF4 PK1' and 'Tunnel Farchant'.</p>
2014	2016	2018
 <p>A rectangular concrete specimen, significantly darker and more textured than the previous ones, indicating weathering. It is placed on a light-colored wooden surface next to a white ruler and a white identification tag labeled 'K3 XF4 PK1' and 'Tunnel Farchant'.</p>	 <p>A rectangular concrete specimen, very dark and highly textured, showing significant weathering and surface degradation. It is placed on a light-colored wooden surface next to a white ruler and a white identification tag labeled 'K3 XF4 PK1' and 'Tunnel Farchant'.</p>	 <p>A rectangular concrete specimen, extremely dark and highly textured, showing severe weathering and surface degradation. It is placed on a light-colored wooden surface next to a white ruler and a white identification tag labeled 'K3 XF4 PK1' and 'Tunnel Farchant'.</p>

Bild A2-1: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant – **XF4-K3-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)** -

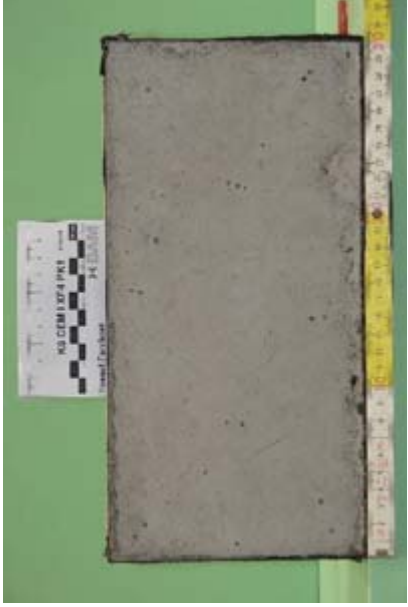




2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A2-2: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant – **XF4-K5-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)** -




2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A2-3: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant - **XF4-K5-CEM III/A 42,5N – 0,50 (PK1)** -

2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A2-4: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügestandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant - **XF4-K9-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)** -






2008	2010	2012
kein Foto		
2014	2016	2018
		

Bild A2-5: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant – **XF4-N19-CEM I 32,5R – 0,50** -




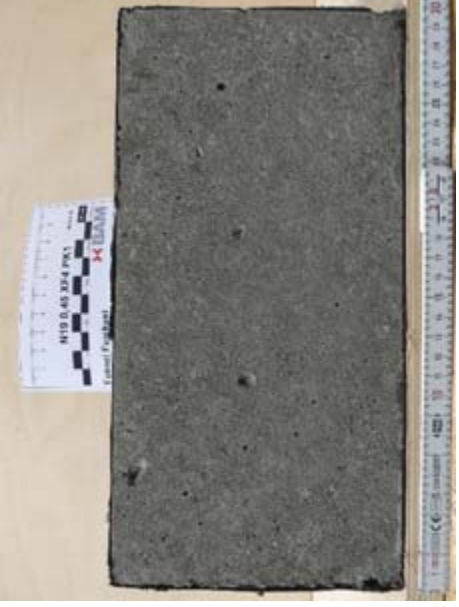

2008	2010	2012
kein Foto	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, light grey in color, with a ruler and a scale marker (N19 0,45 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, light grey in color, with a ruler and a scale marker (N19 0,45 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>
2014	2016	2018
 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, dark grey in color, with a ruler and a scale marker (N19 0,45 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, dark grey in color, with a ruler and a scale marker (N19 0,45 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, dark grey in color, with a ruler and a scale marker (N19 0,45 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>

Bild A2-6: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüffläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant – **XF4-N19-CEM I 32,5R – 0,45 (PK1)** -





2008	2010	2012
kein Foto	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, light grey in color, with a ruler and a scale marker (N22 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, light grey in color, with a ruler and a scale marker (N22 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>
2014	2016	2018
 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, dark grey in color, with a ruler and a scale marker (N22 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, dark grey in color, with a ruler and a scale marker (N22 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>	 <p>A photograph of a rectangular concrete specimen, dark grey in color, with a ruler and a scale marker (N22 XF4 PK1) placed to its left for scale.</p>

Bild A2-7: Fotodokumentation der zeitlichen Entwicklung des äußeren Gefügezustandes der Prüfläche der Auslagerungsprobe bei der BAB A95 in der Nähe des Tunnels Farchant – **XF4-N22-CEM I 32,5R – 0,50 (PK1)** -

AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15214 BG

Verbundforschung Frost - und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen – Teilprojekt „Projektmanagement - Petrographie – Auslagerung“

Teil IV

Arbeitspaket 6: Auslagerung

Institut für Bauforschung Aachen der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen

Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)

Bewilligungszeitraum: 01.06.2007-31.12.2018

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 15214 BG

Thema

Verbundforschung „Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnung“

Teilprojekt „Projektmanagement – Petrographie – Auslagerung“

Arbeitspaket 6: Auslagerungsversuche zum Frost- und Frost-Tausalz-widerstand der Gesteinskörnung im Beton

Berichtszeitraum

01.06.2007 – 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB
Kochstraße 6-7, 10969 Berlin

Forschungseinrichtung(en)

RWTH Aachen University – Institut für Bauforschung
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen

Aachen, 18.02.2019

Ort, Datum

[Name aller Projektleiterinnen und Projektleiter]

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Einführung

Der vorliegende Forschungsbericht ist Teil des Verbundforschungsvorhabens „Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen“, an dem fünf Forschungsstellen in Deutschland beteiligt sind. Die Gesamtproblematik und die von den jeweiligen Forschungsstellen zu bearbeitenden Aufgaben können dem Leitplan der Verbundforschung entnommen werden. Der Forschungsbericht bezieht sich auf das Arbeitspaket 6 im Clusterantrag 3, das die Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Praxisbedingungen durch Auslagerungsversuche umfasst. Dieses Arbeitspaket wurde gemeinsam vom F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB) der Bauhaus-Universität Weimar, dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München, der Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung (BAM) und dem Institut für Baustoffforschung (ibac) der RWTH Aachen bearbeitet. Dieser Forschungsbericht beinhaltet die vom ibac im Rahmen des Arbeitspakets 6 durchgeführten Arbeiten über die Projektlaufzeit bis zum 31.12.2018.

Das Verbundforschungsvorhaben hat zum übergeordneten Ziel, eine Systematik zur Klassifizierung von Gesteinskörnungen im Hinblick auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand der mit ihnen hergestellten Betone abzuleiten.

Gegenstand des Teilprojektes war die Betrachtung der intensiven frostbedingten Belastungsformen, also des Frost-Angriffs bei hoher Wassersättigung (XF3). Durch Auslagerungsversuche unter realen Belastungsbedingungen werden die aus den Laborprüfverfahren gewonnenen Bewertungen bezüglich der Eignung von Gesteinskörnungen und Betonen auf ihre Aussagekraft überprüft. Für die Auslagerung entsprechend der Expositionsklasse XF3 wurde ein Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein gewählt (Auslagerungsstelle 2). Der Auslagerungsstand befindet sich an der Sparbeckenwand im Bereich der Wasserwechselzone. In der Startphase des Verbundforschungsvorhabens sind im Arbeitspaket 6, Clusterantrag 3, vom ibac verschiedene Leistungen zur Vorbereitung des Auslagerung im Sparbecken der Schleuse erbracht worden.

Durchgeführte Arbeiten

Koordination

Die wissenschaftliche Gesamtleitung des Projekts übernahm der Projektleiter. In regelmäßigen Abständen wurde ihm über den Stand der Arbeit berichtet. Der Sachbearbeiter plante und koordinierte den Aus- und Wiedereinbau der Auslagerungsprobekörper, erfasste die Bauwerksdaten der Auslagerungsstelle und wertete sie aus.

Herstellung der Probekörperschalungen

Am ibac wurden spezielle Schalungen hergestellt, die auf die Befestigungstechnik der Probekörper für die Montage an der Sparbeckenwand abgestimmt sind, und die hinsichtlich ihres Aufbaus aufgrund von Erkenntnissen aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt

optimiert wurden. Die Schalungen wurden dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München zur Herstellung der Probekörper mit den Abmessungen 350 mm · 200 mm · 150 mm zur Verfügung gestellt.

Wartungsarbeiten am Auslagerungsstand

Weiterhin wurden durch das ibac Instandhaltungsarbeiten am Auslagerungsstand durchgeführt. Zum Schutz der Probekörper vor einer mechanischen Beanspruchung durch Eisgang befindet sich im Sparbecken bereits eine vom ibac für diesen Anwendungsfall bemessene, hergestellte und installierte Schutzvorrichtung (Bild 1). Vor Beginn der geplanten Auslagerung im Rahmen dieses Verbundforschungsvorhabens wurden bei einem Ortstermin die Stahlkonstruktionen gewartet sowie die Befestigungsvorrichtungen für die Prüfkörper vorbereitet. Die Wartungsarbeiten an der Auslagerungsstelle und die Montage der Probekörper wurden durch Techniker und Hilfskräfte in Eigenleistung durchgeführt.



Bild 1: In der Wasserwechselzone eines Sparbeckens der Schleuse Hilpoltstein angebrachte Probekörper und Position des Messpunktes „MP3“

Überprüfung der Sensortechnik am Messpunkt MP3

Zur kontinuierlichen Erfassung der am Bauwerk aufgezeichneten Klimadaten standen in der Schleusenwand eingebaute Feuchte- und Temperatursensoren mit Datenlogger zur Verfügung. Aufgrund seiner Lage wurde für das Teilprojekt des vorliegenden Verbundforschungsvorhabens der Messpunkt MP3 genutzt (Bild 1). Der Messpunkt liefert tiefengestaffelt bis in eine Tiefe von 90 mm von der Betonoberfläche ein Feuchte- und Temperaturprofil. So konnten jahreszeitliche Schwankungen aber auch kurzfristige Feuchte- und Temperaturentwicklungen beobachtet werden. Die tatsächliche Temperaturbeanspruchung der Betone, die in diesem Fall sowohl durch die Luft, aber auch durch die Wassertemperatur beeinflusst wurde, konnte auf diese

Weise erfasst werden. Die Überprüfung des Messpunkts auf Funktionstüchtigkeit ist parallel zu den Wartungsarbeiten am Auslagerungsstand erfolgt.

Probenauslagerung

Nach Abstimmung mit der Bundesanstalt für Wasserbau und dem Außenbezirk des Wasser- und Schifffahrtsamtes Nürnberg wurden am 6. November 2008 vom cbm der TU München hergestellten XF3-Probekörper erstmals am Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein befestigt (Bild 2).



Bild 2: Ausgelagerte Probekörper an der Sparbeckenwand der Schleuse Hilpoltstein

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht und die jeweilige Lage der Probekörper in der Wasserwechselzone an der Sparbeckenwand der Schleuse Hilpoltstein.

Tabelle 1: Übersicht und Lage der ausgelagerten Probekörper

Probekörper Nr.	Schrank- bezeichnung	Bezeichnung der Betonprobekörper
1	S1	K5 CEM I
2		
3		K5 CEM III
4		
5	S2	N22
6		
7		K9
8		
9	S3	N19 0,5
10		
11		K3
12		
13	S4	N19 0,45

Nach jeder Auslagerung erfolgten zerstörungsfreie Untersuchungen durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Schließlich wurden die Proben wieder ausgelagert. Die

Termine aller durchgeführten Auslagerungen der Probekörper ist der folgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Übersicht der Auslagerungstermine

Datum	Art der Auslagerung
06.11.2008	1. Einbau
05.10.2009	Ausbau
26.10.2009	Einbau
17.06.2010	Ausbau
29.07.2010	Einbau
26.09.2012	Ausbau
13.11.2012	Einbau
04.09.2014	Ausbau
23.04.2015	Einbau
29.08.2016	Ausbau
09.11.2016	Einbau
28.08.2018	Letzter Ausbau

Auswertung der Messdaten

Ein Abgleich der Messdaten des Messpunkts (MP3) mit den Daten einer nahegelegenen Wetterstation (Nürnberg Flughafen), sowie den Schleusenvorgängen und den damit verbundenen Wasserstandsänderungen ermöglicht eine umfassende Auswertung der Beanspruchung der ausgelagerten Betonprobekörper. In Bild 3 sind die Bauwerksdaten des Messpunkts MP3 und die Wetterdaten der Wetterstation für den Zeitraum 2008 bis Ende 2016 dargestellt. Im Frühjahr 2015 fiel die Messtechnik für rund ein halbes Jahr aus, konnte anschließend aber wieder aktiviert werden, bis sie im Herbst 2016 endgültig versagte. Die Betontemperatur wurde mittels Temperatursensor in einer Tiefe von 7 mm gemessen. Die Lufttemperatur stellt die Tagesmittelwerte der Wetterstation dar.

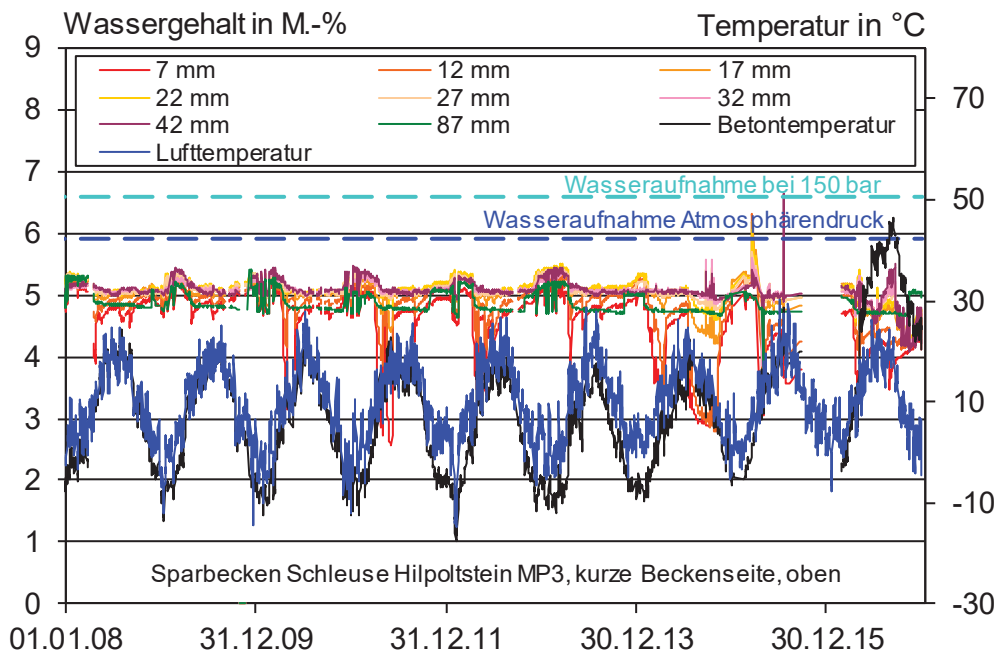


Bild 3: Entwicklung des Feuchtegehalts und des Temperaturverlaufs am Messpunkt MP3 an der Wand des Sparbeckens der Schleuse Hilpoltstein (Auslagerungsstelle 2)

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Ermittlung der unter realen Bedingungen auftretenden Wassersättigungsgrade und Temperaturverteilungen im Bauwerksbeton des Auslagerungsorts sowie der Wetterdaten ermöglichen eine umfassende Auswertung der Beanspruchung der ausgelagerten Betonprobekörper.