

Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 165

bast

Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

von

Frank Weise
Tyler Oesch
Gerd Wilsch
Sandra Sigmund

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Berlin

Klaus-Jürgen Hüniger
Mario Kositz

Brandenburgische Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 165

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 06.0108

Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Fachbetreuung

Janin Kuhnsch

Referat

Betonbauweisen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-648-1

Bergisch Gladbach, Dezember 2021

Kurzfassung – Abstract

Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Das gefügeabhängige Löslichkeitsverhalten wurde an folgenden vier Gesteinskörnungen unterschiedlicher Alkaliempfindlichkeitsklassen untersucht:

- GK1 (EIII-S): quarzreicher Kies
- GK2 (EIII-S): Grauwacke (Splitt)
- GK3 (EI-S): Quarz-Feldspat-Porphyr (Splitt)
- GK4 (EI-S): sandsteinreicher Kies

Die Porenstrukturanalyse erfolgte sowohl an Einzelkörnern mittels vergleichender 3D-CT- und BET- Untersuchungen als auch an Korngemengen der einzelnen Kornfraktionen (außer Fraktion 16/22 mm) über die Wasseraufnahme und mit BET. Für die Visualisierung und Quantifizierung der von außen zugänglichen Oberflächenanteile der Einzelkörner wurde ein Softwaretool entwickelt, erprobt und erfolgreich angewandt. Es gelang so u.a. den Nachweis zu erbringen, dass die gebrochenen Einzelkörner der Grauwacke und des Rhyoliths einen deutlich geringeren von außen zugänglichen Oberflächenanteil als die gleichartigen Gesteinskörner aus dem Kies besitzen. Aufgrund der limitierten Ortsauflösung der 3D-CT von 11 bis 16,5 µm wurde mit BET eine um drei Zehnerpotenzen höhere spezifische Oberfläche ermittelt.

Zu den Porositätsuntersuchungen an den Korngemengen sei angemerkt, dass zum Teil gegenläufige Trends zwischen offener Porosität und spezifischer Oberfläche festgestellt wurden. Dieses ist beim Bezug des bei den Löseversuchen in 0,1 M KOH mit definierter NaCl-Zugabe aus der Gesteinskörnung gelösten SiO₂ und Al₂O₃ von zentraler Bedeutung.

Bei den Löseversuchen an den fraktionsspezifischen Korngemengen selbst zeigte sich, dass die stufenweise Erhöhung des NaCl-Gehalts von 0 auf 10 M.-% im Eluat eine erhöhte SiO₂-Löslichkeit und eine verminderte Auslaugung von Al₂O₃ zur Folge hat. Auffallend war hierbei, dass die Al₂O₃-Löslichkeit bei GK4 ohne und mit geringer NaCl-Zugabe die mit Abstand höchsten Werte annimmt.

Bei den zusätzlich durchgeführten Löseversuchen an den tomografierten Einzelkörnern in 1 M KOH-Lösung mit Zugabe von 1 M.-% NaCl zeigte sich, dass nur vereinzelt bei den untersuchten Gesteinsarten eine Korrelation zwischen dem SiO₂- bzw. Al₂O₃-Gehalt im Eluat und der absoluten BET-Oberfläche nachweisbar ist. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass neben der Oberfläche weitere Parameter (z.B. die mineralogische Zusammensetzung der Einzelkörner) das Löseverhalten maßgebend beeinflussen.

Bei den parallel zu den Löseversuchen durchgeführten Betonversuchen nach dem ARS 04/2013 zeigte sich, dass die Alkaliempfindlichkeit der GK4 bei beiden Betonversuchen mit Alkalizufuhr unterschiedlich zu bewerten ist. So ist unabhängig von der vorgegebenen pessimalen Betonrezeptur des Fahrbahndeckenbetons ausschließlich bei der Klimawechsellagerung die GK4 als alkaliempfindlich einzustufen. Allerdings konnte der Befund der stark ausgeprägten AKR bei der GK4 mit der Dünnschliffmikroskopie nicht bestätigt werden. Analoges gilt für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von GK2 mit den Betonversuchen nach der Alkalirichtlichtlinie des DAfStb. So ist auch hier die GK2 nicht im 60 °C-Betonversuch sondern ausschließlich im 40 °C-Betonversuch als alkaliempfindlich einzustufen.

Die nach den verschiedenartigen Betonversuchen durchgeführten LIBS-Analysen am Vertikalschnitt der Prüfkörper zeigen, dass im Kernbereich nach dem 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung und nach der Klimawechsellagerung mit NaCl-Beaufschlagung annähernd gleich hohe Natrium- und Chloridgehalte vorgefunden werden. Wider Erwarten treten an den beaufschlagten Prüfflächen Abreicherungen von Natrium und Anreicherungen von Chlorid auf. Im 40 °C- und 60 °C-Betonversuch wurde das Natrium bis in eine maximale Tiefe von ca. 30 mm bzw. 20 mm ausgelaugt.

Die aufbauenden korrelativen Betrachtungen zwischen den Ergebnissen des 60 °C Betonversuchs mit Alkalizufuhr und der Löseversuche an den fraktionsspezifischen Korngemengen in 1 M KOH-Lösung mit definierter NaCl-Zugabe sind durchaus vielversprechend. So zeigt sich beispielsweise beim Waschbeton, dass der fraktionsspezifisch gewichtete SiO₂-Überschuss im Eluat nach 56 Tagen mit Zugabe von

0,5 M.-% NaCl ohne Bezug auf die BET-Oberfläche zur gleichen Einstufung der vier betrachteten Gesteinskörnungen wie bei den Dehnungen im 60 °C-Betonversuch mit 3 %-iger NaCl-Lösung führt. Außerdem korrelieren die im 60 °C-Betonversuch mit 10 %-iger NaCl-Lösung ermittelten Dehnungen mit dem gewichteten SiO₂-Überschuss im Eluat bei Zugabe von 2 M.-% NaCl ohne Bezug auf die BET-Oberfläche. Ausschließlich bei den Betonversuchen nach der Alkali-Richtlinie erwies sich der Bezug des im Eluat ermittelten SiO₂-Überschusses auf die BET-Oberfläche als zielführend.

Aufgrund des Potenzials der Löseversuche mit NaCl-Zugabe für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung im Fahrbahndeckenbeton wird empfohlen, die vergleichenden Untersuchungen zwischen den Löseversuchen an Korngemischen der einzelnen Fraktionen und den Betonversuchen nach dem ARS 04/2013 mit einer möglichst hohen Anzahl an Gesteinskörnungen und einem präzisierten Untersuchungsumfang fortzuführen.

Analysis of the microstructure depending solubility behavior of potential ASR sensitive aggregates

The following four aggregates (GK) of varying grades of alkali sensitivity were examined for their microstructure-dependent solubility behavior:

- GK1 (EIII-S) gravel with high quartz content
- GK2 (EIII-S) greywacke (crushed stone)
- GK3 (EI-S) quarz-feldspar-porphyr (crushed stone)
- GK4 (EI-S) gravel with high sandstone content

Pore structure analysis was carried out both on single grains using comparative 3D-CT and BET tests, and on grain samples of individual grain fractions (excluding the 16/22 mm fraction) using water absorption and BET. A software tool for visualizing and quantifying the externally accessible surfaces of single grains was developed, tested and successfully applied. This enabled us, among other things, to prove that single broken grains of greywacke and

rhyolite have a much smaller externally accessible surface than grains of gravel of the same aggregate fraction. Due to the 3D-CT's limited spatial resolution of 11 to 16.5 µm, BET was used to determine a two to three powers of ten higher specific surface.

In relation to the porosity tests of the grain samples, it should be noted that in some cases, counterdirectional trends between open porosity and specific surface were determined. This is of central importance in relation to the SiO₂ and Al₂O₃ dissolved from the aggregate in the solubility tests in 1 M KOH with defined addition of NaCl.

The solubility tests on the grain samples of specific fractions showed that the gradual increase of the NaCl content in the eluate from 0 to 10 M.-% resulted in increased SiO₂ solubility and reduced leaching of Al₂O₃. It was striking in this context that the solubility of Al₂O₃ in GK4 with no or little addition of NaCl gives by far the highest values.

The additional solubility tests carried out on single grains, that were previously subjected to CT testing, in 1 M KOH solution with 1 M.-% added NaCl showed that in the types of aggregate examined, a correlation between the SiO₂ and Al₂O₃ in eluate and the absolute BET surface is only occasionally demonstrable. This is probably due to the fact that solubility behavior is decisively influenced by other parameters in addition to the surface (e.g. by the mineralogical composition of individual grains).

The concrete tests according to ARS 04/2013 carried out parallel to the solubility tests showed that GK4's alkali sensitivity in both concrete tests with added alkali must be evaluated differently. For example, independent of the prescribed pessimal road surface concrete formula, GK4 can only be classified as alkali sensitive under cyclic storage. However petrographic microscopy could not confirm the findings of very marked ASR in GK4. The same applies to the evaluation of alkali sensitivity in GK2 with the concrete tests according to the German Committee for Structural Concrete (DAfStb)'s Alkali Guidelines. In this case too, GK2 should not be classified as alkali sensitive in 60 °C concrete testing, but only in 40 °C concrete testing.

The LIBS analyses carried out on the vertical cross-section of the test specimens after the

various concrete tests showed that almost equally high sodium and chloride levels were found in the core area after the 60 °C concrete prism test with 10 % NaCl solution and after cyclic storage with NaCl application. Contrary to expectations, the surfaces of samples after NaCl application showed a decrease in sodium and an increase in chloride. In the 40°C and 60°C concrete prism tests, sodium was depleted up to a maximum depth of approx. 30 mm and 20 mm respectively.

Subsequent correlative observations between the findings of the 60°C concrete prism test with alkali application, and the solubility tests on the samples of specific grain fractions in 1 M KOH solution with defined NaCl addition, are very promising. In the case of exposed aggregate concrete, for example, the fraction-specific weighted excess SiO₂ to in the eluate after 56 days with added 0.5 M.-% NaCl unrelated to the BET surface results in the same classification of the four aggregates examined as the expansions in the 60 °C concrete prism test with 3% NaCl solution. In addition, the expansions found in the 60 °C concrete prism test with 10% NaCl solution correlated with the weighted excess SiO₂ in eluate with added 2 M.-% NaCl without relation to the BET surface. Only in the case of the concrete test in accordance with the Alkali Guidelines did the relationship of the excess SiO₂ in the eluate to the BET surface prove to be productive.

Due to the potential of the solubility test with added NaCl for the evaluation of alkali sensitivity of aggregates in road surface concrete, we recommend continuing with comparative tests between solubility tests of grain samples of the various fractions and the concrete tests in accordance with ARS O4/13 with the greatest possible number of aggregates and a precisely defined investigation scope.

Summary

Analysis of the microstructure depending solubility behavior of potential ASR sensitive aggregates

To verify the influence of externally accessible aggregate on the solubility of SiO_2 and interacting Al_2O_3 in an alkaline solution with and without defined addition of NaCl, thorough tests were carried out on four aggregate samples (one gravel and one crushed stone sample in each of the alkali sensitivity classes EIII-S and EI-S). The tests covered the characterization of the mineral content and pore structure of all the aggregates, solubility tests on grain samples and single grains, and all concrete tests in accordance with ARS 04/2013 [1] and the DAfStb's Alkali Guidelines [2]. Follow-up tests using microscopy and LIBS were carried out to evaluate the extent of ASR and SEF characteristics and the uptake or leaching of alkalis under the various types of ASR-conductive storage. In order to verify the meaningfulness of the solubility tests for evaluating the alkali sensitivity of the aggregate, comparative correlative observations were also carried out between the findings of the solubility tests on the grain samples and those of the concrete tests.

Aggregate GK1 (EIII-S) is a gravel with high quartz content with small amounts of microcline, plagioclase/albite and muscovite. Aggregate GK2 (EIII-S) is a greywacke with high quartz and plagioclase/albite content, used in crushed form. Aggregate GK3 (EI-S) is a rhyolite also used in crushed form, whose mineral content comprises quartz-feldspar-porphyry. Aggregate GK4 (EI-S) is a gravel with high sandstone content (quartz-feldspar gravel).

The wide range of pore structure values determined in the aggregates should be evaluated differently in the context of the solubility tests. For example, the relationship of excess SiO_2 to open porosity previously applied in the BTU-SP test [accelerated test for assessing the alkali sensitivity of aggregates] does not necessarily lead to the same development as when adequately related to the specific surface. For grain fraction 8/16 mm of GK4, for example, an average open porosity of 3.53 Vol.-% and an average specific surface of 0.89 m^2/g were determined. In the same grain fraction of GK1, despite a significantly lower average open porosity

of 0.88 Vol.-%, a much higher average specific surface of 1.94 m^2/g was determined by BET. For this reason, when the excess SiO_2 in the eluate is assessed in relation to the different pore structure parameters, the results point in the contrary direction.

The visualization and quantification of the externally accessible surface on selected single grains using x-ray 3D-CT showed that, based on the limited minimum spatial resolution of approx. 11 to 16.5 μm , the single grains of greywacke and rhyolite in gravel form have significantly larger externally accessible surface proportions than those from crushed rock. It is also striking, however, that tomographic analysis revealed considerable variations in the externally accessible surface portions of single grains of individual rock types. This applies in particular to all rock types that occur in the GK1 and GK4 gravels. The BET analysis of single grains that had already been subject to tomographic analysis showed, as expected, that the specific surfaces determined by this method increased by a factor of approx. 1,000, due to the higher spatial resolution. There is no correlation between the specific surfaces determined by 3D-CT and BET. With this in mind, the question arises of which externally accessible pore size class is relevant for the transport and solution processes that take place in the solubility tests. The assumption is that due to the higher temperature of the elution medium (80°C), small pores and cracks (>0.1 μm) are also involved in these processes. Therefore, the SiO_2 and Al_2O_3 content in the eluate determined in the solubility tests was expressed in relation to the average BET surface of the relevant grain fraction.

The solubility tests on samples of specific aggregate grain-size fractions in 1 M KOH solution showed that as increasing amounts of NaCl were added to the elution medium, (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 und 10.0 M.-%), the leaching of SiO_2 increased while that of Al_2O_3 decreased. It is striking, however, that the solubility of Al_2O_3 in GK4, particularly in grain fraction 2/8 mm with no or little addition of NaCl, is much greater than in the other aggregates. This is worth mentioning because as a result, more SiO_2 is bonded by aluminosilicate, thus reducing the amount of damaging ASR.

The additional solubility tests carried out on single grains, that had already been subject to tomographic analysis, in 1 M KOH solution with the addition of 1 M.-% NaCl showed that a

correlation between the SiO_2 or Al_2O_3 content in the eluate and the absolute BET surface is only demonstrable in isolated cases in the rock types examined. Further solubility tests are required to statistically validate the findings, which are probably due to the fact that solubility behavior of single grains is decisively influenced not just by the surface, but also by other parameters, e.g. the mineralogical composition of individual grains.

The concrete tests according to ARS 04/2013 [1] carried out parallel to the solubility tests showed that, regardless of the concrete type (upper layer of top course concrete 0/8 mm or upper layer ($D > 8$)/lower layer), the findings of the 60°C concrete prism test with alkali application and climate storage results in differing classification of GK4's alkali sensitivity. Thus, GK4 can only be classified as alkali sensitive under cyclic storage. However, follow-up petrographic microscopy carried out after the climate storage showed no ASR damage in GK4 of the 8/16 mm and 16/22 mm fractions. Instead, the ASR characteristics found here derive exclusively from the sand fraction. The damaging ASR was overlaid by very marked SEF. This throws some doubt on the classification of GK4 as alkali sensitive.

An adequate conclusion must be drawn from the findings of the concrete prism tests in accordance with the DAfStb [2]'s Alkali Guidelines. In this case, aggregate GK2 is only classified as alkali sensitive in 40°C concrete testing, but not in 60°C concrete testing.

The LIBS analyses carried out on the vertical cross-section of the concrete specimens before and after all the concrete tests are also revealing. The findings are as follows:

- After 10 cycles of 60°C concrete test with addition of alkali, an even distribution of sodium and chloride results in the core area of the sample with the worst concrete formula in accordance with ARS 04/2013 [1]. As expected, the average Na and Cl content increases with higher concentrations of NaCl in the de-icing solution. Unexpectedly, a decrease in sodium and an accumulation of chloride were found all around the concrete edge zone.
- In the case of the sample with the pessimal concrete formula in accordance with ARS 04/2013 [1] where demineralized water is

applied to one side, the 12 cycles of climate storage result in sodium leaching up to a depth of approx. 40 mm. In contrast, application of 3.6% NaCl solution to one side of the sample results in a high level of de-icing solution penetration. In this case the percentage of Na and Cl in the sample core was lower as found after the 60°C concrete prism test with a 10% NaCl solution. Unexpectedly, the concrete edge zone of the side to which the solution was applied also showed a decrease in sodium and an increase in chloride. This was also found to a lesser extent on the concrete edge zones of the untreated sides.

- After the 40°C and 60°C concrete prism tests, maximum Na leaching depths of 30 mm and 20 mm respectively were determined for the samples with the concrete formula according to the Alkali Guidelines. Due to the unfavorable ratio of surface to volume, leaching was particularly marked in the corners of the sample.

Comparing the findings of the 60°C concrete prism test with 3% and 10% NaCl solution with those of the solubility tests on the grain samples of the individual aggregates where selected amounts of NaCl were added to the eluate, a correlation was determined between the expansions and the weighted SiO_2 excess in the eluate after the 56-day solubility test. In the case of exposed aggregate concrete, for example, the weighted excess SiO_2 in the eluate after 56 days with added 0.5 M.-% and 1,0 M.-% NaCl unrelated to the BET surface results in the same classification of the aggregates as the expansions in the 60°C concrete prism test with 3% NaCl solution. In addition, the expansions determined in the 60°C concrete prism test with 10% NaCl solution correlate with the weighted excess SiO_2 in the eluate when 2 M.-% NaCl is added. In this case too, relating the result to the BET surfaces yields no new findings. In contrast, in the concrete tests in accordance with the DAfStb's [2] Alkali Guidelines, relating the weighted SiO_2 excess to the BET surface yields results. In this case, modifying the weighted excess SiO_2 by relating it to the BET surface results in the aggregates being given the same classification in the solubility test and in the 40°C and 60°C concrete prism tests (measuring the expansion of the prisms).

To sum up, it can be stated that the findings so far of the correlative observation between solubility tests with added NaCl and concrete tests in accordance with ARS 04/2013 [1] are very promising. However, the number of aggregates examined so far is too small to permit general statements. Therefore, we recommend pursuing further comparative investigations between the solubility tests of aggregates of individual fractions and the concrete tests in accordance with ARS 04/2013 [1], using as many aggregates as possible. The investigation scope should be defined as follows:

- Omitting solubility tests in 1 M KOH solution with added 10 M.-% NaCl.
- Increasing the aggregate sample weight while retaining the 1:10 balance between aggregate and eluate (or several alternative approaches)
- Carrying out additional adequate solubility tests with grain fraction 16/22 mm of each aggregate (minimum aggregate sample weight: 270 to 540 g)
- Testing alternative methods of carrying out the solubility tests on mixtures of grain fractions that correspond to the grain size distribution curve in concrete
- If necessary omitting BET analyses of aggregates, because the surface relationship of the excess SiO₂ in the solubility tests in 1 M KOH solution with added NaCl is not helpful regarding the present results (other influences dominate)

Inhalt			
		5.3.1	Vorbemerkungen 69
		5.3.2	Charakterisierung der Ausgangsstoffe 69
1 Problem- und Zielstellung 11	11	5.3.3	Betonrezepturen mit Frisch- und Festbetoneigenschaften 72
1.1 Problemstellung	11	5.3.4	AKR-provozierende Lagerungen 74
1.2 Zielstellung	12	5.4	Aufbauende Untersuchungen 78
2 Grundlagen, Stand der Technik 13	13	5.4.1	Dünnschliffmikroskopie 78
3 Lösungsansatz 17	17	5.4.2	LIBS-Analyse 80
4 Beschreibung ausgewählter Prüfverfahren 21	21	5.5	Vergleichende Bewertung der Ergebnisse der gefügeabhängigen Löseversuche an der Gesteinskörnung und der Betonversuche 96
4.1 Vorbemerkungen	21	6 Zusammenfassende Betrachtungen und Ausblick 103	
4.2 MRFA-Analyse	21	7 Literaturverzeichnis 106	
4.3 XRD-Analyse	22	Bilder 109	
4.4 Röntgen 3D-CT am Einzelkorn	23	Tabellen 111	
4.5 Ermittlung der spezifischen Oberfläche mit BET	28		
4.6 Ermittlung der Porenvolumenverteilung mit Hg-Druckporosimetrie	29		
4.7 Eluatanalyse mit ICP-OES	30		
4.8 Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen mit Schnellprüfverfahren und Betonversuchen	30		Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter https://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.
4.9 Aufbauende Untersuchungen an Betonprüfkörpern nach Betonversuchen	37		
4.9.1 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung	37		
4.9.2 Analyse des Tausalzeintrags und der Auslaugung von Natrium und Chlorid mit LIBS	37		
5 Ergebnisse und deren Auswertung 41	41		
5.1 Charakterisierung ausgewählter Gesteinskörnungen	41		
5.1.1 Petrographie, oxidische Bestandteile und Mineralphasenbestand	41		
5.1.2 Porenstrukturuntersuchungen	44		
5.2 Löseversuche an Gesteinskörnungen	55		
5.2.1 Untersuchungen an Einzelkörnern der Korngruppe 8/16 mm	55		
5.2.2 Untersuchungen am Korngemenge ausgewählter Korngruppen	64		
5.3 Betonversuche	69		

Abkürzungen

		RL	Richtlinie
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion	RSTO	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
ARS	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau	SEB	Sekundäre Ettringitbildung
BAB	Bundesautobahn	SK	Schadenskategorie
BET	Brunauer, Emmett und Teller	SS	Standspur
BFD	Betonfahrbahndecke	UB	Unterbeton
Bk	Belastungsklasse	W	Wiederholung
BK	Bohrkern	XRD	X-ray diffraction
BV	Betonversuch		
D	Durchmesser		
3D-CT	Dreidimensionale Röntgentomografie		
DIN	Deutsches Institut für Normung		
DS	Dünnschliff		
GK	Gesteinskörnung		
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry		
KWL	Klimawechselagerung		
L	Lösung		
LIBS	Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy		
LOD	Limit of Detection (Nachweisgrenze des Analyseverfahrens)		
LOQ	Limit of Quantification (Kalibrationsbereich des Analyseverfahrens)		
MRFA	Mikroröntgenfluoreszenzanalyse		
NKL	Nebelkammerlagerung		
OB	Oberbeton		
OF	Oberfläche		
PK	Prüfkörper		

1 Problem- und Zielstellung

1.1 Problemstellung

Seit über 15 Jahren beschäftigt sich die Forschung im Straßenbau in Deutschland intensiv mit der Thematik der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Auslöser hierfür waren Schäden, die in Verbindung mit einer AKR an Betonfahrbahndecken von Bundesautobahnen (BAB) aufgetreten sind, deren Herstellung vor 2005 erfolgte. So wurde im Rahmen einer bundesweiten Analyse des BAB-Netztes durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) festgestellt, dass zum Zeitpunkt 2012 ca. 1500 km Richtungsfahrbahn unter AKR-Verdacht standen [1]. Maßgebendes Kriterium für die Beurteilung war dabei das äußere visuelle Erscheinungsbild der Betonfahrbahnoberfläche. So werden nach [2] in Abhängigkeit vom Grad der Schädigung fünf Schadenskategorien (SK) unterschieden (Abbildung 1).

Die Schadenskategorie 0 ist dabei dadurch gekennzeichnet, dass zwar eine alkaliempfindliche Gesteinskörnung (GK) Einsatz fand, aber noch keine AKR-Merkmale auf der Oberfläche der Betonfahrbahndecke erkennbar sind. Im Gegensatz dazu sind bei den Schadenskategorien I O bis III O AKR-Merkmale sichtbar, die auf eine von Oberseite der Betonfahrbahndecke ausgehende AKR schließen lassen.

Bei der SK I O wird als Schadensindikator bisher vor allem die Dunkelfärbung im Bereich der Fugenkreuze und Querscheinfugen herangezogen. Dabei ist keine über Schwindrisse hinausgehende Rissbildung erkennbar. Als Ursache für die Dunkelfärbung wurde ein erhöhter Feuchtegehalt in der Betonrandzone vermutet [1].

Das Schadensbild der SK II O ist, neben der ausgeprägten Verfärbung im Bereich der Fugen, durch eine verstärkte Rissbildung in Fugenkreuzbereichen gekennzeichnet. Zusätzlich wird oft eine beginnende bis ausgeprägte Netzrisbildung auf der Fahrbahnoberfläche vorgefunden. Gegebenenfalls können auch Längs- und Querrisse an den Querfugen sowie Längsrisse in den Rüttelgasen auftreten. All diese Schäden sind jedoch mit noch keinem Substanzverlust verbunden.

Bei der SK III O sind die vorstehend aufgeführten Risse noch stärker ausgeprägt. Oft treten zusätzlich noch Kantenschäden und Eckabbrüche auf. Nicht selten reicht der Substanzverlust bis zur Verschotterung im Bereich der Querscheinfugen, die

eine starke Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit zur Folge hat.

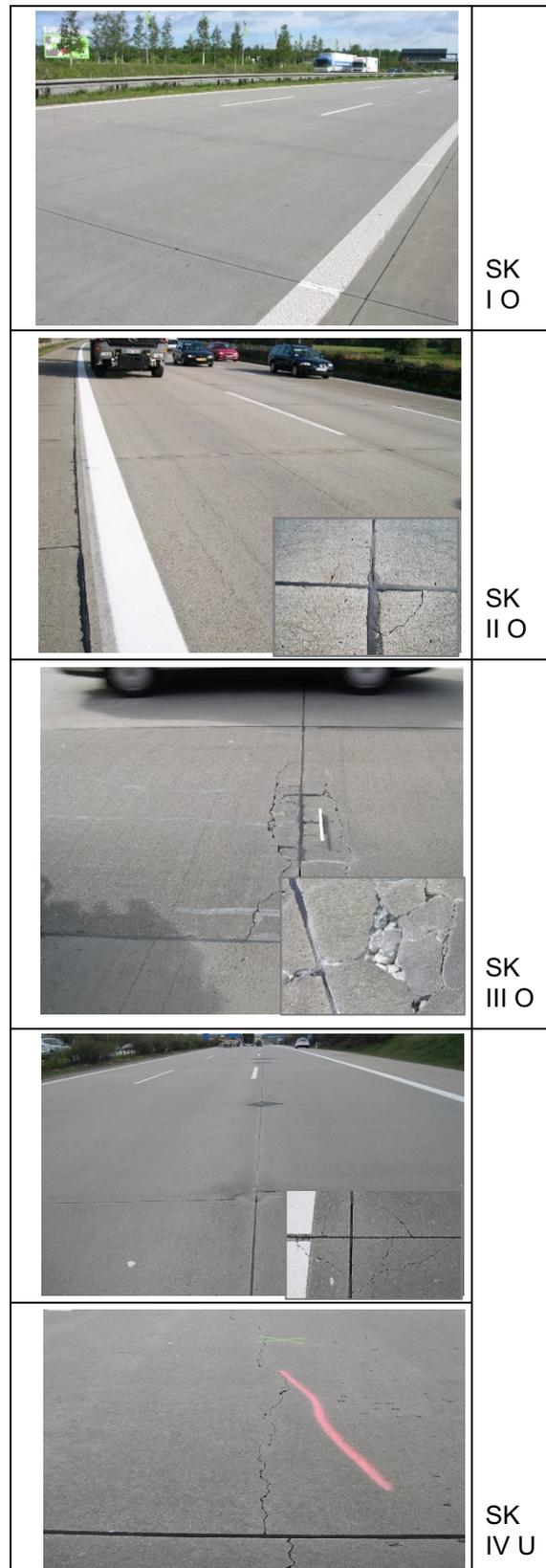


Abbildung 1a: Exemplarische Erscheinungsbilder für die Schadenskategorien [2]

Ergänzend zu den vorstehend aufgeführten drei Schadenskategorien beschreibt die SK IV U

Schadensmerkmale auf der Oberfläche der Betonfahrbahndecke, die von einer AKR im Unterbeton ausgehen. Sie äußern sich in einer rautenförmigen Rissbildung im Bereich der Fugenkreuze. Oft münden diese in Verschotterungen bis hin zu Einbrüchen. Zusätzlich können auch Längsrisse in der Betonfahrbahnplatte auftreten.

Der wichtigste Ansatzpunkt zur Vermeidung derartiger AKR-Schäden an Betonfahrbahndecken besteht im Ausschluss der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung im Vorfeld einer Baumaßnahme. Aus diesem Grund hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) bereits zwei Allgemeine Rundschreiben (ARS) erlassen. So wird im ARS 12/2006 [3] die Anwendung von Opalsandsteinen einschließlich Kieselkreide und Flinten generell untersagt. Darüber hinaus durften gebrochene Gesteinskörnungen aus Grauwacke, Kies-Edelsplitt des Oberrheins und Quarzporphyr sowie rezyklierte Gesteinskörnungen und alle nach Deutschland eingeführten Gesteinskörnungen nur dann für Fahrbahndecken aus Beton verwendet werden, wenn ihre Eignung für diesen Verwendungszweck durch einen von der BASt anerkannten AKR-Gutachter attestiert wurde. Neben den Anforderungen an die Gesteinskörnung wurde das Natriumäquivalent des Zements auf einen Maximalwert von 0,8 M.-% beschränkt. Dies fand auch in der TL Beton-StB 07 [4] Eingang. Da trotz dieser Restriktionen vereinzelt weitere AKR-Schadensfälle bei Betonfahrbahndecken im deutschen Bundesautobahnnetz auftraten, hat das BMVBS im Jahr 2013 sowohl für den Neubau als auch die Erneuerung von Fahrbahndecken aus Beton der Belastungsklasse Bk 100 bis Bk 1,8 gemäß RStO 12 [5] (Feuchtigkeitsklasse WS) bei Bundesfernstraßen das ARS 04/2013 [6] erlassen. Die experimentelle Basis für den Nachweis der AKR-Unbedenklichkeit der gewählten groben Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 [7] mit den Korngruppen $d \geq 2$ mm bzw. des Fahrbahndeckenbetons bilden dabei zeitaufwändige, kostenintensive und pessimistisch ausgelegte AKR-Performance-Prüfverfahren [8, 9]. So kann einerseits die Klimawechsellagerung (KWL) sowie andererseits der 60 °C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr Einsatz finden. Als Kriterium für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen im Beton dient dabei vor allem die Dehnung. Der Dehnungsanteil der sich aus dem Prüfregime ergebenden überlagernden Schädigungsprozesse (z. B. sekundäre Ettringitbildung (bei beiden Performanceprü-

fungen), ggf. Frost bzw. Frost-Tausalz (ausschließlich bei der KWL)) wird dabei nicht separiert.

Eine sinnvolle Ergänzung bzw. ggf. perspektivische Alternative zu den AKR-Performance-Prüfverfahren stellt der modifizierte BTU-SP-Test [10] dar. Er beinhaltet Löseversuche von lediglich zwei Monaten an originaler Gesteinskörnung in 0,1 M Kaliumhydroxid-Lösung bei 80 °C, wobei die Elution von Silizium und Aluminium analysiert wird. Untersuchungen von Hüniger [11] und Hill [12] zeigten in diesem Zusammenhang bereits, dass das aus der Gesteinskörnung herausgelöste Aluminium durch Alumosilicatbildung bzw. durch Blockierungseffekte auf der Oberfläche der Gesteinskörnung zur Inhibierung einer schädigenden AKR im Beton beiträgt. Unzureichend bekannt ist jedoch bisher der Einfluss des von außen zugänglichen Porengefüges der Gesteinskörnung auf das Löslichkeitsverhalten von Silizium und Aluminium. Aber auch der Einfluss von Natriumchlorid in der alkalischen Lösung auf die Löslichkeit beider Elemente wurde in diesem Kontext nur unzureichend untersucht. Aus diesem Grund steht auch eine vergleichende Betrachtung der Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen mit dem modifizierten BTU-Test unter zusätzlicher Berücksichtigung einer Natriumchloridzugabe mit den Performanceprüfungen nach dem ARS 04/2013 [6] noch aus.

1.2 Zielstellung

Ausgehend von der vorgehend geschilderten Problemstellung verfolgt das Projekt das Ziel, den Einfluss des von außen zugänglichen Korngefüges auf die Löslichkeit von Silizium und des interagierenden Aluminiums in einer alkalischen Lösung unter Berücksichtigung des Natriumchlorids quantitativ zu verifizieren. Exemplarisch sollen die hierfür erforderlichen Untersuchungen an vier ausgewählten Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Alkaliempfindlichkeit erfolgen. Die zeitaufgelöste Analyse der Lösevorgänge soll dem besseren Verständnis der Reaktionsmechanismen im Gesteinskorn dienen. Dies wiederum bildet die Voraussetzung für eine schnelle und sichere Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung mit diesem Prüfverfahren. Vergleichend nach dem ARS 04/2013 [6] mit gleichartigen Gesteinskörnung durchgeführte Betonversuche sollen es ermöglichen, erste Rückschlüsse zum ergänzenden Einsatz dieser schnelleren und

flexibleren Prüfmethode bzw. ggf. zur perspektivischen Substituierbarkeit der AKR-Performance-Prüfverfahren zu ziehen.

2 Grundlagen, Stand der Technik

Trotz jahrzehntelanger mannigfaltiger Forschungsaktivitäten im In- und Ausland ist das Problem der schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Bereich des Betonbaus immer noch nicht zufriedenstellend gelöst. Erstmals berichtete Stanton [13] 1940 über schädigende Dehnungen von Beton, die auf chemische Reaktionen des Zements und der Gesteinskörnung zurückzuführen sind. In den fünfziger Jahren entwickelten Powers und Steinour [14, 15] erste Modellvorstellungen zum Schadensmechanismus der AKR. In den siebziger Jahren identifizierten Locher und Sprung [16] Opal und poröse Flinte als alkaliempfindliche Gesteinskörnungen und entwickelten Theorien zu den ablaufenden Reaktionsmechanismen. In den achtziger Jahren führte u.a. Chatterji [17, 18] vertiefende Untersuchungen zum Einfluss der Alkalisalze auf die Quelldrücke des AKR-Gels durch. 2008 fassten Stark et al. [19] den bisherigen Kenntnisstand auf dem Gebiet der AKR in einer Monografie zusammen. Es wird hier davon ausgegangen, dass die reaktiven SiO_2 -Modifikationen der Gesteinskörnung in Anwesenheit von Wasser mit den Alkalien (aus Zementstein bzw. extern zugeführt) unter Bildung quellfähiger Alkalisilicathydrate (AKR-Gele) reagieren. Aufgrund der Hygrokopizität wird dabei das Wasser unter Volumenzunahme in das AKR-Gel eingelagert. Dies kann bei gleichzeitiger Anwesenheit von Kalzium zu Quelldrücken bis zu $8,7 \text{ N/mm}^2$ [20] führen. Da die Zugspannung des Fahrbahndeckenbetons deutlich geringer ist, werden so zwangsläufig Risse induziert. Der zeitliche Verlauf und die Art der Rissbildungsprozesse werden dabei maßgebend von der Art der Gesteinskörnung bestimmt. So ist für schnell reagierende Gesteinskörnungen (z. B. Flint, Opalsandstein und Tonstein) eine von der Übergangzone zwischen dem Korn und der Zementsteinmatrix ausgehende Gel- und Rissbildung charakteristisch. Bei den in diesem Vorhaben primär interessierenden langsam reagierenden Gesteinskörnungen (z. B.: Grauwacke, Rhyolith) hingegen findet die Gelbildung vor allem im Inneren des Kornes statt, was eine von dort ausgehende Rissinitiierung zur Folge hat.

Die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung wird in Deutschland für die meisten Anwendungs-

fälle (außer Betonfahrbahndecken) nach der Alkalirichtlinie des DAfStb [21] in die in der Tabelle 1 aufgeführten drei Klassen eingeteilt. In Abhängigkeit von der Einstufung der Gesteinskörnung (unbedenklich, bedingt brauchbar und bedenklich) werden dort auch erste AKR-Vermeidungsstrategien aufgezeigt. So können ggf. bei den bedingt brauchbaren und bedenklich eingestuften Gesteinskörnungen in Abhängigkeit vom Zementgehalt und der Feuchtigkeitsklasse vorbeugende Maßnahmen ergriffen werden.

Tabelle 1: Klassifikation der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung nach [21]

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Einstufung	Erfordernis vorbeugender Maßnahmen
E I, E I-O, E I-OF, E I-S	unbedenklich	nein
E II-O, E II-OF	bedingt brauchbar	ggf. ja, abhängig von: - Zementgehalt - Feuchtigkeitsklasse
E III-O, E III-OF, E III-S	bedenklich	- Zementgehalt - Feuchtigkeitsklasse

Legende: O... Opalsandstein; F... Flint; S...sonstige Gesteinskörnungen (gebrochene GK: Grauwacke, Rhyolith, Kies des Oberrheins sowie Kiese und gebrochene Kiese aus Mitteldeutschland)

Die Feuchtigkeitsklassen wiederum werden nach der DIN 1045 Teil 2 [22] wie folgt unterteilt:

- WO (trocken: Innenbauteile des Hochbaus)
- WF (feucht: ungeschützte Außenbauteile und massive Bauteile ($d > 0,8 \text{ m}$))
- WA (WF + externe Alkalizufuhr: Meeresbauwerke, Bauteile mit Tausalzeinwirkung (Parkdecks u.a.), Betonfahrbahnen der Belastungsklasse Bk 0,3; Bk 1,0)
- WS (WA + hohe dynamische Beanspruchung: Betonfahrbahnen der Belastungsklasse Bk 0,3; Bk 1,0)

Die normative Grundlage für die Feuchtigkeitsklassen WO, WF und WA bildet die Alkalirichtlinie des DAfStb [21].

Die Prüfmethode für die Einstufung der in diesem Projekt primär betrachteten vier Gesteinskörnungen (ungebrochene Kiese, Grauwacke, Rhyolith) in die Alkaliempfindlichkeitsklasse nach der Alkalirichtlinie des DAfStb [21] ist dem Ablaufschema in der Abbildung 1 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung unbedenklich ist, wenn das Schnellprüfverfahren oder $40 \text{ }^\circ\text{C}$ -Betonversuch bestanden wird.

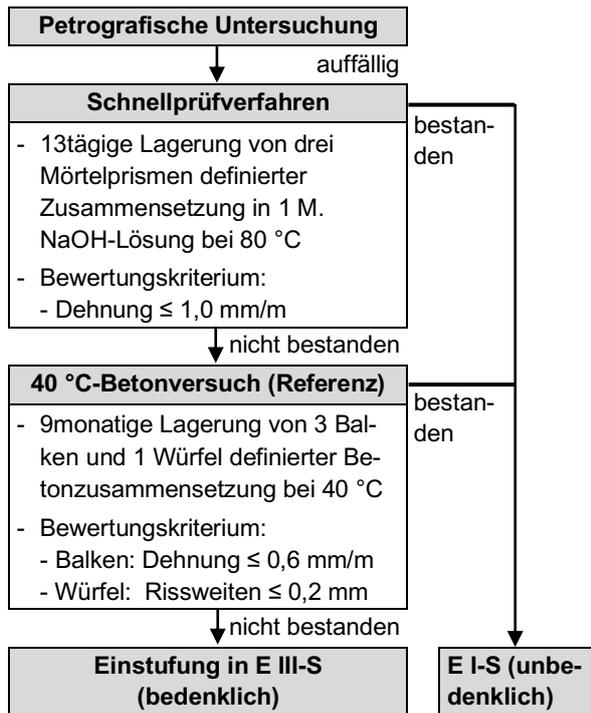


Abbildung 1b: Prüfmethodologie für die Einstufung hier betrachteter Gesteinskörnungen in die Alkaliempfindlichkeitsklassen

Für die hier primär interessierende Feuchtigkeitsklasse WS hingegen ist das bereits einführend erwähnte ARS 04/2013 [6] maßgebend. Der Nachweis der AKR-Unbedenklichkeit der gewählten groben Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 [7] mit Korngruppen $d \geq 2$ mm bzw. des Fahrbahndeckenbetons ist nach dem in der Abbildung 2 aufgezeigten drei Verfahren möglich. Allen Verfahren ist dabei gemeinsam, dass diese durch einen anerkannten AKR-Gutachter zu erfolgen haben. Beim Verfahren V1 wird der Nachweis der Eignung einer konkreten Betonzusammensetzung hinsichtlich der Vermeidung einer betonschädigenden AKR für ein bestimmtes Bauvorhaben erbracht. Art und Umfang der durchzuführenden Prüfungen liegen im Ermessen des AKR-Gutachters. In der Praxis hat sich dabei als Betonversuch die Performanceprüfung etabliert.

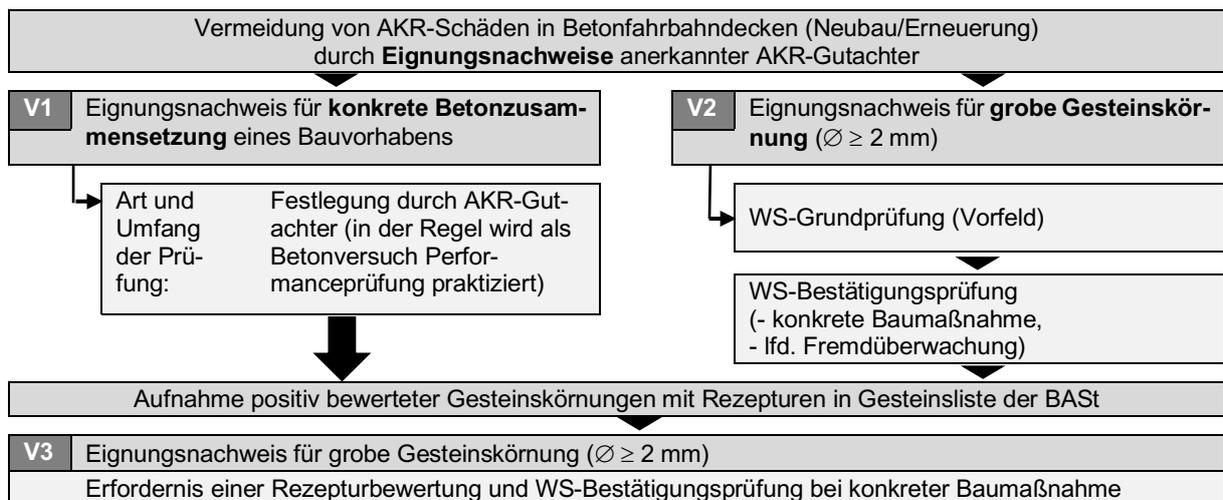


Abbildung 2: Mögliche Verfahren für Eignungsnachweise durch anerkannte AKR-Gutachter zur Vermeidung von AKR-Schäden an Betonfahrbahndecken nach [6]

Ist die Eignung einer groben Gesteinskörnung einer bestimmten Lagerstätte mit den Korngruppen $d \geq 2$ mm hinsichtlich einer AKR-Unbedenklichkeit nachzuweisen, so gelangt das von der Baumaßnahme unabhängige Verfahren V2 mit der sogenannten WS-Grund- und Bestätigungsprüfung zum Einsatz. Der dabei vorgesehene Prüfablauf ist der Abbildung 3 zu entnehmen. Für die WS-Grundprüfung werden alle für den Bau der Betonfahrbahndecke vorgesehenen Lieferkörnungen der Gewinnungsstätte einem Schnellprüfverfahren bzw. alternativ dem Mörtelschnelltest nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie 2007 [23] unterzogen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden die Korngruppen mit den höchsten Dehnungen mineralogisch/petrographisch charakterisiert. Anschließend wird die Eignung dieser Korngruppen in einem WS-Betonversuch nach vorgegebener Rezeptur unter Berücksichtigung der Bauweise mit einem festgelegten Prüfzement und Prüfsand untersucht. Dies kann mittels Klimawechsellagerung (KWL) [8] oder 60 °C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr [9] erfolgen. Bei bestandener WS-Grundprüfung ist in definierten Zeitabständen oder rechtzeitig vor Betonierbeginn eine WS-Bestätigungsprüfung durchzuführen. Diese schließt

sowohl einen erneuten Schnelltest aller Korngruppen der groben Gesteinskörnung als auch deren mineralogisch/petrographische Charakterisierung ein. Alternativ kann dies auch durch eine Überwachungsstelle erfolgen. Die vergleichende Bewertung der Ergebnisse der WS-Bestätigungs- und WS-Grundprüfung hingegen obliegt ausschließlich dem anerkannten AKR-Gutachter.

Die mit dem Verfahren V1 bzw. V2 positiv bewerteten Betonrezepturen bzw. Gesteinskörnungen werden in einer Gesteinsliste geführt, die der Internetseite der BAST (www.bast.de) zu entnehmen ist. Die Aufnahme weiterer Gesteinskörnungen in diese Liste können gemäß [6] die anerkannten AKR-Gutachter auf Veranlassung und nach Zustimmung des Auftraggebers des Gutachtens empfehlen. Die so erstellte Gesteinsliste der BAST ist aber auch die Basis für den Eignungsnachweis einer groben Gesteinskörnung nach dem Verfahren V3 durch den anerkannten AKR-Gutachter (Abbildung 2). In der Regel schließt dieser Nachweis eine Rezepturbewertung und WS-Bestätigungsprüfung für eine konkrete Baumaßnahme ein.

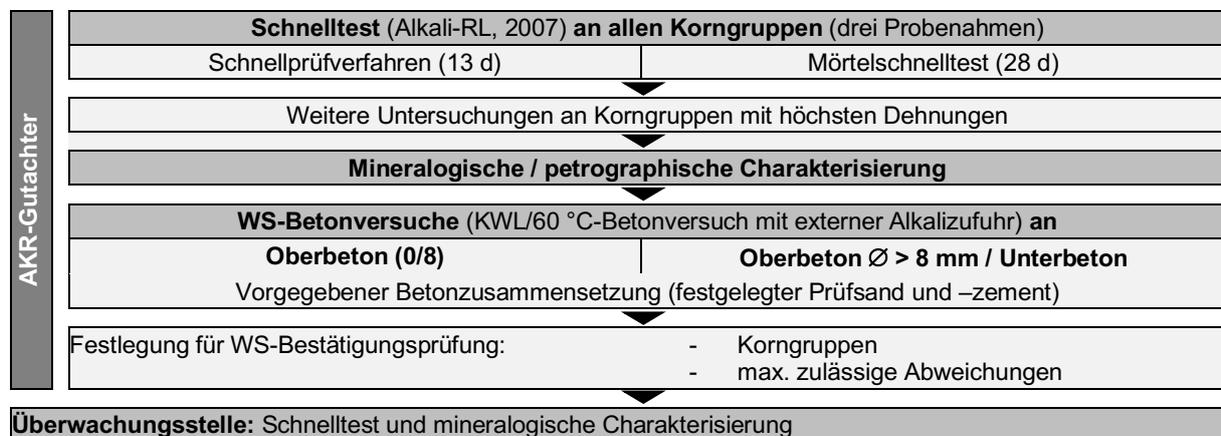


Abbildung 3: Prüfablauf bei WS-Grundprüfung nach Verfahren V2 [6]

Zur Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung wurde alternativ zum Prüfablauf nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] an der BTU der BTU-SP-Test entwickelt. Dieses vor allem von Bachmann [10] entwickelte Prüfverfahren basiert auf 14tägigen Löseversuchen gebrochener Lieferkörnungen in 1 M KOH-Lösung bei 80 °C. Dabei werden nach dem Brechen der Gesteinskörnung im Backenbrecher die Fraktionen 0,25/0,5 mm, 1,0/2,0 mm und 4/8 mm abgesiebt, gewaschen und anschließend bis zur Massekonstanz getrocknet. Danach werden 10 g von

den einzelnen Fraktionen für die Löseversuche eingewogen und in HDPE-Flaschen eingebracht. Nach dem jeweiligen Auffüllen mit 100 g 1 M KOH-Lösung werden die Flaschen luftdicht verschlossen und bei 80 °C im Wärmeschrank gelagert. Zur Verfolgung der Lösekinetik werden alle zwei Tage 3 ml Lösung aus den Flaschen entnommen und nach dem Filtrieren mit einem 0,2 µm-Membranfilter mit dem ICP-OES analysiert. Von zentralem Interesse ist dabei vor allem der SiO₂-Überschuss (SiO₂, ü.b.) in der Lösung. Er berechnet sich nach Hill [12] aus der gesamten SiO₂ - Konzentration

($\text{SiO}_2, \text{ ges.}$) in der Lösung abzüglich den durch das gesamte gelöste Al_2O_3 ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{ ges.}$) aluminosilikatisch gebundenen SiO_2 -Anteil mit nachstehender Gleichung 1:

$$\text{SiO}_2, \text{ ü.} = \text{SiO}_2, \text{ ges.} - 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{ ges.} \quad (\text{Gl. 1})$$

Neben dem SiO_2 -Überschuss wird auch die über die Wasseraufnahme ermittelte offene Porosität zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung herangezogen. So stellte Bachmann [10] durch vergleichend durchgeführte Löse- und 40°C -Betonversuche fest, dass sich die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung im Beton mit zunehmender offener Porosität der Gesteinskörnung verringert. Vor diesem Hintergrund entwickelte er die in der Abbildung 4 dargestellte Bewertungsmatrix.

Aufbauend auf den BTU-SP-Test entwickelte Kronemann [24] den modifizierten BTU-Test. Er unterscheidet sich im Wesentlichen durch folgende Punkte:

- Erhöhung der Einwaage der zu beurteilenden Gesteinskörnung von 10 g auf 90 g bei den Löseversuchen zur Verbesserung der Repräsentativität der Ergebnisse
- Durchführung der Löseversuche an der ungeborenen Lieferkörnung zur Vermeidung verfälschender Einflüsse durch das Brechen
- Verlängerung der Löseversuche von 14 auf 56 Tage zur besseren Verfolgung der Lösekinetik
- Erhöhung der Konzentration der KOH-Lösung von 0,1 M auf 1,0 M zur Verstärkung der Lösekinetik
- Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung über die korrelative Betrachtung der gewichteten zeitlichen Veränderung des SiO_2 -Überschusses in den Löseversuchen der Gesteinskörnungsfractionen einerseits und die Zunahme der Dehnung bzw. Rissweite bei den Betonprüfkörpern im 40°C -Betonversuch andererseits
- Zeitlich gestaffelte Auswertung der Lösegeschwindigkeiten im Löseversuch in vier Phasen (0. Phase: 0-4 d; 1. Phase: 4-14 d; 2. Phase: 14-28 d; 3. Phase: 28-56 d)

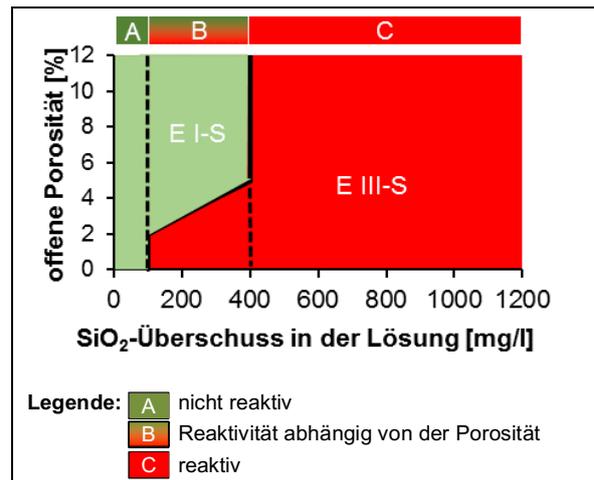


Abbildung 4: Bewertungsmatrix des BTU-SP-Tests

Beiden an der BTU entwickelten Tests ist gemeinsam, dass sie die Veränderung der Lösekinetik durch die Zufuhr von NaCl im Eluationsmedium bisher nicht berücksichtigen. Dies ist jedoch vor dem Hintergrund des Tausalzeintrags beim Winterdienst für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der bei Betonfahrbahndecken der Belastungsklasse Bk 100 bis Bk 1,8 gemäß RStO 12 [5] eingesetzten Gesteinskörnungen unerlässlich. So wurde beispielweise bei der Klimawechsellagerung der Betonprüfkörper durch Beaufschlagung mit unterschiedlichen Prüflösungen bereits unzählige Male der Nachweis erbracht, dass NaCl in Betonen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen eine AKR auslösen und/oder stark beschleunigen kann. Allerdings ist der diesem Sachverhalt zu Grunde liegende Schadensmechanismus bis heute nicht hinreichend geklärt.

Lange Zeit wurde angenommen, dass durch die Bindung der Chloridionen im Friedelschen Salz ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$) Hydroxidionen freigesetzt werden und mit den Natriumionen des Tausalzes Natriumhydroxid bilden. Diesem wiederum wurde ein maßgebender Einfluss auf die schädigende AKR zugeschrieben [u.a. 25, 26]. Neuere Löseversuche mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen in alkalischen Lösungen von Dressler [27] zeigen jedoch, dass in Gegenwart von NaCl die SiO_2 -Löslichkeit der reaktiven Gesteinskörnung trotz sinkendem pH-Wert ansteigt. Es wird angenommen, dass bei hoher NaCl-Zugabe auch kristallines SiO_2 (Quarz) angelöst wird. Bei einer durch Alkalien aus dem Bindemittel gesteuerten AKR (ohne Alkalien von außen) gilt nur amorphes, mikro- oder kryptokristallines SiO_2 sowie gestresser Quarz als schadensauslösend. Enthalten Gesteinskörnungen weitere Quarz-Modifikationen, kann vermutlich auch bei bisher als unbedenklich

geltenden Gesteinskörnungen eine ausreichende Menge an SiO_2 für eine Gelbildung gelöst werden.

Auch Giebson [28] fand heraus, dass sich SiO_2 aus Rhyolithkörnern in einer Porenlösung mit NaCl bis zum Erreichen einer bestimmten NaCl-Konzentration deutlich stärker löst als in einer Porenlösung gleichen pH-Wertes ohne NaCl.

3 Lösungsansatz

Zur Erreichung der Zielstellung wurde basierend auf dem vorstehend aufgezeigten Stand der Technik der in der Abbildung 5 aufgezeigte Lösungsansatz entwickelt.

Er sieht im ersten Schritt die **Auswahl, Beschaffung und Homogenisierung von vier Gesteinskörnungen** vor. Als Auswahlkriterien dienten dabei die Art, die Alkaliempfindlichkeit und die Gefügebesechaffenheit der Gesteinskörnung. Vor diesem Hintergrund wurden nach vorheriger Abstimmung mit der BAST in Kooperation mit der BTU Cottbus-Senftenberg je zwei Fest- und Lockergesteine mit unterschiedlicher offener Porosität und Alkaliempfindlichkeit ausgewählt und beschafft. Nähere Angaben zu den ausgewählten Gesteinskörnungen sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität bei den nachfolgenden Untersuchungen wurden die Gesteinskörnungen mittels Probenteiler homogenisiert.

Tabelle 2: Bezeichnung, Gesteinsart und Korngruppen der Gesteinskörnungen

Kriterium		GK-Bezeichnung			
		GK1	GK2	GK3	GK4
Fotodokumentation					
Gesteinsart	[-]	Kies	Grauwacke (Festgestein)	Rhyolith (Festgestein)	Kies
Korngruppen	[mm]	2/8; 8/16; 16/32 (16/22)	2/5; 5/8; 8/16; 16/22	2/5; 5/8; 8/16; 16/22	2/8; 8/16; 16/32 (16/22)
offene Porosität ¹⁾	[M.-%]	0,9	0,6	0,8	1,61
Alkaliempfindlichkeit ²⁾		EIII-S	EIII-S	EI-S	EI-S
<p>1) Ermittlung in Anlehnung an an DIN EN 1097 Teil 6 [29] und DIN EN 1936 [30] 2) nach Alkalirichtlinie des DAfStb [21]</p>					

Gegenstand des nächsten Schritts war die umfassende **Charakterisierung der vorstehend ausgewählten Gesteinskörnungen**. So wurde diese zunächst petrografisch beschrieben. Anschließend wurden die oxidischen Bestandteile mit **Mikroröntgenfluoreszenzanalyse (MRFA)** und der Mineralbestand mit Röntgenbeugung (englisch: **X-ray diffraction, XRD**) bei allen Gesteinskörnungen analysiert. Das bildete die Voraussetzung für die gezielte Auswahl der Einzelkörner in der Fraktion 8/16 für die röntgentomografischen Untersuchungen. Aufgrund der naturgegebenen heterogenen Zusammensetzung der Kiese wurden die in GK1 und GK4 primär vorkommenden Gesteinsarten ermittelt und aus ihnen je 10 Einzelkörner für die 3D-Computertomografie (3D-CT) ausgewählt. Aufgrund der Homogenität der Festgesteine beschränkte sich bei GK2 und GK3 die Auswahl auf je 10 Einzelkörner. Nach einer umfassenden Optimierung der Messanordnung erfolgten die röntgentomografischen Untersuchungen an den hygrothermisch vorkonditionierten Einzelkörnern. Für die Auswertung der so gewonnenen 3D-Datensätze hinsichtlich der differenzierten Ermittlung der äußeren, der von außen zugänglichen sowie der von außen nicht zugänglichen Oberflächen des Einzelkorns wurde ein spezieller Softwaretool entwickelt. Zur ganzheitlichen Einordnung der tomografisch ermittelten Oberflächen wurde zusätzlich die spezifische Oberfläche der Einzelkörner mit dem BET-Verfahren in Anlehnung an ISO 9277:2010 [31] bestimmt. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass die Ortsauflösung der 3D-CT auf 10 bis 12 μm beschränkt ist und mit dem BET-Verfahren auch signifikant kleinere Poren bzw. Risse erfasst werden können. Aus dem gleichen Grund wurde orientierend mittels Quecksilberdruckporosimetrie (Hg-Druckporosimetrie) die Porengrößenverteilung in je zwei zusätzlich gewonnenen Einzelkörnern der primär in den Kiesen GK1 und GK4 vorkommenden Gesteinsarten sowie der gebrochenen Festgesteine GK2 und GK4 bestimmt.

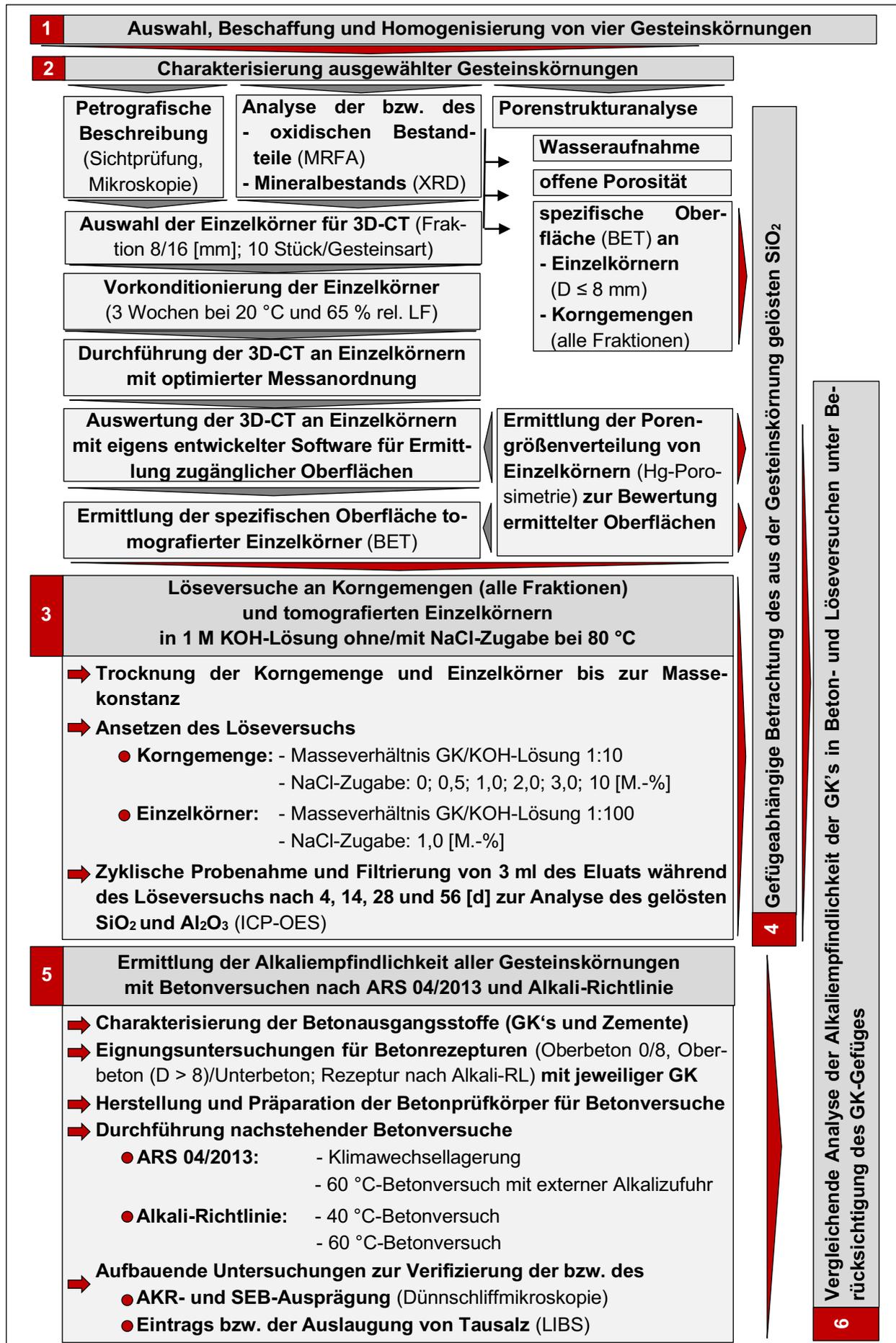


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes zur Erreichung der Zielstellung

Parallel zu den 3D-CT-Untersuchungen mit der nachgeschalteten BET-Analyse und der Hg-Druckporosimetrie an Einzelkörnern an der BAM wurde an der BTU Cottbus-Senftenberg die offene Porosität an Einzelkörnern der Fraktion 8/16 mm über die Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN 1097 Teil 6 [29] und DIN EN 1936 [30] bestimmt. Zusätzlich wurde hier die spezifische Oberfläche an Korngemengen der Fraktion 2/8 mit BET in Anlehnung an ISO 9277:2010 [31] ermittelt. Bei beiden Prüfgrößen wurden die einzelnen Hauptgesteinsarten der Kiese GK1 und GK4 separat und im Korngemisch gewichtet betrachtet. Zusätzlich wurde nach der gerätetechnischen Modifikation der BET-Messapparatur (Vergrößerung der Messzelle) die spezifische Oberfläche von Korngemengen in allen Kornfraktionen bis zu einem Größtkorn von 16 mm ganzheitlich, d.h. ohne separate Betrachtung der Hauptgesteinsarten der Kiese, ermittelt.

Nach der Charakterisierung der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 wurden die **Löseversuche an den Korngemengen aller Fraktionen und an den tomografierten Einzelkörnern** in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Zugabe bei 80 °C durchgeführt. Bei den Löseversuchen der Korngemenge betrug deren Einwaage 90 g. Diese wurde mit 900 g der Prüflösung versetzt und in luftdicht verschlossenen Kunststoffflaschen bei 80 °C gelagert. Der Prüflösung selbst wurden 0, 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 und 10,0 M.-% NaCl zugegeben. Bei den Löseversuchen an den tomografierten Einzelkörnern musste aufgrund der geringen Einwaage des Kornes und der mehrfachen Eluatanalyse während des Löseversuchs das Masseverhältnis GK/Prüflösung von 1:10 auf 1:100 erhöht werden. Die NaCl-Zugabe betrug hier generell 1,0 M.-%. Zur Erfassung der Lösekinetik wurde in beiden Löseversuchsarten nach 4, 14, 28 und 56 Tagen 3,0 ml des Eluats entnommen und mit einem 0,2 µm-Membranfilter filtriert. Die Analyse des so filtrierten Eluats erfolgte mit optischer Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (englisch: **I**nductively **C**oupled **P**lasma **O**ptical **E**mission **S**pectrometry; ICP-OES). Bestimmt wurden hierbei die Konzentrationen der Silizium- und Aluminiumionen, die nachfolgend in oxidischer Schreibweise in mg/l angegeben werden.

Basierend auf den Ergebnissen der Eluatanalyse bei den Löseversuchen und den zuvor ermittelten Oberflächen mittels BET (Korngemengen) und 3D-CT (Einzelkörnern) wurden im

nächsten Schritt die gesteinskörnungsspezifisch ermittelten SiO₂-Gehalte im jeweiligen Eluat auf die jeweils ermittelten Oberflächen des Korngemenges bzw. des Einzelkorns bezogen.

Unabhängig davon wurde in einem weiteren Schritt die **Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 mittels Betonversuchen** nach dem ARS 04/2013 [6] und der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] untersucht. Im Vorfeld hierzu wurden zunächst die Betonausgangsstoffe charakterisiert. So wurden hier einerseits die mechanischen und physikalischen sowie chemischen Eigenschaften des WS-Prüfzements nochmals vergleichend zu den Angaben des VDZ im Auftrage der BAST bestimmt. Andererseits wurde die Alkaliempfindlichkeit aller Gesteinskörnungen mit dem Schnellprüfverfahren nach [21] analysiert. Zusätzlich wurde die Rohdichte, der Wasseranspruch und die Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 ermittelt.

Die Basis für die Betonversuche bildeten einerseits die im ARS 04/2013 [6] aufgeführten Rezepturen für den Oberbeton 0/8 (Waschbeton) und den Oberbeton (D > 8)/Unterbeton mit dem WS-Prüfzement. Andererseits fand die in der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] aufgeführte Rezeptur mit dem AKR-Prüfzement Anwendung. Nach den Eignungsuntersuchungen zu allen drei Basisrezepturen mit den jeweiligen Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 wurden die Betonprüfkörper für die Betonversuche und die mechanische Kennwertermittlung hergestellt. Als Betonversuche fanden einerseits nach dem ARS 04/2013 [6] der 60 °C Betonversuch mit externer Alkalizufuhr (3 und 10 %ige NaCl-Lösung) und die Klimawechselagerung mit Wasser- und NaCl-Belastung Anwendung. Andererseits wurden die nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] hergestellten Prüfkörper im 40 °C-Betonversuch (Prismen und Würfel) und 60 °C-Betonversuch (Prismen) gelagert.

Nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen wurde bei ausgewählten Betonprüfkörpern die Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale an Dünnschliffen mikroskopisch analysiert. Außerdem wurde der Eintrag bzw. die Auslaugung des Tausalzes mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie (englisch: **L**aser-**I**nduced **B**reakdown **S**pectroscopy (LIBS)) an Vertikalschnitten durch die Betonprüfkörper vor und

nach der jeweiligen AKR-provozierenden Lagerung verifiziert.

In einem letzten Schritt wurde die **Alkaliempfindlichkeit aller Gesteinskörnungen vergleichend in den Beton- und Löseversuchen** ohne und mit Berücksichtigung der von außen zugänglichen inneren Oberflächen der Gesteinskörnungen **bewertet**.

4 Beschreibung ausgewählter Prüfverfahren

4.1 Vorbemerkungen

Zum besseren Verständnis werden nachfolgend ausgewählte Prüfverfahren kurz beschrieben. Dabei werden folgende Prüfkomplexe betrachtet:

- MRFA und XRD zur Charakterisierung der oxidischen Bestandteile und des Mineralbestands der Gesteinskörnungen
- Röntgen-3D-CT, BET-Analyse und Hg-Porosimetrie zur Charakterisierung der Porenstruktur der Gesteinskörnungen, wobei den tomografischen Analysen besondere Beachtung geschenkt wurde
- ICP-OES für die Eluatanalyse bei den Löseversuchen an den Gesteinskörnungen
- Schnellprüfverfahren und verschiedenartige Betonversuche zur Charakterisierung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen
- Dünnschliffmikroskopie bzw. LIBS an Prüfkörpern nach Betonversuchen zur Verifizierung der AKR- und SEB-Merkmale bzw. zur Ermittlung des Eintrags bzw. der Auslaugung von Alkalien

4.2 MRFA-Analyse

Die oxidische Zusammensetzung der Fraktionen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 wurde ausschließlich mit MRFA bestimmt. Dazu wurden die Korngruppen der jeweiligen Gesteinskörnung zu einem Pulver aufgemahlen.

Das Messprinzip der MRFA ist dadurch gekennzeichnet, dass hier ein fokussierter Röntgenstrahl auf die Baustoffoberfläche appliziert wird. Dies führt zum Herauslösen der Elektronen aus den inneren Schalen des Atoms. Die so entstehenden Lücken werden durch Elektronen aus

weiter außenliegenden Atomschalen aufgefüllt. Bei diesen Übergängen entsteht eine für jedes Element charakteristische Fluoreszenzstrahlung, die vom Detektor erfasst wird. Sie gibt Aufschluss über die Zusammensetzung der Probe. Eine weitergehende detaillierte Beschreibung des Messverfahrens ist u.a. [32] zu entnehmen.

Realisiert wurden die Analysen mit dem kommerziell erhältlichen Mikro-Röntgenfluoreszenzspektrometer Eagle III mit variablem Fokussiersystem (Abbildung 6). Das Gerät besitzt eine minimale Spotgröße von 35 µm. Diese kann jedoch in mehreren Stufen auf bis zu 200 µm vergrößert werden. Gemessen wurde bei einer definierten Spannung der Rhodiumröhre bei variablem Probenstrom im Vakuum. Die Fluoreszenzstrahlung wird mit einem mit flüssigem Stickstoff gekühlten Halbleiterdetektor gemessen. Das Gerät ist mit einem motorisierten x-y-z-Tisch ausgestattet, welcher neben den Punktanalysen auch linien- und flächenförmige Elementverteilungsanalysen erlaubt. Es ist damit möglich, quasi zerstörungsfrei ortsaufgelöst Elemente auf Oberflächen gleich oder höher der Ordnungszahl 11 (Natrium) zu detektieren. Im hier vorliegenden Fall waren die integralen Gehalte von SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, K₂O und TiO₂ in den Gesteinskörnungen von besonderem Interesse.

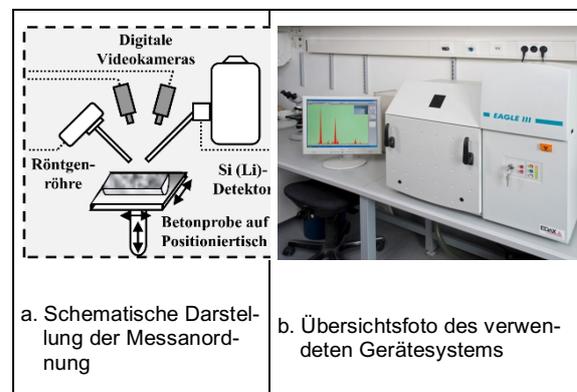


Abbildung 6: Beschreibung der eingesetzten MRFA-Analysetechnik

4.3 XRD-Analyse

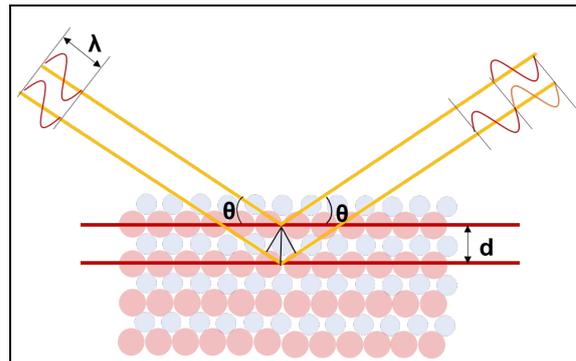
Der Mineralphasenbestand wurden an pulverisierten Gesteinskörnungen jeder Korngruppe mittels XRD analysiert.

Das Messprinzip der XRD basiert auf der Röntgenbeugung. So wird ein fokussierter monochromatischer Röntgenstrahl auf die Probe appliziert und die Reflexion bzw. Beugung gemessen (Abbildung 7). Dabei nutzt man die physikalische Tatsache, dass Kristalle aus dreidimensionalen und periodisch angeordneten Atomen bestehen, welche durch ihre dichten Kerne eine Beugungsebene für den Röntgenstrahl ausbilden. Trifft nun ein Röntgenstrahl mit dem Winkel θ auf die so genannten Netzebenen auf, so wird dieser nach der Bragg-Gleichung im gleichen Winkel gebeugt, wenn der Gangunterschied ($2d \cdot \sin\theta$) zweier Röntgenstrahlen an zwei Netzebenen mit dem Abstand d einem ganzzahligen Vielfaches (n) der Wellenlänge (λ) entspricht:

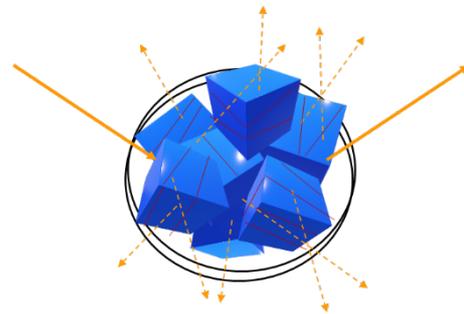
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (\text{Gl. 2})$$

Variiert man nun systematisch den Einfallswinkel werden nur Netzebenen erfasst, die sich in Beugungsbedingung befinden. Wird die Probe dabei pulverisiert und gedreht, erhöht sich die statistische Wahrscheinlichkeit alle Netzebenen zu erfassen. Trägt man nun die erfasste Intensität der gebeugten Netzebenen über den Einfallswinkel auf, ergibt sich daraus eine Diffraktogramm. Dieses ist für jedes Mineral charakteristisch. Mit Hilfe des Rietveld-Algorithmus lassen sich nun aus dem Diffraktogramm einer Mischprobe die quantitativen Anteile der einzelnen Phasen sehr genau bestimmen, wenn die nötigen Voraussetzungen, wie Korngröße ($< 6 \mu\text{m}$) und texturfreie Präparation gegeben sind.

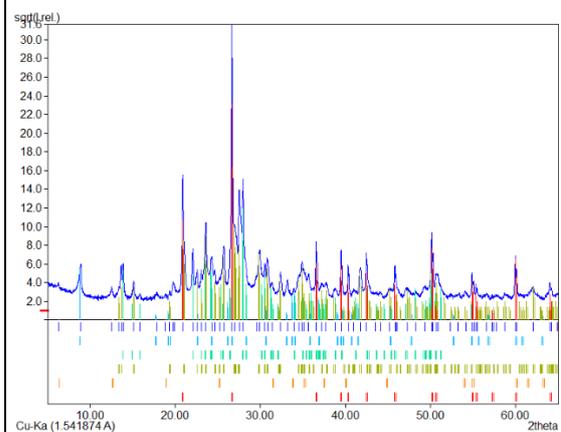
Realisiert wurden die Analysen in diesem Projekt mit dem Röntgendiffraktometer XRD 3003 TT mit Eulerwiege und X-Y Tisch der Firma Seifert. Die Auswertung erfolgte rietveldbasiert mit dem Auswertetool Autoquant 2.62.



a. Schematische Darstellung der Bragg-Gleichung für eine Netzebene



b. Schematische Darstellung der XRD an einer Pulverprobe mit unterschiedlich orientierten Kristallen und daraus resultierenden Netzebenen (rote Linien)



c. Exemplarisch dargestelltes Diffraktogramm

Abbildung 7: Prinzip und Ergebnis der XRD-Messungen in Anlehnung an [33, 34]

4.4 Röntgen 3D-CT am Einzelkorn

Zur räumlichen Charakterisierung des inneren Gefüges ausgewählter Einzelkörner der Fraktion 8/16 mm gelangte die Röntgen 3D-CT zum Einsatz. Dabei war die Visualisierung und Quantifizierung der von der äußeren Kornoberfläche in das Korn hineinreichende Rissstrukturen und Poren von zentralem Interesse.

Die Grundlage der Röntgen 3D-CT bildet die Durchstrahlungsprüfung. Diese wiederum basiert auf der unterschiedlichen Schwächung der Röntgenstrahlung durch Dichte- und Dickenunterschiede im Prüfobjekt. Die hierfür erforderliche Messanordnung ist der Abbildung 8a in schematischer Form zu entnehmen. Sie besteht aus der Strahlenquelle, im hier vorliegenden Fall einer Röntgenröhre, dem auf einem Drehtisch befindlichen Prüfobjekt und einem Detektor.

Das Messprinzip der Röntgen 3D-CT basiert auf der Durchstrahlung des Prüfobjektes mit Röntgenstrahlung aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln über seinen gesamten Umfang. Dazu wird das auf einem Drehtisch befindliche Prüfobjekt schrittweise gedreht. In der jeweiligen Standposition erfolgt die Durchstrahlungsprüfung. Als Ergebnis erhält man eine Vielzahl an Einzelbildern mit der Verteilung der radiografischen Dichte. Aus diesen wird anschließend mit speziellen Rekonstruktionsalgorithmen die räumliche Verteilung der Absorptionskoeffizienten α im Prüfobjekt berechnet (Abbildung 8a). Durch die so erfolgende Abbildung der radiogra-

fischen Dichteunterschiede kann im jeweiligen Prüfobjekt, hier im Einzelkorn, die räumliche Verteilung des Feststoffs und die darin befindlichen Poren und Rissen sichtbar gemacht werden [35, 36].

Für die tomografischen Untersuchungen gelangte hier die in der Abbildung 8b dargestellte 3D-Mikrofokusanlage zum Einsatz. Zur Erreichung einer möglichst hohen Ortsauflösung und damit zur besseren Visualisierbarkeit der Poren und Risse im Einzelkorn wurde einerseits als Strahlenquelle eine 225 kV Mikrofokusröntgenröhre sowie andererseits ein α -Si Flachdetektor mit einer Größe von 2048 Pixel x 2048 Pixel verwendet. In Abhängigkeit von den stark schwankenden geometrischen Abmessungen des Einzelkorns ergab sich daraus eine Voxelgröße von 11,2 bis 21,1 μm . Die Röhrenspannung betrug bei allen Messungen 130 kV. Es wurde ein Röhrenstrom von 180 μA gewählt. Zur Vorfilterung wurde ein 0,5 mm dickes Kupferblech verwendet. Die Anzahl der Betrachtungswinkel betrug 3000. Als Belichtungszeit wurde 1 s gewählt.

Zur Automatisierung des Messablaufs wurden je zehn Einzelkörner in ein Plexiglasrohr eingebracht. Zur radiografischen Separierung der Einzelkörner wurden diese mit Distanzstücken aus Polystyrolhartschaum getrennt. Dadurch konnten alle im Plexiglasrohr befindlichen Gesteinskörner hintereinander ohne aufwändigem Probenwechsel gemessen werden. Höhenpositionierung der Röntgenröhre erfolgte gleichfalls automatisch.

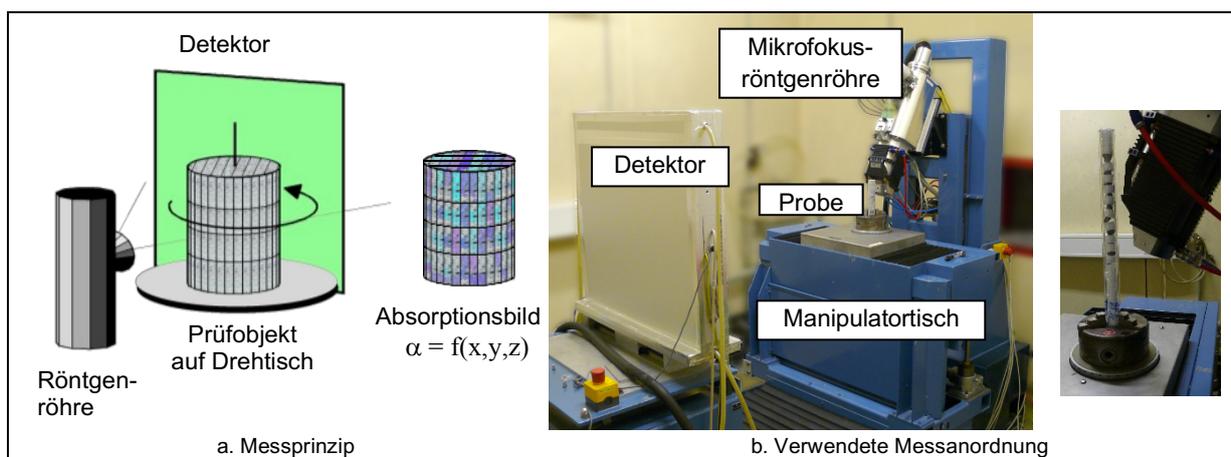


Abbildung 8: Messaufbau der 3D-CT für die Visualisierung und Quantifizierung der Risse und Poren im Einzelkorn

Eine besondere Herausforderung war die Auswertung der gewonnenen 3D-Datensätze, da die verfügbaren konventionellen Programme für diesen Zweck nicht alle benötigten Anforderungen genügen. So sollte die Segmentierung der Poren und Risse in den Gesteinskörnern möglichst automatisiert und reproduzierbar erfolgen. Aus diesem Grunde wurde hierfür ein eigener modular aufgebauter erweiterbarer Auswertalgorithmus basierend auf dem Rechenprogramm MATLAB [37] entwickelt. Die Basisversion besteht aus folgenden drei aufeinander aufbauenden Modulen:

- Modul M1: Grauschwellwertanalyse
- Modul M2: Gradientenschwellwertanalyse
- Modul M3: Rauschentfernung

Der erste **Modul M1** verfolgt das Ziel, alle Risse und Poren, die größer als zwei Voxel sind, zu identifizieren. Hierfür wird ein binärer 3D-Datensatz **T1** mit einem konservativen Grauschwellwert (conservative threshold) aus den rekonstruierten originalen 3D-Datensatz **A** erzeugt (Abbildung 9). Für die hierfür erforderliche Grauschwellwertbildung wurde das Histogramm mit der Grauwertverteilung im originalen 3D-Datensatz erzeugt. Basierend darauf erfolgte die Grauschwellwertermittlung mit dem Triangulationsalgorithmus von Young, Gerbrands, & van Vliet [38] und Zack, Rogers, & Latt [39] automatisiert. Als Vorhaltemaß zum realen Grauwert (generous Void-Solid Threshold) wurden 25 % gewählt (Abbildung 9b).

Im nächsten **Modul M2** werden nun Risse und Poren identifiziert, die kleiner als 2 Voxel sind. Dies wird mittels Gradientenschwellwertanalyse realisiert, die eine bessere Erfassung der Rissränder ermöglicht. Umgesetzt wird dies durch ein gestuftes Vorgehen. So wird hier zunächst wiederum aus dem originalen 3D-Datensatz **A** ein binärer 3D-Datensatz **T2** mit einem größeren Grauschwellwert (generous Void-Solid Threshold) als im Modul M1 erzeugt (Abbildung 10.1). Danach wird ein weiterer 3D-Datensatz **G1** durch Bildung der 1. Ableitung des originalen 3D-Datensatzes **A** nach dem Ort (x , y und z) unter Nutzung des Sobel-Operators nach Pringle [38] generiert (Abbildung 10.2a). Dieser wird anschließend unter Nutzung eines Schwellwertgradienten binarisiert (Abbildungen 10.2b und 10.2c). Der so erhaltene 3D-Datensatz wird als **G2** bezeichnet. Der hierfür erforderliche Schwellwertgradient wiederum wird aus dem

berechneten Histogramm der Amplitudenverteilung der Gradienten im 3D-Datensatz **G1** mittels Triangulationsalgorithmus automatisiert gewonnen. In einem letzten Schritt wurden in diesem Modul die lokalen Bereiche mit sehr hoher radio-graphischer Dichte eliminiert. Hierfür wurde der binäre 3D-Datensatz **T2** mit dem binären abgeleiteten 3D-Datensatz **G2** multipliziert (Abbildung 10.3).

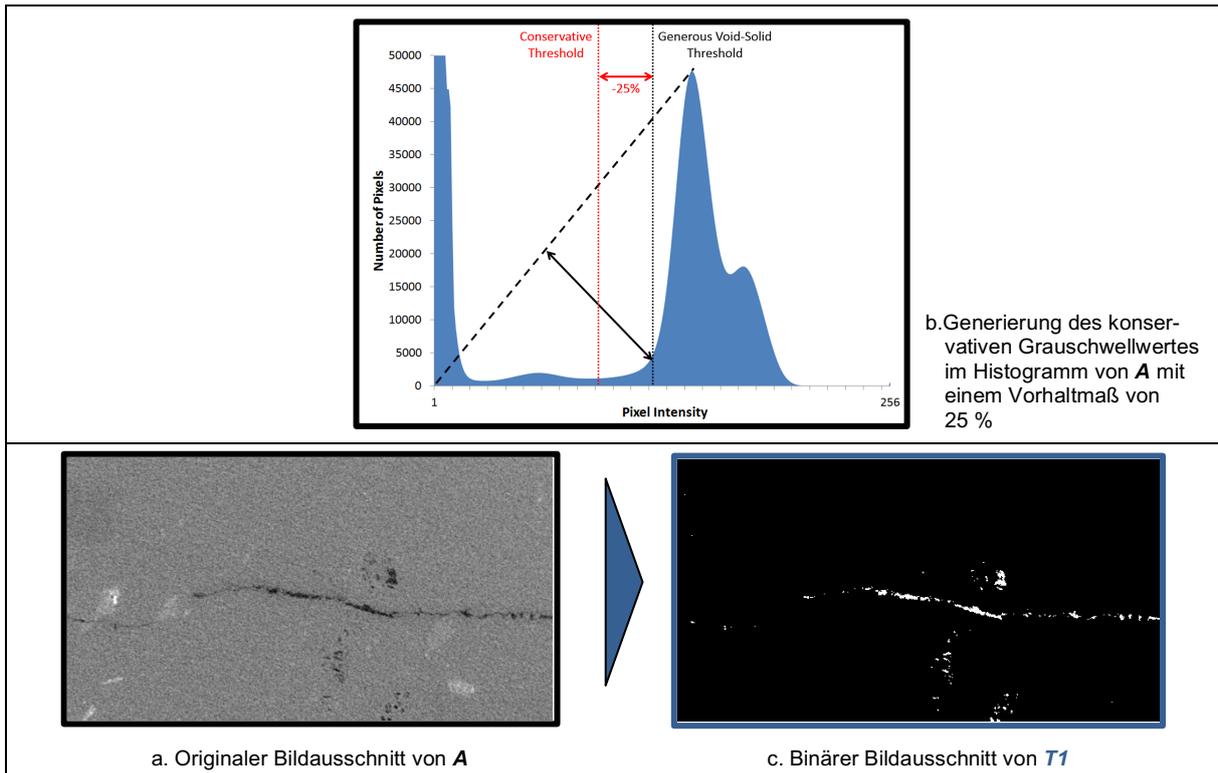


Abbildung 9: Binarisierung des originalen 3D-Datensatzes **A** mit konservativem Grauschwellwert im Modul M1

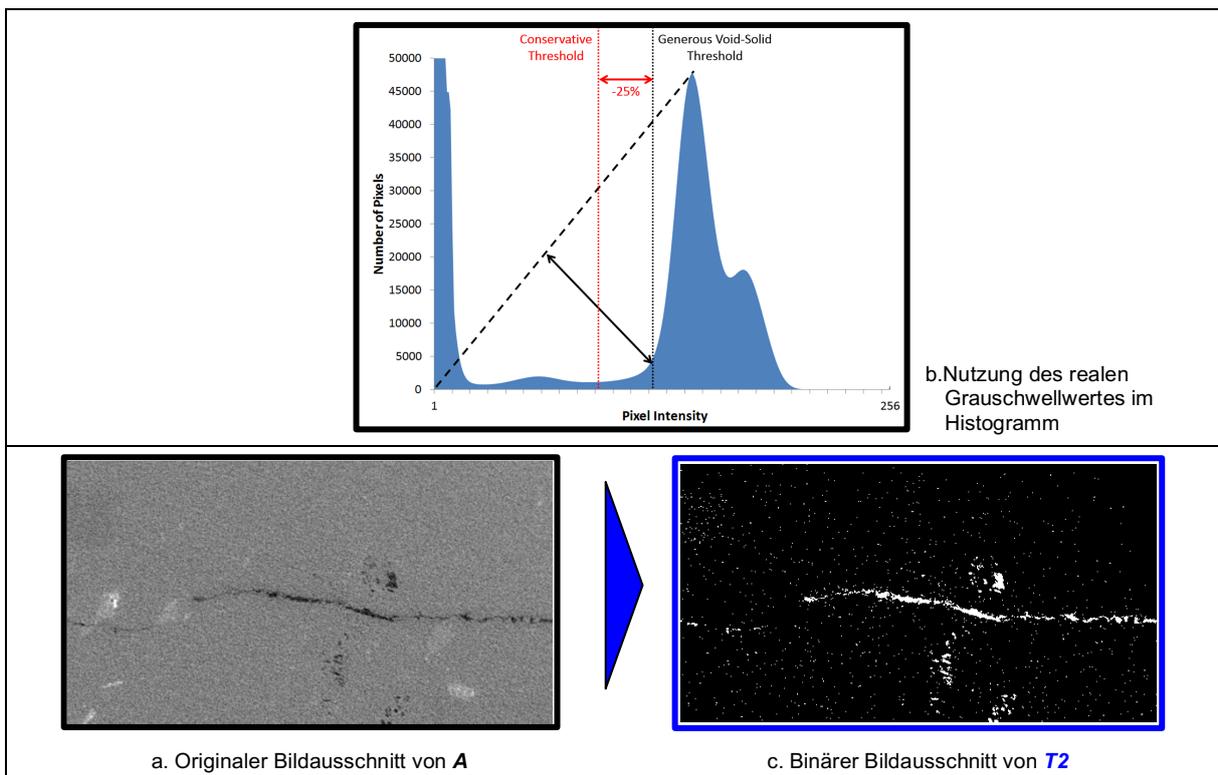


Abbildung 10.1: Binarisierung des originalen 3D-Datensatzes **A** mit realen Grauschwellwert im Modul M2

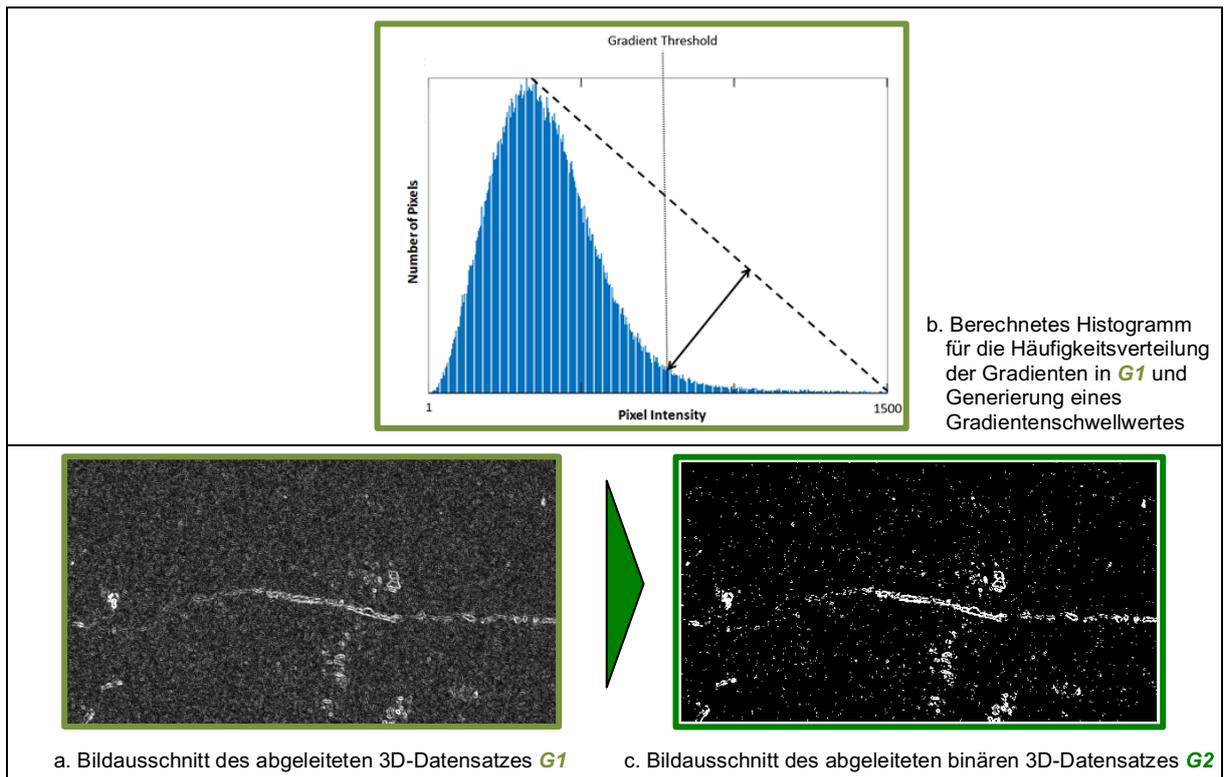


Abbildung 10.2: Binarisierung der 1. Ableitung des originalen 3D-Datensatzes A mit dem ermittelten Gradientenschwellwert im Modul M2

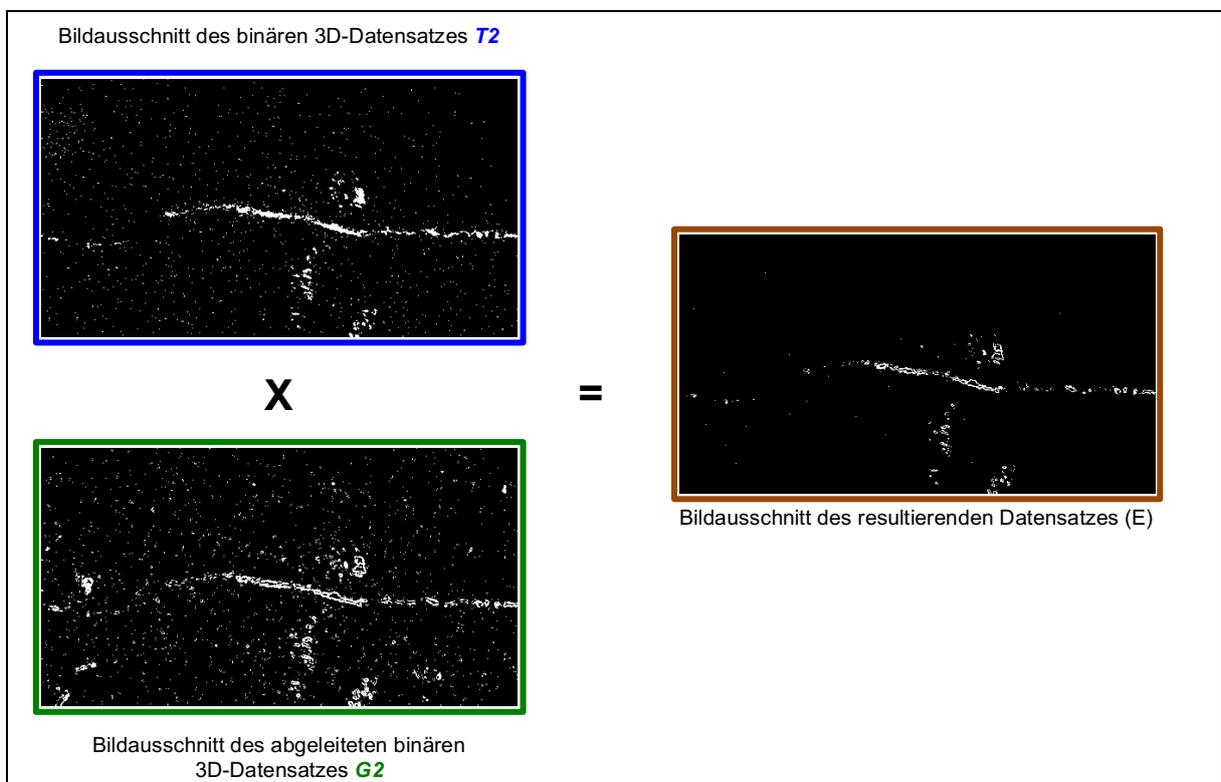


Abbildung 10.3: Multiplikation des binären 3D-Datensatzes $T2$ mit dem binären abgeleiteten 3D-Datensatz $G2$

Im dritten und damit letzten **Modul M3** werden alle in den Modulen M1 und M2 identifizierten Risse und Poren zusammengeführt. Realisiert wird dieses durch die Superposition der in beiden Modulen gewonnenen binären 3D-Ergebnisdatensätze (Abbildung 11). In einem weiteren Schritt werden die verbundenen Voxel

analysiert. Das ermöglicht das Zusammenfassen von Voxeln mit geringer radiografischer Dichte zu einem Riss bzw. einer Pore. Abschließend wurden zur Verminderung des Bildrauschens kleinere Objekte entfernt. Als optimale Geometrie erwies sich dabei ein würfelförmiges Objekt, das aus 125 Voxeln besteht.

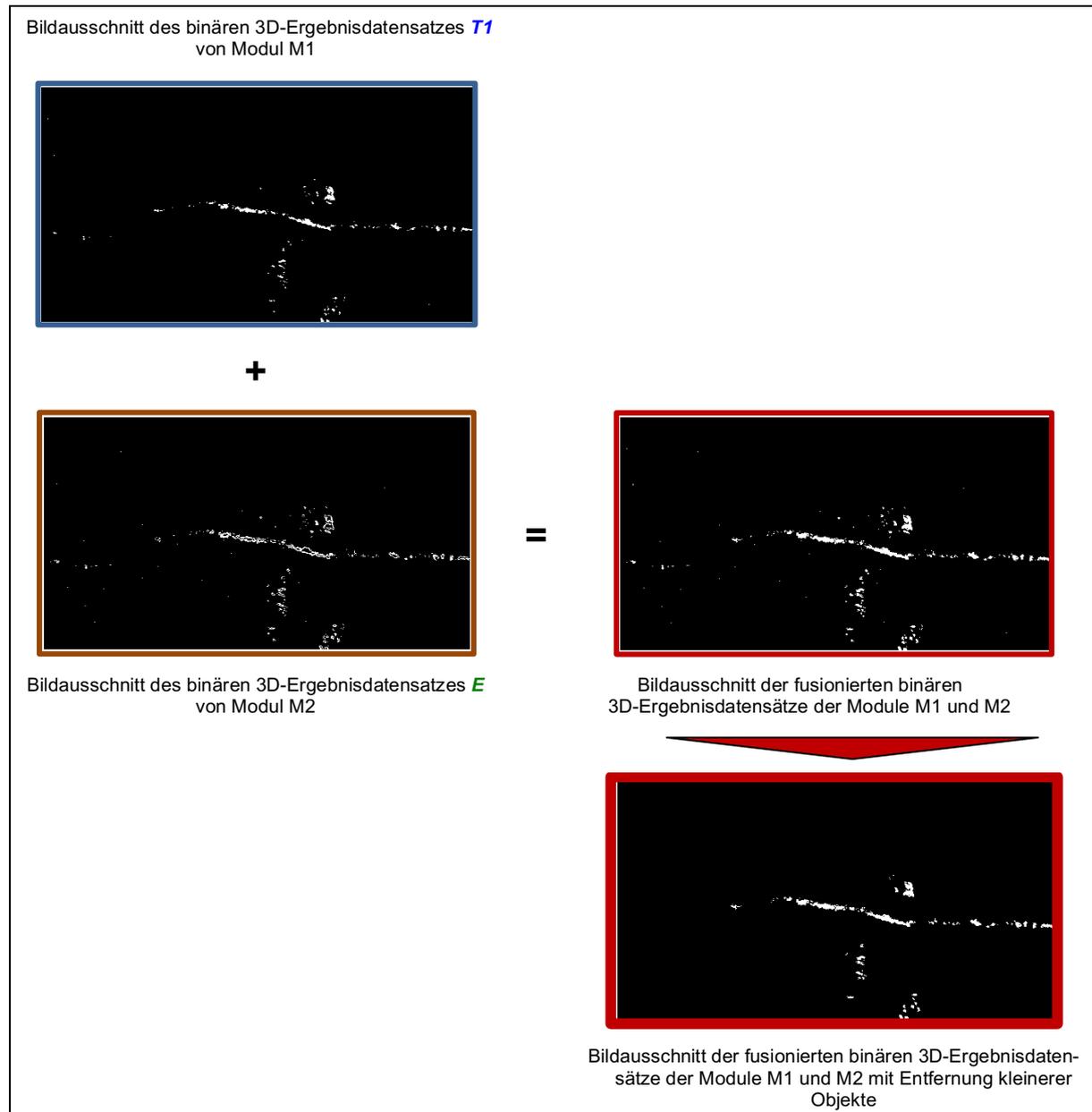


Abbildung 11: Multiplikation des binären 3D-Datensatzes **T2** mit dem binären abgeleiteten 3D-Datensatz **G2** mit anschließender Entfernung kleinerer Objekte

4.5 Ermittlung der spezifischen Oberfläche mit BET

Alternativ bzw. ergänzend zur Röntgen 3D-CT wurde die spezifische Oberfläche der Einzelkörner mittels Gasadsorption hochauflösend bestimmt. Die normativen Grundlagen zum Messverfahren sind [41, 42] zu entnehmen.

Das Verfahren beruht auf der Ermittlung der Menge des Adsorbates oder des verbrauchten Adsorptivs, die erforderlich ist, um die äußere Oberfläche und die zugängliche innere Porenoberfläche eines Feststoffes mit einer vollständigen Adsorbat-Monoschicht bei einer definierten Temperatur zu bedecken. Als Adsorptive werden Gase verwendet, die durch Physisorption mit schwachen Wechselwirkungskräften (Van-der-Waals-Kräfte) an der Feststoffoberfläche adsorbiert und durch Druckerniedrigung schnell desorbiert werden. In der Regel findet hierfür Stickstoff (Siedetemperatur: 77,3 K) Anwendung. Alternativ wird bei kleinen spezifischen Oberflächen des Festkörpers ($<1 \text{ m}^2/\text{g}$) Krypton (Siedetemperatur: 119,93 K) eingesetzt. Die Adsorbat-Monoschichtkapazität wird aus der Adsorptionsisotherme mit der von Brunauer, Emmett und Teller erarbeiteten BET-Auswertemethode bestimmt. Die Adsorptionsisotherme selbst kann mittels statisch-volumetrischem, dynamisch-volumetrischem und gravimetrischem Verfahren bestimmt werden. Bei der hier angewandten statisch-volumetrischen Messung wird der zuvor getrockneten und durch Ausheizen im Vakuum entgasten Probe in dem auf konstanter Temperatur gehaltenen Probehgefäß unter Nutzung der Zustandsgleichung der Gase schrittweise mit zunehmender Druckstufe gasförmiges Adsorptiv zugeführt. Die im Gleichgewicht unter dem Gasdruck des Adsorptivs an der Probe adsorbierte Gasmenge n_a wird aus der jeweiligen Differenz zwischen dem Dosier- und dem Gleichgewichtsdruck in jedem Dosierschritt ermittelt und gegen den Relativdruck p/p_0 aufgetragen. Bei beiden vorstehend aufgeführten Adsorptiven liegt der angelegte Relativdruck zwischen 0,05 und 0,3. Aus der so gewonnenen Adsorptionsisotherme kann denn mit Hilfe der BET-Gleichung (3) die Stoffmenge n_m ermittelt werden, die zur vollständigen Ausbildung einer Adsorbat-Monoschicht erforderlich ist.

$$\frac{p/p_0}{n_a(1 - p/p_0)} = \frac{1}{n_m \cdot C} + \frac{C - 1}{n_m \cdot C} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (\text{Gl. 3})$$

In dem zur Gleichung (3) gehörigen BET-Diagramm wird die linke Seite der BET-Gleichung als Ordinate und der Relativdruck des Adsorptivs p/p_0 als Abszisse aufgetragen (Abbildung 12). Die in verschiedenen Druckstufen ermittelten Messwerte sollten im Relativdruckbereich beider Messgase von 0,05 bis 0,3 eine Gerade ergeben, die sich mit nachstehender Gleichung (4) beschreiben lässt.

$$y = a + bx \quad (\text{Gl. 4})$$

Der Ordinatenabschnitt $a = 1/(n_m \cdot C)$ und die Steigung $b = \Delta y/\Delta x = (C-1)/(n_m \cdot C)$ können einfach mittels linearer Regression ermittelt werden. Daraus wiederum können die spezifische Monoschichtstoffmenge und der BET-Parameter C mit den Gleichungen (5) und (6) berechnet werden.

$$n_m = \frac{1}{a + b} + \frac{C - 1}{n_m \cdot C} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$C = \frac{b}{a} + 1 \quad (\text{Gl. 6})$$

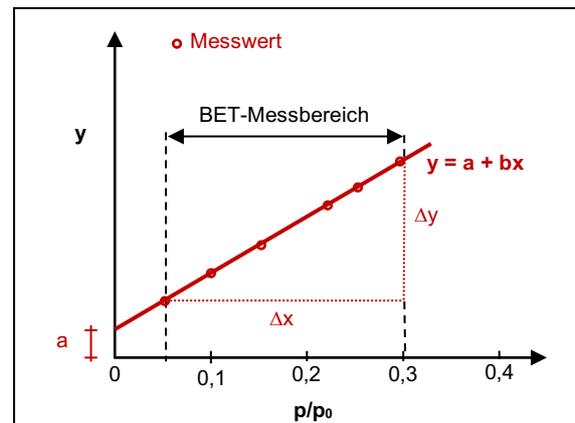


Abbildung 12: BET-Diagramm für Mehrpunktemessung in Anlehnung an [41]

Aus der so ermittelten Monoschichtstoffmenge n_m und dem molekularen Flächenbedarf des adsorbierten Moleküls a_m lässt sich dann unter der Berücksichtigung Avogadrokonstante L die gesuchte spezifische Oberfläche a_s nach Gleichung (7) ermitteln.

$$a_s = n_m \cdot a_m \cdot L \quad (\text{Gl. 7})$$

Im Rahmen dieses Projekts wurde die spezifische Oberfläche an Einzelkörnern an der BAM und an Korngemengen an der BTU-CS mit dem BET-Verfahren bestimmt. Die Probenvorbereitung erfolgte einheitlich durch Aufheizen mit 10 K/min auf 200 °C. Diese Temperatur wurde bei gleichzeitig

angelegtem Vakuum 72 h belassen und danach wieder auf Raumtemperatur ohne äußeren Feuchtezutritt abgekühlt. Aufgrund der für diese Messungen unüblichen Probeabmessungen mussten spezielle größere Büretten angefertigt bzw. beschafft werden. Als Adsorptiv wurde an der BAM Krypton und an der BTU-CS Stickstoff verwendet. Als Kühlmittel für das Dewargefäß fand bei beiden Kooperationspartnern Stickstoff Anwendung. Weiterhin wurde in beiden Forschungseinrichtungen die Adsorptionsisotherme bei mehreren Gasdruckstufen für die Mehrpunktbestimmung ermittelt. Zur Analyse wurde an der BAM das Gerät autosorb iQ von der Firma Quantachrome Instruments verwendet (Abbildung 13). Als Analysesoftware fand ASiQwin Einsatz. An der BTU-CS wurde das Analysegerät Quantachrome NOVA 2000 verwendet. Abschließend sei angemerkt, dass die Einwaage bei den Korngemengen für die Analyse ca. 20 g bei den hier untersuchten Korngruppen bis zu einem Größtkorn von 16 mm betrug. Zur Sicherstellung der Repräsentativität der Messwerte erfolgte eine Dreifachbestimmung.

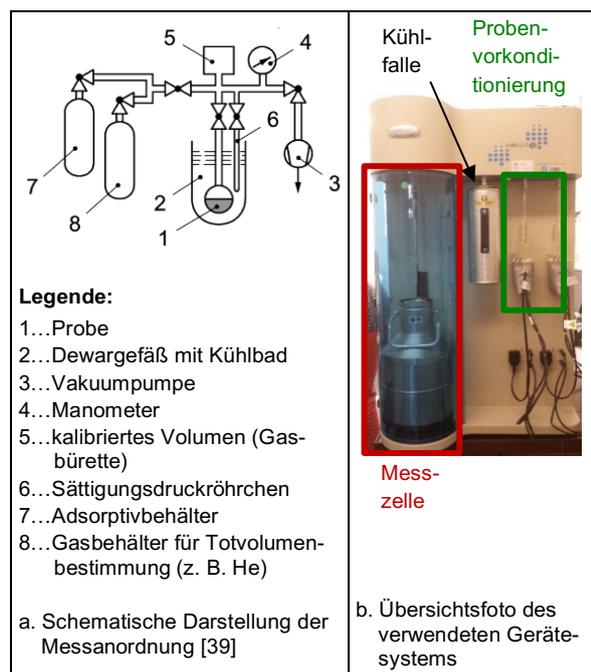


Abbildung 13: Beschreibung der eingesetzten Analysetechnik für die Bestimmung der spezifischen Oberfläche mit BET-Auswerteverfahren

4.6 Ermittlung der Porenvolumenverteilung mit Hg-Druckporosimetrie

Zur Bewertung der örtlichen Auflösung der Poren und Risse bei der Röntgen 3D-CT und der der BET-Analyse wurde orientierend an Einzelkörnern

die Porengrößenverteilung mit der Hg-Druckporosimetrie bestimmt. Die normativen Grundlagen hierfür sind [43, 44] zu entnehmen.

Das Verfahren basiert auf der Messung des in einen porösen Feststoff eingepressten Quecksilbervolumens in Abhängigkeit vom aufgebrachtem Druck. Dabei werden nur Poren erfasst, in die beim jeweilig aufgebrachtem Druck Quecksilber eindringen kann. Das ist darauf zurückzuführen, dass es sich beim Quecksilber um eine nichtbenetzende Flüssigkeit handelt (Kontaktwinkel ϑ zwischen Quecksilber und den meisten Feststoffen liegt zwischen 135° und 142°). So dringt eine nichtbenetzende Flüssigkeit nur unter Druck in ein poröses Material ein. Dabei ist der aufgebrachte Druck umgekehrt proportional zur lichten Weite der Porenöffnungen. Für zylindrische Poren wird der Zusammenhang zwischen Porenradius r_p und Druck p durch die Washburn-Gleichung [6] beschrieben. σ stellt dabei die Oberflächenspannung von Quecksilber dar. Sie beträgt bei Raumtemperatur unter Vakuum 0,41 bis 0,515 N/m.

$$r_p = -\frac{2 \cdot \sigma}{p} \cos \vartheta \quad (\text{Gl. 8})$$

Nach der Vorkonditionierung der Proben erfolgt die eigentliche Messung in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird die Makroporenverteilung bestimmt. Hierzu wird die Probe im Vakuum mit Quecksilber überschichtet und langsam belüftet. Aus der druckabhängigen Längenänderung der Quecksilbersäule in der Kapillare wird die Porenvolumenverteilung bis zu einem minimalen Porenradius von $7,5 \mu\text{m}$ ($p = 0,3 \text{ MPa}$) bestimmt. Im zweiten Schritt wird die Mesoporenverteilung ermittelt. Zu diesem Zweck wird das Probengefäß in den Autoklaven der Messapparatur gegeben und mit Hydraulikflüssigkeit überschichtet. Mittels Druckwandler wird dann über die Hydraulikflüssigkeit schrittweise oder kontinuierlich Quecksilber in das Porensystem gepresst. Bei einem Maximaldruck von 400 MPa werden so minimale Porenradien von $3,6 \mu\text{m}$ erfasst.

Zur Vermeidung verfälschender Einflüsse durch das Brechen erfolgten im Rahmen dieses Projektes die Messungen direkt am Einzelkorn. Vor der Messung der Makroporenverteilung wurden die Proben 48 h bei 60°C im Vakuumschrank vorkonditioniert. Realisiert wurden die Hg-Druckporosimetriemessungen mit dem Gerät AutoPore V der Firma Micromeritics (Abbildung 14).

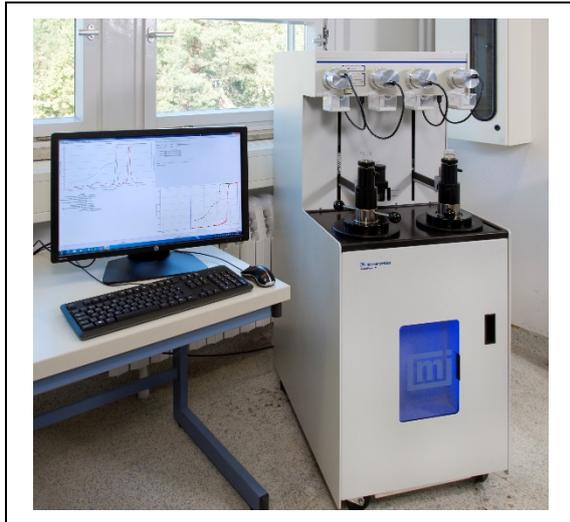


Abbildung 14: Verwendetes Messgerät für die Hg-Druckporosimetrie

4.7 Eluatanalyse mit ICP-OES

Ein zentraler Bestandteil bei den Löseversuchen am Einzelkorn und den Korngemengen war die Analyse der Konzentration von SiO_2 und Al_2O_3 im filtrierten Eluat mit der ICP-OES.

Bei der ICP-OES wird zur qualitativen und quantitativen Analyse der Probenlösung ein induktiv gekoppeltes Hochfrequenzplasma (ICP) zur Anregung verwendet. Hierfür wird die Probenlösung über ein pneumatisches Zerstäubersystem in ein induktiv gekoppeltes Argonplasma eingebracht. Bei einer Temperatur von 5000-7000 K im Plasma werden die in der Lösung enthaltenen Elemente atomisiert und zur Lichtemission angeregt. Die optische Emission dieses Plasmas (OES) wird hinsichtlich der Element- und Ionenlinien mittels Polychromator und modernem CCD-Detektor analysiert. So wird das emittierte Licht bei der simultanen Analyse über einen Polychromator in elementspezifische Wellenlängen aufgespalten und die Lichtintensität mittels einer Reihe von fest installierten Photomultipliern detektiert. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit, einzelne Wellenlängen im Emissionsspektrum mit einem sequentiell arbeitenden Monochromator hoher Auflösung zu erfassen. Die Lichtintensität ist proportional der Menge der im Plasma angeregten Atome eines Elements. Zur quantitativen Bestimmung des Elementgehalts einer Lösung wird das Gerät mit synthetischen Lösungen bekannten Gehalts kalibriert. Zur Kontrolle der Ergebnisse werden kommerziell erhältliche Referenzlösungen eingesetzt. Zusammenfassend zeigt die Abbildung 15 die Basiskomponenten der ICP-OES.

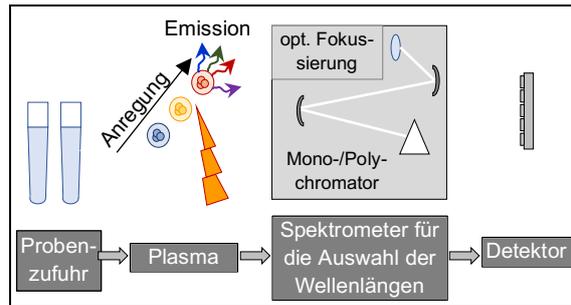


Abbildung 15: Basiskomponenten der ICP-OES in Anlehnung an [45]

Im Rahmen dieses Projektes gelangte für die Analyse das ICP Spectrometer Thermo Fisher Scientific iCAP 6000 zur Anwendung. Hierfür wurde das filtrierte Eluat nach der pH-Wertbestimmung mit HNO_3 angesäuert und mit dem Deionat im Verhältnis 1:50 verdünnt.

4.8 Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen mit Schnellprüfverfahren und Betonversuchen

Von zentraler Bedeutung für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung sind neben den Löseversuchen auch die normativen Verfahren wie das Schnellprüfverfahren und die verschiedenartigen Betonversuche. Letztere beinhalten einerseits die Performanceprüfungen nach dem ARS 04/2013 [6] und andererseits die zusätzlich in das Prüfprogramm aufgenommenen 40 °C- und 60 °C-Betonversuche nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21].

Mit dem **Schnellprüfverfahren** werden Korngruppen mit Korngrößen ≥ 2 mm nach [21] geprüft. Bei gebrochenem Festgestein ist die Prüfung der Korngruppe 8/16 mm für die Bewertung und Einstufung aller Korngruppen in der Regel ausreichend. Bei un- und gebrochenen Kiesen erfolgt in Abhängigkeit vom Größtkorn im Beton eine gemeinsame Prüfung der Körnungen 2/8 mm und 8/16 mm im Volumenverhältnis 57:43 bzw. der Körnungen 2/8 mm 8/16 mm und 16/22 mm im Volumenverhältnis 28:29:43. Dabei wird das Gemisch aus allen Körnungen gemeinsam gebrochen.

Zur Beurteilung möglicher AKR induzierter Treiberscheinungen werden nach vorgegebener Rezeptur aus den jeweils gebrochenen Gesteinskörnungen und dem AKR-Prüfzement CEM I 32,5 R (Na_2O -Äquival.: 1,3 M.-%) drei Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Für die Dehnungsmessungen werden

dabei die Stirnseiten der Prismen mit je einem Messzapfen versehen. Nach normativer Präparation und Vorkonditionierung der Prismen bei $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ in entionisiertem Wasser erfolgt die Nullmessung für die Dehnung im Alter von (48 ± 2) h. Danach werden die Prismen in $(1,00 \pm 0,01)$ molarer und $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ heißer NaOH-Lösung im Wärmeschrank 13 Tage mit zwischenzeitlichen Dehnungsmessungen gelagert (Abbildung 16). Die Enddehnung der Prismen nach der Beendigung dieser Lagerung ist das Kriterium für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung. Unterschreitet diese im Mittel den Grenzwert von $1,0\text{ mm/m}$, ist die Gesteinskörnung als unbedenklich einzustufen (E I-S). Ist dies nicht gegeben, muss nach der Alkali-Richtlinie [21] der 40°C - oder 60°C -Bettonversuch durchgeführt werden.



Abbildung 16: Dehnungsmessung beim Schnellprüfverfahren

Die Basis für die Prüfung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung mit dem **40°C - und 60°C -Bettonversuch** bildet die in [21] vorgegebene Betonrezeptur. Dabei werden 30 Vol.-% Natursand (Fraktion 0/2 mm) und 70 Vol.-% der zu beurteilenden Gesteinskörnung in den Fraktionen 2/8 und 8/16 [mm] bzw. 2/8, 8/16 und 16/22 [mm] in einem vorgegebenen Volumenverhältnis verwendet. Weiterhin wird der AKR-Prüfzement mit einem Natriumäquivalent von 1,3 M.-% mit einem Gehalt von 400 kg/m^3 eingesetzt. Der gleichfalls vorgegebene w/z-Wert beträgt 0,45. Als Prüfkörper werden im 40°C -Bettonversuch 3 Prismen mit den Abmessungen $500 \times 100 \times 100\text{ mm}^3$ und ein

Würfel mit einer Kantenlänge von 30 cm verwendet. Für den 60°C -Bettonversuch werden drei Prismen mit den Abmessungen $280 \times 75 \times 75\text{ mm}^3$ hergestellt. Für die Dehnungsmessungen werden bei allen Prismen an den Stirnseiten Messzapfen einbetoniert. Nach der Betonage werden alle Prüfkörper (24 ± 2) h bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in der Schalung mit Folienabdeckung gelagert. Unmittelbar danach erfolgt an den für den 40°C -Bettonversuch vorgesehenen Prismen bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ die Nullmessung für die Dehnung. Daran anschließend werden alle Prüfkörper für neun Monate in der Nebelkammer bei $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von mindestens 99 % mit zwischenzeitlichen Dehnungsmessungen (Prismen) und Rissbreitenbestimmungen (Würfel) eingelagert. Die Prüftermine sind im Betonalter von 2, 7 und 28 Tagen nach der Herstellung sowie danach alle 28 Tage bis zu einem Betonalter von 270 Tagen determiniert. Hierfür werden die Prüfkörper kurzzeitig aus der Nebelkammer entnommen und quasi bei 40°C geprüft. Dies hat zur Folge, dass die gegenüber der Nullmessung ermittelten Längenänderungen sowohl die hygriech als auch thermisch bedingten Dehnungen des Prüfkörpers zusätzlich beinhalten. Das dadurch induzierte Offset kann bis zu $0,4\text{ mm/m}$ betragen. Der für den 40°C -Bettonversuch in [21] festgelegte Dehnungsgrenzwert bezieht sich auf eine neunmonatige Lagerung und beträgt $0,6\text{ mm/m}$. Beim Würfel wird für die Rissbreite ein Grenzwert von $0,2\text{ mm}$ in Ansatz gebracht [21].

Im Gegensatz zum 40°C -Bettonversuch werden im 60°C -Bettonversuch die drei Prismen nach ihrer Herstellung und Lagerung in der Schalung (30 ± 5) Minuten in Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ getaucht. Nach der Entfernung des Oberflächenwassers erfolgt dann die Nullmessung der Dehnung. Unmittelbar danach werden die Prüfkörper ca. 5 Monate bei einer Temperatur von $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 98 % über Wasser in geschlossenen Edelstahlbehältern gelagert. Für die Längen- und Massebestimmung der Prüfkörper aller vier Wochen werden die geschlossenen Behälter mit den darin befindlichen Prüfkörpern auf eine Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ abgekühlt und anschließend für maximal zwei Minuten aus den Behältern entnommen. Dies hat zur Folge, dass die gegenüber der Nullmessung ermittelten Längenänderungen auch die hygriech bedingten Dehnungen erfassen. Angemerkt sei allerdings, dass durch die intermittierende Abkühlung und Erwärmung der Prüfkörper

Zwangsspannungen entstehen, die eine erhöhte Längenänderung zur Folge haben [48]. Zusätzlich sei angemerkt, dass nach der jeweiligen Messung die Prüfkörper beim Einbringen in den Edelstahlbehälter um 180° gedreht werden müssen. Der in diesem Vorhaben in Ansatz gebrachte Dehnungsgrenzwert bezieht sich auf eine Lagerungsdauer von 140 d und beträgt $0,3 \text{ mm/m}$ [21].

Im Gegensatz zu den vorstehend beschriebenen 40°C - und 60°C -Betonversuchen werden bei den beiden **Performanceprüfungen** nach dem ARS 04/2013 [6] nicht nur eine sondern zwei pessimale, aus dem Straßenbau entlehnte, Betonrezepturen vorgegeben. Dabei findet sowohl beim Oberbeton ($D > 8$)/Unterbeton als auch beim Oberbeton 0/8 (Waschbeton) als Bindemittel der WS-Prüfzement mit 360 kg/m^3 bzw. 430 kg/m^3 Anwendung. Der w/z-Wert beträgt bei beiden Rezepturen einheitlich 0,45. Als Gesteinskörnung wird bei beiden Rezepturen in der Fraktion 0/2 mm der WS-Prüfsand in einem Anteil von je 30 Vol.-% verwendet. Die verbleibenden 70 Vol.-% bilden die zu beurteilenden groben Fraktionen der Gesteinskörnung ab. Beim Oberbeton ($D > 8$)/Unterbeton sind dies die Fraktionen. 2/8, 8/16 und 16/22 [mm]. Beim Oberbeton 0/8 (Waschbeton) betrifft das die Fraktionen 2/8 bzw. 2/5 und 2/8 [mm]. Basierend auf diesen vorgegebenen Betonrezepturen werden für den 60°C -Betonversuch mit externer Alkalizufuhr jeweils 6 Prismen mit den Abmessungen $280 \times 75 \times 75 \text{ mm}^3$ und für die Klimawechsellagerung jeweils 6 Prismen mit den Abmessungen $400 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ hergestellt. Dabei wurden für die Dehnungsmessungen bei allen Prismen an den Stirnseiten Messzapfen einbetoniert. Unmittelbar nach der Betonage werden auch hier die Prüfkörper $(24 \pm 2) \text{ h}$ bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in der Schalung mit Folienabdeckung gelagert.

Die danach erfolgende Vorkonditionierung der Prüfkörper ist bei beiden Performanceprüfungen unterschiedlich. So werden die für den 60°C -Betonversuch mit externer Alkalizufuhr vorgesehenen Prüfkörper ca. 30 Minuten in Wasser bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ getaucht. Anschließend wird das Oberflächenwasser von den Prüfkörpern entfernt. Danach werden die Prüfkörper sechs Tage in geschlossenen Behältern bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert. Daran schließt sich eine 14tägige Lagerung der Prüfkörper bei Normklima an. Es folgt eine erneute 6tägige Lagerung der Prüfkörper über Wasser bei einer Temperatur von $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$. Die Vorkonditionierung der Prüfkörper wird mit ihrer eintägigen

Lagerung in geschlossenen Behältern über Wasser bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ beendet. Bei der Klimawechsellagerung hingegen werden die Prüfkörper unmittelbar nach dem Entschalen luftdicht in Folie bis zu einem Betonalter von 5 Tagen bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert. Danach wird der Moosgummi auf den oberen Bereich der PK-Mantelfläche zur Sicherstellung des Verbleibs der Prüflösung auf der Prüfkörperoberseite aufgeklebt. Danach wurde der zusätzlich zu den normativen Vorgaben an der BAM angefastete Fugenbereich zwischen Moosgummi und Betonrandzone umlaufend mit einer Silikonnaht abgedichtet. Weiterhin werden die Stirnseiten der Prüfkörper normativ mit einem alukaschierten Butylklebeband versehen. Einen optischen Eindruck von der Präparation der KWL-Prüfkörper vermittelt die Abbildung 17a. Nach der so erfolgten Präparation werden die Prüfkörper bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 5) \%$ bis zum Betonalter von 7 d gelagert. Danach schließt sich eine viertägige Trocknungsphase bei 60°C des ersten KWL-Zyklus mit anschließender Abkühlung auf $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ an.

Nach der verfahrensspezifisch unterschiedlichen Vorkonditionierung der Prüfkörper erfolgte auch hier die Nullmessung für die Zustands- und Schädigungsindikatoren. So wurde einerseits die Länge, das heißt der Abstand zwischen den Messzapfen, mit einer Genauigkeit von $1 \mu\text{m}$ gemessen. Andererseits wurde die Masse der Prüfkörper mit einer Genauigkeit von $0,1 \text{ g}$ bestimmt. Beide Messgrößen wurden zur Eliminierung verfälschender Einflüsse bei einer Lufttemperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 5) \%$ bestimmt. Einen optischen Eindruck vom Messplatz für die Längen- und Massebestimmung vermittelt die Abbildung 17b.

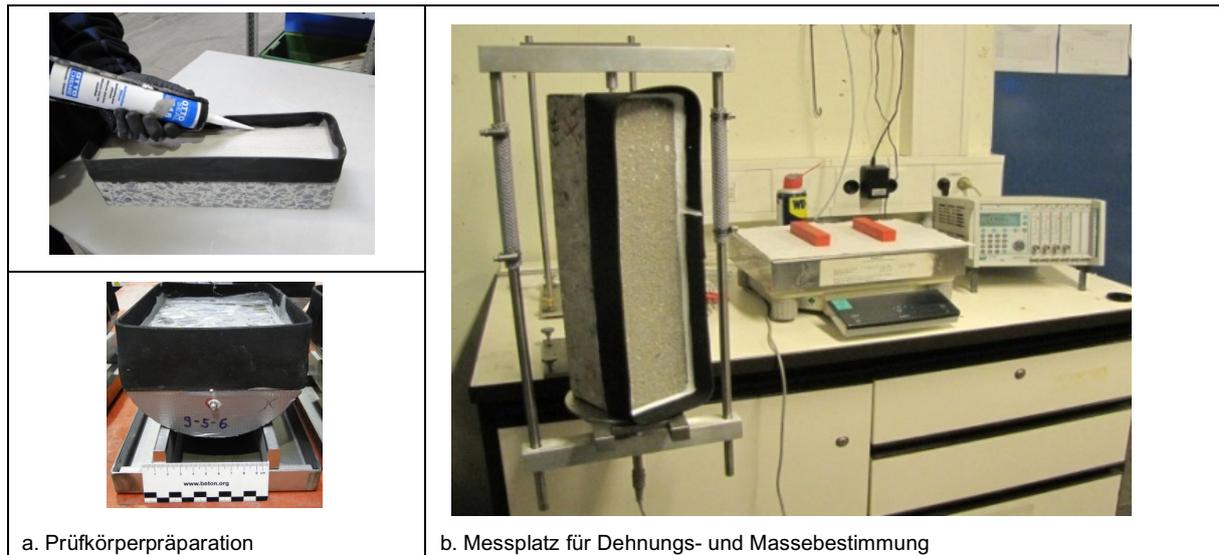


Abbildung 17: Impressionen zur KWL

Nach der Nullmessung werden beim 60 °C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr die vorkonditionierten Prüfkörper zehn Wechsellagerungszyklen unterzogen. Jeder Zyklus besteht dabei aus einer fünftägigen Trocknungsphase bei einer Temperatur von (60 ± 2) °C, einer zweitägigen Eintauchphase in die Prüflösung (hier Verwendung einer 3 %igen und 10 %igen NaCl-Lösung) bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C, einer sechstägigen Lagerung bei einer Temperatur von (60 ± 2) °C über Wasser (relativer Luftfeuchte mindestens 98 % sowie einer eintägigen Abkühlphase auf eine Temperatur von (20 ± 2) °C (Abbildung 18).

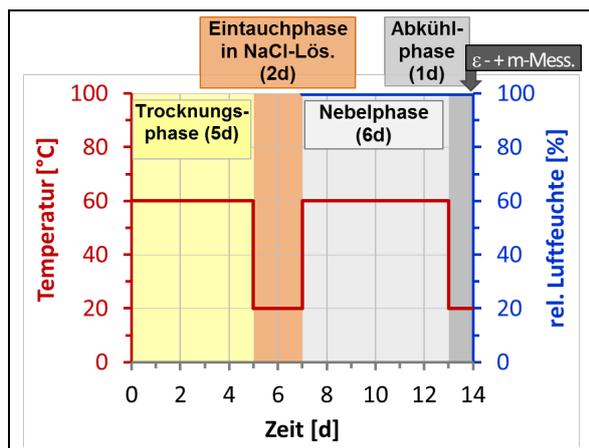


Abbildung 18: Lagerungsregime in einem Wechselzyklus im 60 °C Betonversuch mit externer Alkalizufuhr

Danach werden die Prüfkörper für maximal zwei Minuten aus den verschlossenen Edelstahlbehältern zur Ermittlung ihrer Länge und Masse entnommen. Dies hat zur Folge, dass die gegenüber der Referenzmessung ermittelte Längenänderung auch die hygrysch bedingte Dehnung erfasst.

Angemerkt sei, dass auch hier durch die intermittierende Abkühlung und Erwärmung sowie Befeuchtung und Trocknung der Prüfkörper thermisch und hygrysch bedingte Zwangsspannungen entstehen, die eine erhöhte Längenänderung zur Folge haben. Die Dehnungsgrenzwerte nach 10 Wechsellagerungszyklen betragen in Abhängigkeit von der Konzentration der NaCl-Lösung 0,5 mm/m (10 %ig) und 0,3 mm/m (3 %ig) [49].

Bei der Klimawechsellagerung durchliefen alle Prüfkörper 12 KWL-Zyklen. Jeder KWL-Zyklus besteht dabei aus einer ca. 4-tägigen Trocknungsphase, einer 14-tägigen Nebelphase und einer 3-tägigen Frost-Tauwechselphase (Abbildung 19). Die Trocknungsphase wird mit einer Temperaturschockbeanspruchung eingeleitet. Nach der Trocknungsphase bei 60 °C und der sich anschließenden Abkühlung auf 20 °C werden jeweils drei Prüfkörper einer Prüfserie vergleichend mit entmineralisiertem Wasser bzw. einer 3,6 %igen NaCl-Lösung beaufschlagt, die während der Nebel- und der Frost-Tauwechselphase auf dem Prüfkörper verbleibt.

Nach Beendigung der Frost-Tauwechselphase wird die Prüflösung auf den Prüfkörpern entfernt und anschließend deren Masse- und Längenänderung bestimmt. Die Bezugswerte für die Bewertung der Veränderung dieser Messgrößen werden, wie bereits vorstehend erwähnt, im ersten Zyklus nach der Trocknungsphase bestimmt. Zu Beginn der Trocknungsphase wird die zuvor entfernte Prüflösung wieder aufgebracht. Nach der Trocknungsphase werden die Prüfkörper mit neuen Prüflösungen beaufschlagt.

Als Beurteilungskriterium für das AKR-Schädigungspotenzial nach Beendigung der KWL dient auch hier die Dehnung. Der Grenzwert für Laborbetone beträgt hierbei in Abhängigkeit von der Art der Beaufschlagung 0,5 mm/m (NaCl-Lösung)

und 0,4 mm/m (Wasser) [50]. Zusätzlich wird der Dehnungsanstieg zwischen dem 6. und 8. KWL-Zyklus zur Bewertung herangezogen.

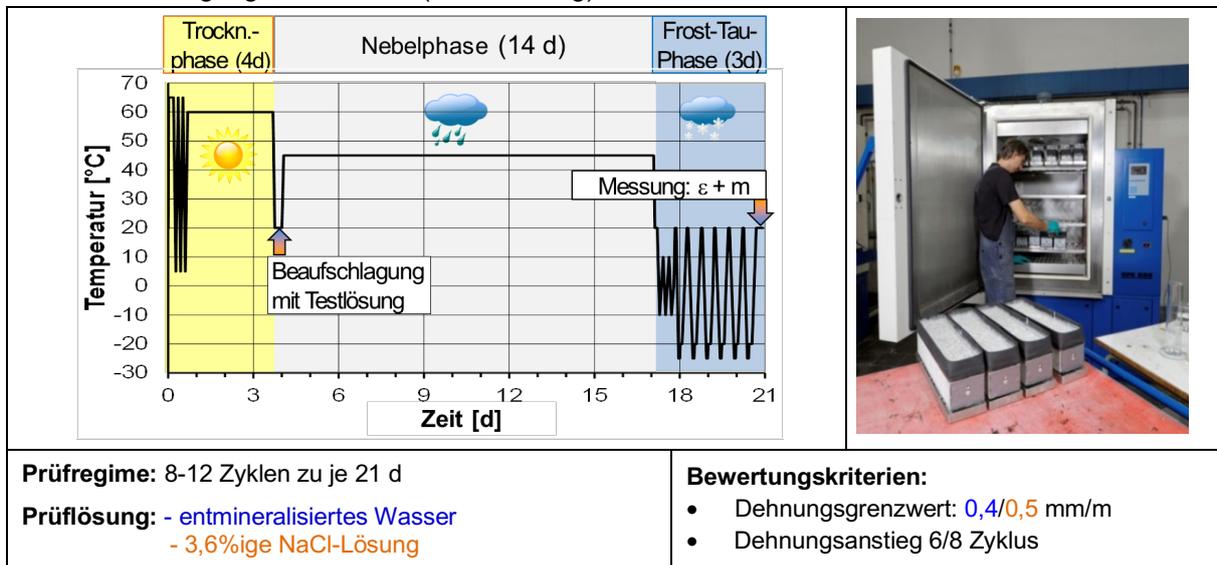


Abbildung 19: Prüfprozedere bei der KWL

Einen zusammenfassenden Überblick über die Vorgehensweise bei allen Betonversuchen geben die Tabellen 3a und 3b.

Kriterium der Verfahrensbeschreibung	Betonversuche nach Alkali-Richtlinie des DAfStb [21]		Performanceprüfungen nach ARS 04/2013 [6]	
	40 °C-BV	60 °C-BV	60 °C-BV mit ext. Alkalizufuhr [46]	Klimawechselagerung [47]
Betonrezeptur	400 kg/m ³ AKR-Prüfzement (Na-Äquiv. = 1,3 M.-%) w/z-Wert = 0,45 30 Vol.-% Natursand 70 Vol.-% zu beurteilende GK mit vorgegebenen Volumenanteilen in Fraktionen 2/8, 8/16 bzw. 2/8, 8/16 und 16/22 [mm]		Oberbeton (D > 8)/Unterbeton	
			360 kg/m ³ WS-Prüfzement w/z-Wert = 0,45 30 Vol.-% WS-Prüfsand 70 Vol.-% zu beurteilende GK in den Fraktionen 2/8 bzw. 2/5 und 2/8 [mm]	
Prüfkörper (Form und Regelabmessungen)	- 3 Prismen: 500 x 100 x 100 mm ³ - 1 Würfel (a = 300 mm)		6 Prismen 280 x 75 x 75 mm ³ mit einbetonierten Messmarken an den Stirnseiten (Prismen)	
			6 Prismen: 400 x 100 x 100 mm ³	
PK-Vorkonditionierung	Lagerung der Prüfkörper nach Betonage (24 ± 2) h bei (20 ± 2) °C in der Schalung mit Folienabdeckung			
			(30 ± 5) minütiges Tauchen der PK in H ₂ O bei (20 ± 2) °C, anschl. Entfernung des Oberflächenwassers + Längen- und Massenermittlung an PK's	luftdichte Lagerung der PK in Folie bei (20 ± 2) °C nach dem Entschalen (1 d) bis zum Betonalter von 5 d
			6-tägige Lagerung der PK in geschlossenen Behältern über H ₂ O bei (20 ± 2) °C	Probenpräparation (Anfasen der Kanten auf PK-Oberseite, Kleben des Moosgummis und Abdichten mit Silikon)
			14-tägige Lagerung der PK bei Normklima ((20 ± 2) °C und 65 ± 5) % rel. LF.)	Lagerung der PK bei (20 ± 2) °C und (65 ± 5) % rel. LF bis zum Betonalter von 7 d
			6-tägige Lagerung der PK in geschlossenen Behältern über H ₂ O bei (60 ± 2) °C	4-tägige Trocknungsphase im 1.KWL-Zyklus und anschließender PK-Abkühlung auf (20 ± 2) °C
		1-tägige Lager. der PK in geschlossenen Behältern über H ₂ O bei (20 ± 2) °C		
Nullmessung (Zustands- + Schädigungsindikat.)	Ermittlung der Referenzwerte für die Länge und Masse bei einer Lufttemperatur von (20 ± 2) °C und einer rel. Luftfeuchte von (65 ± 5) % (Genauigkeit: Längenmessung: Messzapfenabstand: 0,001 mm; Massebestimmung: 0,1 g)			

Tabelle 3a: Übersicht über die Vorgehensweise bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Tabelle 3b: Übersicht über die Vorgehensweise bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Kriterium der Verfahrensbeschreibung	Betonversuche nach Alkali-Richtlinie des DAfStb [21]		Performanceprüfungen nach ARS 04/2013 [6]	
	40 °C-BV	60 °C-BV	60 °C-BV mit ext. Alkalizufuhr [46]	Klimawechsellagerung [47]
Lagerungsregime	<ul style="list-style-type: none"> 9-monatige Lagerung bei (40 ± 2) °C und einer rel. LF ≥ 99 % (Nebelkammer) zwischenzeitlich kurzzeitige Entnahme der PK für Längen- und Massenermittlung (vernachlässigbare Temperaturabsenkung des Prüfkörpers) 	<ul style="list-style-type: none"> mindestens 5-monatige Lagerung der PK bei (60 ± 2) °C und einer rel. LF ≥ 98 % (PK über H₂O in geschlossenen Edelstahlbehältern) zwischenzeitliche Abkühlung der Behälter mit PK's auf (20 ± 2) °C für Längen- und Massenermittlung Entnahme der PK aus Behältern für Messungen (Zeitfenster ≤ 2 min/PK) Drehung der PK um 180° nach jeder Messung 	mindestens 10 Wechsellagerungszyklen mit folgendem Einzelzyklusregime:	mindestens 12 KWL-Zyklen mit folgendem Einzelzyklusregime:
			5 d Trocknung der PK bei (60 ± 5) °C in Wärmeschrank zuzügl. 4 h Abkühlung bei Normklima in geschlossenen Boxen	4 d Trocknungsphase bei 60 °C (Beginn: Temperaturschock; Ende: PK-Temperierung auf (20 ± 2) °C)
			2 d vollständiges Eintauchen der PK in Prüflösung (3 %ige und 10 %ige NaCl-Lös.; Volumenverhältnis $V_{PK}/V_{PL} = 1/1,6$)	Beaufschlagung der PK-Oberseiten mit Prüflösung (je 3 PK mit entmin. H ₂ O und 3,6 %iger NaCl-Lös.)
			6 d PK-Lagerung in dicht geschlossenen Edelstahlbehältern bei (60 ± 2) °C und >98 % rel. LF. (PK über Wasser)	14 d Nebelphase bei 45 °C
			1 d Abkühlung der Behälter mit PK auf (20 ± 2) °C	3 d Frost-Tauwechselphase zwischen 20 °C und -20 °C mit abschließender PK-Temperierung auf (20 ± 2) °C für Messungen
Messregime für Indikatoren während + nach Lager.	Ermittlung nach 1, 3, 7, 14, 28 d, dannach alle 4 Wochen bis zum 9. Monat	Ermittlung aller 4 Wochen bis zum 5. Monat	Messung nach jedem Wechsellagerungszyklus	Messung nach Frostphase bei jedem KWL-Zyklus (Prüflös. entfernt)
Dehnungsgrenzwert am Prisma ϵ [mm/m]	$> 0,6$ nach [21]	$\geq 0,3$ in Anlehnung an [21]	$\geq 0,5$ (10 %ige NaCl-Lös.) nach [49]; $\geq 0,3$ (3 %ige NaCl-Lös.) nach [49]	$\geq 0,5$ (NaCl-L. nach [50]); $\geq 0,4$ (H ₂ O) nach [50]
Grenzwert für Rissbreite am Würfel w [mm]	$\geq 0,2$ [21]	-	-	-

4.9 Aufbauende Untersuchungen an Betonprüfkörpern nach Betonversuchen

4.9.1 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung

Für die Analysen der AKR- und SEB-Ausprägung sowie der Natrium- und Chloridverteilung wurden je zwei Scheiben aus den Betonprüfkörpern mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 1,0 cm bzw. 7,5 cm x 7,5 cm x 1,0 cm trocken herausgeschnitten. Als Analyseflächen bzw. -segmente für beide Prüfaufgaben dienten die beiden gegenüberliegenden und ausschließlich durch den trockenen Sägeschnitt getrennten Oberflächen bzw. Randbereiche der Betonscheiben (Abbildung 20). Aus diesem Grund wurden für die mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Merkmale die Dünnschliffe aus dem entsprechenden Randbereich der Betonscheibe gewonnen. Hierfür wurde die Betonscheibe schonend bei 40 °C im Vakuumofen getrocknet und danach in fluoreszierendes Epoxidharz eingebettet. Die Fluoreszenz ermöglicht eine Kontrastanhebung und somit eine bessere Visualisierbarkeit von Rissstrukturen und Poren. Die Dünnschliffpräparation aus dem mit Epoxidharz getränkten Rohling selbst erfolgte in einem externen Labor.

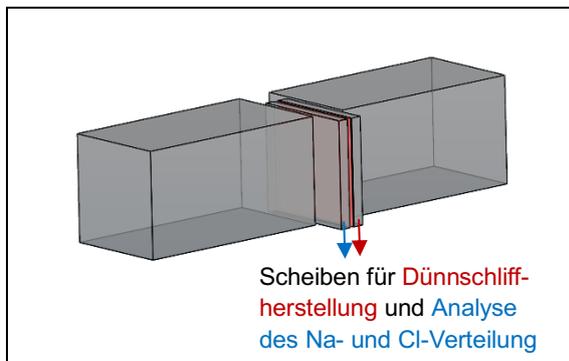


Abbildung 20: Räumliche Einordnung herausgearbeiteter Scheiben aus den Betonprüfkörpern nach verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Für die Mikroskopie der Dünnschliffe gelangten zwei Mikroskope zum Einsatz. So wurden zunächst mit dem Stereomikroskop Olympus SZX16 Übersichtsaufnahmen unter Normal- und UV-Licht bei 0,7-facher Vergrößerung angefertigt. Basierend darauf wurden die DS mit dem Polarisationsmikroskop Axioskop 40 der Firma Zeiss vertiefend in Anlehnung an ASTM C 856-11 [51] untersucht. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Charakterisierung des

Gefüges und möglicher Phasenneubildungen. Als Schädigungsindikatoren waren Risse, Reaktionsprodukte und Phasenneubildungen von besonderem Interesse.

Zur einheitlichen Bewertung der Schadensmerkmale hinsichtlich AKR und SEB wurden diese nach Tabelle 4 klassifiziert.

Tabelle 4: Bewertung der Schadensmerkmale bei der DS-Mikroskopie

Klassifizierung	Häufigkeit der Merkmale
-	keine
+	punktuell eindeutig
++	häufig
+++	vorhandene Merkmale im betonschädigenden Ausmaß

4.9.2 Analyse des Tausalzeintrags und der Auslaugung von Natrium und Chlorid mit LIBS

Die Analyse des Tausalzeintrags in die Betonprüfkörper bei den AKR-Performanceprüfungen und die Auslaugung von Natrium und Chlorid aus den Betonprüfkörpern beim 40 °C- und 60 °C-Betonversuch nach der Alkalirichtlinie des DAfStb [21] erfolgte hier, wie bereits im vorstehenden Abschnitt 3.0 erwähnt, ausschließlich mit LIBS. Vor dem Hintergrund der sekundären Ettringitbildung wurde zusätzlich die Anwendbarkeit des Verfahrens für die bildgebende großflächige Ermittlung der Schwefelverteilung verifiziert.

Das Messprinzip von LIBS ist in der Abbildung 21 schematisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ein gepulster Laserstrahl zunächst fokussiert und dann auf die Baustoffoberfläche (hier: Vertikal- bzw. Horizontalschnitt des Betonprüfkörpers vor und nach jeweiliger AKR-provozierender Lagerung) appliziert wird. Durch die hohe Leistungsdichte des applizierten Laserstrahls wird ein kleines Volumen des Baustoffs aufgeschmolzen und verdampft. Es entsteht ein Plasma, was mit der Bildung einer Schockwelle durch die Verdrängung der Luft einhergeht. Durch die hohe Temperatur im Plasma (ca. 10.000 bis 12.000 K) werden alle chemischen Bindungen aufgebrochen. Zusätzlich werden die Elektronen in den einzelnen Atomen auf ein höheres Energieniveau gehoben (z.B. von $E_{\text{Niv. 0}}$ auf $E_{\text{Niv. 1}}$ oder $E_{\text{Niv. 2}}$) bzw. aus dem Atom herausgelöst (Ionisation: Übergang der Elektronen von $E_{\text{Niv. 0}}$ auf $\geq E_{\text{ionisiert}}$). Während der sich an-

schließenden Ausdehnung und Abkühlung des Plasmas wird zunächst ein kontinuierliches Spektrum und danach ein elementspezifisches Linienspektrum emittiert. Letzteres ist nur dann gegeben, wenn die im Atom gebundenen Elektronen von einem energiereicheren in ein energieärmeres Niveau übergehen (z.B. von $E_{\text{Niv. 2}}$ auf $E_{\text{Niv. 1}}$ oder $E_{\text{Niv. 0}}$ bzw. von $E_{\text{Niv. 1}}$ auf $E_{\text{Niv. 0}}$).

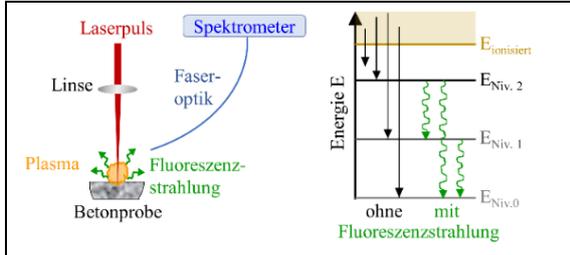


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Messprinzips von LIBS

Bei der spektroskopischen Auswertung der emittierten Strahlung gibt die Wellenlänge Aufschluss über die im verdampften Volumen enthaltenen Elemente. Zusätzlich erlaubt die Intensität der Strahlung Rückschlüsse auf die Konzentration der einzelnen Elemente. Dies ermöglicht eine quantitative Bestimmung der Elemente über die Kalibrierung mittels definiert zusam-

mengesetzter Proben. Weitergehende Angaben zur baustoffanalytischen Anwendung von LIBS sind [52] bis [57] zu entnehmen.

Realisiert wurden die Messungen mit dem für die Baustoffanalytik kommerziell erhältlichen FiberLIBS-lab-System der Firma SECOPTA analytics GmbH. Ein Schema der hierbei verwendeten Messanordnung sowie Fotos vom Gerätesystem sind der Abbildung 22 zu entnehmen. Es ist der Legende zu entnehmen, dass hier ein NdCr-YAG Mikrochip-Laser, der mit Laserdioden optisch gepumpt wird, Anwendung findet. Die Übertragung der Pumpstrahlung von den Dioden zum Laserkristall im Messkopf erfolgt über eine Glasfaser. Die gepulste Laserstrahlung wird mit zwei Spiegeln (A2 und A3) umgelenkt. Der als zweites zum Einsatz kommende Parabolspiegel (A3) fokussiert zusätzlich den auf die Baustoffoberfläche gerichteten Laserstrahl. Zum Ausschuss verfälschender atmosphärischer Einflüsse (Stickstoff, Sauerstoff) wird der Bereich in dem sich das Plasma befindet mit Helium gespült. Zusätzlich wird so die Nachweisempfindlichkeit von Chlor signifikant erhöht.

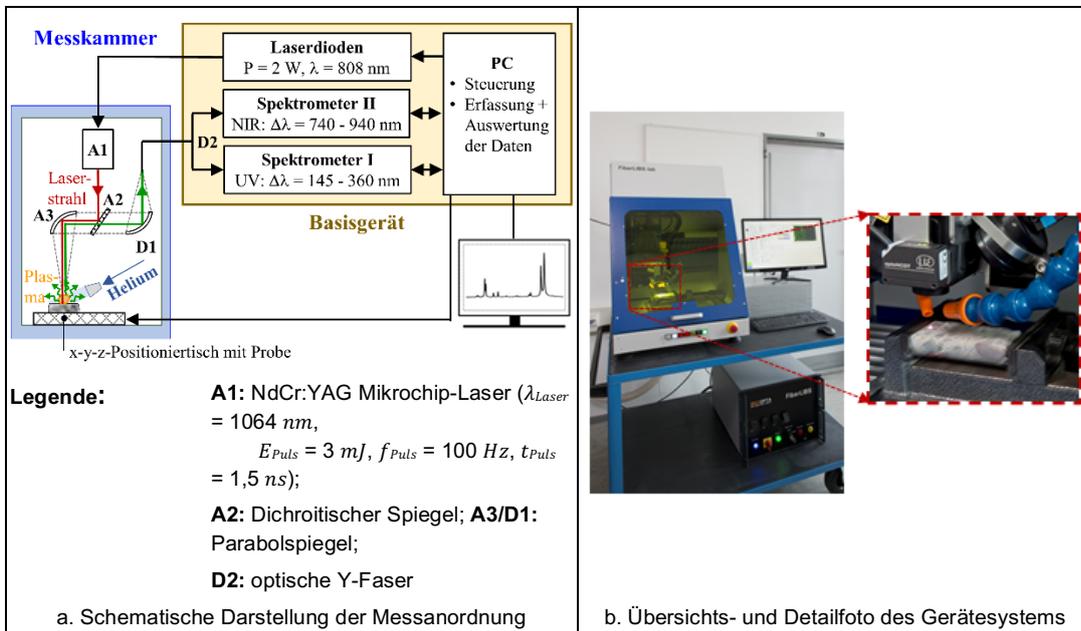


Abbildung 22: Beschreibung des verwendeten FiberLIBS-lab-Systems

Die bei der Abkühlung des laserinduzierten Plasmas emittierte Strahlung wird gleichfalls mittels zweier Spiegel (A3 und D1) umgelenkt. Dabei wird die mit dem Parabolspiegel D1 fokussierte Strahlung in eine optische Faser (D2) eingekoppelt. Mittels einer Verzweigung der optischen Faser wird anschließend die Strahlung in je ein Spektrometer, das im ultravioletten Bereich (UV) bzw. im nahen Infrarotbereich (NIR) arbeitet, eingespeist. Die Wellenlängen für die hier primär interessierende Analyse von Natrium, Chlor und Kalzium befinden sich im nahen Infrarotbereich. Zusätzlich werden im ultravioletten Bereich Kalzium und Silizium bestimmt. Ein typisches mit LIBS gewonnenes Spektrum einer Zementsteinoberfläche ist in Abbildung 23 exemplarisch dargestellt. Eine detaillierte elementspezifische Zuordnung der Wellenlänge ist der Tabelle 5 zu entnehmen. Dabei sind die hier verwendeten elementspezifischen Wellenlängen durch eine fette Schrift hervorgehoben.

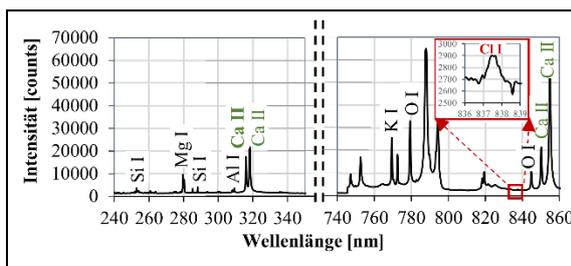


Abbildung 23: Typisches LIBS-Spektrum für die Analyse einer Zementsteinprobe aus CEM I 42,5 R mit definierter NaCl-Zugabe ($c_{Cl} = 1,08 \text{ M.-%}$ und $c_{Na} = 0,57 \text{ M.-%}$) im UV- und NIR-Bereich

Tabelle 5: Zuordnung der Wellenlänge zu ausgewählten Elementen [28]

Element	Ionisierungszustand	Wellenlänge [nm]
Natrium	Na I	818,3
	Na I	819,5
Chlor	Cl I	837,6
Kalzium	Ca II	315,9
	Ca II	317,9
	Ca II	849,8
	Ca II	854,2
Silizium	Si I	251,6
	Si I	288,2

Die LIBS-Messungen und ihre Auswertungen erfolgten weitestgehend automatisch unter Nutzung selbst entwickelter Softwaretools. Vor dem Hintergrund, dass die Alkalien für die schädigende AKR durch den Tausalzeintrag von außen und weniger durch Löseprozesse im Gesteinskorn bereitgestellt werden, fand bei der

Auswertung die Kalziumverteilung als Ausschlusskriterium Anwendung. Dies ermöglicht die Identifikation des Zementsteins und damit die Eliminierung der im Betonstraßenbau üblichen nicht kalzitischen bzw. nicht dolomitischen Gesteinskörnung. Die Abbildung 24 veranschaulicht exemplarisch die Vorgehensweise bei der Ermittlung des Na-Tiefenprofils aus den gemessenen Ca- und Na-Flächenscans mit erfasster Gesteinskörnung. Als Beispiel dient dabei ein mit LIBS abgescannter Vertikalschnitt durch das obere Segment eines Bohrkerns aus einer ca. zehn Jahre alten Fahrbahndecke eines BAB-Abschnitts. Dabei wird die Intensität des LIBS-Signals farbcodiert dargestellt. Deutlich erkennbar ist im hier dargestellten Na-Flächenscan, dass die eingesetzte Gesteinskörnung einen hohen Natriumgehalt aufweist. Dies führt bei der Akkumulation und Mittelung der kalibrierten LIBS-Messsignale entlang der einzelnen horizontalen Messlinien zu einem sehr indifferenten Na-Tiefenprofil, das den Tausalzeintrag in den Fahrbahndeckenbeton nicht hinreichend widerspiegelt. Aufgrund des verfälschenden Einflusses des Natriums in der Gesteinskörnung auf die Abbildung des primär im Zementstein erfolgenden Transports der Tausalzlösung wurde die Gesteinskörnung identifiziert und eliminiert. Hierfür wurde der signifikant höhere Kalziumgehalt im Zementstein gegenüber der Gesteinskörnung genutzt, was im Ca-Flächenscan mit erfasster Gesteinskörnung deutlich erkennbar ist (Abbildung 24, oben). Das nach Eliminierung der Gesteinskörnung im Na-Flächenscan generierte Na-Tiefenprofil beschreibt den Tausalzeintrag in die Betonfahrbahndecke plausibel. So weist dieses einen von der Oberfläche in das Innere der Betonfahrbahndecke gerichteten Gradienten auf, der auf eine Mindesteindringtiefe des Natriums von ca. 15 mm schließen lässt. Aus Vergleichbarkeitsgründen wurde dieselbe Vorgehensweise bei der Ermittlung der Cl-Tiefenprofile aus den Messdaten von LIBS gewählt.

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten LIBS-Analysen erfolgten an je einer Scheibe der Betonprüfkörper vor und nach ihrer jeweiligen AKR-provozierenden Lagerung. Zur Vermeidung verfälschender Einflüsse durch ein Schneidmittel wurde die Messfläche für LIBS trocken geschnitten. Die so erhaltene Schnittfläche wurde anschließend mittels Druckluft gereinigt und danach ohne weitere Präparation schrittweise mäanderförmig mit dem Laserstrahl

abgescannt. Die Größe der Messfläche für LIBS betrug 90 mm x 60 mm. Als Messpunkteabstand wurde in x- und y-Richtung jeweils 0,5 mm gewählt. Am jeweiligen Messpunkt wurden je sechs kurze energiereiche Laserpulse (Pulsenergie: ca. 3 mJ; Länge: ca. 1,5 ns) appliziert. Der

Durchmesser des Spots betrug ca. 100 μm . Daraus ergibt sich eine Energiedichte im Fokus von ca. 40 GW/cm^2 . Für einen Flächenscan betrug die Messzeit ca. 0,5 h.

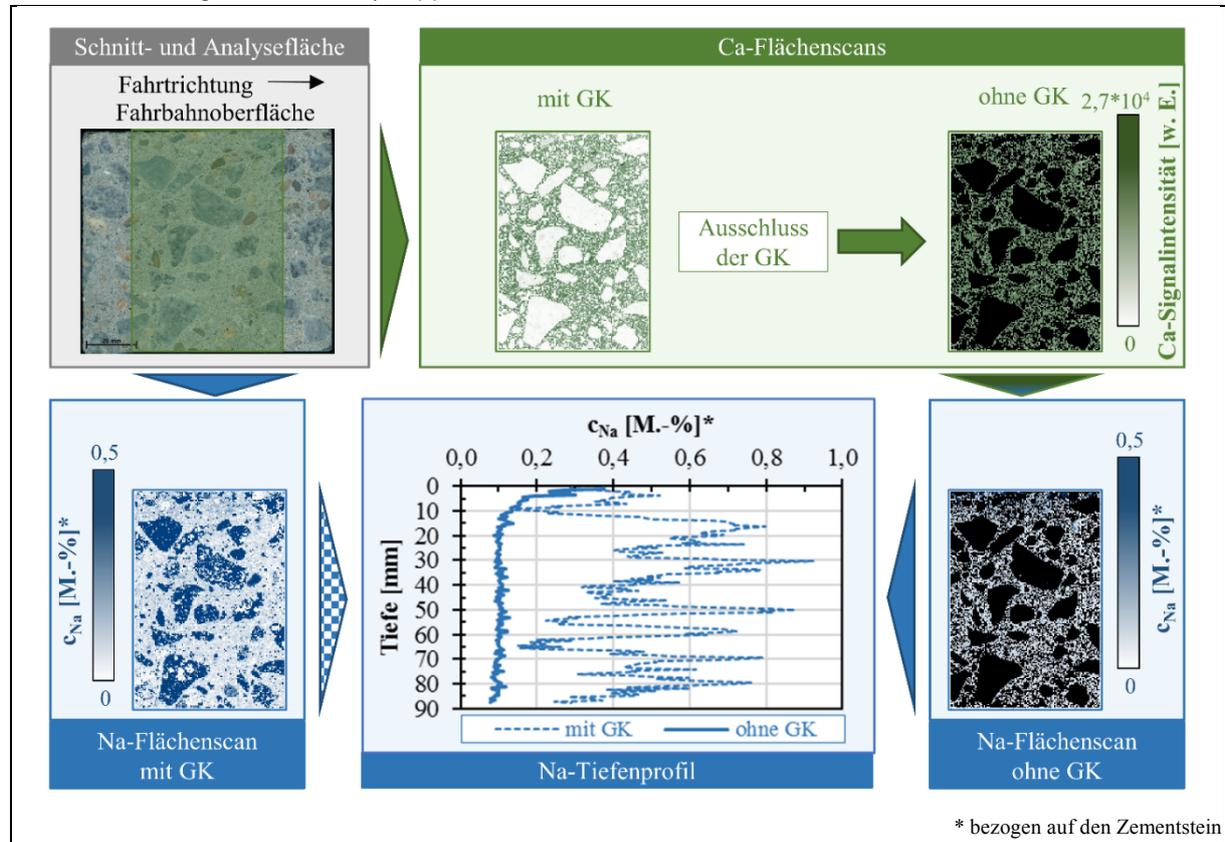


Abbildung 24: Vorgehensweise bei der Ermittlung des Natriumtiefenprofils bei der Auswertung der LIBS-Flächenscans unter Nutzung des Ca-Ausschlusskriteriums zur Eliminierung der Gesteinskörnung (GK) am Beispiel des oberen Segments eines Bohrkerns aus der Plattenmitte eines BAB-Abschnitts

Weiterführende Angaben zur Kalibrierung und der Güte der quantitativen LIBS-Messungen sind [59, 60] zu entnehmen.

5 Ergebnisse und deren Auswertung

5.1 Charakterisierung ausgewählter Gesteinskörnungen

5.1.1 Petrographie, oxidische Bestandteile und Mineralphasenbestand

Für die Gesteinskörnungen GK1 und GK4 (Kiese) wurde die **petrografische Zusammensetzung** visuell ermittelt. Das Ergebnis der Geröllkomponentenanalysen für die betrachteten Kiese GK1 und GK4 zeigt die Tabelle 6. Der Ergebnisvergleich lässt signifikante Unterschiede in der petrografischen Zusammensetzung beider Gesteinskörnungen erkennen. So besteht die Gesteinskörnung GK1 zu über 60 M.-% aus Quarz. Bei der Korngruppe 16/22 mm beträgt der Quarzanteil sogar über 80 M.-%. Als weitere

Bestandteile sind mit jeweils unter 10 M.-% sowohl Sand- und Tonsteine als auch Flinte zu finden. Bei den verbleibenden Mineralphasen handelt es sich um Magmatite. Die Gesteinskörnung GK4 hingegen weist eine deutlich höhere Streubreite im Mineralphasenbestand der Korngruppen auf. Die Hauptbestandteile sind mit jeweils über 20 M.-% bei der Korngruppe 2/8 mm Sand- und Tonsteine sowie Grauwacke. Magmatite und ein geringer Anteil an Quarz wurden als weitere Geröllkomponenten identifiziert. Die Korngruppe 8/16 mm der Gesteinskörnung GK4 besteht zu fast 50 M.-% aus Sandstein. Weitere Gemengeanteile sind hier Tonstein (22 M.-%), Grauwacke (16 M.-%) sowie Quarz und Granit mit jeweils 6 M.-%. Bei der Korngruppe 16/22 mm sind Sandstein (53 M.-%) und Grauwacke (17 M.-%) die Hauptbestandteile. Mit jeweils 5 M.-% ist der Anteil der Flinte und Hornsteine deutlich erhöht.

Tabelle 6: Petrografische Zusammensetzung der Fraktionen der Gesteinskörnungen GK1 und GK4

Art der Geröllkomponente	GK 1 (Kies)			GK 4 (Kies)		
	2/8 mm	8/16 mm	16/22 mm	2/8 mm	8/16 mm	16/22 mm
	[M.-%]			[M.-%]		
Sandstein	5	9	1	38	48	53
Quarz, Quarzit	65	68	84	6	6	-
Tonstein	6	4	1	26	22	7
Grauwacke	-	-	-	20	16	17
Kalkstein	-	1	-	-	-	-
Flint, Feuerstein	1	3	3	-	1	5
Hornstein, Chert	-	2	3	-	-	5
Rhyolith	-	8	1	-	-	-
Granit	-	-	3	10	6	2
Gabbro	-	-	-	-	-	6
Plutonit	-	5	-	-	-	-
Sonstige Magmatite	22	-	4	-	-	-
Ganggestein	-	-	-	-	-	5

Außerdem wurden die Gesteinskörnungen GK2 und GK3 petrografisch untersucht. Bei der Gesteinskörnung GK2 handelt es sich um eine Grauwacke mit geringen Anteilen an rötlichen Komponenten. Die Gesteinskörnung GK3 ist ein Rhyolith. Bei den Korngruppen 2/5 mm und 5/8 mm waren geringe Mengen an Dacit festzustellen.

Gegenstand einer weiteren Teilaufgabe war die Ermittlung der **oxidischen Bestandteile** der

Gesteinskörnungen mit Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse. Dazu wurden, wie im Abschnitt 4.2 bereits umfassend beschrieben, die Korngruppen der jeweiligen Gesteinskörnung zu einem Pulver aufgemahlen und mit dem Gerät EDAX Eagle III analysiert.

Die Ergebnisse der Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass sich die Korngruppen der einzelnen Gesteinskörnungen in ihrer

chemischen Zusammensetzung nur geringfügig unterscheiden. Allerdings treten zwischen den Gesteinskörnungen erwartungsgemäß signifikante Unterschiede auf. Die Gesteinskörnung GK1 hat mit über 90 M.-% den höchsten Gehalt an SiO₂ und mit ca. 5 M.-% den geringsten Gehalt an Al₂O₃. Der SiO₂-Gehalt der anderen Gesteinskörnungen liegt zwischen 70 und 78 M.-%. Dabei beträgt der Al₂O₃-Gehalt deutlich über

10 M.-%. Die Gesteinskörnung GK2 verfügt mit 18 M.-% bei der Korngruppe 5/8 mm über den höchsten Al₂O₃-Gehalt. Auffällig ist aber auch, dass bei den Gesteinskörnungen GK2 und GK4 der Fe₂O₃-Gehalt signifikant höher ist als bei den anderen Gesteinskörnungen. Die Gesteinskörnung GK3 weist mit 5 M.-% den höchsten Gehalt an K₂O auf.

Tabelle 7: Oxidische Zusammensetzung der Fraktionen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4, ermittelt mit Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse

Gesteinskörnungsart	Korngruppe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O
	[mm]	[M.-%]						
GK 1 (Kies)	2/8	91,2	6,4	0,2	0,8	-	0,1	1,4
	8/16	92,3	5,5	0,4	0,8	-	0,1	0,9
	16/22	94,1	4,0	0,1	0,6	-	0,1	0,8
GK 2 (Grauwacke)	2/5	71,1	17,6	2,0	3,9	2,4	0,5	2,3
	5/8	70,0	18,4	1,6	4,1	2,7	0,7	2,2
	8/16	70,6	17,3	2,3	4,1	2,8	0,5	2,1
	16/22	73,1	15,7	2,5	3,6	2,4	0,6	1,8
GK 3 (Rhyolith)	2/5	77,7	15,1	0,5	1,7	-	0,2	4,8
	5/8	77,3	15,6	0,4	1,6	-	0,2	5,0
	8/16	76,2	15,6	1,3	1,7	-	0,2	5,1
	16/22	77,2	15,4	0,2	2,0	-	0,3	5,0
GK 4 (Kies)	2/8	75,3	14,3	0,8	4,7	2,1	0,6	2,2
	8/16	77,1	12,6	1,4	4,7	1,9	0,5	1,6
	16/22	74,7	13,1	3,2	5,0	1,9	0,5	1,4

Der **Mineralphasenbestand** wurde, wie im Abschnitt 4.3 ausführlich beschrieben, an pulverisierten Gesteinskörnungen jeder Korngruppe mittels Röntgenbeugung (XRD) analysiert. Die Ergebnisse der XRD-Analyse für die einzelnen Gesteinskörnungen sind korngruppenspezifisch den Tabellen 8.1 bis 8.4 zu entnehmen.

Bei der Gesteinskörnung GK1 (Kies) wurde der visuelle Befund, dass sie überwiegend aus Quarz besteht, bestätigt. So beträgt der Quarzanteil ca. 77 % in der Kornfraktion 2/8 und ca. 81 % in der Kornfraktion 8/16. Als weitere erwähnenswerte Mineralphasen wurden bei dieser Gesteinskörnung Mikrolin, albitreicher Plagioklas und Muskovit ermittelt.

Die Gesteinskörnung GK2 (Grauwacke) enthält vor allem Quarz (33 bis 40 M.-%), hohe Gehalte an albitreichem Plagioklas (ca. 26 bis 39 M.-%) sowie Biotit und Chlorit (11 bis 15 M.-%). Der

vorgefundene Mineralphasenbestand ist typisch für eine Grauwacke.

Die Gesteinskörnung GK3 (Rhyolith) besteht neben Quarz (ca. 28 M.-%) vor allem aus Orthoklas (ca. 19 bis 20 M.-%), albitreichem Plagioklas (ca. 12 bis 20 M.-%) sowie Mikrolin (ca. 13,6 bis 23 M.-%). Der ermittelte Mineralphasenbestand lässt darauf schließen, dass es sich hierbei um einen Quarz-Feldspat-Porphyr mit einer Anreicherung von Mikrolin in der Fraktion 8/16 mm handelt.

Die Gesteinskörnung GK4 (Kies) enthält neben Quarz (ca. 45 M.-%), albitreichem Plagioklas (ca. 12 bis 16 M.-%, Muskovit (6,6 bis 12 M.-%), Microline (ca. 4 bis 10 M.-%), Biotit (ca. 7 bis 12 M.-%) sowie Chlorit (ca. 7 bis 9 M.-%). Der vorgefundene Mineralphasenbestand lässt den Schluss zu, dass es sich hierbei um einen Quarz-Feldspat-Kies handelt.

Tabelle 8.1: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK1 (Kies), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Mineralphase	Korngruppe [mm]					
	2/8			8/16		
	Rechenwert	Fehler	Bemerkung ¹⁾	Rechenwert	Fehler	Bemerkung ¹⁾
	[M,-%]			[M,-%]		
Biotit	2,1	4	Nachweisgrenze (NWG)	3,3	2.73	Quarzkies
Hematit	2,0	0,6	-	2,0	0.96	
Kaolinit	3,4	3	-	1,8	2.85	NWG
Mikroklin	6,8	2	-	3,3	3.30	NWG
Muskovit	4,0	2	-	0,5	1.56	NWG
albitreicher Plagioklas	4,3	2	-	6,1	3.30	
Quarz	76,7	6	-	81,2	5.70	-
Sanidin (Na)	0	-	-	1,1	2.28	NWG
Titanit	0,6	0,7	NWG	0,5	0.81	NWG

1) NWG: Nachweisgrenze

Tabelle 8.2: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK2 (Grauwacke), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Mineralphase	Korngruppe [mm]						Bemerkungen
	2/5		5/8		8/16		
	Rechenwert	Fehler	Rechenwert	Fehler	Rechenwert	Fehler	
	[M,-%]		[M,-%]		[M,-%]		
Biotit	15,4	4	14,9	2	14,7	2	typisches Grauwackegestein, nur gering schwankend in der Zusammensetzung der Fraktionen
Calcit	2,0	0,8	1,6	0,8	2,6	0,9	
Chlorit	14,9	3,0	10,7	3,0	14,4	2,0	
Hematit	2,0	0,9	0,6	0,3	1,8	0,7	
albitreicher Plagioklas	25,6	2,0	38,9	3,0	33,0	2,0	
Quarz	40,1	3,0	33,2	2,0	33,4	2,0	

Tabelle 8.3: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK3 (Rhyolith), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Mineralphase	Korngruppe [mm]						Bemerkung ¹⁾
	2/5		5/8		8/16		
	Rechenwert	Fehler	Rechenwert	Fehler	Rechenwert	Fehler	
	[M,-%]		[M,-%]		[M,-%]		
Calcit	0.6	0.9	0.1	0.3	1.9	1	NWG
Chlorit	7.8	2	4.6	2	6.2	3	Quarz-Feldspat-Porphyr, Anreicherung von Mikroklin in 8/16
Hematit	1.9	0.6	2.2	0.7	1.6	0.9	
Mikroklin	13.6	5	16.4	4	22.8	7	
Muscovit	5.3	1	4.4	2	4.5	2	
Orthoklas	19.2	5	20.0	8	19.3	6	
albitreicher Plagioklas	20.5	2	19.1	2	12.1	1	
Quarz	28.4	1	28.2	2	28.0	2	
Rutil	0.2	0.2	1.9	0.9	0.2	0.4	NWG
Sanidin (Na)	2.5	2	3.0	4	3.3	3	NWG

1) NWG: Nachweisgrenze

Tabelle 8.4: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK4 (Kies), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Mineralphase	Korngruppe [mm]						Bemerkung ¹⁾
	2/8			8/16			
	Rechenwert	Fehler	Bemerkung	Rechenwert	Fehler	Bemerkung ¹⁾	
	[M,-%]			[M,-%]			
Biotit	7,0	1	Quarz-Feldspat-Kies, kein dominierendes Mineral im Kies	11,7	2	Quarz-Feldspat-Kies, kein dominierendes Mineral im Kies	
Chlorit	7,0	2		8,7	0.9		
Hematit	1,7	0,6		1,9	2		
Kaolinit	4,1	1		4,5	0.7		
Mikroklin	10,4	3		3,9	2		
Muskovite	11,9	2		6,6	1		
albitreicher Plagioklas	12,4	2		16,6	2		
Quarz	45,4	2		43,7	2		

1) NWG: Nachweisgrenze

5.1.2 Porenstrukturuntersuchungen

5.1.2.1 Einzelkörner der Korngruppe 8/16 mm

Bestimmung der offenen Porosität über die Wasseraufnahme

Zur orientierenden Bewertung der Porenstruktur wurde zunächst orientierend über die Wasseraufnahme die offene Porosität an Einzelkörnern

der für die Tomografie vorgesehenen Kornfraktion 8/16 mm in Anlehnung an DIN EN 1097 Teil 6 [29] und DIN EN 1936 [30] bestimmt. Dabei wurden insbesondere bei den Kiesen die einzelnen Geröllkomponenten separat und im Kornemisch gewichtet betrachtet (Abbildung 25).

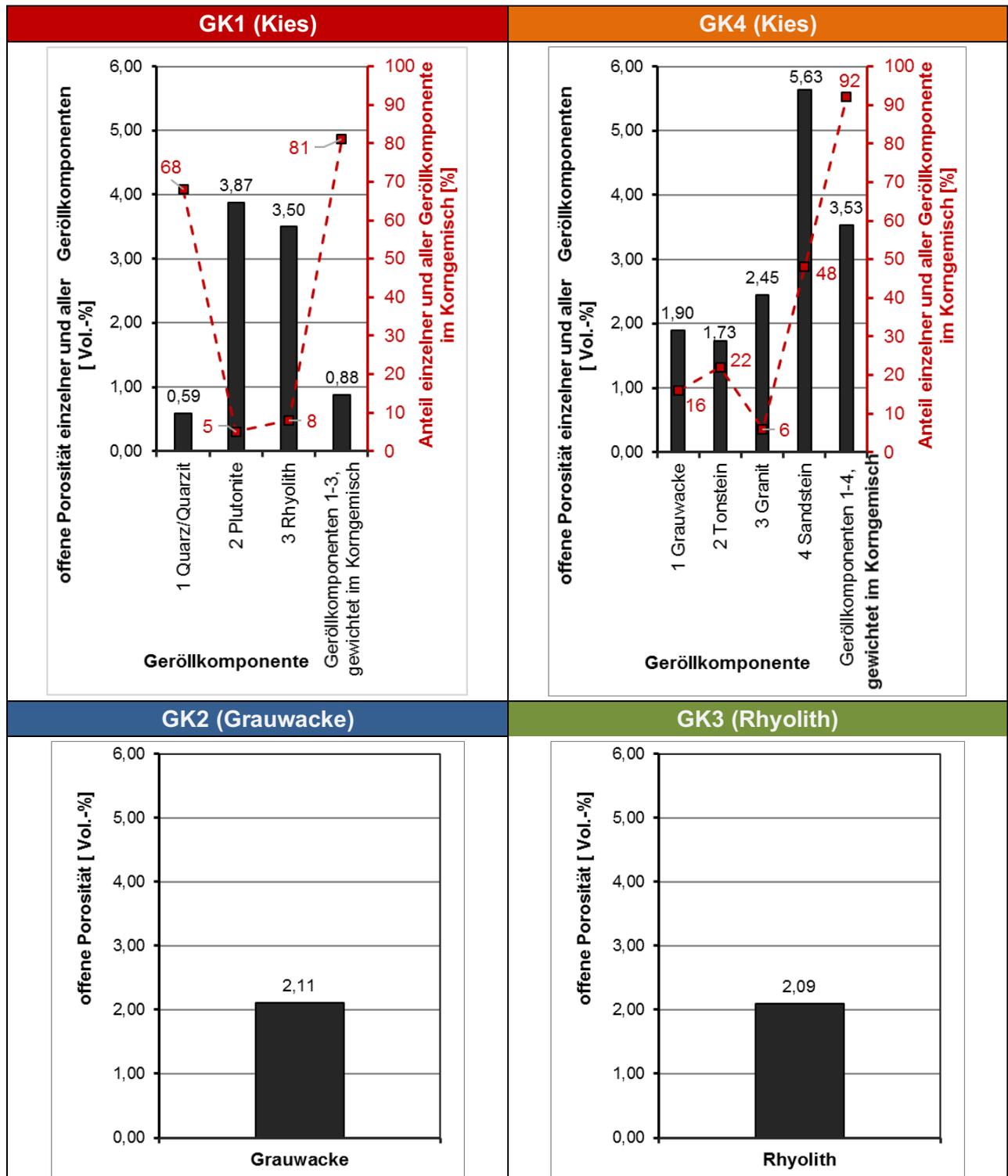


Abbildung 25: Offene Porosität der für die 3D-CT ausgewählten Körner von den Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 in der Fraktion 8/16 mm, ermittelt aus 24-stündiger Wasseraufnahme

Eine vergleichende Betrachtung aller Diagramme in Abbildung 25 zeigt, dass die beiden gebrochenen Festgesteine Grauwacke (GK2) und Rhyolith (GK3) mit 2,22 und 2,09 Vol.-% annähernd die gleiche offene Porosität aufweisen. Demgegenüber besitzen die Geröllkomponenten der beiden heterogen zusammengesetzten

Kiese (GK1 und GK4) sehr unterschiedliche offene Porositäten. Wichtet man die offene Porosität der einzelnen Geröllkomponenten entsprechend ihres Vorkommens im Korngemisch, ergibt sich für die Gesteinskörnung GK1 ein Wert von 0,88 Vol.-% und für GK4 ein Wert von 3,53 Vol.-%. Der relativ hohe Wert bei der GK4

resultiert dabei vor allem aus der hohen Porosität und dem hohen Anteil des Sandsteins im Korngemisch. Abschließend sei allerdings zu dem Verfahren angemerkt, dass dieses sehr subjektiv geprägt ist und mit großen Streuungen behaftet ist. Eine Objektivierung der gemessenen Porenstrukturdaten ist mit der Röntgen 3D-CT möglich.

Oberflächenanalyse mit Röntgen 3D-CT

Die Ergebnisse der räumlichen Analyse der einzelnen Oberflächenanteile der Einzelkörner mit der Röntgen 3D-CT sind für die Kiesbestandteile der Gesteinskörnungen GK1 und GK4 der Abbildung 26 sowie für die Grauwacke und den Rhyolith mit unterschiedlicher Herkunft (aus Festgestein (GK2 und GK3) bzw. aus Kies (GK1 und GK4)) der Abbildung 29 zu entnehmen. Die Basis für die Erstellung der Abbildungen bilden die in der Anlage A0 aufgeführten Messwerte. Es werden drei Oberflächenanteile differenziert betrachtet. Als äußere Oberfläche wird die äußere Mantelfläche des jeweiligen Kornes definiert. Die von außen zugängliche Oberfläche berücksichtigt den Oberflächenanteil der von der Mantelfläche des Kornes ausgehenden und in das Korn hineinreichenden Poren und Risse. Zusätzlich wurde der Oberflächenanteil der Risse und Poren ausgewiesen, der nicht mit der Mantelfläche des Kornes verbunden und somit von außen nicht zugänglich ist. Die so differenzierten Oberflächenanteile der Einzelkörner selbst wurden sowohl absolut als auch relativ (bezogen auf die Masse des Einzelkorns) aufgetragen.

Eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse der Oberflächenanalyse der Kiese in Abbildung 26 zeigt, dass bei der Darstellung der absoluten Oberflächenanteile die Einzelkörner des Quarzes/Quarzits und des Plutonits der Gesteinskörnung GK1 tendenziell die höchsten Maximalwerte und Schwankungen aufweisen. Werden die Oberflächenanteile auf die Masse bezogen, erfahren deren Maximalwerte und Schwankungen insbesondere beim Quarz und Quarzit eine signifikante Verminderung, während sie beim Rhyolith (GK1) signifikant zunehmen. Einen optischen Eindruck von der inneren Gefügestruktur der gesteinsartspezifischen Einzelkörner vermitteln die ausgewählten räumlichen CT-Einzelbilder (Abbildungen 27 und 28). In diesen Bildern wird der Feststoff der Einzelkörner transparent dargestellt. Das ermöglicht eine bessere räumliche Visualisierung der von der äußeren Oberfläche ausgehenden Risse und Poren (rot

eingefärbt) sowie die außen nicht zugängliche Poren und Risse (gelb eingefärbt). Eine Zuordnung der grafisch dargestellten Oberflächenanteile des jeweiligen Einzelkorns (Abbildungen 26 und 29) zu den räumlichen CT-Einzelbildern (Abbildungen 27 und 28) ist über die Bezeichnung des CT-Datensatzes gegeben. Mit dieser Zuordnung und den zuvor dargestellten Bewertungshintergrund ist die starke Schwankung der von außen zugänglichen und nicht zugänglichen Oberflächenanteile in den Einzelkörnern des Quarzes/Quarzits der GK1 (CT-Datensätze 7032 und 7035) deutlich in Abbildung 27 erkennbar. Für den Rhyolith (GK1) wird in Abbildung 27 exemplarisch ein räumliches CT-Einzelbild eines Einzelkorns mit den höchsten von außen zugänglichen und nicht zugänglichen Oberflächenanteilen aufgezeigt (CT-Datensatz 6838). Das breite Spektrum beider Oberflächenanteile beim Plutonit zeigen die räumlichen CT-Einzelbilder der in der Abbildung 27 aufgezeigten zwei CT-Einzelbilder (CT-Datensätze 6976 und 6977). Es ist erkennbar, dass sowohl die von außen zugänglichen als auch die von außen nicht zugänglichen Oberflächenanteile bei dieser Gesteinsart sehr stark variieren können.

Im Gegensatz zur Gesteinskörnung GK1 schwanken die Oberflächenanteile der untersuchten gesteinsartspezifischen Einzelkörnern bei GK4 deutlich weniger. Erwartungsgemäß führt auch hier die Einführung des Massenbezugs der Oberflächenanteile der Einzelkörner zu einer veränderten Bewertung. So führt beispielsweise der Massenbezug bei den Einzelkörnern aus Granit zu einer Erhöhung der relativen Oberfläche im Vergleich zu den Einzelkörnern aus Sandstein. Einen Eindruck vom inneren Gefügestand des Einzelkorns aus Sandstein mit dem höchsten von außen zugänglichen Oberflächenanteil (CT-Datensatz 6984) aller untersuchten Sandsteineinzelkörner vermittelt das räumliche CT-Einzelbild in der Abbildung 28. Erwartungsgemäß zeigt dieses einen relativ hohen von außen zugänglichen und einen geringen von außen nicht zugänglichen Oberflächenanteil. Die räumliche Einordnung der von außen zugänglichen Oberflächenanteile lässt auf einen schichtenweisen Aufbau schließen. Auch bei den untersuchten Einzelkorn aus Tonstein (CT-Datensatz 6962) und Grauwacke (CT-Datensatz 6874) ist aufgrund der ähnlichen Entstehungsgeschichte eine Schichtung erkennbar. Bei letzterem überwiegt allerdings der von außen nicht

zugängliche gegenüber dem von außen zugänglichen Oberflächenanteil. Das exemplarisch in der Abbildung 28 abschließend dargestellte räumliche CT-Einzelbild des Einzelkorns aus

Granit zeigt, dass auch diese Gesteinsart größere von außen zugängliche Oberflächenanteile aufweisen kann.

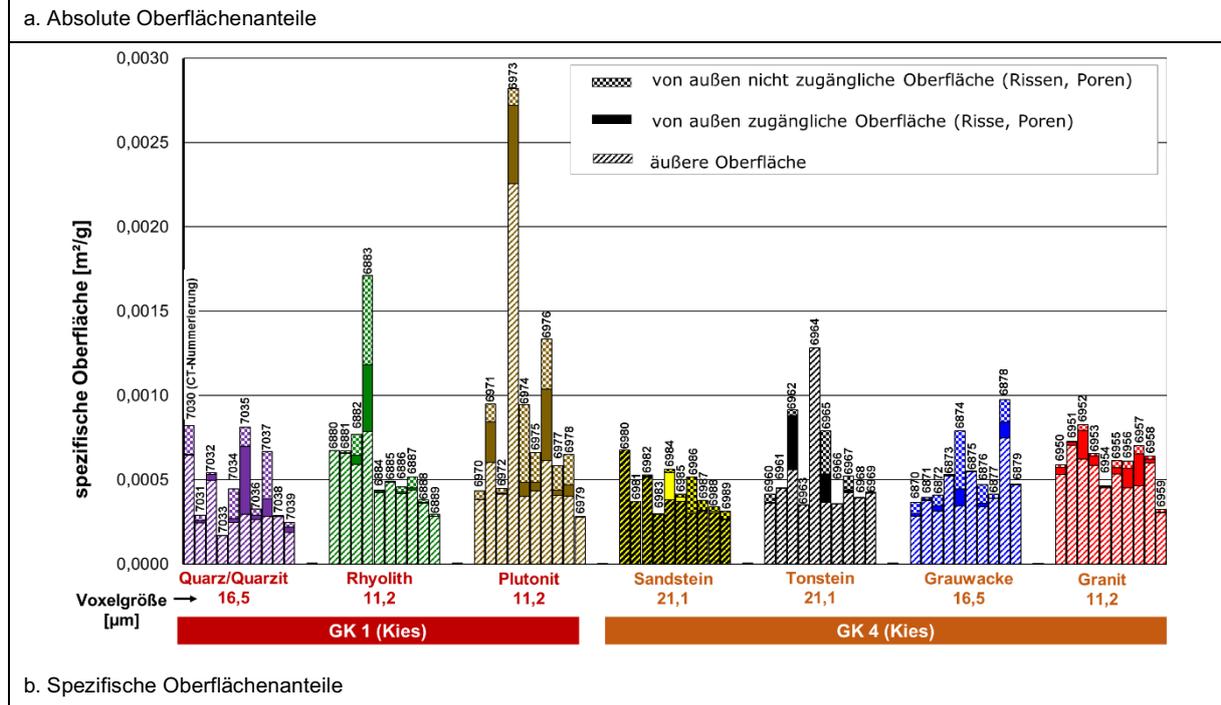
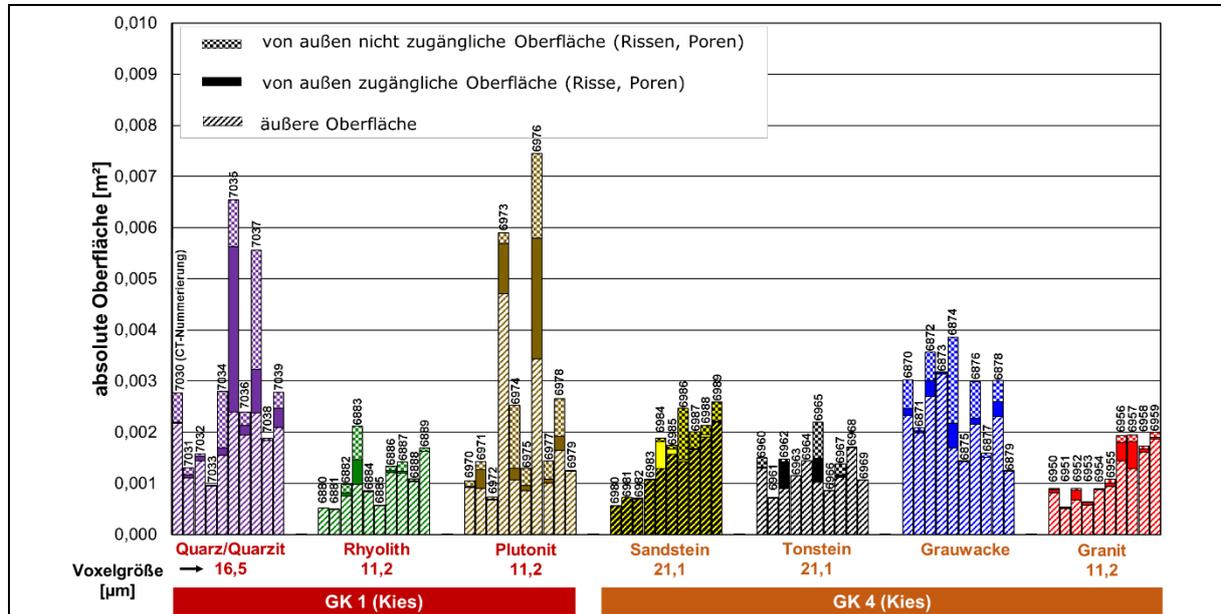


Abbildung 26: Ergebnis der tomografischen Oberflächenanalyse der Einzelkörner aus der Fraktion 8/16 mm der Gesteinskörnungen GK1 und GK4 (Kiese)

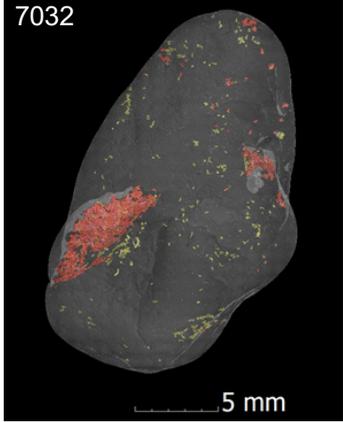
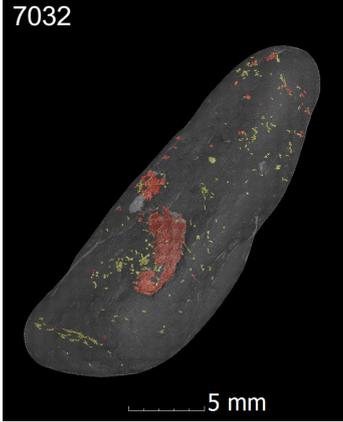
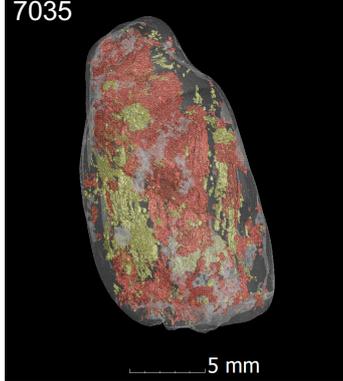
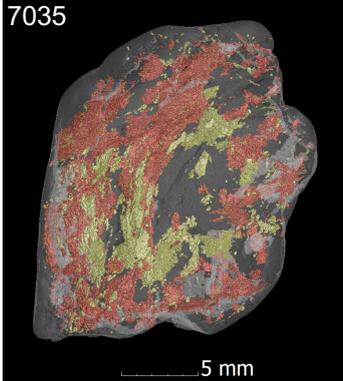
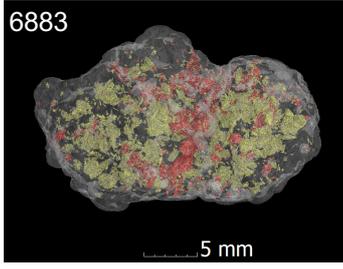
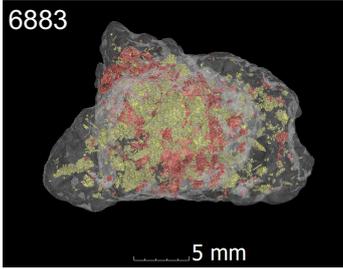
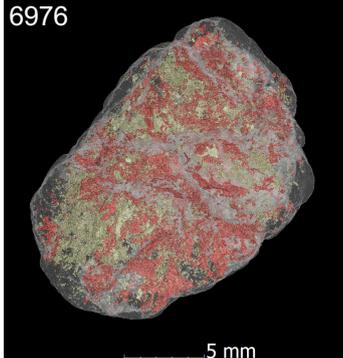
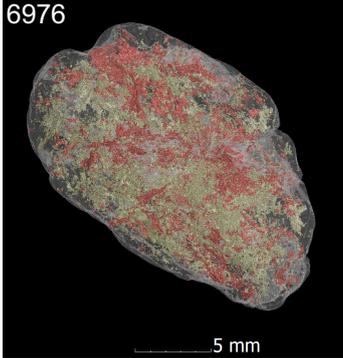
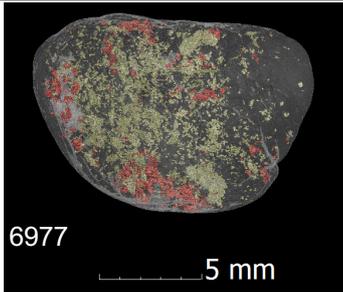
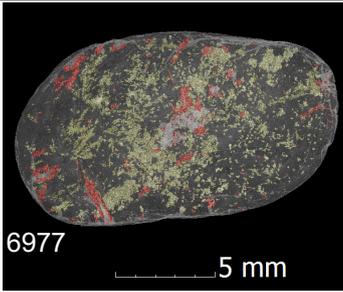
		Ausgewählte räumliche CT-Einzelbilder		Kurzbeschreibung		
GK1	Quarz/Quarzit	7032		7032		geringer von außen zugänglicher und nicht zugänglicher Oberflächenanteil
		7035		7035		hoher von außen zugänglicher und nicht zugänglicher Oberflächenanteil
	Rhyolith	6883		6883		mittlerer von außen zugänglicher und nicht zugänglicher Oberflächenanteil
		Plutonit	6976		6976	
	6977			6977		geringer von außen zugänglicher und hoher nicht zugänglicher Oberflächenanteil
	Legende: ■ von außen zugänglicher Oberfläche ■ von außen nicht zugängliche Oberfläche					

Abbildung 27: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner der Gesteinskörnung GK1 (Kies)

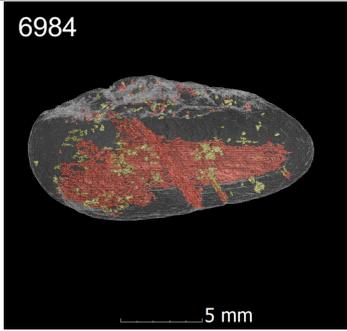
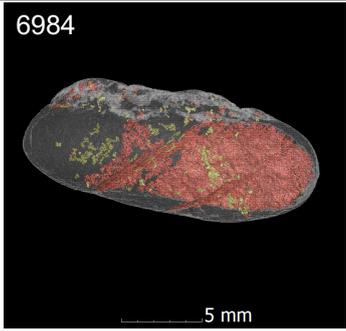
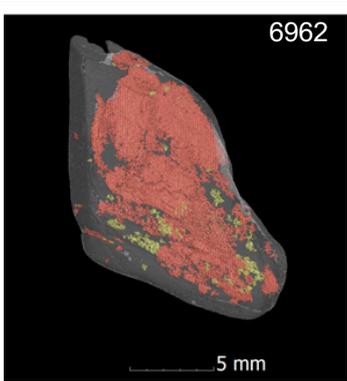
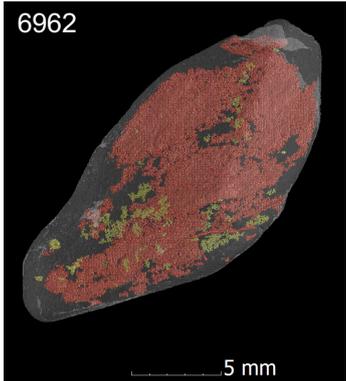
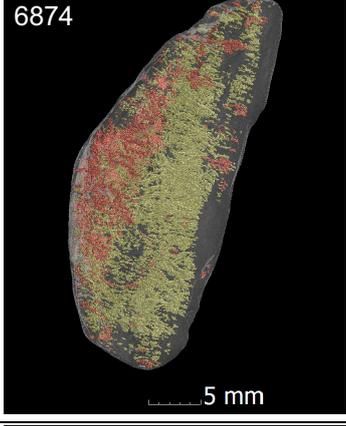
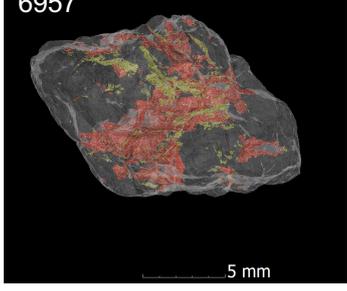
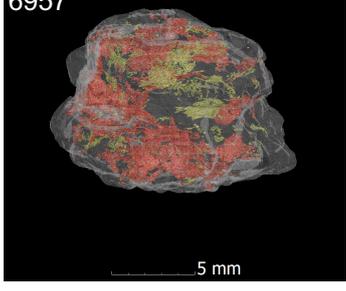
		Ausgewählte räumliche CT-Einzelbilder		Kurzbeschreibung
GK4	Sandstein	 <p>6984</p> <p>5 mm</p>	 <p>6984</p> <p>5 mm</p>	relativ hoher von außen zugänglicher und geringer nicht zugänglicher Oberflächenanteil (Schichtung)
	Tonstein	 <p>6962</p> <p>5 mm</p>	 <p>6962</p> <p>5 mm</p>	hoher von außen zugänglicher und geringer nicht zugänglicher Oberflächenanteil (Schichtung)
	Grauwacke	 <p>6874</p> <p>5 mm</p>	 <p>6874</p> <p>5 mm</p>	mittlerer von außen zugänglicher und hoher nicht zugänglicher Oberflächenanteil (Schichtung)
	Granit	 <p>6957</p> <p>5 mm</p>	 <p>6957</p> <p>5 mm</p>	hoher von außen zugänglicher und geringer nicht zugänglicher Oberflächenanteil
Legende:		 von außen zugänglicher Oberfläche	 von außen nicht zugängliche Oberfläche	

Abbildung 28: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner der Gesteinskörnung GK4 (Kies)

Interessant ist auch ein vergleichende Oberflächenanalyse der Einzelkörner aus Grauwacke bzw. aus Rhyolith aus dem Festgestein (GK 2 und GK3) und dem Kies von GK4 und GK1 (Abbildungen 29 -31). Dabei fällt auf, dass die Einzelkörner der Festgesteine gegenüber denen der Kiese nur vernachlässigbar geringe von

außen zugängliche und nicht zugängliche Oberflächenanteile aufweisen. Dies wird eindrucksvoll durch die in den Abbildungen 30 und 31 jeweils vergleichend für das Fest- und Lockergestein dargestellten räumlichen CT-Einzelbilder für die Grauwacke und den Rhyolith dokumentiert.

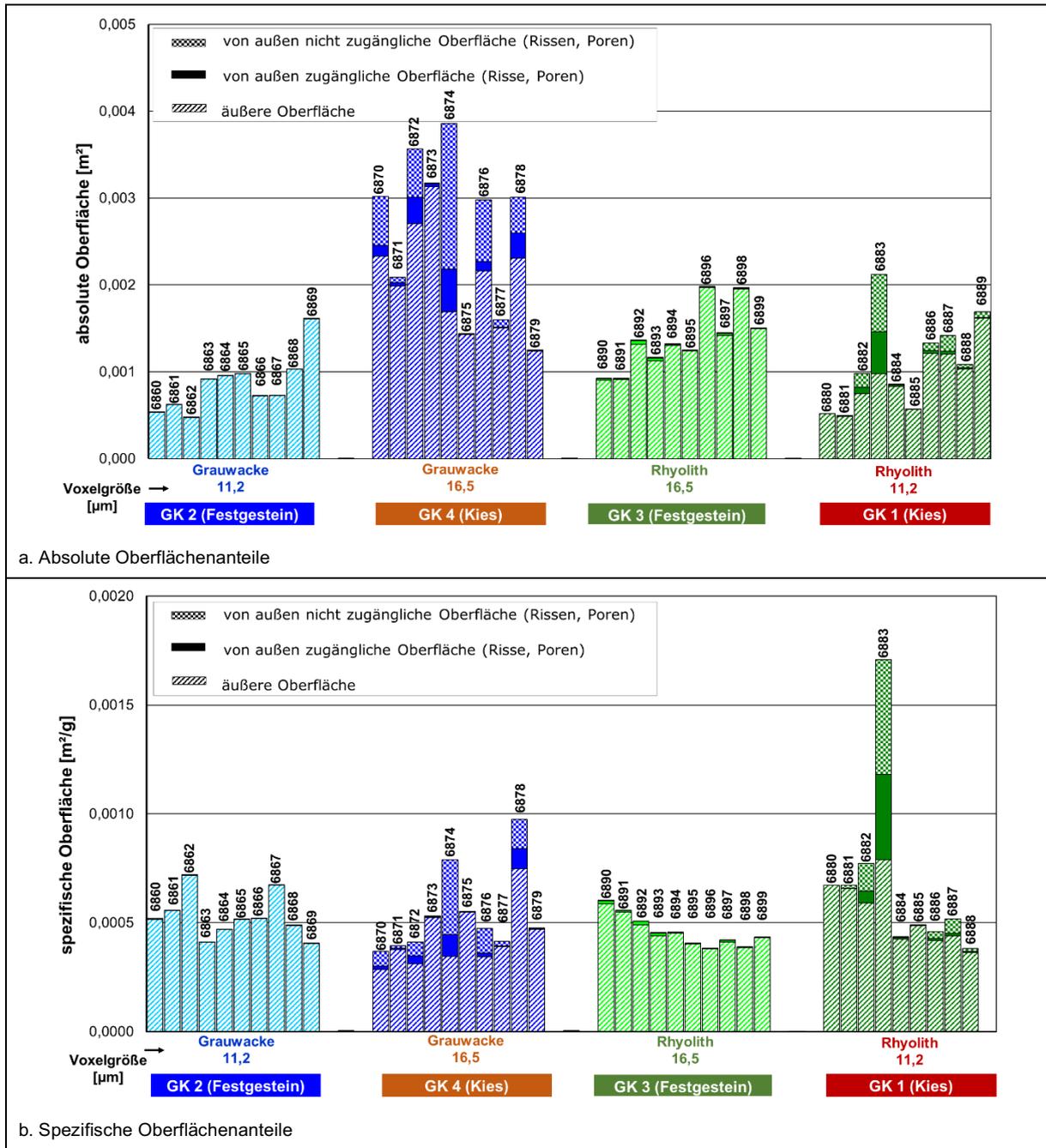


Abbildung 29: Ergebnis der tomografischen Oberflächenanalyse der Einzelkörner aus der Fraktion 8/16 mm der Gesteinskörnungen GK 2 und GK 4 (vergleichende Betrachtung der Grauwacke als Fest- und Lockergestein) sowie von GK 3 und GK 1 (vergleichende Betrachtung von Rhyolith als Fest- und Lockergestein)

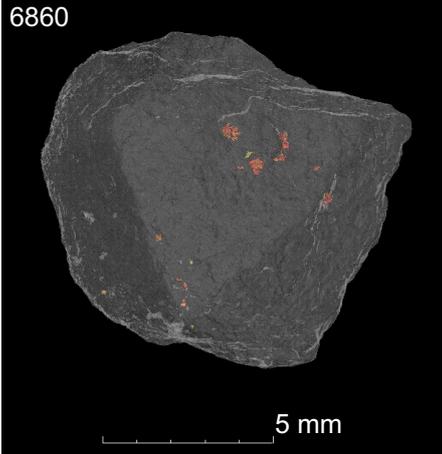
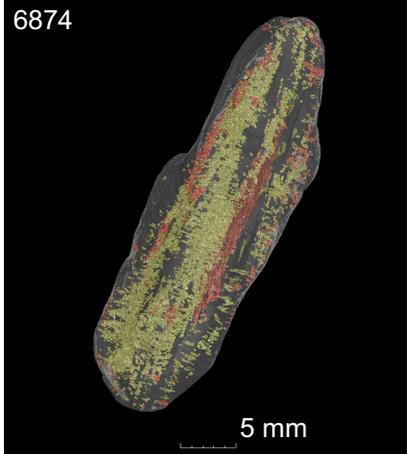
Charakteristika	Grauwacke aus	
	Festgestein (GK2)	Kies (GK4)
Ausgewählte räumliche CT-Einzelbilder	<p>6860</p>  <p>5 mm</p>	<p>6874</p>  <p>5 mm</p>
Kurzbeschreibung	geringer von außen zugänglicher und nicht zugänglicher Oberflächenanteil	mittlerer von außen zugänglicher und hoher nicht zugänglicher Oberflächenanteil (Schichtung)

Abbildung 30: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner der Grauwacke aus dem Festgestein (GK2) und dem Kies (GK4)

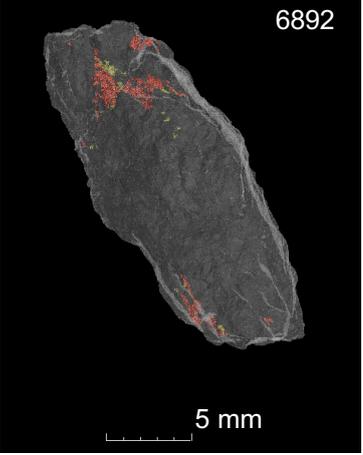
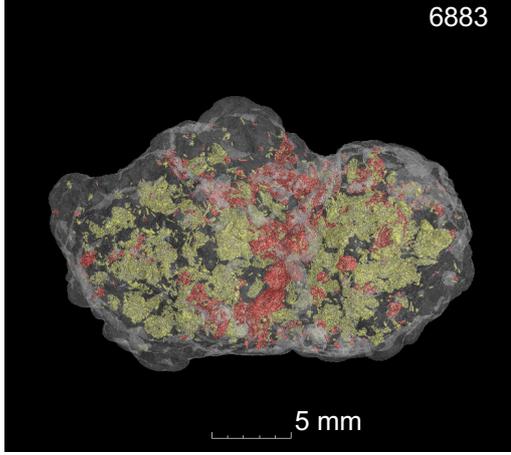
Charakteristika	Rhyolith aus	
	Festgestein (GK3)	Kies (GK1)
Ausgewählte räumliche CT-Einzelbilder	<p>6892</p>  <p>5 mm</p>	<p>6883</p>  <p>5 mm</p>
Kurzbeschreibung	geringer von außen zugänglicher und nicht zugänglicher Oberflächenanteil	mittlerer von außen zugänglicher und nicht zugänglicher Oberflächenanteil

Abbildung 31: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner des Rhyoliths aus dem Festgestein (GK3) und dem Kies (GK1)

Die limitierende Größe für die Ermittlung der von außen zugänglichen und nicht zugänglichen Oberflächenanteile im Einzelkorn mit der 3D-CT stellt die in den Abbildungen 26 und 29 ausgewiesene Voxelgröße dar. Sie begrenzt die Erkennbarkeit von Rissen und Poren im Einzelkorn. So können mit diesem Verfahren in der Regel nur Mikrorisse mit einer Mindestbreite von zwei Voxeln sicher identifiziert werden. Handelt es sich jedoch um Risse, die sehr lang sind (mehr als 5 Voxel) können günstigenfalls auch Risse mit einer Breite von einem halben Voxel identifiziert werden.

Vor diesem Hintergrund wurde zur Erfassung kleinerer Strukturen ($\geq 0,3$ nm) die spezifische Oberfläche der tomografisch untersuchten Einzelkörner zusätzlich mit dem BET-Verfahren bestimmt. Allerdings ist bisher nicht bekannt, welche Porengrößenbereiche für die Transport- und Löseprozesse beim BTU-Test relevant sind. Es wird vermutet, dass aufgrund der hohen Temperatur des Eluationsmediums bei den Löseversuchen (80 °C) auch in kleineren Poren bzw. Rissen (<100 nm) Transport- und Löseprozesse stattfinden.

Ermittlung der spezifischen Oberfläche mit BET

Die detaillierten Einzelergebnisse der BET-Messungen an allen tomografierten Einzelkörnern sind der Anlage A1 zu entnehmen. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Oberflächenanalyse mit der BET und der 3D-CT in den Abbildungen 32 und 33 vergleichend dargestellt. Die CT-Oberfläche beinhaltet dabei sowohl den äußeren als auch den von außen zugänglichen Oberflächenanteil mit Bezug auf die Einwaage des Einzelkorns. Auffallend ist bereits bei allen gesteinsartspezifischen Darstellungen für die Kiese GK1 und GK4 in der Abbildung 32, dass die BET-Oberfläche ca. drei Zehnerpotenzen größer ist als die CT-Oberfläche. Dies ist der bereits vorstehend geschilderten eingeschränkten Ortsauflösung der 3D-CT geschuldet.

Bemerkenswert ist aber auch, dass sich die mit BET ermittelte spezifische Oberfläche bei den einzelnen Gesteinsarten der Kiese stärker unterscheiden als bei den CT-Oberflächen. So beträgt diese beim Quarz/Quarzit mit durchschnittlich $0,14$ m²/g nur ein Zehntel gegenüber der vom Rhyolith (im Mittel ca. $1,41$ m²/g). Beim Plutonit wurde ein mittlerer Wert von $1,11$ m²/g bestimmt. Eine stärkere Differenzierung der mit

BET bei den einzelnen Gesteinsarten ermittelten spezifischen Oberfläche ist auch bei GK4 erkennbar. So wurde beim Sandstein mit $4,91$ m²/g der höchste und beim Granit mit $0,42$ m²/g der kleinste Mittelwert bestimmt. Beim Tonstein betrug die spezifische Oberfläche im Mittel $0,86$ m²/g und bei Grauwacke $1,46$ m²/g. Bemerkenswert ist weiterhin, dass bei der Grauwacke und dem Rhyolith die Herkunft des Einzelkorns (aus Locker- oder Festgestein) quasi keine Auswirkungen auf die mittlere, mit BET an Einzelkörnern bestimmte spezifische Oberfläche hat.

Es stellt sich nun allerdings noch die Frage, nach der Verteilung der Poren- bzw. Rissgröße unterhalb der Ortsauflösung der 3D-CT. Deshalb wurde zusätzlich orientierend die Porengrößen- bzw. Rissverteilung an zwei weiteren Einzelkörnern der Fraktion 8/16 mm aller vier Gesteinskörnungen, differenziert nach Gesteinsarten bei den Kiesen, mittels Hg-Druckporosimetrie bestimmt.

Bestimmung der Porenvolumenverteilung mit Hg-Druckporosimetrie

Die detaillierten Einzelergebnisse der Hg-Druckporosimetrie an den Einzelkörnern aller vier Gesteinskörnungen sind der Anlage A2 zu entnehmen. Zusammenfassend sei angemerkt, dass bei allen Gesteinsarten auch lokale Maxima bei Poren- bzw. Rissgrößen unterhalb der Ortsauflösung der Röntgen-3D-CT auftreten. Das bestätigt nochmals die Plausibilität der ermittelten spezifischen Oberflächen an den Einzelkörnern mittels BET. Vor diesem Hintergrund wurden nachfolgend die im Löseversuch ermittelten SiO₂- und Al₂O₃-Gehalte im Eluat auf die mit BET ermittelten spezifischen Oberfläche und nicht auf die mit CT-ermittelten spezifischen Oberflächenanteile bezogen.

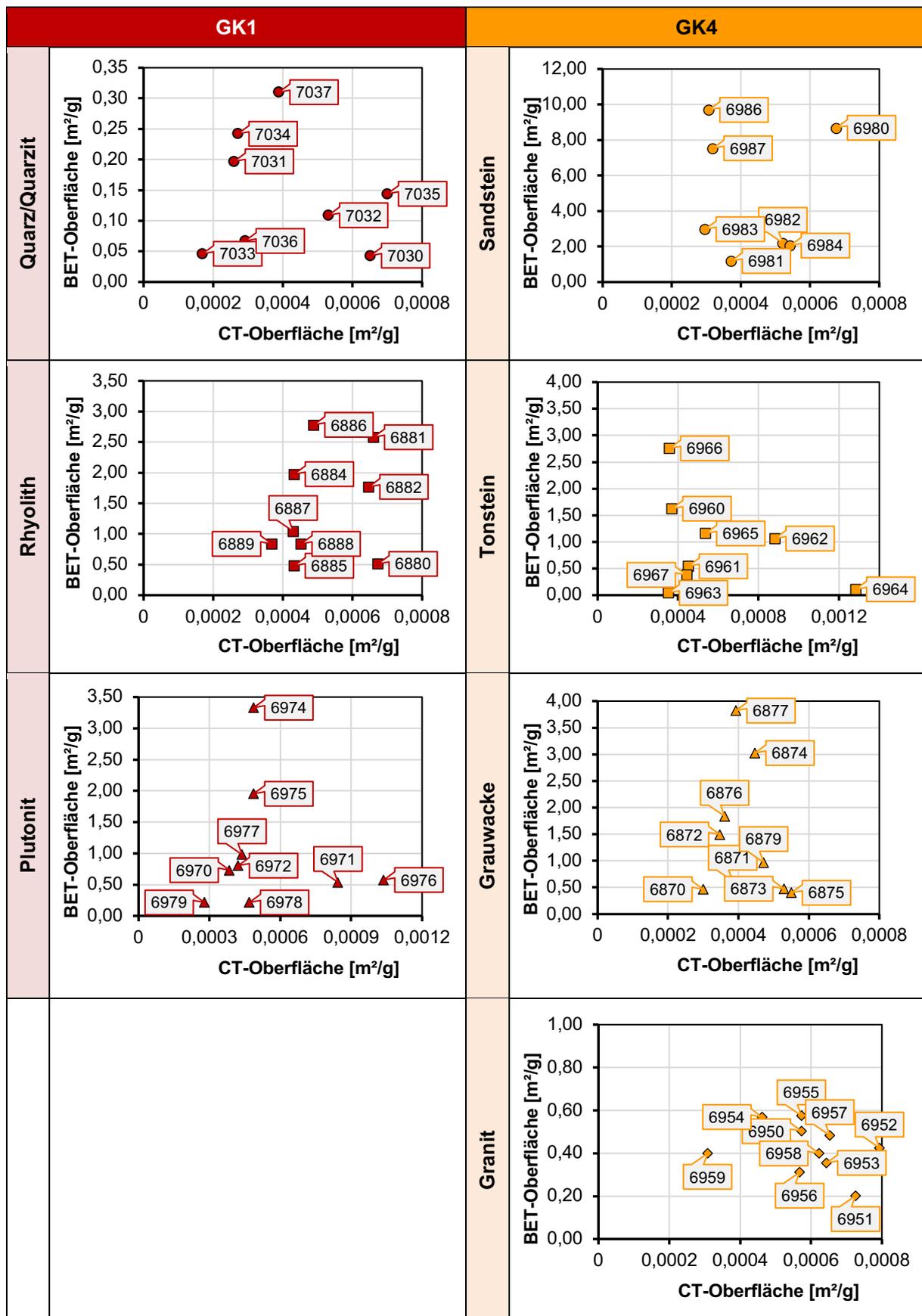


Abbildung 32: Ergebnisvergleich der Oberflächenanalyse mit BET und Röntgen 3D-CT an den gesteinsartsspezifischen Einzelkörnern der Kiese (GK1 und GK4)

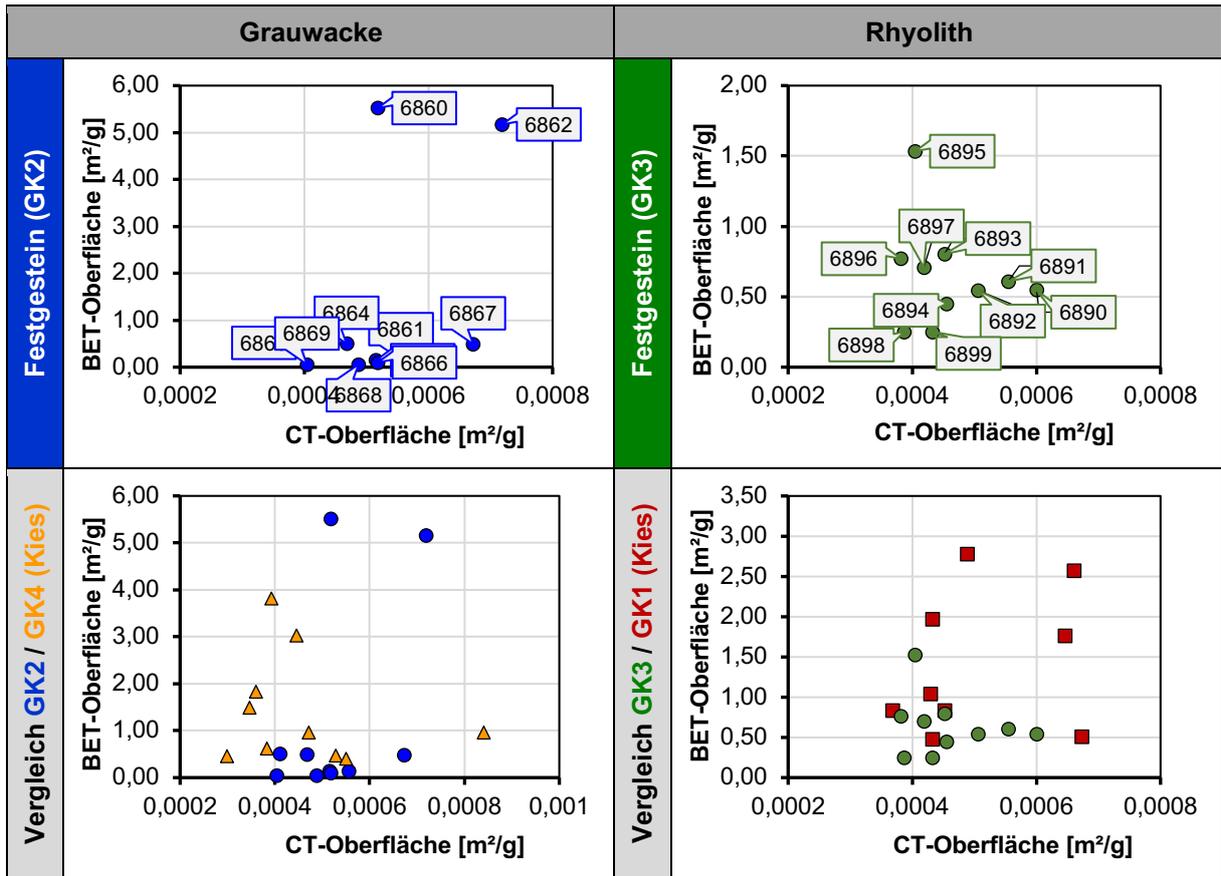


Abbildung 33: Ergebnisvergleich der Oberflächenanalyse mit BET und Röntgen 3D-CT an den Einzelkörnern der Grauwacke des Rhyoliths

5.1.2.2 Untersuchungen am Korngemenge ausgewählter Korngruppen

Ermittlung der spezifischen Oberfläche mit BET
Die Einzelergebnisse der BET-Oberflächenanalyse an den Korngemengen ausgewählter Korngruppen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 sind der Anlage A2 zu entnehmen. Auf die Oberflächenanalyse der Korngemenge der Fraktion 16/22 mm musste aufgrund gerätetechnischer Limitationen verzichtet werden. Einen vergleichenden zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der BET-Oberflächenanalyse gibt die Abbildung 34. Es ist erkennbar, dass mit Ausnahme der Korngemenge der Gesteinskörnung GK3 sich die mittlere spezifische Oberfläche in den einzelnen Korngruppen der Gesteinskörnungen GK1, GK2 und GK4 signifikant unterscheidet. So nimmt diese bei der Gesteinskörnung GK4 (Kies) in der Korngruppe 2/8 mm einen mittleren Wert von ca. 3 m²/g an und beträgt in der Korngruppe 8/16 mm nur ca. 0,89 m²/g.

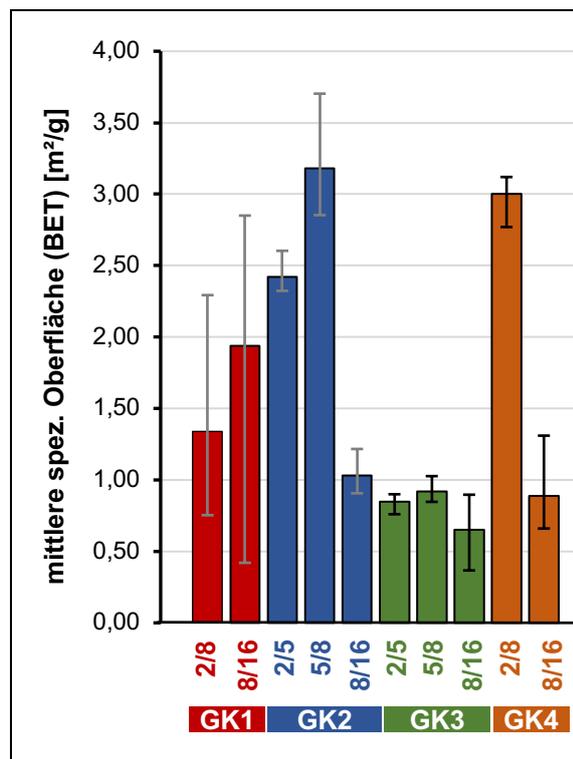


Abbildung 34: Ergebnis der BET-Analyse an Korngemengen der einzelnen Korngruppen der Gesteinskörnungen

Bemerkenswert ist aber auch, dass sich sowohl bei der Gesteinskörnung GK1 (Kies) als auch bei GK2 (Festgestein Grauwacke) mit größer werdenden Kornfraktion (von 2/8 mm \Rightarrow 8/16 mm

sowie von 2/5 mm \Rightarrow 5/8 mm) die mittlere spezifische Oberfläche von ca. 1,3 m²/g auf ca. 1,9 m²/g bzw. von ca. 2,42 m²/g auf ca. 3,2 m²/g erhöht. Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür ist der erhöhte von außen zugängliche Oberflächenanteil durch Risse und Poren in den größeren Kornfraktionen. Angemerkt sei, dass die mehrfach bestimmte spezifische Oberfläche bei den Korngruppen der Gesteinskörnung GK1 sehr hohe Schwankungen aufweist. Diese sind vermutlich auf die große Heterogenität dieses Kiesel zurückzuführen. Relativ geringe spezifische Oberflächen wurden mit der BET-Oberflächenanalyse bei der Gesteinskörnung GK3 (Festgestein Rhyolith) in allen Kornfraktionen mit Mittelwerten von 0,85 m²/g (2/5 mm), 0,92 m²/g (5/8 mm) und 0,65 m²/g bestimmt.

5.2 Löseversuche an Gesteinskörnungen

5.2.1 Untersuchungen an Einzelkörnern der Korngruppe 8/16 mm

Die Ergebnisse der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl-Zugabe an ausgewählten tomografierten Einzelkörnern aller vier Gesteinskörnungen sind der Anlage A7.1 sowie den darauf basierenden Abbildungen 35 bis 41 zu entnehmen. Dabei wurden bei den Kiesen die einzelnen Gesteinsarten differenziert betrachtet. Die Ergebnisdarstellung selbst erfolgte bei allen Gesteinsarten in einheitlicher komprimierter Form. So sind in der jeweiligen Abbildung in den Zeilen A1 und A2 die zeitlichen Verläufe der Auslaugung von SiO₂- und Al₂O₃ absolut und normiert auf die BET-Oberfläche der Einzelkörner dargestellt. Zur Verminderung des Einflusses der naturgegebenen unterschiedlichen Massen der Einzelkörner und der damit verbundenen variierenden Eluatmengen (konstantes Masseverhältnis Einzelkorn und Eluat: 1:100) wurden die absoluten Gehalte von SiO₂ bzw. Al₂O₃ und nicht deren Konzentrationen ausgewiesen. Die Zeile B gibt Aufschluss über die Abhängigkeit des ausgelaugten SiO₂ und Al₂O₃ im Eluat und der absoluten BET-Oberfläche. nach maximaler Eluatlagerung (56 d). Abschließend wird in der Zeile C der SiO₂-Überschuss im Eluat absolut und bezogen auf die BET-Oberfläche dargestellt.

Die größte Anzahl an Einzelkörnern wurde beim Quarz/Quarzit der GK1 (Kies) und beim Sandstein der GK4 (Kies) untersucht (Abbildungen 35 und 40). Auffallend sind in beiden Fällen die relativ großen Schwankungen der SiO₂- und Al₂O₃-

Löslichkeit bei den Einzelkörnern. Weiterhin ist ersichtlich, dass der Bezug auf die BET-Oberfläche oft zu einer anderen Bewertung der Löslichkeiten der Einzelkörner führt. Bemerkenswert ist aber auch, der in den Diagrammen in Zeile B (Abbildungen 35 und 40) erkennbare Trend, dass bei beiden Gesteinsarten der SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalt im Eluat nach 56-tägigem Löseversuch mit zunehmender absoluter BET-Oberfläche eine Erhöhung erfährt. Besonders ausgeprägt ist diese Korrelation bei der SiO_2 -Löslichkeit des Sandsteins. Bei den jeweils drei untersuchten Einzelkörnern des Rhyoliths und Plutonits der GK1 ist keine Korrelation zwischen SiO_2 -Gehalt und BET-Oberfläche erkennbar. Bei den Löseversuchen der drei bzw. vier Einzelkörner der Grauwacke (Kiesbestandteil von GK4 (Abbildung 41)) zeigte sich, dass diese ein ähnliches SiO_2 -Auslaugungsverhalten aufweisen. Allerdings führt hier der Bezug des SiO_2 -Gehalts auf die absolute BET-Oberfläche zu einer starken Differenzierung der Löslichkeit der Einzelkörner.

Auch die drei untersuchten Einzelkörner der Grauwacke aus dem Festgestein (GK2) weisen ein nahezu deckungsgleiches Löseverhalten auf (Abbildung 38). Bemerkenswert ist dabei, dass dies auch für den Bezug auf die BET-Oberfläche gilt. Ein völlig anderes Auslaugungsverhalten zeigen die Einzelkörner des Rhyoliths aus dem Festgestein (GK3) in Abbildung 39. So tritt bei einem der vier untersuchten Einzelkörner eine signifikant erhöhte SiO_2 -Auslaugung auf. Auch ist hier eine Korrelation zwischen SiO_2 -Gehalt im Eluat nach 56-tägigen Löseversuch und der absoluten BET-Oberfläche nicht gegeben.

Abschließend kann das Zwischenfazit gezogen werden, dass nur vereinzelt bei den untersuchten Gesteinsarten eine Korrelation zwischen dem SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalt im Eluat und der absoluten BET-Oberfläche nachgewiesen werden konnte. Ein möglicher Grund hierfür sind vermutlich weitere Einflussgrößen, die bei dieser Betrachtung bisher nicht berücksichtigt wurden. Eine zentrale Rolle kommt mit hoher Wahrscheinlichkeit in diesem Kontext auch der mineralogischen Zusammensetzung der Einzelkörner zu.

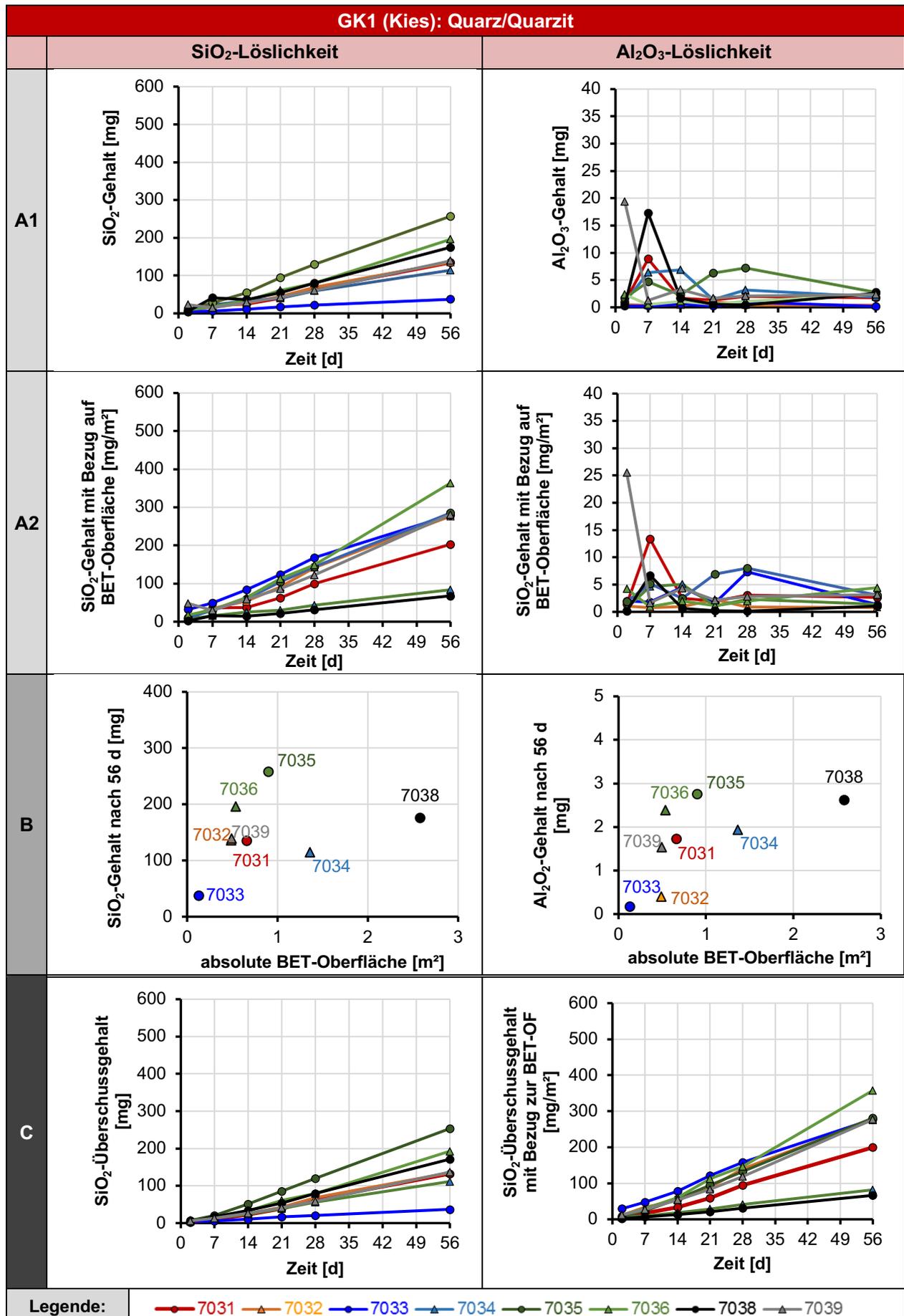


Abbildung 35: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK1 (Quarz/Quarzit)

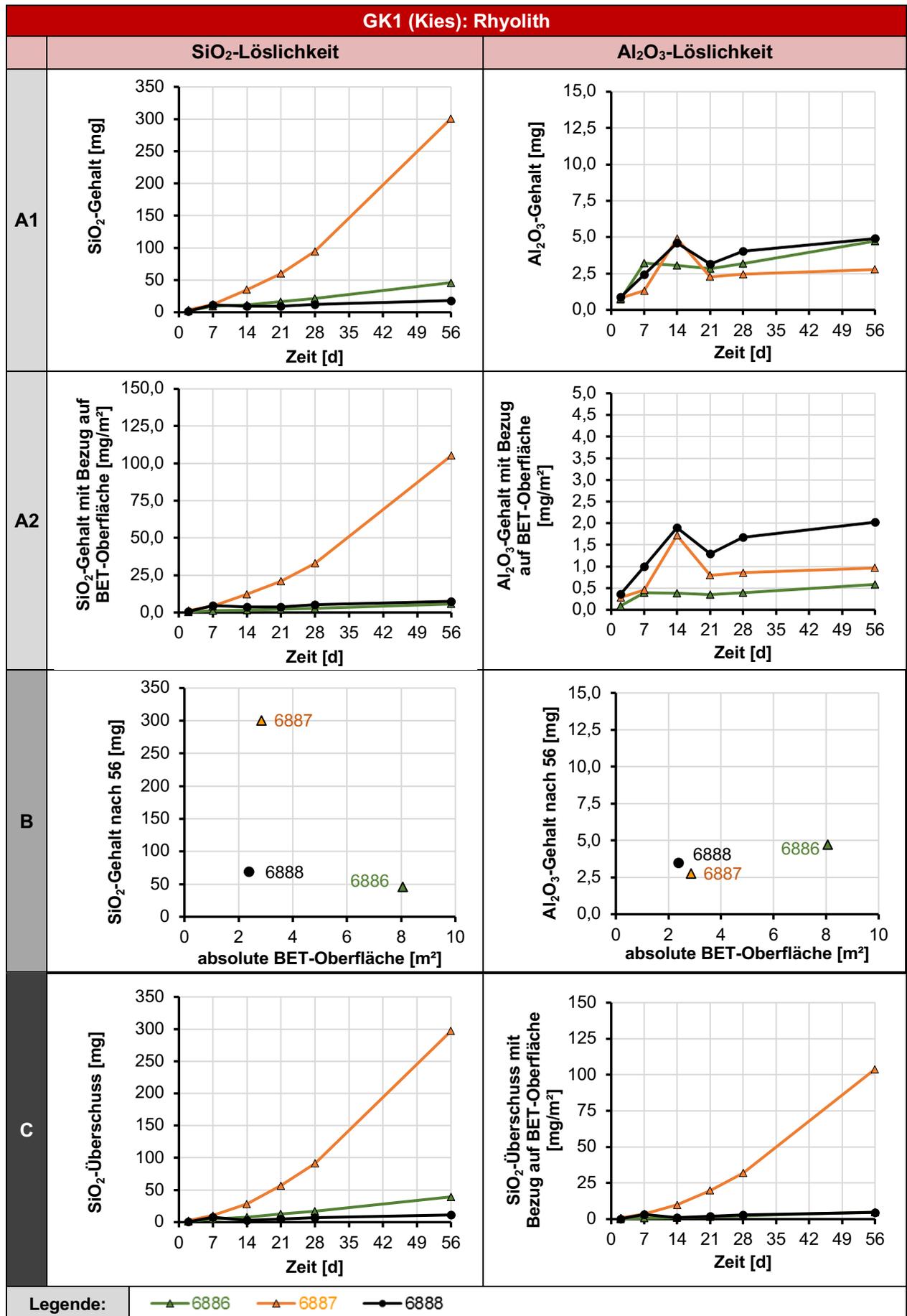


Abbildung 36: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK1 (Rhyolith)

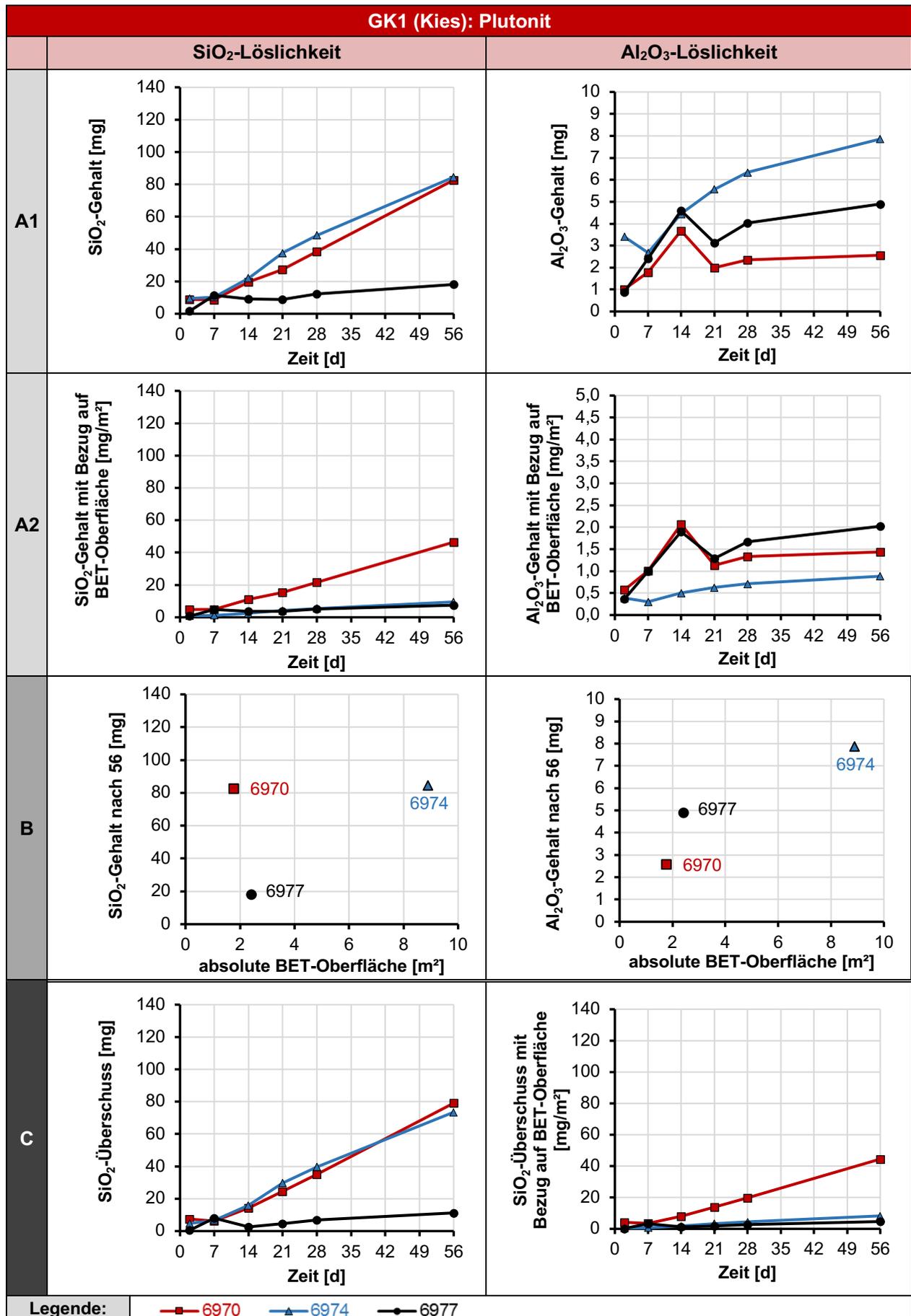


Abbildung 37: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK1 (Plutonit)

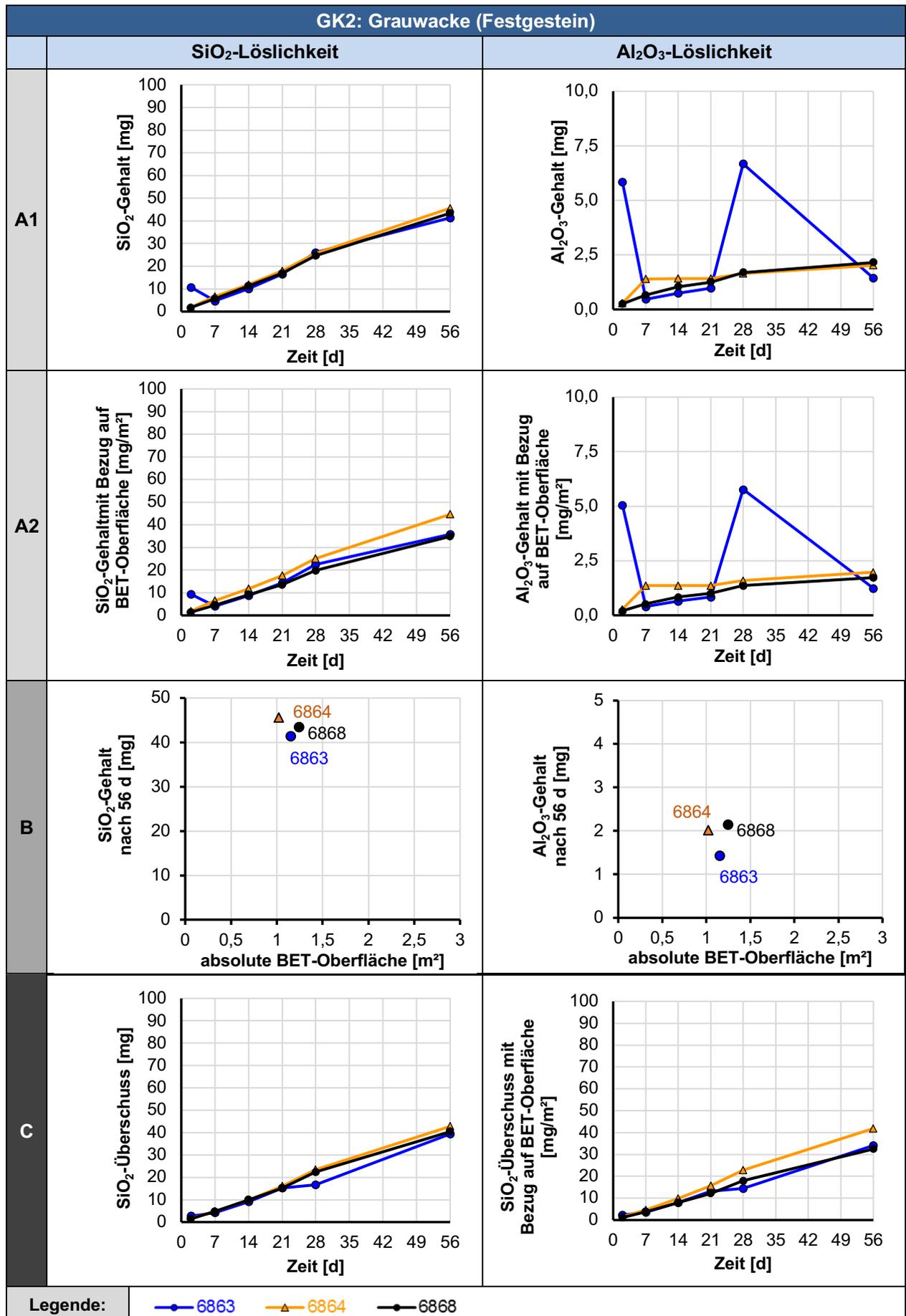


Abbildung 38: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK2 (Festgestein Grauwacke)

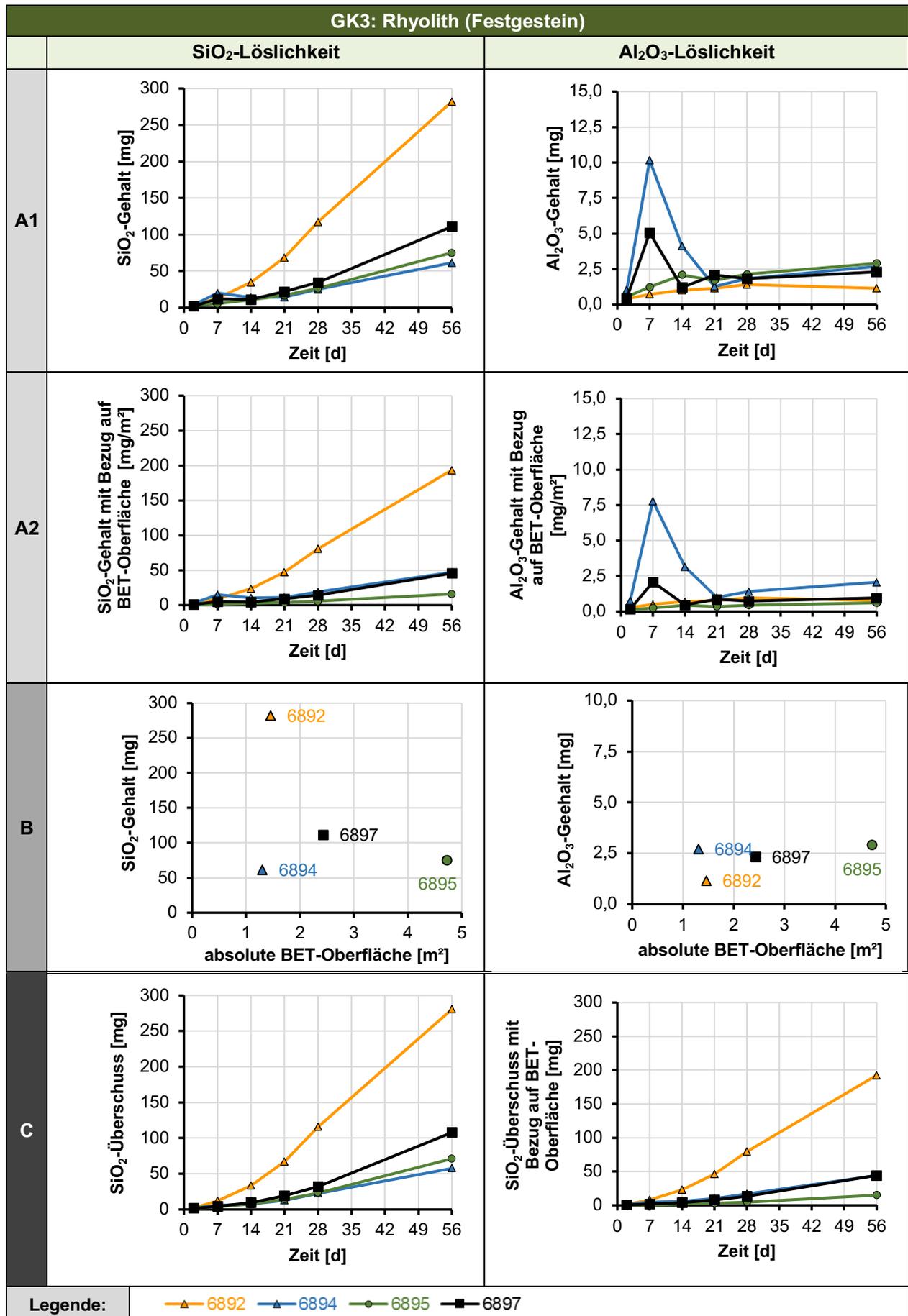


Abbildung 39: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK3 (Festgestein Rhyolith)

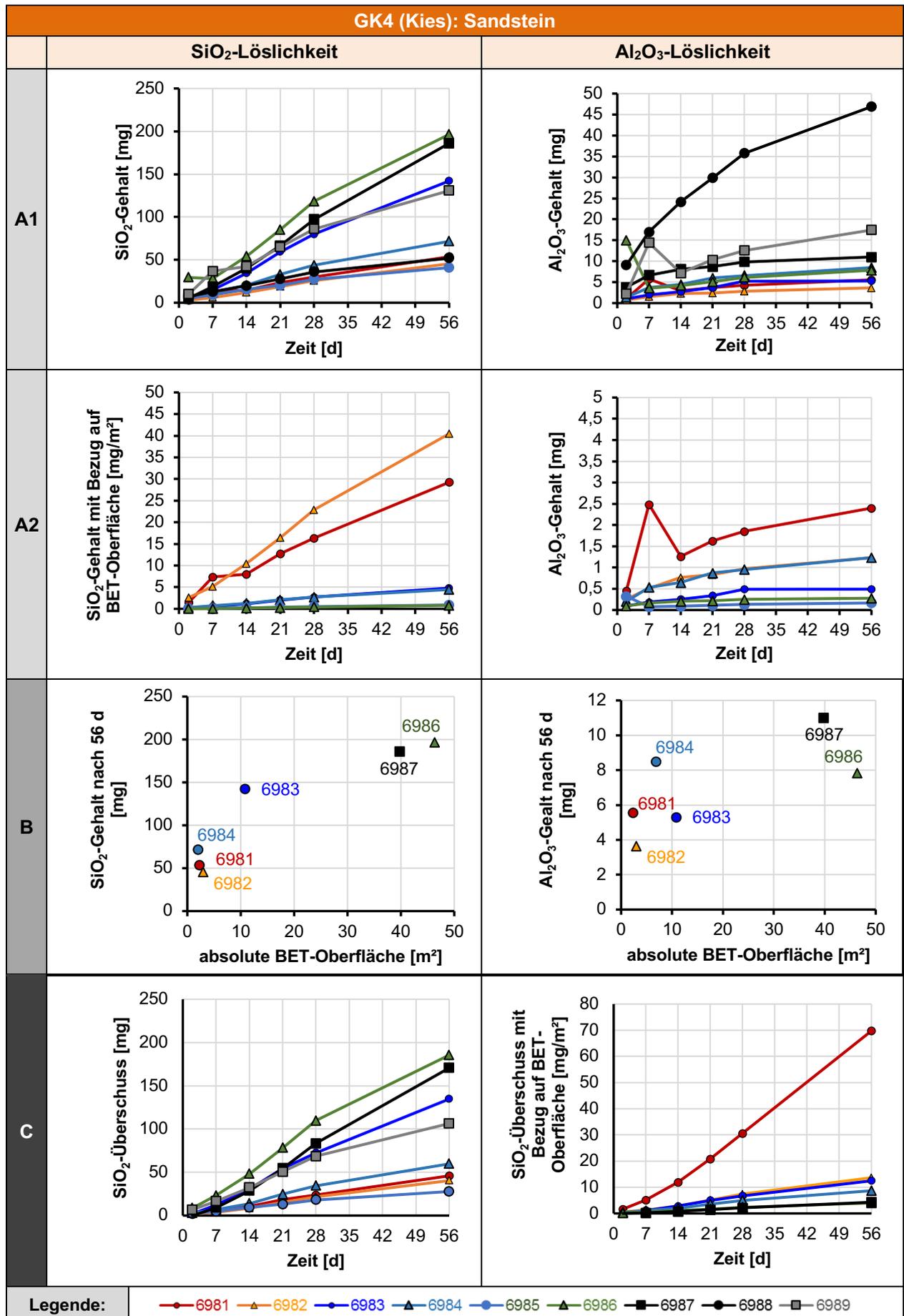


Abbildung 40: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK4 (Sandstein)

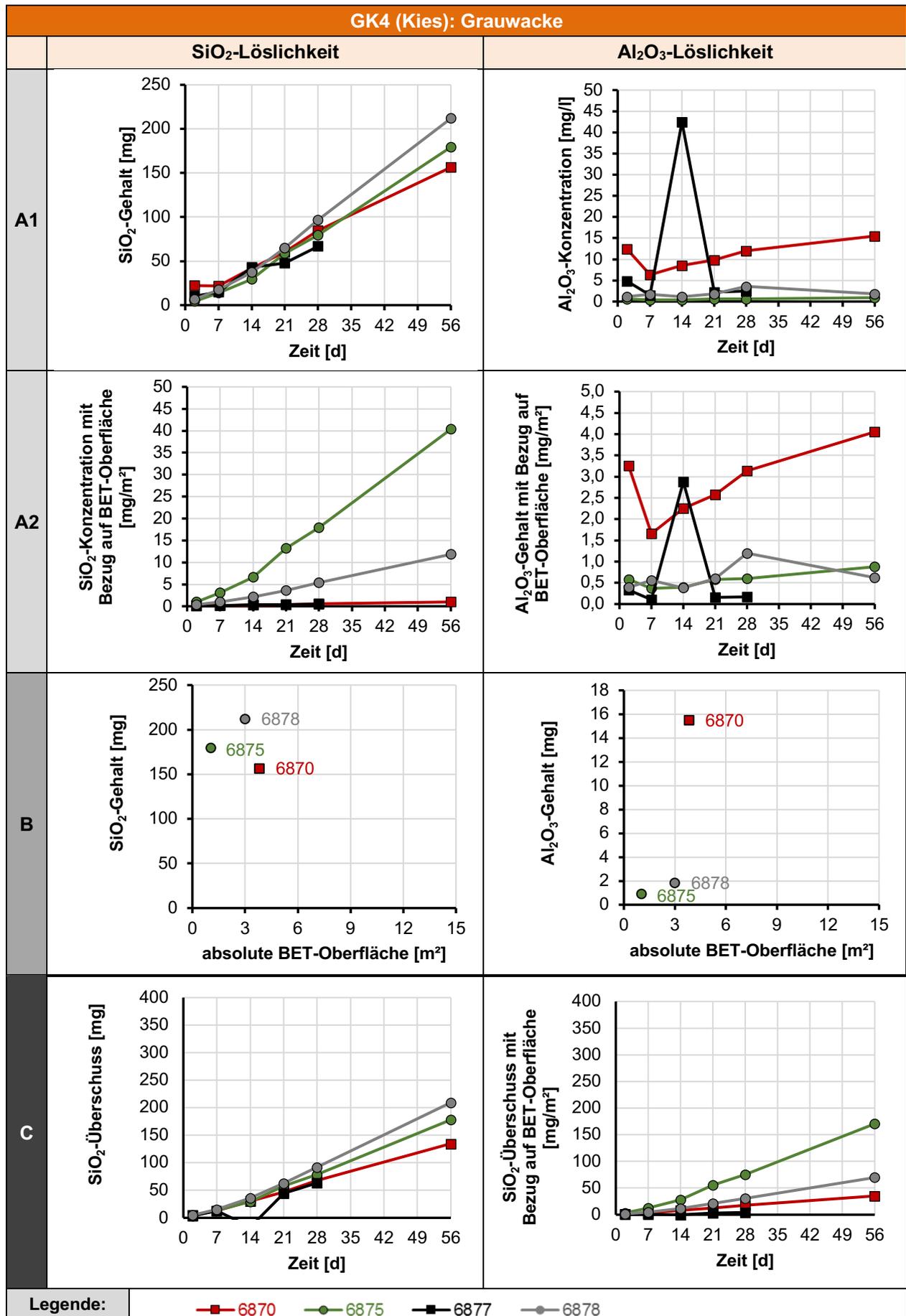


Abbildung 41: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK4 (Grauwacke)

5.2.2 Untersuchungen am Korngemenge ausgewählter Korngruppen

Aufbauend auf den vorstehend detailliert beschriebenen Löseversuchen an den Einzelkörnern der Kornfraktion 8/16 mm aller vier Gesteinskörnungen erfolgten adäquate Untersuchungen an Korngemengen aller Korngruppen der GK1 bis GK4. Eine Ausnahme bildet dabei die Korngruppe 16/22 mm. Aufgrund gerätetechnischer Limitationen musste auf die Löseversuche dieser Korngruppe verzichtet werden. Weiterhin sei angemerkt, dass bei den heterogen zusammengesetzten Kiesen auf eine differenzierte Betrachtung aller vorkommenden Gesteinsarten verzichtet wurde. Vielmehr wurde versucht, durch die relativ große Einwaage des Korngemenges von 90 g möglichst alle in den Kiesen vorkommenden Gesteinsarten in einer repräsentativen Menge integral zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu den Löseversuchen am Einzelkorn wurde hier die Zugabemenge von NaCl mit der Abstufung 0, 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 und 10,0 M.-% variiert. Einen zusammenfassenden Überblick über die hierbei gewonnenen Ergebnisse vermitteln die auf der Grundlage der Anlage A7.2 erstellten Abbildungen 42 bis 45. Zur besseren Vergleichbarkeit aller Abbildungen wurde sowohl die SiO₂- als auch Al₂O₃-Konzentrationen im Eluat mit jeweils gleicher Achsenskalierung versehen. Eine vergleichende Betrachtung aller Abbildungen zeigt, dass sich unabhängig von der Art der Gesteinskörnung und deren Korngruppe mit zunehmender NaCl-Zugabemenge die SiO₂-Auslaugung erhöht und die Löslichkeit von Al₂O₃ eine Verminderung erfährt. Außerdem ist erkennbar, dass sich tendenziell mit zunehmender Korngruppe die SiO₂- und Al₂O₃-Löslichkeit leicht vermindert. Ursächlich hierfür ist vermutlich die sich mit zunehmender Korngruppe verminderte Oberfläche des Korngemenges, die für die Transport- und Löseprozesse wirksam ist. Auffallend ist aber auch, dass bei den Kiesen (GK1 und GK4) signifikant höhere Al₂O₃-Auslaugungen auftreten als bei den Korngemengen aus den Festgesteinen (GK2 und GK3). So erreichen die Al₂O₃-Konzentrationen bei der Eluierung der Korngemenge der Korngruppe 2/8 mm in 1 M KOH-Lösung Maximalwerte von ca. 160 mg/l bei GK4 und ca. 85 mg/l bei GK1. Bei den Gesteinskörnungen GK2 und GK3 hingegen werden hier nur Maximalwerte von ca. 20 mg/l erreicht. Dieser Tatsache wird deshalb so viel Bedeutung beigegeben, da mit

zunehmender Menge an gelöstem Al₂O₃ auch mehr gelöstes SiO₂ alumosilikatisch gebunden wird und somit die schädigende AKR nicht weiterbefördert.

Es stellt sich nun die Frage, ob die Ergebnisse der Löseversuche auch Rückschlüsse auf das Verhalten der Gesteinskörnung im Beton bei verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen zulassen. Zu diesem Zweck wurden sowohl Fahrbahndeckenbetone nach dem ARS 04/2013 [6] als auch Betone nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] mit allen vier Gesteinskörnungen hergestellt und anschließend verschiedenartig AKR-provozierend gelagert.

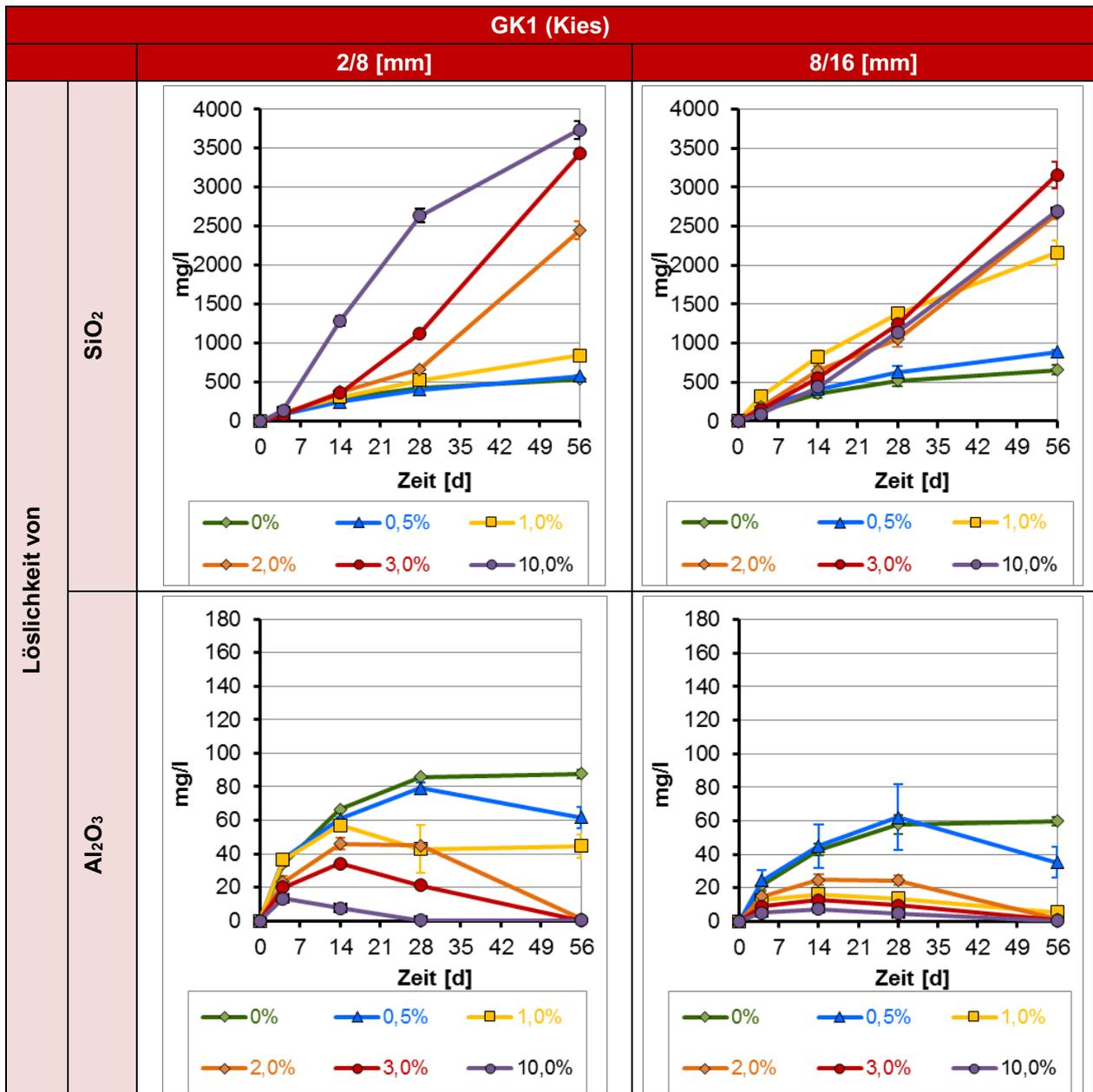


Abbildung 42: Löslichkeit von SiO₂ und Al₂O₃ der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK1 (Kies) -

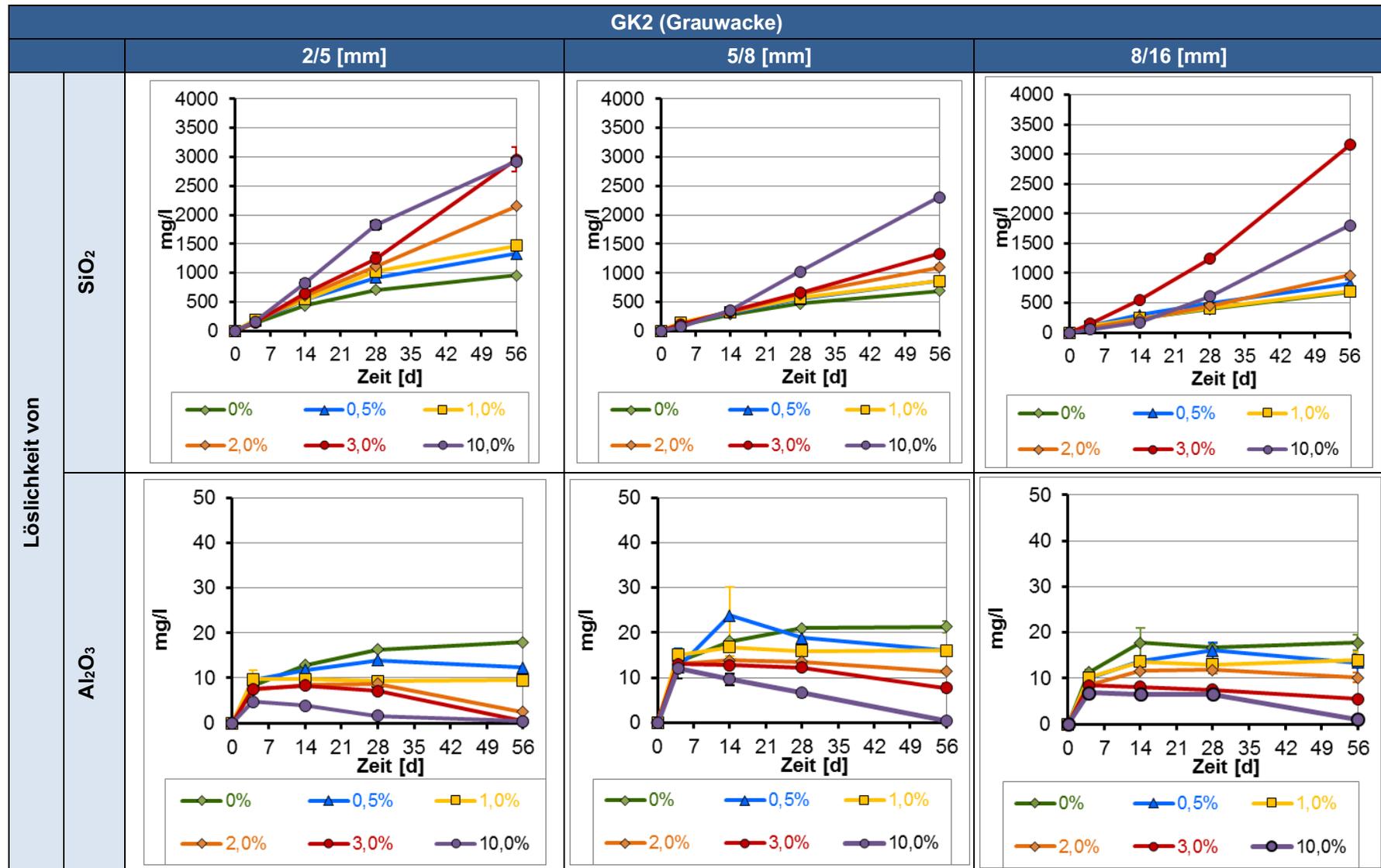


Abbildung 43: Löslichkeit von SiO₂ und Al₂O₃ der Korngruppen 2/5 mm, 5/8 mm und 8/16 mm in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK2 (Grauwacke) -

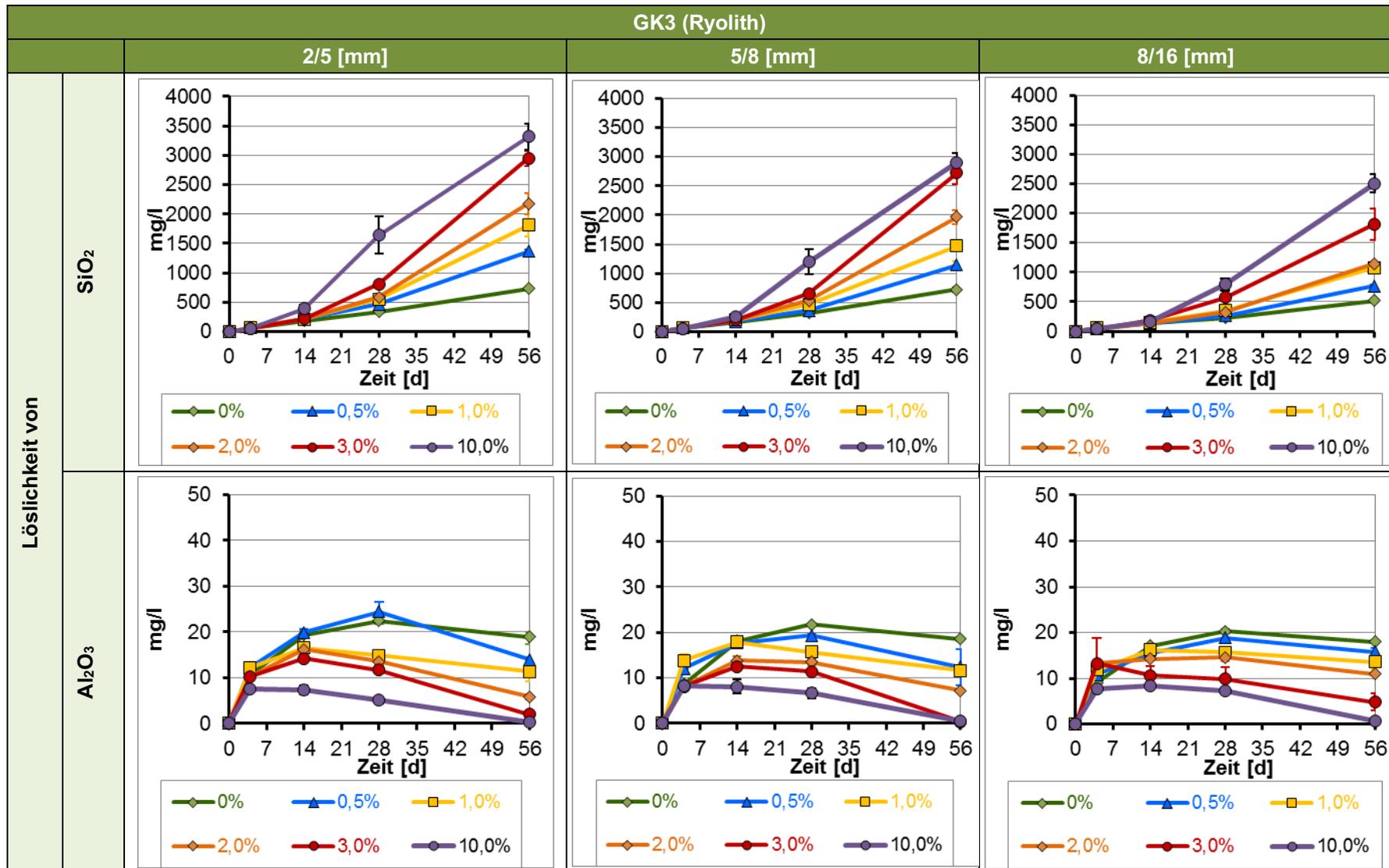


Abbildung 44: Löslichkeit von SiO₂ und Al₂O₃ der Korngruppen 2/5 mm, 5/8 mm und 8/16 mm in ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK3 (Rhyolith)

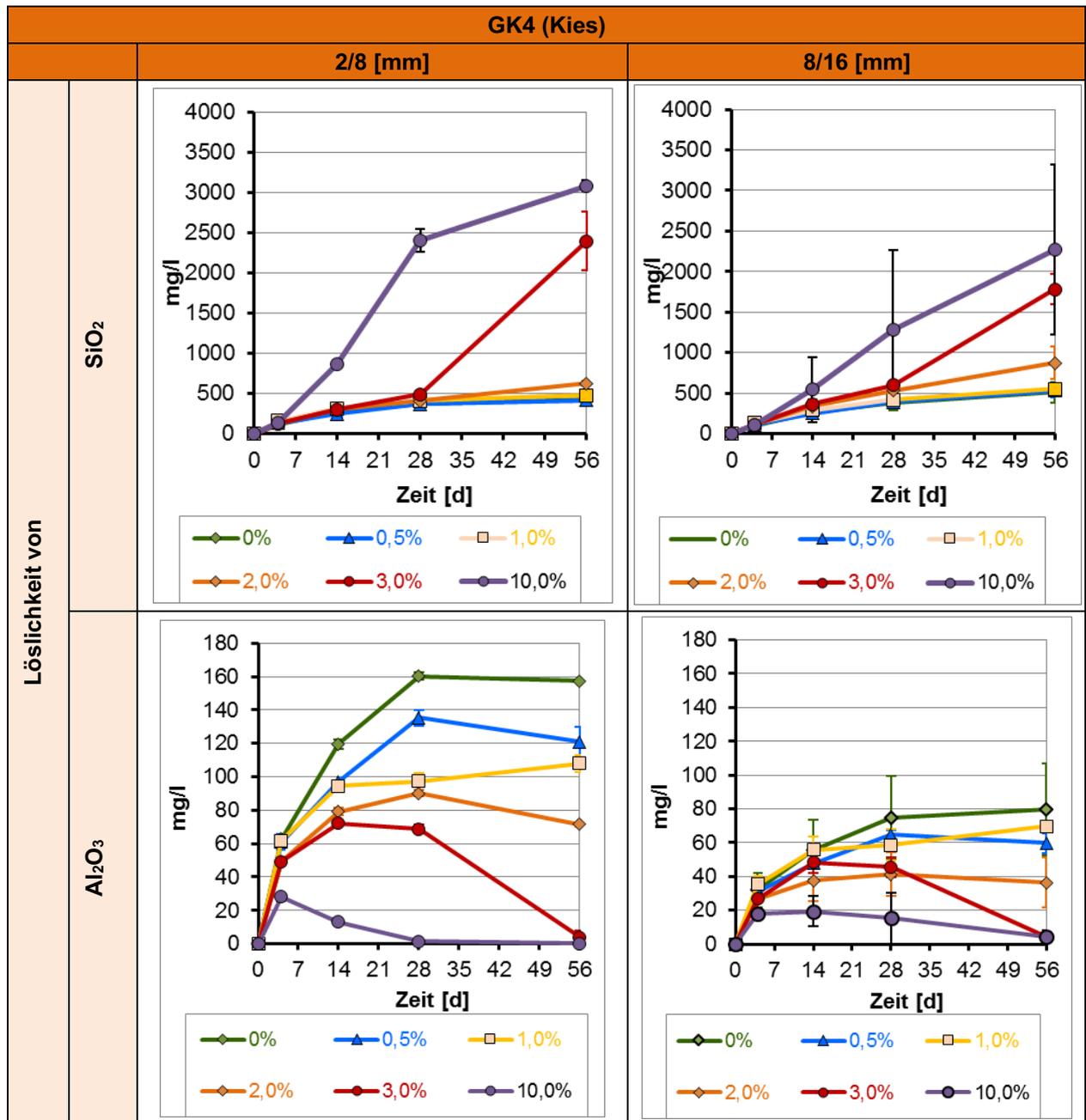


Abbildung 45: Löslichkeit von SiO₂ und Al₂O₃ der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK4 (Kies) -

5.3 Betonversuche

5.3.1 Vorbemerkungen

Zur Verifizierung des Verhaltens der vier Gesteinskörnungen im Beton wurden WS-Betonversuche nach dem ARS 04/2013 [6] durchgeführt. Zur ganzheitlichen Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen wurden diese um die Betonversuche bei 40 °C und 60 °C nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] mit der dort vorgesehenen Betonzusammensetzung erweitert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die verwendeten Betonausgangsstoffe charakterisiert. Darauf aufbauend werden die Betonrezepturen und die ermittelten Frisch- und Festbetoneigenschaften aufgezeigt. Abschließend

werden die Ergebnisse der verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerung der unterschiedlichen Betone dargestellt und diskutiert.

5.3.2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Gesteinskörnungen

Einen zusammenfassenden Überblick über die ermittelte Rohdichte und Wasseraufnahme der einzelnen Korngruppen aller Lieferkörnungen von GK1 bis GK4 gibt die Tabelle 9. Zusätzlich ist in der Tabelle 11 der Siebdurchgang der einzelnen Korngruppen aller Gesteinskörnungen aufgeführt. Das schließt auch den bei den Betonrezepturen nach dem ARS 04/2013 [6] verwendeten WS-Prüfsand ein.

Tabelle 9: Rohdichte, Wasseraufnahme der Korngruppen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4

Parameter	GK 1			GK 2			
	2/8 mm	8/16 mm	16/22 mm	2/5 mm	5/8 mm	8/16 mm	16/22 mm
Rohdichte [kg/dm ³]	2,63	2,63	2,62	2,73	2,74	2,72	2,72
WA ₂₄ [M.-%]	1,4	0,8	0,6	1,1	1,1	0,5	0,4
	GK 3				GK 4		
	2/5 mm	5/8 mm	8/16 mm	16/22 mm	2/8 mm	8/16 mm	16/22 mm
Rohdichte [kg/dm ³]	2,64	2,64	2,64	2,63	2,72	2,73	2,72
WA ₂₄ [M.-%]	0,9	0,8	0,5	0,8	1,7	1,0	1,0

Tabelle 10: Siebdurchgang der Korngruppen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 und des WS-Prüfsands

Gesteinskörnung	Korngruppe	Durchgang in M.-% durch die Siebe [Lochweite in mm]								
		0,25	0,5	1	2	4	8	16	22	32
[-]	[mm]									
GK 1	2/8	0,5	0,6	1,6	9,2	46,8	96,7	100	100	100
	8/16	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	2,8	85,9	100	100
	16/22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,3	97,8	100
GK 2	2/5	0,1	0,1	0,2	1,6	51,7	100	100	100	100
	5/8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,7	81,0	100	100	100
	8/16	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	11,4	97,6	100	100
	16/22	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	12,1	94,6	100
GK 3	2/5	0,0	0,0	0,2	2,7	41,8	100	100	100	100
	5/8	0,2	0,3	0,3	0,5	2,4	83,6	100	100	100
	8/16	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	5,7	93,4	100	100
	16/22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	13,1	95,6	100
GK 4	2/8	0,1	0,1	0,4	5,4	43,3	98,8	100	100	100
	8/16	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	3,5	84,6	100	100
	16/22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	4,9	95,9	100
WS-Prüfsand	0/2	9,7	38,7	70,0	98,3	100	100	100	100	100

Die detaillierten Ergebnisse des zusätzlich durchgeführten AKR-Schnellprüfverfahrens nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] sind für alle Gesteinskörnungen der Anlage A3 zu entnehmen. Einen darauf aufbauenden Gesamtüberblick über die Ergebnisse gibt die Abbildung 46. Es ist erkennbar, dass alle Gesteinskörnungen den Dehnungsgrenzwert von 1 mm/m nach 13-tägiger Lagerung der Mörtelprismen in 1 molarer NaOH-Lösung bei 80 °C überschreiten. Deshalb sind nach [21] zusätzlicher Betonversuche zur Einstufung der Gesteinskörnungen in die Alkaliempfindlichkeitsklassen erforderlich.

Zemente

Bei der Betonherstellung fanden sowohl der WS-Prüfzement nach dem ARS 04/2013 [6] als auch der AKR-Prüfzement nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb Anwendung.

Im Auftrag der BAST wurden die vom VDZ ausgewiesenen mechanischen und physikalischen sowie die chemischen Eigenschaften des WS-Prüfzements (Charge 02/2015) nochmals durch die BAM überprüft (Tabellen 11 und 12). Dabei wurde festgestellt, dass im Rahmen der Messtoleranzen der Untersuchungsmethoden und der Inhomogenität des Zements keine signifikanten Abweichungen zu den Angaben des VDZ bestehen.

Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des zusätzlich verwendeten AKR-Prüfzements (Charge: 03/2015) für die Betonversuche nach Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] sind den Tabellen 13 und 14 zu entnehmen.

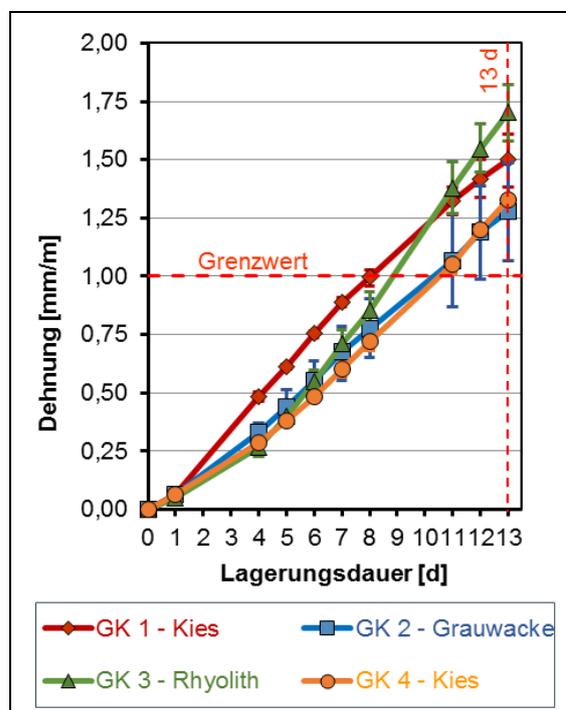


Abbildung 46: Ergebnisse des AKR-Schnellprüfverfahrens nach Alkali-Richtlinie des DAfStb [21]

Tabelle 11: Vergleich der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des verwendeten WS-Prüfzements (Charge: 02/2015)

Charakteristika mit Prüfmethode	Einheit	Prüfinstitut	
		VDZ	BAM
Reindichte nach DIN EN 196-6	[kg/dm ³]	3,15	3,15
spezifische Oberfläche nach Blaine	[cm ² /g]	3260	3395
Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1	2d	22,8	25,0
	28d	54,8	50,9
Normsteifemaß nach DIN EN 196-3	[mm]	6,0	7,0
Erstarrungszeiten nach DIN EN 196-3	Beginn	210	210
	Ende	245	245
Wasseranspruch nach DIN EN 196-3	[M.-%]	27,7	25,6

Tabelle 12: Vergleich der chemischen Eigenschaften des verwendeten WS-Prüfzements (Charge: 02/2015)

Bestandteil	VDZ		BAM	
	Messmethode	Wert [M.-%]	Messmethode	Wert [M.-%]
Kohlenstoffdioxid	950 °C/IR	1,64	950 °C/IR	1,63
Wasser	950 °C/IR	0,49	950 °C/IR	0,50
Glühverlust	Summe aus CO ₂ , H ₂ O	2,12	Summe aus CO ₂ , H ₂ O	2,13
Calciumoxid	RFA	62,65	DIN EN 196-2	64,42
Siliziumdioxid	RFA	19,93	DIN EN 196-2	19,56
Aluminiumoxid	RFA	5,20	DIN EN 196-2	4,30
Eisen (III)-oxid	RFA	3,05	DIN EN 196-2	3,00
Kaliumoxid	DIN EN 196-2	0,79	DIN EN 196-2	0,80
Natriumoxid	DIN EN 196-2	0,24	DIN EN 196-2	0,26
Na ₂ O-Äquivalent	DIN EN 196-2	0,76	DIN EN 196-2	0,79
Magnesiumoxid	RFA	2,83	DIN EN 196-2	2,42
Titanoxid	RFA	0,34	DIN EN 196-2	0,26
Manganoxid	RFA	0,05	DIN EN 196-2	0,05
Sulfat als SO ₃	RFA	2,74	DIN EN 196-2	2,75

Tabelle 13: Mechanische und physikalische Eigenschaften des verwendeten AKR-Prüfzements (Charge: 03/2015) nach VDZ-Angabe

Charakteristika mit Prüfmethode	Einheit	Prüfinstitut	
		VDZ	
Reindichte nach DIN EN 196-6	[kg/dm ³]	3,17	
spezifische Oberfläche nach Blaine	[cm ² /g]	3530	
Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1	2d	[N/mm ²]	24,2
	28d		45,3
Normsteifemaß nach DIN EN 196-3	[mm]	8,0	
Erstarrungszeiten nach DIN EN 196-3	Beginn	[min]	160
	Ende		210
Wasseranspruch nach DIN EN 196-3	[M.-%]	27,5	

Tabelle 14: Chemische Eigenschaften des verwendeten AKR-Prüfzements (Charge: 03/2015) nach VDZ-Angabe

Bestandteil	VDZ	
	Messmethode	Wert [M.-%]
Kohlenstoffdioxid	950 °C/IR	1,54
Wasser	950 °C/IR	0,56
Glühverlust	Summe aus CO ₂ , H ₂ O	2,10
Calciumoxid	RFA	61,95
Siliziumdioxid	RFA	20,11
Aluminiumoxid	RFA	5,01
Eisen (III)-oxid	RFA	3,10
Kaliumoxid	DIN EN 196-2	1,36
Natriumoxid	DIN EN 196-2	0,16
Na ₂ O-Äquivalent	DIN EN 196-2	1,05
Magnesiumoxid	RFA	3,24
Titanoxid	RFA	0,23
Manganoxid	RFA	0,09
Sulfat als SO ₃	RFA	3,11

5.3.3 Betonrezepturen mit Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die nach dem ARS 04/2013 [6] entworfenen Rezepturen der Oberbetone 0/8 (Waschbeton) und der Oberbetone (D>8) / Unterbetone sind für die jeweilige Gesteinskörnung der Tabelle 15 zu entnehmen. Zusätzlich sind in den Tabellen 16

und 17 die ermittelten Frisch- und Festbetoneigenschaften aller Betone aufgeführt. Die normativ geforderten Werte für den Luftporengehalt im Frischbeton (10 min nach der Herstellung) sowie für die Druckfestigkeit (28 d) werden für alle Betone mit den Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 eingehalten.

Tabelle 15: Zusammensetzung der Betone nach ARS 04/2013

Betonzusammensetzung	Oberbeton 0/8 (Waschbeton)							
Zementgehalt	430 kg/m ³ (WS-Prüfzement, Charge 02/2015)							
w/z-Wert	0,45							
Gesteinskörnung	30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand	
	GK 1	70 Vol.-%	GK 2	50 Vol.-%	GK 3	60 Vol.-%	GK 4	70 Vol.-%
		2/8 mm		2/5 mm		2/5 mm		2/8 mm
				20 Vol.-%		10 Vol.-%		2/8 mm
		5/8 mm	5/8 mm					
Luftporenbildner bezogen auf den Zementgehalt	0,08 M.-%		0,11 M.-%		0,12 M.-%		0,10 M.-%	
Betonzusammensetzung	Oberbeton (D>8) / Unterbeton							
Zementgehalt	360 kg/m ³ (WS-Prüfzement, Charge 02/2015)							
w/z-Wert	0,45							
Gesteinskörnung	30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand	
	GK 1	15 Vol.-%	GK 2	11 Vol.-%	GK 3	13 Vol.-%	GK 4	15 Vol.-%
		2/8 mm		2/5 mm		2/5 mm		2/8 mm
				4 Vol.-%		2 Vol.-%		2/8 mm
				5/8 mm		5/8 mm		
		25 Vol.-%		25 Vol.-%		25 Vol.-%		25 Vol.-%
		8/16 mm		8/16 mm		8/16 mm		8/16 mm
		30 Vol.-%		30 Vol.-%		30 Vol.-%		30 Vol.-%
	16/22 mm		16/22 mm		16/22 mm		16/22 mm	
Luftporenbildner bezogen auf den Zementgehalt	0,11 M.-%		0,15 M.-%		0,17 M.-%		0,16 M.-%	

Tabelle 16: Frisch- und Festbetonwerte der Oberbetone 0/8 (Waschbetone)

Parameter	Zeit	Grenzwerte	Oberbeton 0/8 (Waschbeton) mit der Gesteinskörnung			
			GK 1	GK 2	GK3	GK 4
Frischbetontemperatur [°C]	10 min	-	21,5	21,0	24,2	23,0
	30 min	-	20,9	20,5	24,1	21,9
Frischbetonrohddichte [kg/dm ³]	10 min	-	2,21	2,22	2,21	2,26
	30 min	-	2,25	2,27	2,25	2,27
Luftporengehalt [Vol.-%]	10 min	$5,5 \leq x \leq 6,5^1$	5,5	6,5	6,2	5,8
	30 min		5,0	5,2	5,0	5,2
Ausbreitmaß [mm]	10 min	-	440	380	360	360
	30 min	-	400	360	360	360
Festbetonrohddichte [kg/dm ³]	7 d	-	2,20	2,23	2,22	2,27
	28 d	-	2,20	2,23	2,23	2,28
Druckfestigkeit [N/mm ²]	7 d	-	37,8	35,6	39,9	41,9
	28 d	$\geq 37^2$	44,4	46,7	47,1	50,8

Tabelle 17: Frisch- und Festbetonwerte der Oberbetone (D>8) / Unterbetone

Parameter	Zeit	Grenzwerte	Oberbeton (D>8) / Unterbeton mit der Gesteinskörnung			
			GK 1	GK 2	GK3	GK 4
Frischbetontemperatur [°C]	10 min	-	24,1	23,8	21,8	21,1
	30 min	-	-	-	21,6	20,7
Frischbetonrohddichte [kg/dm ³]	10 min	-	2,36	2,31	2,27	2,32
	30 min	-	-	-	-	-
Luftporengehalt [Vol.-%]	10 min	$4,0 \leq x \leq 5,0^1$	4,5	4,8	4,9	4,5
	30 min		-	-	4,4	4,0
Ausbreitmaß [mm]	10 min	-	365	345	335	357
	30 min	-	-	-	325	345
Festbetonrohddichte [kg/dm ³]	7 d	-	2,35	2,33	-	-
	28 d	-	2,33	2,33	2,29	2,33
Druckfestigkeit [N/mm ²]	7 d	-	44,0	39,9	-	-
	28 d	$\geq 37^2$	46,5	46,5	47,4	47,3

¹ Grenzwert nach TL Beton-StB 07 und Anlage ARS Nr. 04/2013² Charakteristische Druckfestigkeit Würfel ($f_{ck,cube}$); Grenzwert nach TL Beton-StB 07

Die für die verschiedenen Gesteinskörnungen zusätzlich nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] entworfenen Betonrezepturen sind in der Tabelle 18 zu entnehmen. Zusätzlich gibt die

Tabelle 19 Aufschluss über die erzielten Frisch- und Festbetoneigenschaften.

Tabelle 18: Zusammensetzung des Betons nach Alkali-Richtlinie des DAfStb

Betonzusammensetzung	Beton nach Alkali-Richtlinie des DAfStb							
Zementgehalt	400 kg/m ³ (AKR-Prüfzement CEM I 32,5 R, Charge 03/2015)							
w/z-Wert	0,45							
Gesteinskörnung	30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand		30 Vol.-% WS-Prüfsand	
	GK 1	20 Vol.-%	GK 2	15 Vol.-%	GK 3	16 Vol.-%	GK 4	20 Vol.-%
		2/8 mm		2/5 mm		2/5 mm		2/8 mm
		5/8 mm		4 Vol.-%		4 Vol.-%		2/8 mm
		5/8 mm		5 Vol.-%		5/8 mm		20 Vol.-%
		20 Vol.-%		20 Vol.-%		20 Vol.-%		20 Vol.-%
		8/16 mm		8/16 mm		8/16 mm		8/16 mm
		30 Vol.-%		30 Vol.-%		30 Vol.-%		30 Vol.-%
16/22 mm	16/22 mm	16/22 mm	16/22 mm					

Tabelle 19: Frisch- und Festbetonwerte der Betonzusammensetzungen der Betone nach Alkali-Richtlinie des DAfStb (GK 0-22)

Parameter	Zeit	Beton nach Alkali-Richtlinie des DAfStb mit der Gesteinskörnung			
		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4
Frischbetontemperatur [°C]	10 min	22,1	22,8	21,5	20,0
Frischbetonrohichte [kg/dm ³]	10 min	2,36	2,39	2,36	2,41
Luftporengehalt [Vol.-%]	10 min	1,2	1,1	0,75	1,1
Ausbreitmaß [mm]	10 min	345	305	345	355
Festbetonrohichte [kg/dm ³]	28 d	2,36	2,40	2,35	2,39
Druckfestigkeit [N/mm ²]	28 d	48,9	51,5	62,8	56,5

5.3.4 AKR-provozierende Lagerungen

Die mit den vorstehenden Betonrezepturen hergestellten Prüfkörper wurden nach ihrer normativen Lagerung und Präparation verschiedenartig AKR-provozierend gelagert. So wurden einerseits die für die WS-Grundprüfung vorgesehenen Prüfkörper aus dem Oberbeton 0/8 (Waschbeton) und dem Oberbeton (D>8) / Unterbeton vergleichend einem 60 °C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr (3 und 10 %ige NaCl-Lösung) und einer Klimawechsellaagerung mit Wasser- und NaCl-Beaufschlagung unterzogen. Andererseits wurden die nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] hergestellten Prüfkörper im 40 °C Betonversuch (Prismen und Würfel) und 60 °C-Betonversuch (Prismen) gelagert.

Die Einzelergebnisse aller AKR-provozierenden Lagerungen sind der Anlage A4 zu entnehmen. Darauf aufbauend gibt die Tabelle 20 einen zusammenfassenden Überblick über die gemittelten Ergebnisse und die daraus resultierende Einstufung der Alkaliempfindlichkeit aller Gesteinskörnungen. Letzteres erfolgt mittels Ampelfarben. Dabei ist rot ein Indikator für die Überschreitung des Grenzwertes und lässt damit auf eine hohe Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung schließen. Bei grün kehrt sich die Sachlage um. Bei gelb hingegen bewegt sich der Schädigungsindikator nur geringfügig unter dem Grenzwert. Vor diesem Bewertungshintergrund ergibt sich partiell eine unterschiedliche Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der einzelnen Gesteinskörnungen in den verschiedenartigen Betonversuchen. Betrachtet man zunächst vergleichend die

Ergebnisse der beiden nach dem ARS 04/2013 [6] durchgeführten Performanceprüfungen, so werden unabhängig von der Betonart bei der Klimawechsellaagerung alle vier Gesteinskörnungen und beim 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung nur die Gesteinskörnungen GK1, GK2 und GK3 als alkaliempfindlich eingestuft. Im 60 °C Betonversuch mit 3 %iger NaCl-Lösung hingegen ist die Alkaliempfindlichkeit dieser drei Gesteinskörnungen als grenzwertig zu betrachten. Dies legt die Vermutung nahe, dass sich durch die Erhöhung der Tausalzkonzentration der AKR-Schädigungsprozess verstärkt.

Wird die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] bewertet, so sind im 40 °C-Betonversuch lediglich die Gesteinskörnungen GK1 und GK2 als alkaliempfindlich (E III-S) einzustufen. Im 60 °C-Betonversuch trifft dieses sogar ausschließlich für die Gesteinskörnung GK1 zu.

Die vorstehenden Ausführungen lassen den Schluss zu, dass die verschiedenartigen Performanceprüfungen nach dem ARS 04/2013 [6] und die unterschiedlichen Betonversuche nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] zu einer unterschiedlichen Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung führen können. So kann die Anwendung des 60 °C-Betonversuchs mit externer Alkalizufuhr gegenüber der Klimawechsellaagerung einerseits und der 60 °C-Betonversuch im Vergleich zur Nebelkammerlagerung andererseits eine Unterbewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung zur Folge haben. Weiterhin ist bemerkenswert, dass mit den Betonversuchen nach [21] im Vergleich zu den Performanceprüfungen nach dem ARS 04/2013 [6] tendenziell eine geringere Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen ermittelt wird.

Für eine weitergehende Bewertung ist jedoch die Analyse der Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale in den Betonen nach der verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerung mittels Mikroskopie unabdingbar. Zusätzlich ist der Eintrag bzw. die Auslaugung von Tausalz während den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen von zentralem Interesse.

Tabelle 20: Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse der AKR-Prüfungen für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen GK1, GK2, GK3 und GK4

Art der AKR-provozierenden Lagerung			Bewertungs- kriterium nach defi- nierter Lage- rungszeit	Betonzusammensetzung nach ARS 04/2013								Betonzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie des DAfStb			
				Oberbeton 0/8 (Waschbeton)				Oberbeton (D>8) / Unterbeton							
				GK1	GK2	GK3	GK4	GK1	GK2	GK3	GK4	GK1	GK2	GK3	GK4
60 °C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr	3 %	NaCl-Lösung	≤ 0,3 mm/m	0,30	0,28*	0,30*	0,14	0,18	0,25	0,23	0,18				
	10 %		≤ 0,5 mm/m	1,0*	1,0*	1,16*	0,34	0,51*	0,59*	0,56*	0,30				
Klimawechselagerung mit	H ₂ O-	Beaufschlagung	≤ 0,4 mm/m	0,40*	0,35	0,40*	0,33	0,37	0,28	0,35	0,28				
	NaCl-		≤ 0,5 mm/m	2,05*	2,18*	1,67*	0,82*	1,38	1,63*	1,23*	1,12*				
40 °- Betonversuch	Dehnungsmessung		≤ 0,6 mm/m									0,86	0,44	0,23	0,19
	Rissweitenbestimmung		< 0,2 mm									0,20	0,60	0,10	0
60 °C-Betonversuch	Dehnungsmessung		≤ 0,6 mm/m									1,02	0,22	0,10	0,06
Legende:		Grenzwert													
				unter											
				nahe											
		über													
	..*	Untersetzung des Befundes mit Dünnschliffmikroskopie													

Tabelle 21: Zusammenfassende Darstellung der Befunde der Dünnschliffmikroskopie und der AKR-provozierenden Lagerungen

Bezeichnung des Dünnschliffs	Beton nach ARS 04/2013		Art der Performanceprüfung				WS-Prüfsand	Befund der Dünnschliffmikroskopie										Ausprägung der		Befund der AKR-provozierenden Lagerung
			60 °C-BV mit Alkalizufuhr		KWL mit			Hauptbestandteile der groben GK												
	Oberbeton 0/8	Oberbeton (D>8) / Unterbeton	3 %ige NaCl-Lösung	10 %ige NaCl-Lösung	NaCl-L	H ₂ O		Rhyolith	Basalt	Granit	Grauwacke	Quarzit	Sandstein	Kieselschiefer	Flint	Tonstein	AKR	SEB		
																	Beaufschlagung		Merkmale	
GK 2 (2-08-60-3)	X	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	(+)	++			
GK 3 (3-08-60-3)	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	(+)	++			
GK 1 (1-08-60-10)	X	-	-	X	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	+++	(+)			
GK 2 (2-08-60-10)	X	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	+++	-			
GK 3 (3-08-60-10)	X	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	-			
GK 1 (1-22-60-10)	-	X	-	X	-	-	X	X	-	-	X	X	X	X	-	+++	(+)			
GK 2 (2-22-60-10)	-	X	-	X	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	+++	-			
GK 3 (3-22-60-10)	-	X	-	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	+++	-			
GK 1 (1-08-KWL H ₂ O)	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X	X	X	-	++	+			
GK 3 (3-08-KWL H ₂ O)	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+			
GK 1 (1-08-KWL NaCl)	X	-	-	-	X	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	+++	++			
GK 2 (2-08-KWL NaCl)	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	+++	+++			
GK 3 (3-08-KWL NaCl)	X	-	-	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	+++	++			
GK 4 (4-08-KWL NaCl)	X	-	-	-	X	-	-	-	-	X	X	X	-	-	X	+ ¹⁾	+++			
GK 2 (2-22-KWL NaCl)	-	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	+++	+++			
GK 3 (3-22-KWL NaCl)	-	X	-	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++			
GK 4 (4-22-KWL NaCl)	-	X	-	-	X	-	X	-	-	X	X	X	-	-	X	+++ ¹⁾	++			

Legende:

X	Herkunft des AKR-Gels im Dünnschliff	-	Kein Merkmal erkennbar	+	vereinzelte Merkmale	++	häufig eindeutige Merkmale	+++	vorhandene Merkmale im betonschädigenden Ausmaß	unter	nahe	über	Dehnungsgrenzwert
---	--------------------------------------	---	------------------------	---	----------------------	----	----------------------------	-----	---	-------	------	------	-------------------

1) Besonderheit bei den Proben mit GK4 in den Fraktionen 8/16 mm und 16/ 22mm: AKR ja, aber wenn, dann an der Sandfraktion

5.4 Aufbauende Untersuchungen

5.4.1 Dünnschliffmikroskopie

Wie bereits in der Tabelle 20 aufgezeigt, wurden ausschließlich Dünnschliffe ausgewählter Prüfkörper nach den verschiedenartigen Performanceprüfungen (ARS 04/2013 [6]) mit grenzwertigen und den Grenzwert überschreitenden Dehnungswerten mikroskopisch untersucht. Einen zusammenfassenden Überblick über die hierbei ermittelten Befunde gibt die Tabelle 21. Darüber hinaus sind die Detailbilder der Dünnschliffe in der Anlage A5 ausführlich dokumentiert und kommentiert. Aus diesem Grund wird nachfolgend nur ein zusammenfassendes Fazit zu den Befunden der Dünnschliffe nach der verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerung gegeben.

Bemerkenswert ist zu den beiden Dünnschliffen von den Prüfkörpern aus **Waschbeton** mit den Gesteinskörnungen GK2 und GK3 nach dem **60 °C-Betonversuch mit 3%iger NaCl-Lösung**, dass die nahe dem Grenzwert ermittelte Dehnung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vordergründig durch eine schädigende AKR sondern vermutlich durch eine SEB verursacht wurde. So wurde im Dünnschliff **GK 2 (2-08-60-3)** nur an einer Stelle in der Nähe eines groben gebrochenen Kornes AKR-Gel, abgelagert in Poren, gefunden. Auch die typischen Merkmale einer AKR, wie Riss im Korn, Rissfortsetzung in die Matrix bis zu den zahlreichen Poren und AKR-Gelablagerung wurden lediglich an dieser einen Stelle nachgewiesen. Verursacher ist aber kein typisches Grauwackekorn, sondern ein stark metamorph überprägtes Gestein (Metamorphit). Außerdem sind fein verästelte, netzartige Risse im Zementstein, die sehr häufig von mit Ettringit gefüllten Poren ausgehen, typisch für das Gefüge. Der Füllgrad der Poren ist unter 100 %. Die Anzahl der so gefüllten Poren ist jedoch recht groß, so dass die Menge an Ettringit über die für eine normale Zementhydratation hinausgeht. Das lässt den Schluss zu, dass für Schädigungen/Dehnungen dieses Prüfkörpers vermutlich keine AKR (bzw. diese nur untergeordnet) sondern eine SEB ursächlich ist. Auch beim Dünnschliff **GK 3 (3-08-60-3)** wurde nur an einer Stelle im Gefüge, d.h. am Porenrand ein AKR-Gel identifiziert. Risse gehen von dort nicht aus. Der Verursacher ist ebenfalls unklar, da die groben Rhyolithkörner keinerlei Anzeichen für eine AKR-Schädigung zeigen. Vielmehr sind

auch hier für fein verästelte netzartige Risse im Zementstein, die sehr häufig von mit Ettringit gefüllten Poren ausgehen, typisch für das Gefüge. Der Füllgrad der Poren ist unter 100 %, die Anzahl an so gefüllten Poren jedoch immens, so dass die Menge an Ettringit über die für eine normale Zementhydratation hinausgeht. Damit ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch hier keine AKR sondern eine SEB ursächlich für Schädigungen/Dehnungen des Prüfkörpers.

Im Gegensatz zum vorstehenden Befund ist die den Grenzwert überschreitende Dehnung der Prüfkörper aus **Waschbeton** mit den Gesteinskörnungen GK1, GK2 und GK3 beim **60 °C-Betonversuch mit 10 %-iger NaCl-Lösung** vor allem auf eine schädigende AKR zurückzuführen. So zeigt der Dünnschliff **GK 1 (1-08-60-10)** zahlreiche AKR-Merkmale. Sie äußern sich in Rissen in Gesteinskörnern, die sich in die Matrix fortsetzen. Außerdem wurden AKR-Gelablagerungen in den Rissen und angrenzenden Poren identifiziert. Weiterhin waren oberflächennahe Reaktionsräume aus AKR-Gel erkennbar. Beteiligt waren quarzische Rundkörner, stressquarzhaltige- und mikrokristalline Quarzkörner, Sandstein, Flinte und Rhyolithe. Vereinzelt wurde in geringen Mengen Ettringit in den Poren identifiziert. Auch im Dünnschliff **GK 2 (2-08-60-10)** ist eine massive AKR-Schädigung erkennbar. So zeigen die Grauwackekörner auch hier die typischen Merkmale einer AKR in Form von Rissen im Korn. Diese setzen sich auch hier netzartig in die Matrix fort. In den Rissen und in den angrenzenden Poren wurden vermehrt AKR-Gelablagerungen gefunden. Auffallend ist, dass hier nahezu alle Körner betroffen sind. Eine weitere Besonderheit besteht hier darin, dass die Körner bereits innerhalb ihres Gefüges netzartige Risse aufweisen. Das legt die Vermutung nahe, dass die Körner mehrmals geschädigt wurden. Die nachweisbaren AKR-Gelmengen für Grauwacke sind sehr hoch. Es gibt auch Hinweise darauf, dass die feine Gesteinskörnung mit an der AKR-Reaktion und möglicherweise auch an der Schädigung beteiligt war. Auch im Dünnschliff **GK 3 (3-08-60-10)** ist erkennbar, dass im Gefüge des Waschbetons mit der Gesteinskörnung GK3 zweifelsfrei eine AKR stattgefunden hat. Merkmale, wie Risse in den Rhyolith-Gesteinskörnern, Rissfortsetzungen in die Matrix und AKR-Gelablagerungen in den Rissen und angrenzenden Poren belegen diese Aussage. Es sind fast alle groben Rhyolithkörner an der Reaktion

beteiligt. Auch wenn für jedes Korn die AKR-Gel-mengen gering sind, führt in Summe die AKR auch bei GK 3 zu einer deutlich sichtbaren Gefügeschädigung.

Aber nicht nur beim Waschbeton sondern auch beim **Oberbeton (D>8)/Unterbeton** mit den Gesteinskörnungen GK1, GK2 und GK3 ist die den Grenzwert überschreitende Dehnung im **60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung** auf eine schädigende AKR zurückzuführen. So wurden im Dünnschliff **GK 1 (1-22-60-10)** auch die bereits vorstehend mehrfach benannten typischen Merkmale für eine schädigende AKR vorgefunden. Auffallend ist allerdings hier, dass an den groben 22 mm Körnern sehr häufig ein oberflächliches Anlösen ganzer Gesteinskornbereiche, verbunden mit einer dortigen AKR-Gelbildung, vorgefunden wurde. An wenigen Stellen wurde auch Ettringit identifiziert. Manchmal hat es den Anschein, dass sich hier der AKR- und SEB-Schädigungsmechanismus überlagern. Beteiligt an der AKR-Schädigung sind Quarz, stressquarzhaltige und Mikroquarzkörner und Rhyolith. Flint aus der Sandfraktion zeigt ebenfalls Anzeichen einer AKR. Auch im Dünnschliff **GK 2 (2-22-60-10)** waren nicht nur die Grauwackekörner sondern auch Körner der Sandfraktion an der stark ausgeprägten schädigenden AKR beteiligt. Ähnliches gilt für den Befund des Dünnschliffs **GK 3 (3-22-60-10)**. So wurden hier Rhyolithkörner aus der groben Fraktion und Sandkörner aus der feinen Fraktion als Verursacher der AKR identifiziert. Anzeichen einer SEB waren bei diesem Dünnschliff nicht nachweisbar.

Es stellt sich nun die Frage nach der Ursache für die erhöhten und die den Grenzwert überschreitenden Dehnungen der Prüfkörper beider Betonarten bei der **Klimawechsellagerung**. Für den **Lastfall Wasserbeaufschlagung** wurden exemplarisch zwei Dünnschliffe von Prüfkörpern aus Waschbeton mit den Gesteinskörnungen GK1 und GK3 mikroskopisch untersucht. Im Dünnschliff **GK 1 (1-08-KWL-H₂O)** ist erkennbar, dass die über den Grenzwert hinausgehende Dehnung primär durch eine schädigende AKR verursacht wurde. Begleitet wird diese von einer SEB. Grobe Kieskörner sind die Verursacher der AKR. Merkmale sind mit AKR-Gel gefüllte Poren. Die SEB äußert sich im Gefüge durch mit Ettringit gefüllte Poren, die hier allerdings nicht so massiv auftritt wie bei den noch zu diskutierenden Prüfkörpern mit NaCl-

Beaufschlagung. In solchen Bereichen äußert sich die Gefügeschädigung in einer netzartigen Rissbildung im Zementstein. Im Gegensatz dazu ist die grenzwertige Dehnung bei den gleichartig gelagerten Waschbetonprüfkörpern mit der Gesteinskörnung GK3 nicht auf eine schädigende AKR zurückzuführen. Vielmehr sind im Dünnschliff **GK 3 (3-08-KWL-H₂O)** eindeutige Indikationen für eine SEB erkennbar. So sind zahlreiche Poren vollständig mit Ettringit gefüllt. An einigen Stellen sind auch von dort ausgehende Risse erkennbar.

Beim **KWL-Lastfall mit NaCl-Beaufschlagung** wird bei den Prüfkörpern aus **Waschbeton** mit den Gesteinskörnungen GK1, GK2 und GK3 die den Grenzwert signifikant überschreitende Dehnung primär durch eine AKR verursacht. Zusätzlich wurden aber auch häufig Merkmale einer SEB vorgefunden. So zeigte sich bei der Analyse des Dünnschliffs **GK 1 (1-08-KWL-NaCl)**, dass im Betongefüge mit der GK1 zweifelsfrei und sehr massiv eine AKR stattgefunden hat. Verursacher sind fast alle Bestandteile des Kieses (Sandsteinkörner, Mikroquarz- und Stressquarzkörner, Rhyolith, Grauwacke). Viele Körner zeigen die typischen Merkmale einer AKR. Stellenweise gibt es auch Hinweise darauf, dass die Sandfraktion ebenfalls an der AKR beteiligt ist. Die Poren sind nicht nur mit AKR-Gel sondern auch partiell massiv mit Ettringit gefüllt. Partiiell gehen von solchen Poren auch Risse bzw. Treiberscheinungen in die Matrix aus. Im Dünnschliff **GK 2 (2-08-KWL-NaCl)** ist erkennbar, dass der Waschbeton mit der Grauwacke auch bei der AKR-provozierenden Lagerung eine massive AKR erfahren hat. Typische Merkmale, wie Risse in den Grauwackekörnern, Rissfortsetzungen in die Matrix, Gelablagerungen in den Rissen und in den Poren sind eindeutige Hinweise. Bemerkenswert ist aber auch, dass genauso intensiv eine SEB im Gefüge stattgefunden hat. So sind massive großflächige Gefügeschädigungen ursächlich einer SEB zuzuordnen. Das findet seinen Ausdruck in massiv mit Ettringit gefüllten Poren, die sehr zahlreich im Gefüge anzutreffen sind. Von dort ausgehend verlaufen radialstrahlige Risse, die zu einem netzartigen Rissbild führen, welches für das Prisma typisch ist. Zusätzlich sei angemerkt, dass offensichtlich auch die Sandkörner von einer AKR betroffen sind.

Auch die Analyse des Dünnschliffs **GK 3 (3-08-KWL-NaCl)** zeigte, dass im Waschbetongefüge mit der GK3 zweifelsfrei eine AKR stattgefunden

hat. Verursacher sind überwiegend die groben Rhyolithkörner mit den typischen Merkmalen. Stellenweise gibt es Hinweise, dass die Sandfraktion an der Reaktion beteiligt ist. Auch hier sind die Poren sowohl mit AKR-Gel als auch mit Ettringit massiv gefüllt. Von solchen Poren gehen vereinzelt radialstrahlige Risse in die Matrix aus.

Im Gegensatz zu den vorstehend betrachteten Waschbetonen mit GK1, GK2 und GK3 ist die Überschreitung des Dehnungsgrenzwertes bei der KWL mit NaCl-Beaufschlagung beim Waschbeton mit GK4 nicht auf eine AKR zurückzuführen. So ist im Dünnschliff **GK 4 (4-08-KWL-NaCl)** erkennbar, dass es bei diesem nur vereinzelt Hinweise auf eine AKR gibt. Verursacher sind fast ausschließlich die Grauwackekörner des Kiesel. Risse findet man dort und auch stellenweise Rissfortsetzungen in die Matrix. Diese sind jedoch nur wenig oder gar nicht mit AKR-Gel gefüllt. Der einzige klare Hinweis stammt von einem Sandkorn mit fast vollständig amorpher Struktur (Flint). Dieses Korn kann nicht Teil des Kiesel GK4 sein. Im Gefüge findet man andererseits massiv mit Ettringit gefüllte Poren. Häufig gehen von solchen Poren auch Risse bzw. Treiberscheinungen in die Matrix aus. An zwei Stellen findet man auch eine vollständige Zerstörung des Gefüges des Zementsteines durch Ettringittreiben.

Die anschließend durchgeführte Analyse der Dünnschliffe von den Prüfkörpern aus dem **Oberbeton (D>8)/Unterbeton** mit den Gesteinskörnungen GK2, GK3 und GK4 ergab, dass die signifikante Überschreitung des Dehnungsgrenzwertes hier auf eine AKR mit einer begleitenden SEB zurückzuführen ist. So ist im Dünnschliff **GK 2 (2-22-KWL-NaCl)** erkennbar, dass im Betongefüge eine schädigende AKR stattgefunden hat. Verursacher sind grobe Grauwackekörner, die Risse zeigen, die bis zur Oberfläche verlaufen. Die Risse setzen sich auch an einigen Stellen in die Matrix fort, dort kommt es zur Gelablagerung in den Risskanälen und in den Poren. Im Betongefüge wurden zahlreiche Poren identifiziert, die fast vollständig bzw. massiv mit Ettringit gefüllt sind. An einigen Stellen kommt es zu einer deutlich sichtbaren Gefügestörung und zur Bildung netzartiger Risse, was auf das Abläufen einer SEB hinweist. Im Dünnschliff **GK 3 (3-22-KWL-NaCl)** wird ein ähnlicher Befund vorgefunden. Allerdings wurden hier

grobe Rhyolithkörner als schadensverursachend für die AKR identifiziert.

Zum Dünnschliff **GK 4 (4-22-KWL-NaCl)** ist zusammenfassend festzustellen, dass eindeutig eine AKR diagnostiziert wurde. Allerdings geht diese nicht vom Grobkorn sondern von der Sandfraktion aus. Zusätzlich wurden vermehrt mit Ettringit gefüllte Poren vorgefunden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Betongefüge eindeutig eine AKR diagnostiziert werden kann, typische Merkmale, wie Riss in den Körnern, Rissfortsetzung in die Matrix und dort in den Poren Gelablagerungen werden gefunden. An den groben Körnern der GK4 sind diese Merkmale aber nur an ganz wenigen Stellen ausgeprägt. Aber es gibt doch zahlreiche Gefügebereiche mit ausgeprägter Gelbildung, dort ist kein Grobkorn in der Nähe, es gibt vielmehr an diesen Stellen eindeutige Hinweise, dass die Sandfraktion hier massiv an der AKR beteiligt ist. Zusätzlich wurden vermehrt mit Ettringit gefüllte Poren identifiziert. An einigen Stellen gibt es auch Hinweise dafür, dass es zu Treiberscheinungen im Zementstein infolge SEB mit begleitender Rissbildung gekommen ist.

Die Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale in den Betonen nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen wird maßgebend von der Anwesenheit von Alkalien bestimmt. Aus diesem Grunde werden nachfolgend die Ergebnisse der LIBS-Analyse zum Tausalzeintrag und zur Auslaugung der Alkalien aufgezeigt und diskutiert.

5.4.2 LIBS-Analyse

Die Ergebnisse der LIBS-Analyse werden nachfolgend exemplarisch für alle Betone mit der Gesteinskörnung GK4 vor und nach den jeweiligen AKR-provozierenden Lagerungen aufgezeigt (Tabellen 22a bis 24b*). Das geschieht vor dem Hintergrund, dass bei diesen Betonen vergleichsweise geringe Dehnungen bei den AKR-provozierenden Lagerungen ermittelt wurden. Darüber hinaus sind die LIBS-Ergebnisse für die Betone mit den Gesteinskörnungen GK1 bis GK3 nach allen AKR-provozierenden Lagerungen der Anlage A6 zu entnehmen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Ergebnistabellen im Haupttext und in der Anlage A6 gleichartig gestaltet. So sind zunächst in der jeweiligen Tabelle das Ergebnis der Dehnungsmessungen

und ein Foto der Analysefläche mit der räumlichen Einordnung im Prüfkörper dargestellt. Aufbauend darauf werden die Natrium- und Chlorid-Flächenscans mit den daraus ermittelten Tiefenprofilen dargestellt. Zusätzlich wird das vor der Prüfung an einer unbeanspruchten Vergleichsprobe ermittelte Tiefenprofil ausgewiesen. Weiterhin wird der untere Kalibrationswert (LOQ) für die quantitative Darstellung des Na- und Cl-Gehalts im Diagramm aufgezeigt. Die zusätzlich ausgewiesenen Schwefelverteilungen tragen lediglich Informationscharakter.

Die Tabellen 22a bis 22d geben Aufschluss über die Ergebnisse der LIBS-Analyse nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen des Waschbetons mit der GK4. Bei der vergleichenden Betrachtung der Analyseergebnisse an den Vertikalschnitten der Betonprüfkörper nach dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (Tabellen 22a und 22b) ist erkennbar, dass unabhängig von der Höhe der Konzentration der NaCl-Lösung im Kernbereich der Prüfkörper ein gleichmäßiger Na- und Cl-Eintrag vorhanden ist. Erwartungsgemäß werden dabei deutlich höhere Gehalte an Natrium und Chlorid bei der Verwendung einer 10 %igen NaCl-Lösung als beim Einsatz der 3 %igen NaCl-Lösung vorgefunden. Bemerkenswert ist aber auch, dass in beiden Lastfällen im Randbereich eine Abreicherung an Natrium und eine Anreicherung von Chlorid erkennbar ist.

Den Tabellen 22c bis 22d sind die Ergebnisse der LIBS-Analyse für die Waschbetonprüfkörper nach der Klimawechsellagerung zu entnehmen. Dabei zeigt sich, dass ausgehend von der einseitig mit entmineralisiertem Wasser beaufschlagten Prüffläche das Natrium bis in eine Tiefe von ca. 40 mm ausgewaschen wird. Dieser Trend ist, wenn auch in nur abgeschwächter Form, auch in der Betonrandzone auf der Unterseite und den Seitenflächen der Prüfkörper erkennbar. Ein möglicher Grund hierfür könnte der nur halb so große Radius der Na- gegenüber den Cl-Ionen und die daraus resultierende höhere Mobilität der Na-Ionen bei der zyklischen Befeuchtung und Austrocknung der Prüfkörper sein. Im Gegensatz dazu werden bei der einseitigen Beaufschlagung der Prüfkörper mit 3,6 %iger NaCl-Lösung große Mengen an Tausalz in die Waschbetonprüfkörper eingetragen. Wider Erwarten ist auch hier ausgehend von der beaufschlagten Prüffläche nach der Klimawechsellagerung eine Auslaugung von Natrium bis in eine

Tiefe von ca. 30 mm erkennbar. Auch in der Betonrandzone an den Seitenflächen der Prüfkörper ist eine leichte Auslaugung an Natrium erkennbar. Diese geht allerdings auch hier mit einer Anreicherung an Chlorid einher. Die maximale Na-Konzentration ist im Kernbereich des Prüfkörpers nach der KWL mit NaCl-Beaufschlagung in der Regel geringer als nach dem 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung.

Die vorstehend dargelegten Erkenntnisse zum Na- und Cl-Haushalt im Waschbeton bei den Betonversuchen mit Alkalizufuhr lassen sich direkt auf den Oberbeton ($D > 8$)/Unterbeton nach gleichartiger AKR-provozierender Lagerung übertragen (Tabellen 23a bis 23d).

Von großem Interesse ist allerdings auch das bereits vielfach diskutierte Auslaugungsverhalten von Natrium bei den nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb hergestellten Betonen im 40 °C- und 60 °C-Betonversuch. Dabei erfolgten die Untersuchungen bisher nasschemisch mittels Analyse des entmineralisierten Wassers über den die Betonprüfkörper ausgelagert wurden. Bei der hier erstmals mit LIBS erfolgten bildgebenden Analyse der Natriumverteilung und des daraus abgeleiteten Natriumprofils zeigt sich, dass die Betonrandzone im 40 °C-Betonversuch bis in eine maximale Tiefe von ca. von ca. 30 mm ausgelagert wird (Tabelle 24a*). Beim 60 °C-Betonversuch erreicht die Auslaugungstiefe einen Maximalwert von ca. 20 mm (Tabelle 24b*). Unabhängig von der Art des Betonversuchs (40 °C oder 60 °C) ist in den Eckbereichen aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Oberfläche zum Volumen die Na-Auslaugung besonders stark ausgeprägt.

Tabelle 22a: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe GK4-(0-8)-60 °C-3%

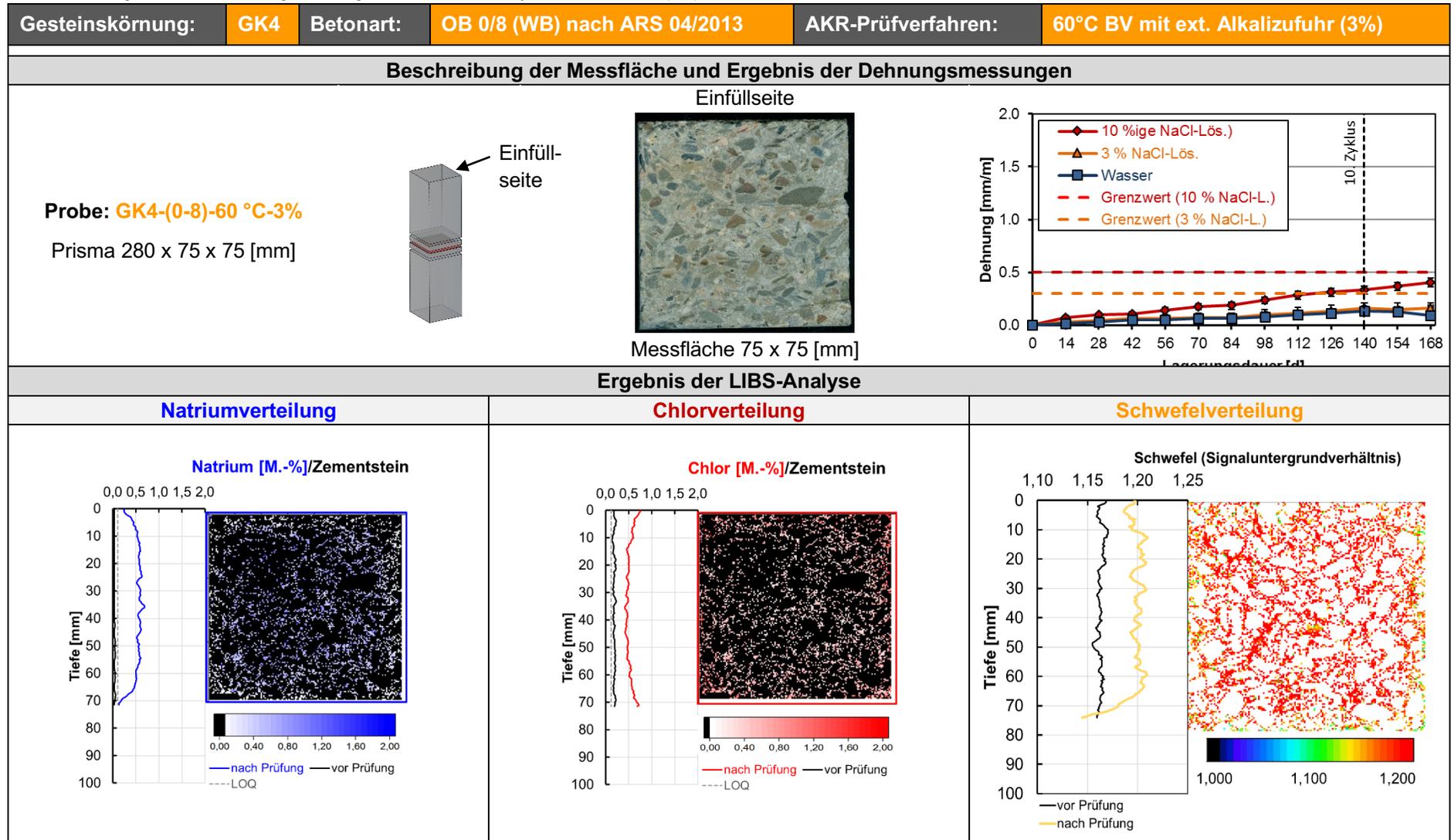


Tabelle 22b: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-8)-60 °C-10%**

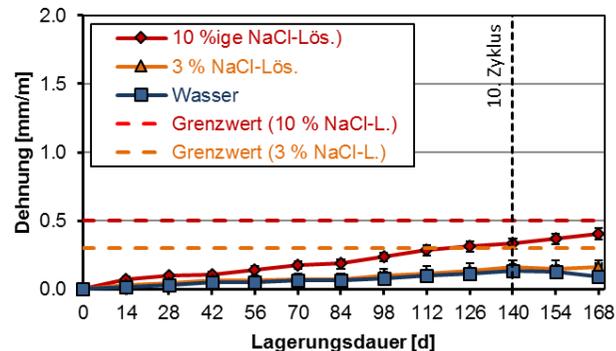
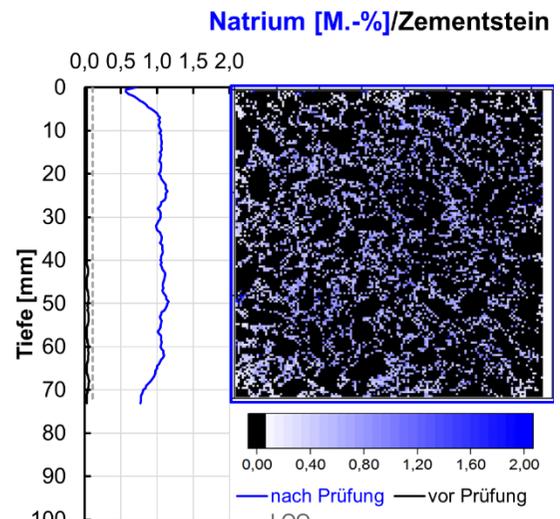
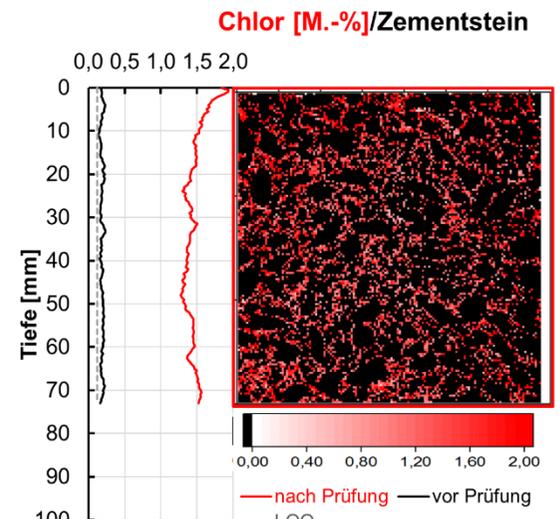
Gesteinskörnung:	GK4	Betonart:	OB 0/8 (WB) nach ARS 04/2013	AKR-Prüfverfahren:	60°C BV mit ext. Alkalizufuhr (10%)
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-8)-60 °C-10% Prisma 280 x 75 x 75 [mm]</p>  <p style="text-align: center;">Einfüll- seite</p>		 <p style="text-align: center;">Einfüllseite Messfläche 75 x 75 [mm]</p>			
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung		Chlorverteilung		Schwefelverteilung	
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p>nicht bestimmt</p>	

Tabelle 22c: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe GK4-(0-8)-KWL-H₂O

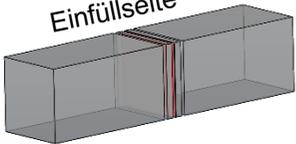
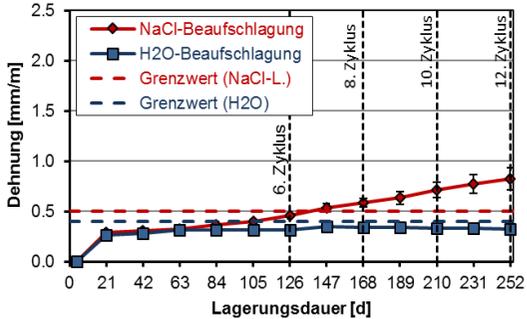
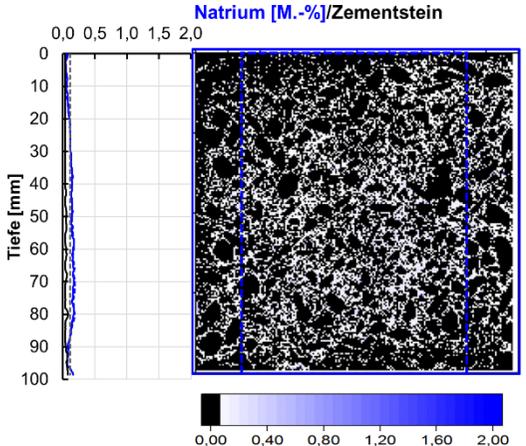
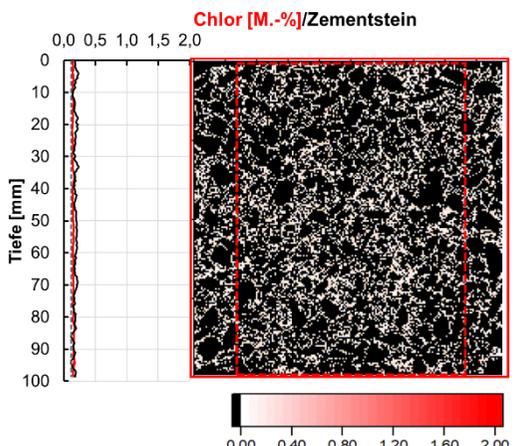
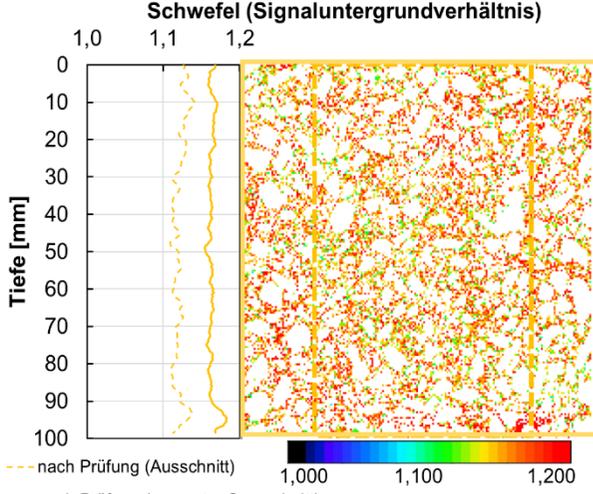
Gesteinskörnung:	GK4	Betonart:	OB 0/8 (WB) nach ARS 04/2013	AKR-Prüfverfahren:	Klimawechsellagerung (H ₂ O)
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-8)-KWL-H₂O</p> <p>Prisma 400 x 100 x 100 [mm]</p>	<p>Einfüllseite</p> 	<p>Einfüllseite</p> 	<p>Messfläche 100 x 100 [mm]</p>		
					
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung		Chlorverteilung		Schwefelverteilung	
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Schwefel (Signaluntergrundverhältnis)</p> 	

Tabelle 22c*: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-8)-KWL-H₂O** (veränderte Achsenskalierung)

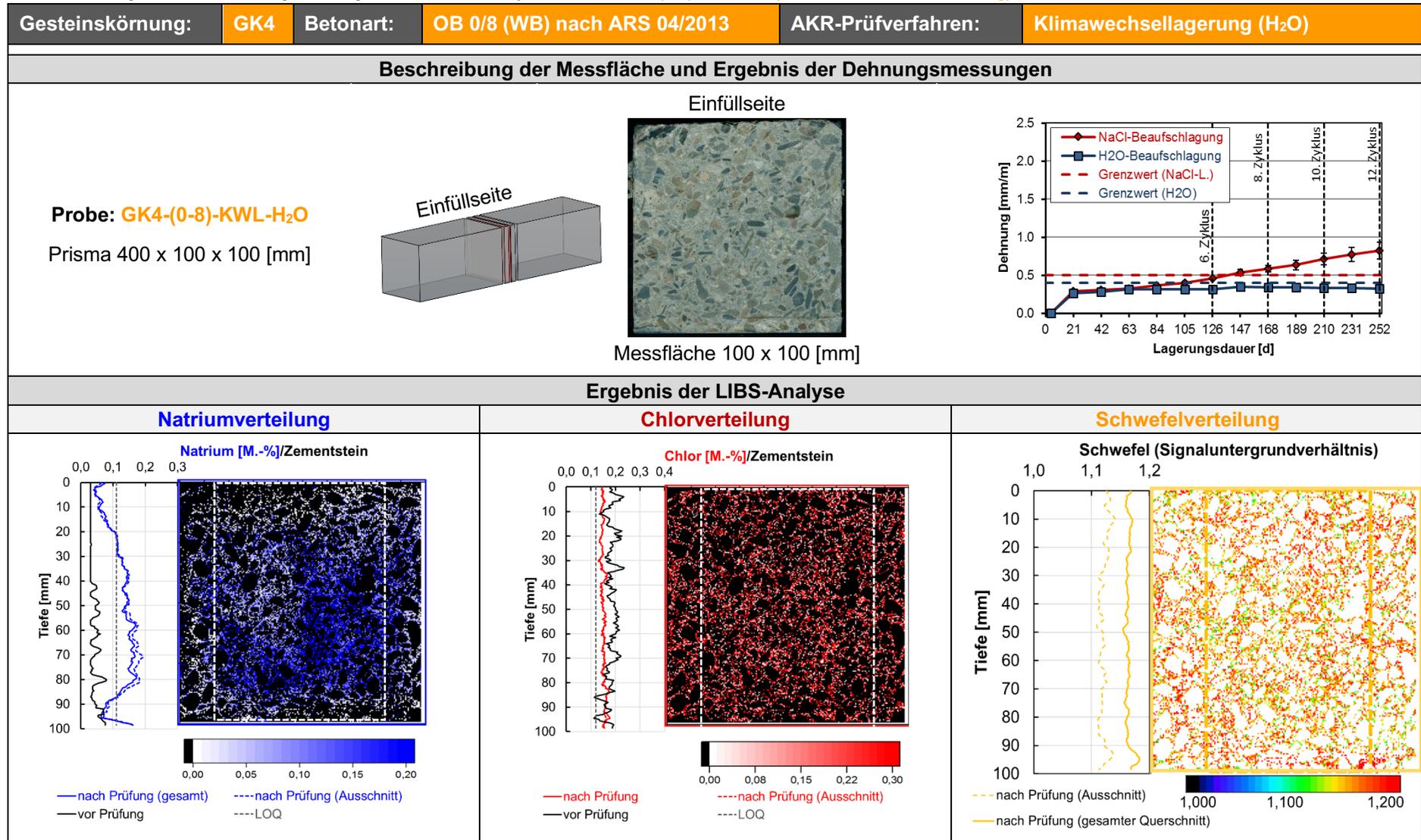


Tabelle 22d: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-8)-KWL-NaCl**

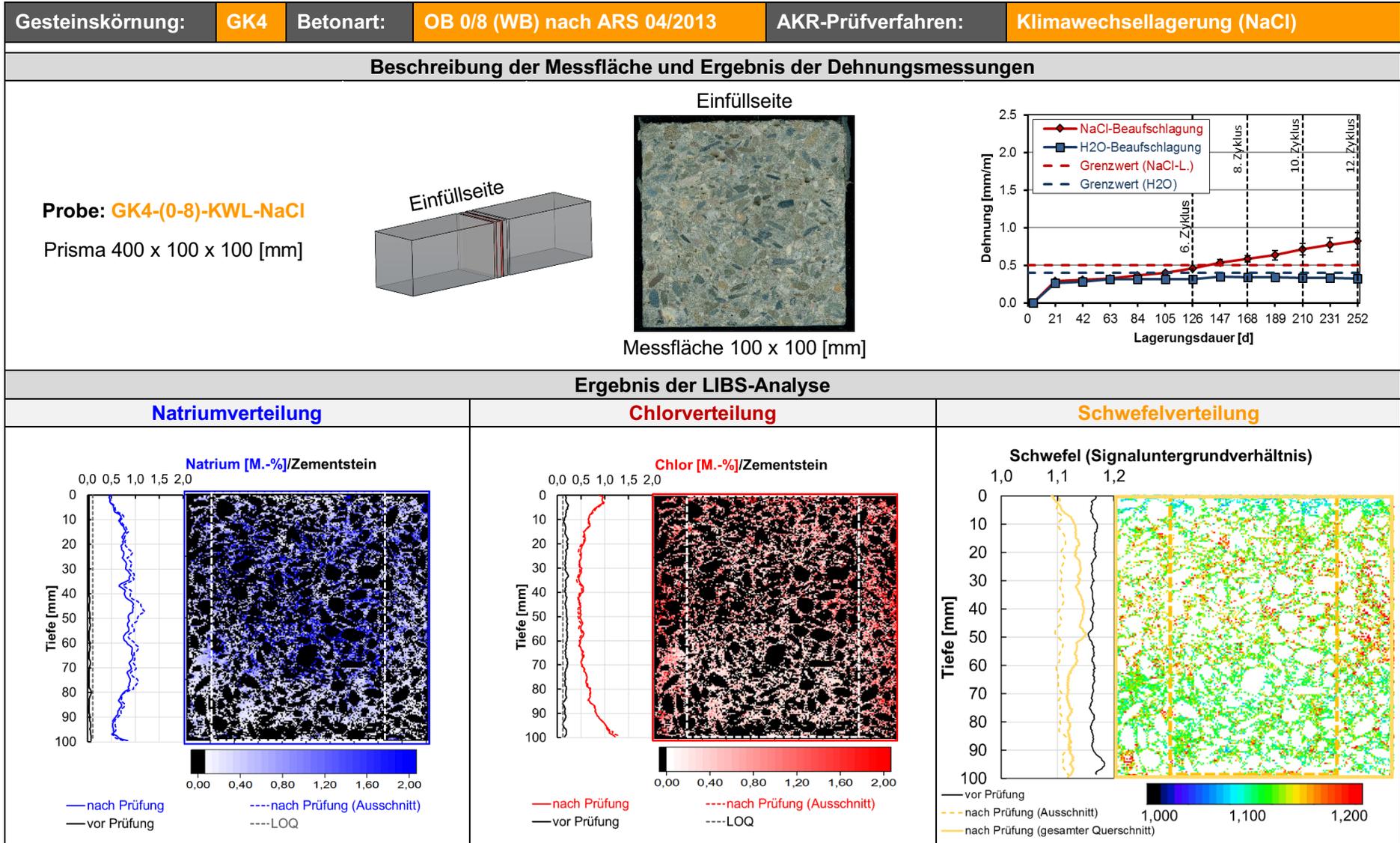


Tabelle 23a: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-60 °C-3%**

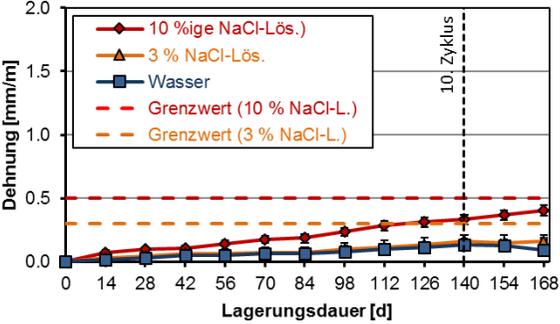
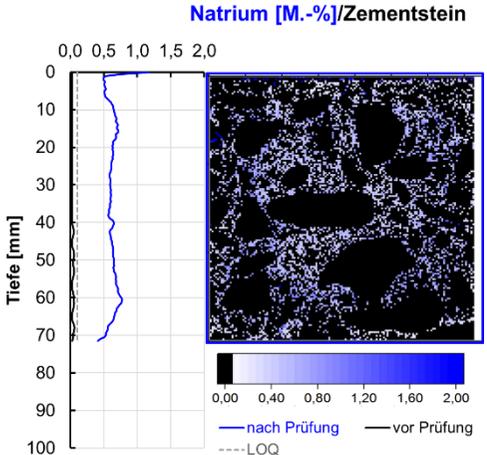
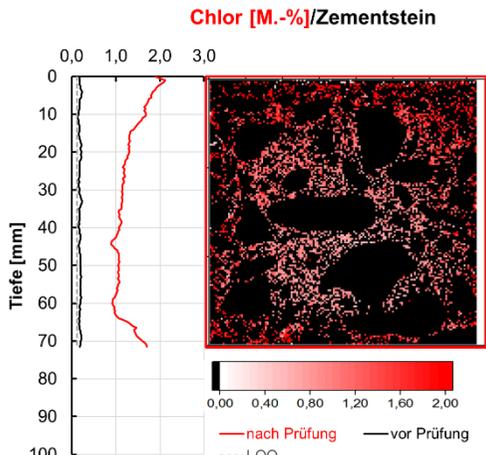
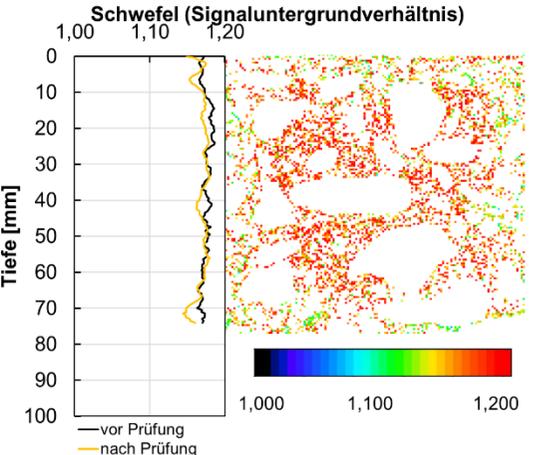
Gesteinskörnung:	GK4	Betonart:	OB D>8 und UB nach ARS 04/2013	AKR-Prüfverfahren:	60°C BV mit ext. Alkalizufuhr (3%)
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-22)-60 °C-3% Prisma 280 x 75 x 75 [mm]</p>  <p style="text-align: right;">Einfüll- seite</p>		<p style="text-align: center;">Einfüllseite</p>  <p style="text-align: center;">Messfläche 75 x 75 [mm]</p>			
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung		Chlorverteilung		Schwefelverteilung	
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Schwefel (Signaluntergrundverhältnis)</p> 	

Tabelle 23b: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe GK4-(0-22)-60 °C-10%

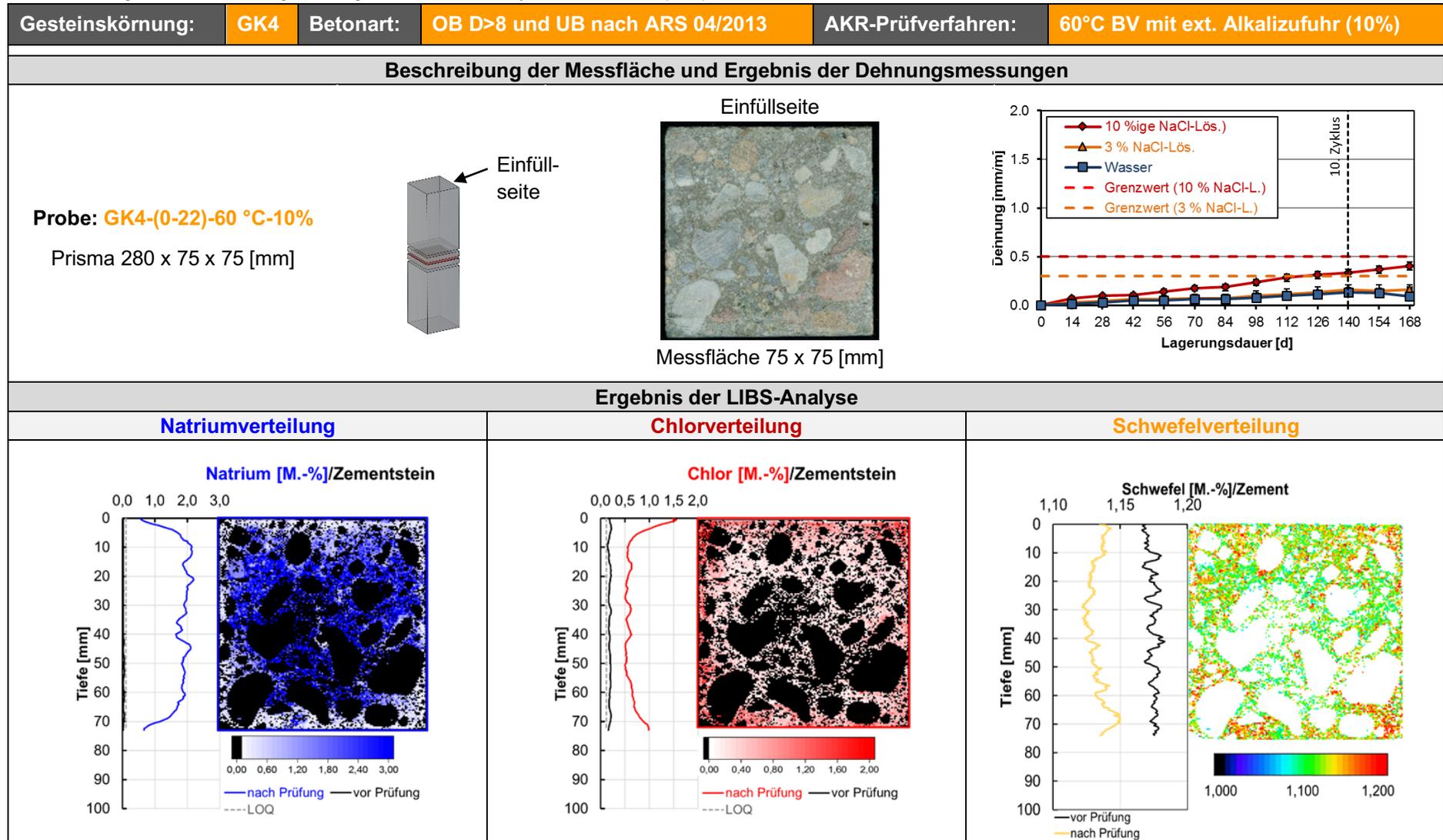


Tabelle 23c: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-KWL-H₂O**

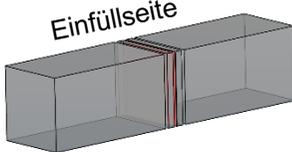
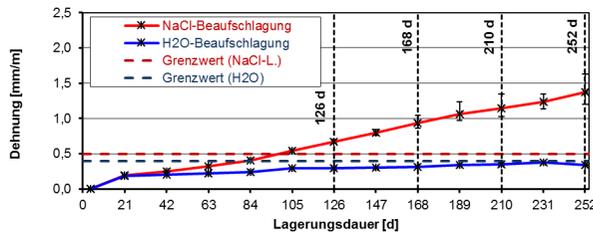
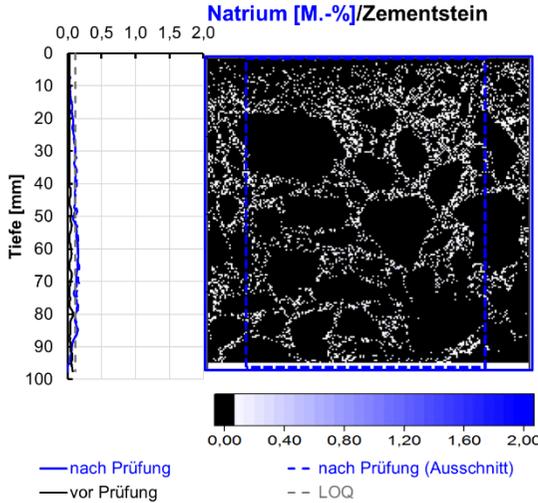
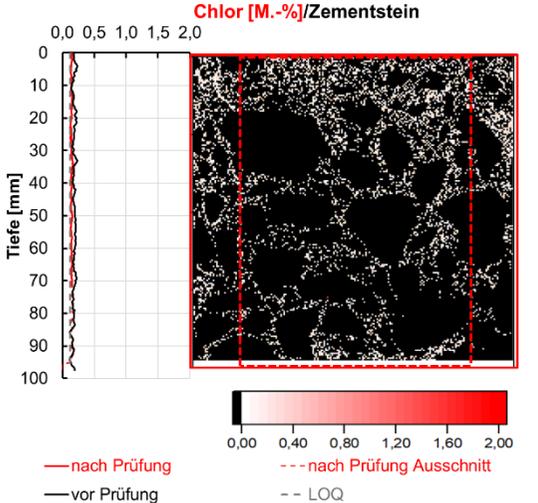
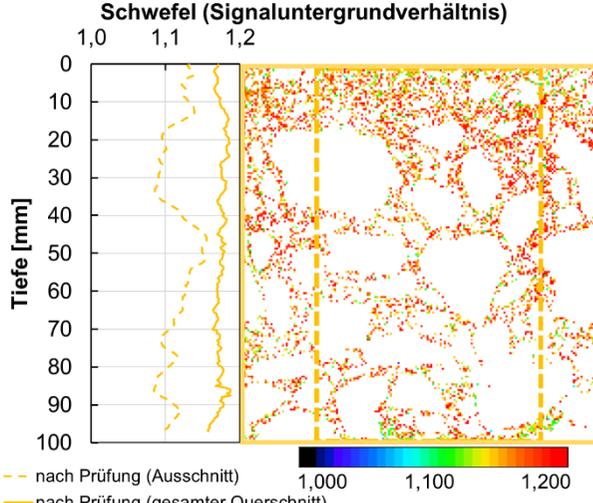
Gesteinskörnung:	GK4	Betonart:	OB D>8 und UB nach ARS 04/2013	AKR-Prüfverfahren:	Klimawechsellagerung (H₂O)
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-22)-KWL-H₂O</p> <p>Prisma 400 x 100 x 100 [mm]</p>		<p style="text-align: center;">Einfüllseite</p>  <p style="text-align: center;">Einfüllseite</p>  <p style="text-align: center;">Messfläche 100 x 100 [mm]</p>			
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung		Chlorverteilung		Schwefelverteilung	
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Schwefel (Signaluntergrundverhältnis)</p> 	

Tabelle 23c*: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe GK4-(0-22)-KWL-H₂O (veränderte Achsenskalierung)

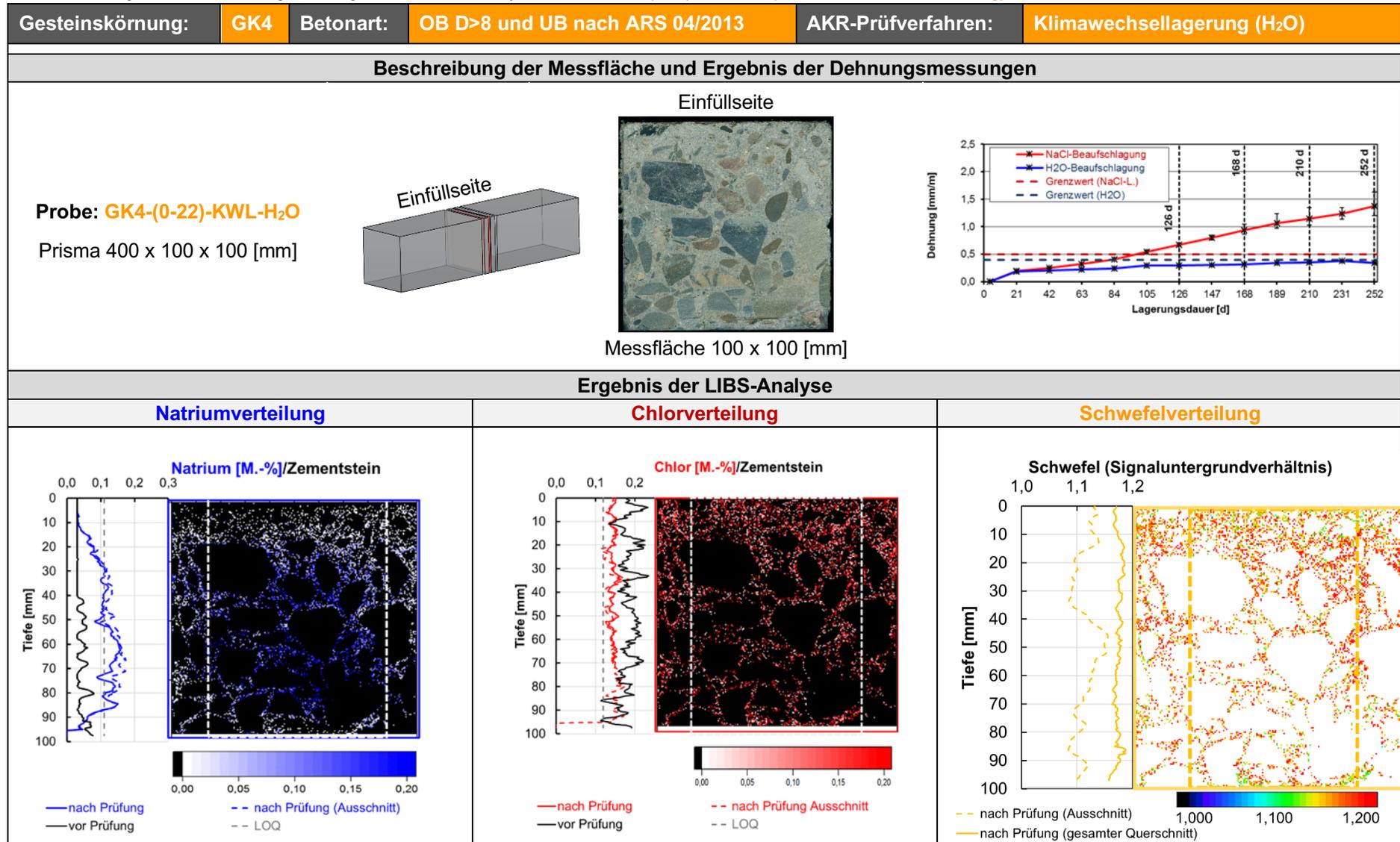


Tabelle 23d: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-KWL-NaCl**

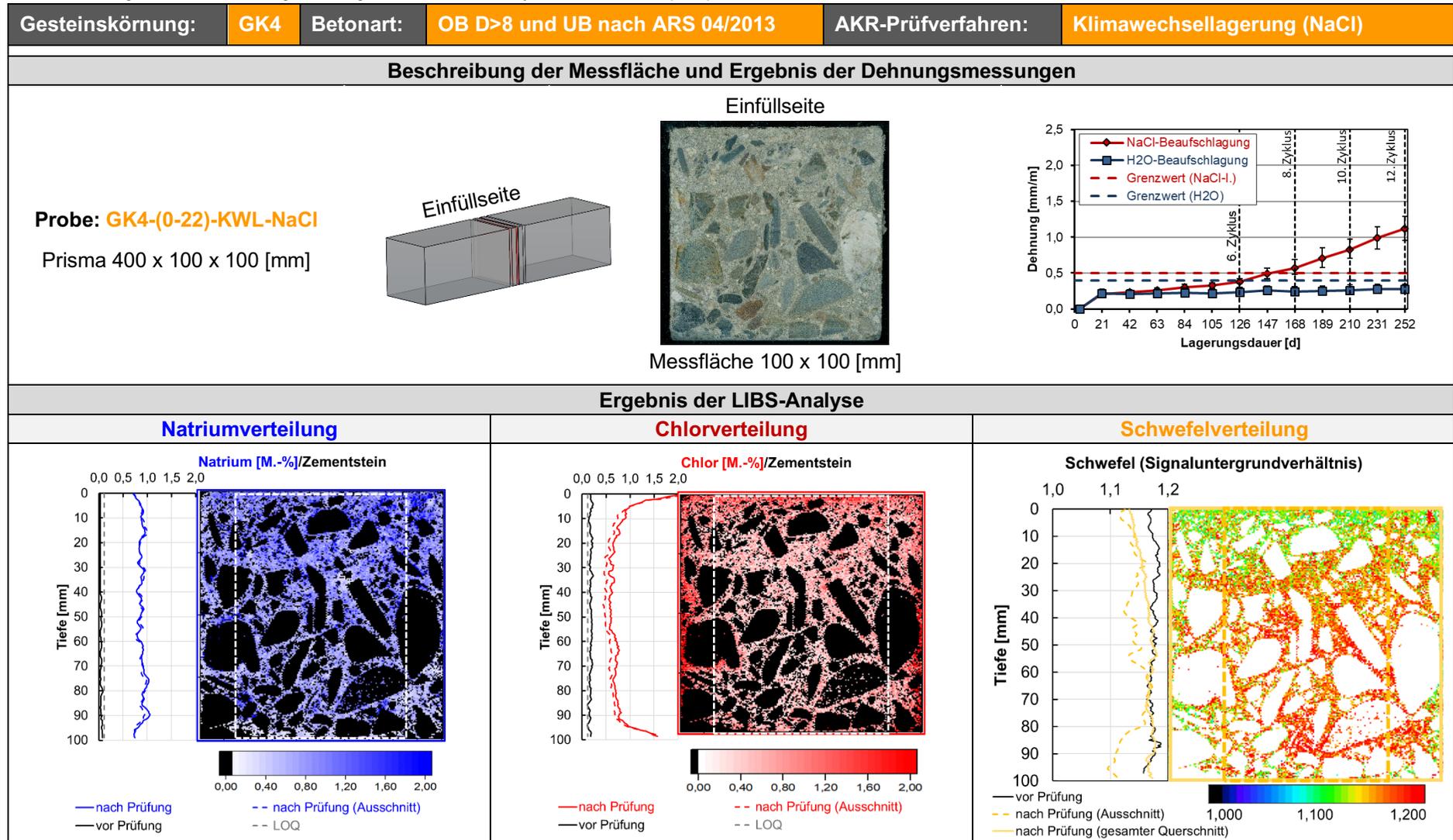


Tabelle 24a: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-NKL**

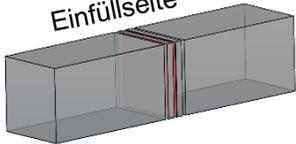
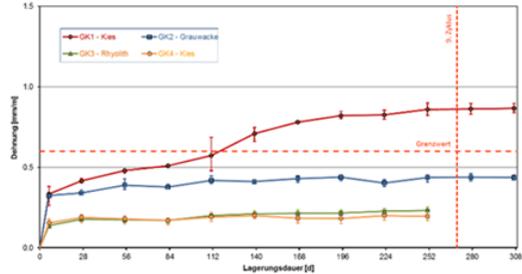
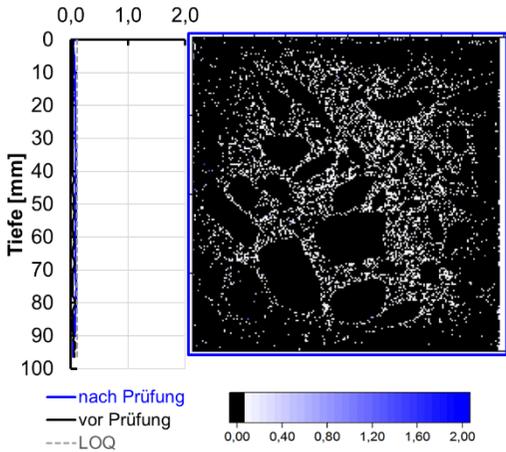
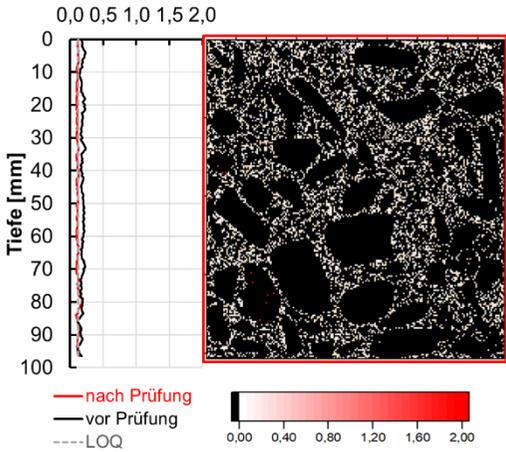
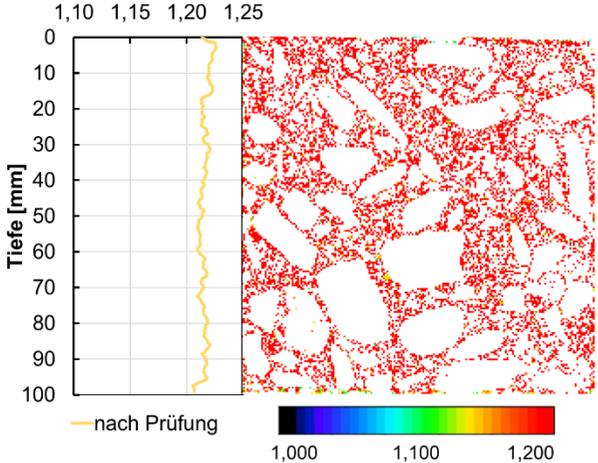
Gesteinskörnung:	GK4	Betonart:	Betonzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie	AKR-Prüfverfahren:	40°C Betonversuch
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-22)-NKL Prisma 400 x 100 x 100 [mm]</p>	 <p>Einfüllseite</p>	 <p>Einfüllseite</p>			
Messfläche 100 x 100 [mm]					
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung	Chlorverteilung		Schwefelverteilung		
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 	<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Schwefel (Signaluntergrundverhältnis)</p> 		

Tabelle 24a*: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-NKL (veränderte Achsenskalierung)**

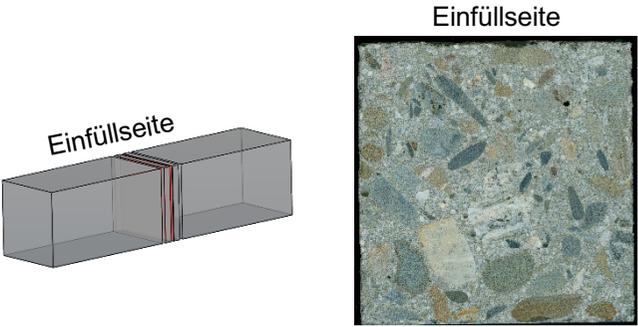
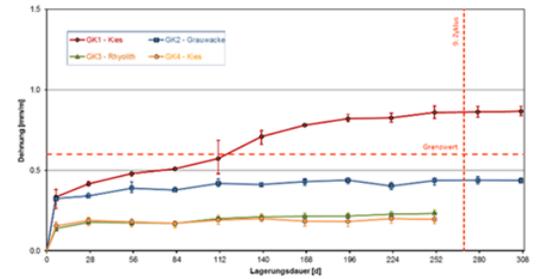
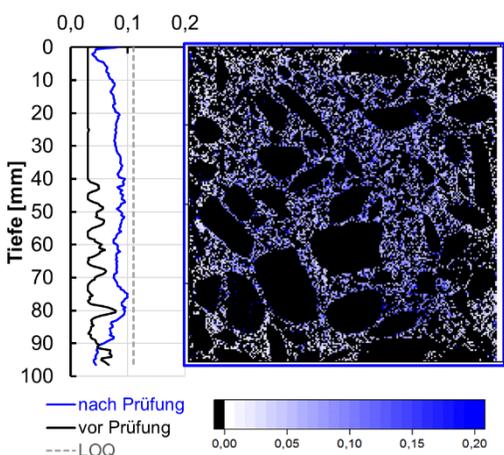
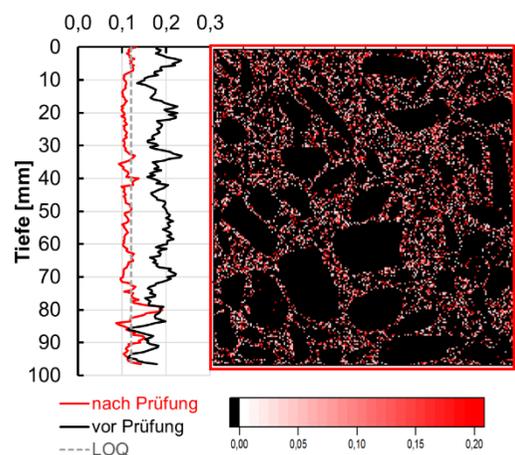
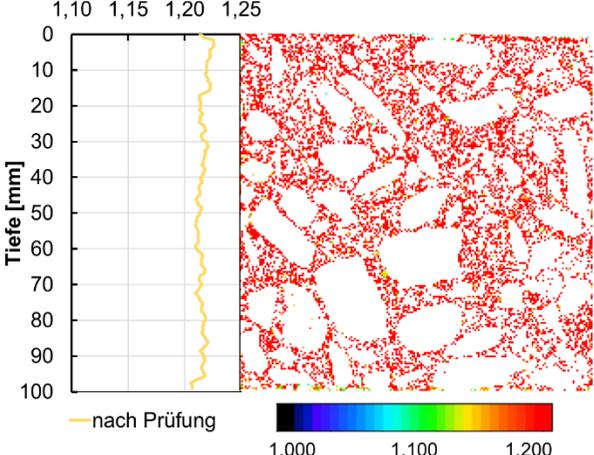
Gesteinskörnung:	GK4	Betonart:	Betonzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie	AKR-Prüfverfahren:	40°C Betonversuch
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-22)-NKL Prisma 400 x 100 x 100 [mm]</p>		<p style="text-align: center;">Einfüllseite</p>  <p style="text-align: center;">Messfläche 100 x 100 [mm]</p>			
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung		Chlorverteilung		Schwefelverteilung	
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Schwefel (Signaluntergrundverhältnis)</p> 	

Tabelle 24b: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-RL**

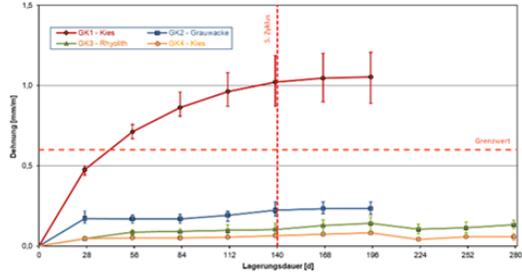
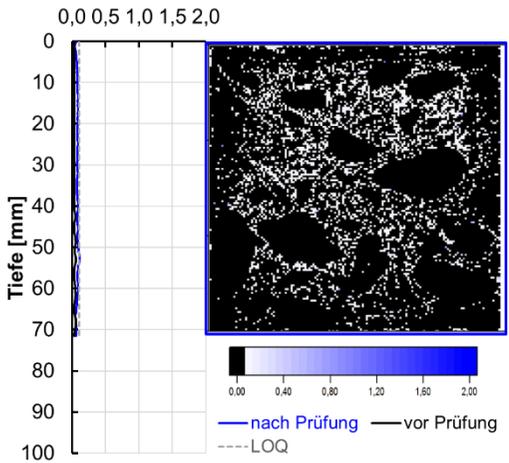
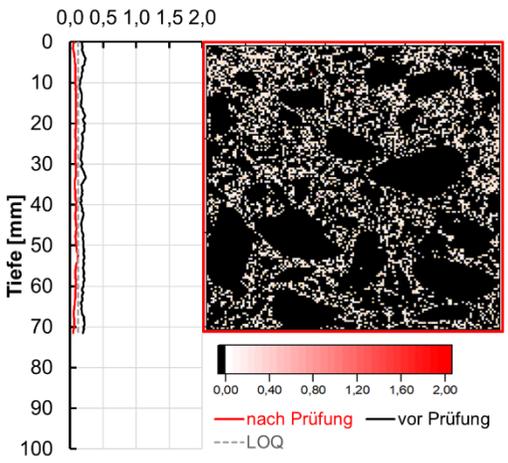
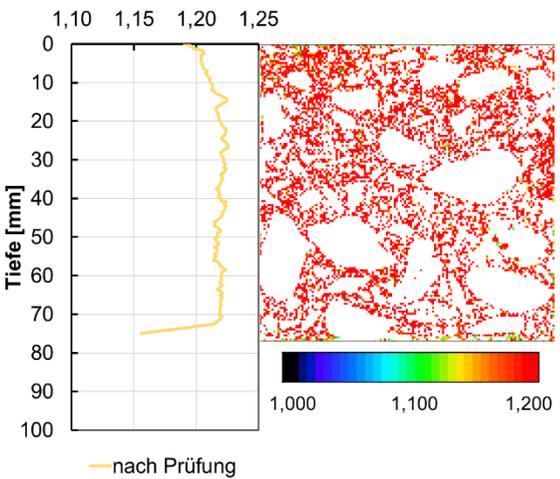
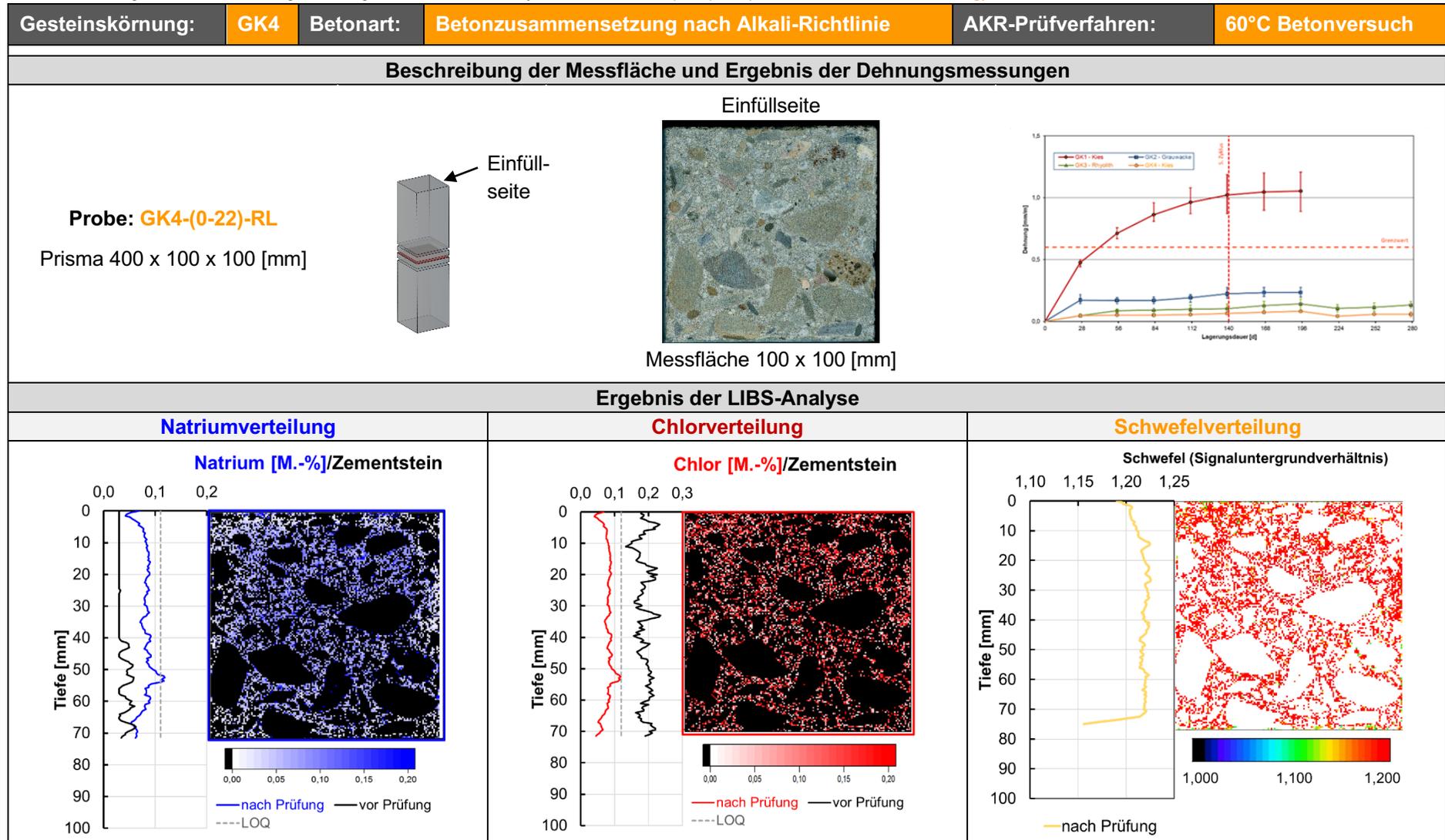
Gesteinskörnung: GK4		Betonart: Betonzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie		AKR-Prüfverfahren: 60°C Betonversuch	
Beschreibung der Messfläche und Ergebnis der Dehnungsmessungen					
<p>Probe: GK4-(0-22)-RL Prisma 400 x 100 x 100 [mm]</p> 		<p>Einfüllseite</p>  <p>Messfläche 100 x 100 [mm]</p>			
Ergebnis der LIBS-Analyse					
Natriumverteilung		Chlorverteilung		Schwefelverteilung	
<p style="text-align: center;">Natrium [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Chlor [M.-%]/Zementstein</p> 		<p style="text-align: center;">Schwefel (Signaluntergrundverhältnis)</p> 	

Tabelle 24b*: Ergebnisse der Dehnungsmessungen und der LIBS-Analyse bei Probe **GK4-(0-22)-RL (veränderte Achsenskalierung)**



5.5 Vergleichende Bewertung der Ergebnisse der gefügeabhängigen Löseversuche an der Gesteinskörnung und der Betonversuche

Es gilt nun die Frage zu beantworten, ob eine Korrelation zwischen den Ergebnissen der Löseversuche an den Korngruppen der einzelnen Gesteinskörnungen einerseits und den Befunden der Betonversuche andererseits besteht. Dies bildet die Voraussetzung für eine eventuell zukünftige Ergänzung bzw. Substitution der Betonversuche durch Löseversuche für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der Löseversuche aller Gesteinskörnungen und den 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr geben die Abbildungen 47a und 47b für den Oberbeton 0/8 (Waschbeton) sowie die Abbildungen 48a und 48b für den Oberbeton (D>8)/Unterbeton. So ist hier einerseits die zeitliche Entwicklung des SiO₂-Überschusses beim 56-tägigem Löseversuch in 1 M KOH-Lösung mit definierter NaCl-Zugabe über das Volumenverhältnis der einzelnen Korngruppen der jeweiligen Gesteinskörnung im Beton gewichtet dargestellt. Es ist hierbei vergleichend das zeitabhängige Lösungsverhalten ohne und mit Bezug auf die BET-Oberfläche ausgewiesen. Andererseits wird hier die zeitliche Entwicklung der mittleren Dehnungen der Prismen im 60 °C-Betonversuch mit Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser sowie mit einer 3%igen und 10%igen NaCl-Lösung aufgezeigt. Eine vergleichende Betrachtung der Diagramme der Löseversuche mit den Dehnungsdiagramm des 60 °C-Betonversuchs mit 3%iger NaCl-Lösung für den Waschbeton in Abbildung 47a zeigt, dass der SiO₂-Überschuss im Eluat nach 56 Tagen mit Zugabe von 0,5 M.-% NaCl ohne Bezug auf die BET-Oberfläche zur gleichen Einstufung der Gesteinskörnungen wie bei den Dehnungen führt. Der Bezug des SiO₂-Überschusses auf die BET-Oberfläche erweist sich hier nicht als zielführend. Offensichtlich ist im vorliegenden Fall der Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteinskörner gegenüber dem der Oberfläche dominant. Die vergleichende Betrachtung der Dehnungen im 60 °C-Betonversuch mit den Ergebnissen der Löseversuche in Abbildung 47b zeigt, dass der SiO₂-Überschuss

im Eluat mit 2 %iger Zugabe von NaCl zur gleichen Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der vier untersuchten Gesteinskörnungen wie beim 60 °C-Betonversuch mit 10%iger NaCl-Lösung führt. Auch hier liefert der zusätzliche Bezug des SiO₂-Überschusses auf die BET-Oberfläche keine zusätzlichen Erkenntnisse.

Zur Bewertung der Ergebnisse der Löseversuche im Kontext des Oberbetons (D>8)/Unterbeton sei angemerkt, dass die in den Abbildungen 48a und 48b aufgeführten gewichteten SiO₂-Überschüsse nicht die Kornfraktion 16/22 berücksichtigen. Trotzdem ist auch hier erkennbar, dass die dehnungsbasierte Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen im hier primär interessierenden 60°C Betonversuch bei Zufuhr von 10 %iger NaCl-Lösung mit den Ergebnissen der Löseversuche mit 2 M.-% NaCl-Zugabe korrelieren. Der zusätzliche Bezug des SiO₂-Überschusses auf die BET-Oberfläche erweist sich vermutlich auch in diesem Fall aufgrund der Dominanz der mineralogischen Parameter als nicht zielführend.

Im Gegensatz zu den korrelativen Betrachtungen zwischen den Ergebnissen der Löseversuche an den Kornfraktionsgemischen und den Betonversuchen mit Alkalizufuhr zeigt sich bei der vergleichenden Betrachtung des SiO₂-Überschusses im Eluat der Gesteinskörnungen ohne NaCl-Zugabe mit den im 40°C- und 60 °C-Betonversuch ermittelten Dehnungen bzw. Rissweiten, dass der Bezug des SiO₂-Überschusses auf die BET-Oberfläche durchaus auch zielführend sein kann. So korrelieren die hohen Dehnungen der Prismen der Betone 0/16 und 0/22 mit der Gesteinskörnung GK1 im 40°C- bzw. 60°C Betonversuch mit dem hohen auf die BET-Oberfläche bezogenen SiO₂-Überschuss im Eluat des Kornfraktionsgemisches von GK1 (Abbildungen 49 und 50). Andererseits zeigt sich, dass die den Grenzwert überschreitende Rissweite der Würfel im 40 °C-Betonversuch bei den Betonen 0/16 und 0/22 mit der Gesteinskörnung GK2 mit dem gewichteten SiO₂-Überschuss dem Kornfraktionsgemisch von GK2 ohne Bezug zur BET-Oberfläche korreliert.

Basierend auf den bisher untersuchten vier Gesteinskörnungen kann das Fazit gezogen werden, dass durchaus eine Korrelation zwischen den Ergebnissen der Löseversuche der Kornfraktionsgemische der Gesteinskörnungen und den Dehnungen bzw. Rissweiten im Betonversuch besteht.

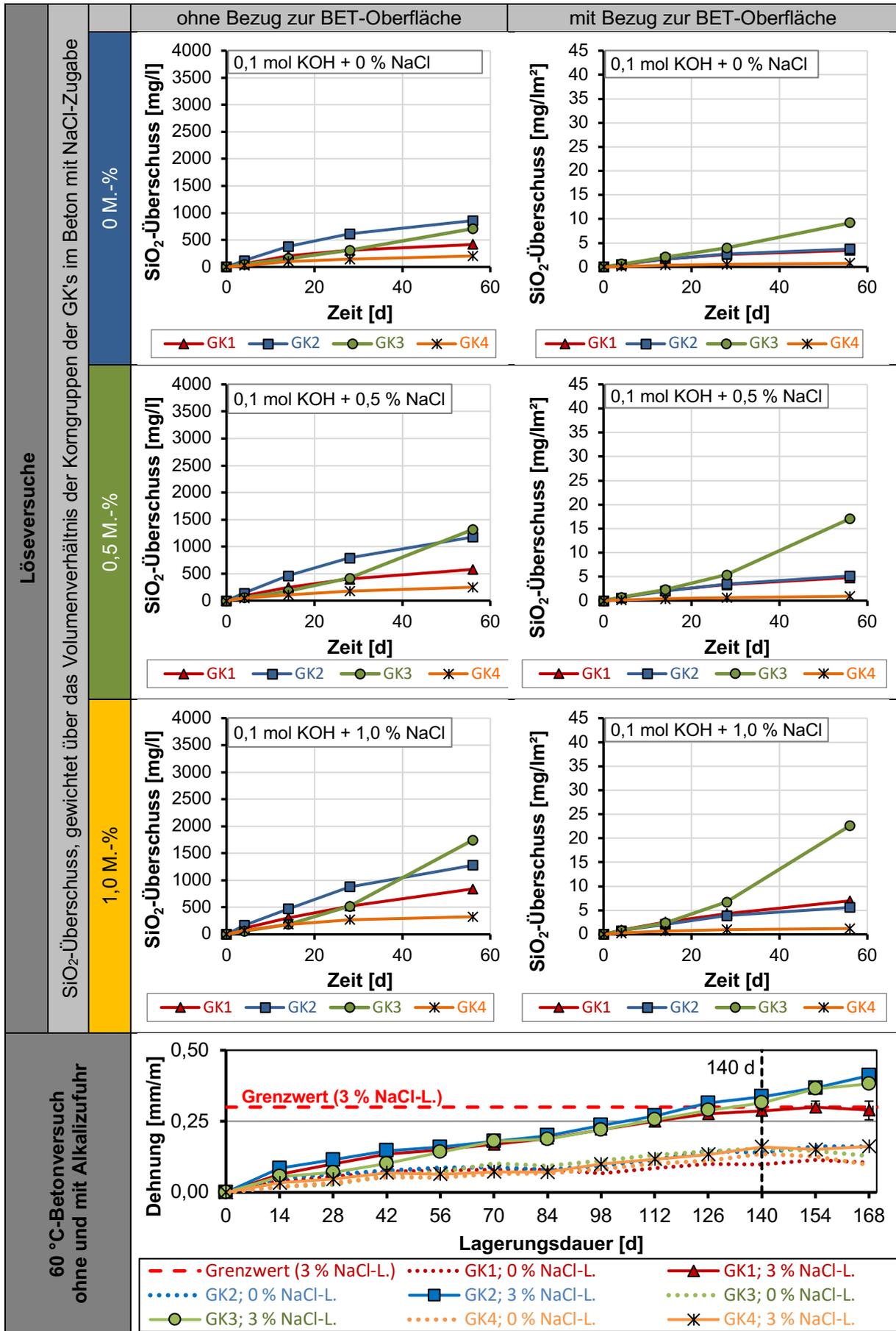


Abbildung 47a: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton 0/8 (Waschbeton)

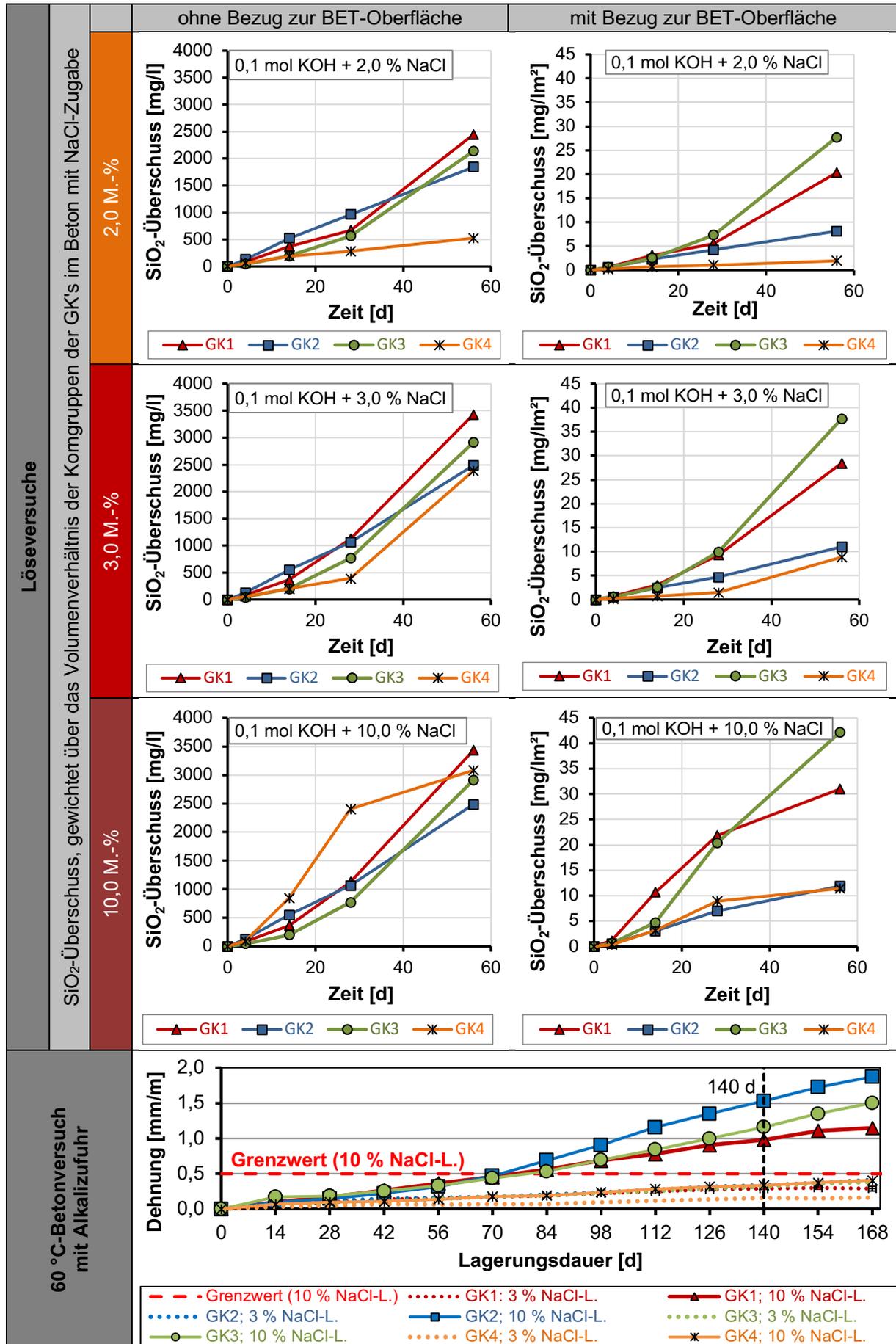
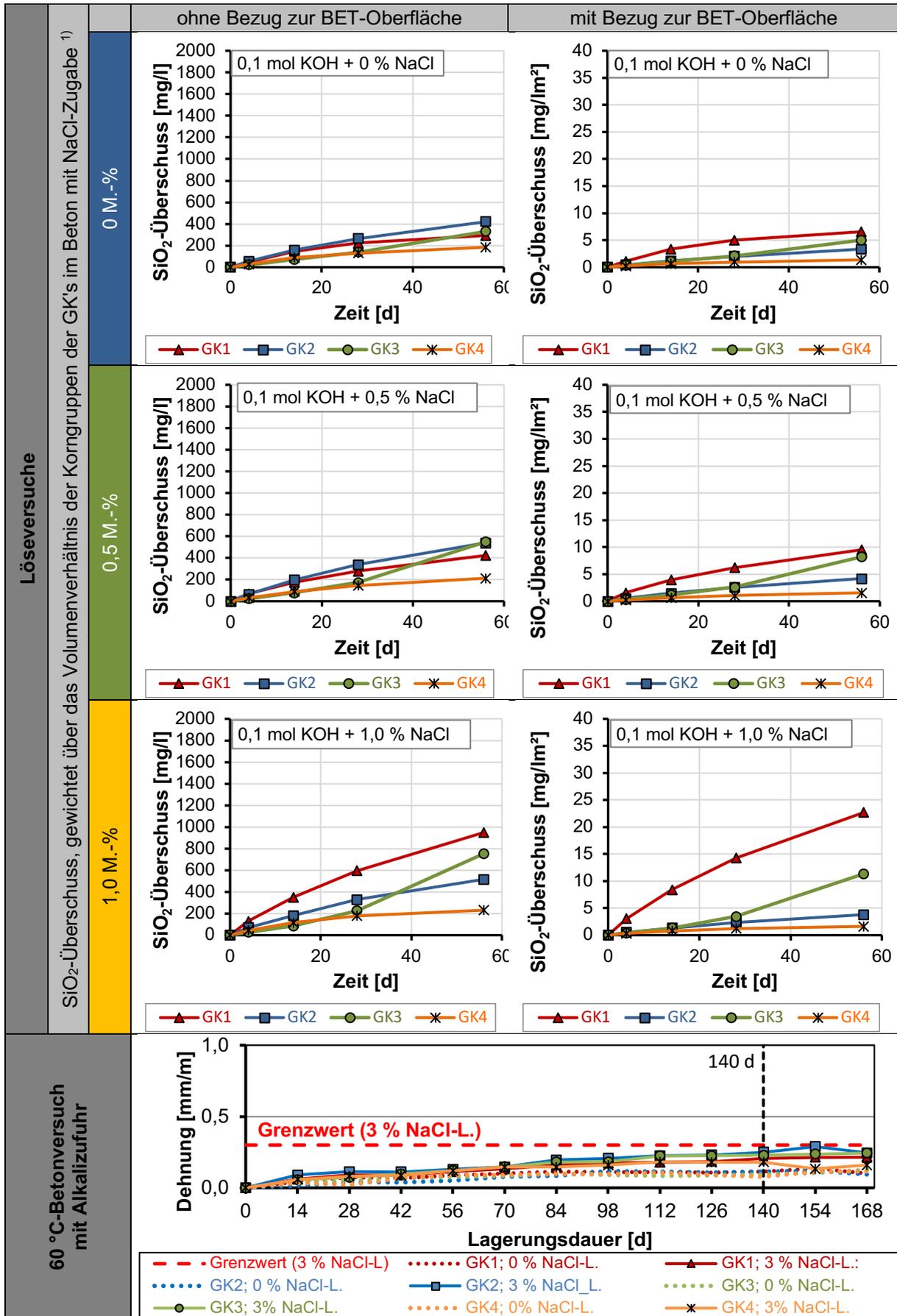
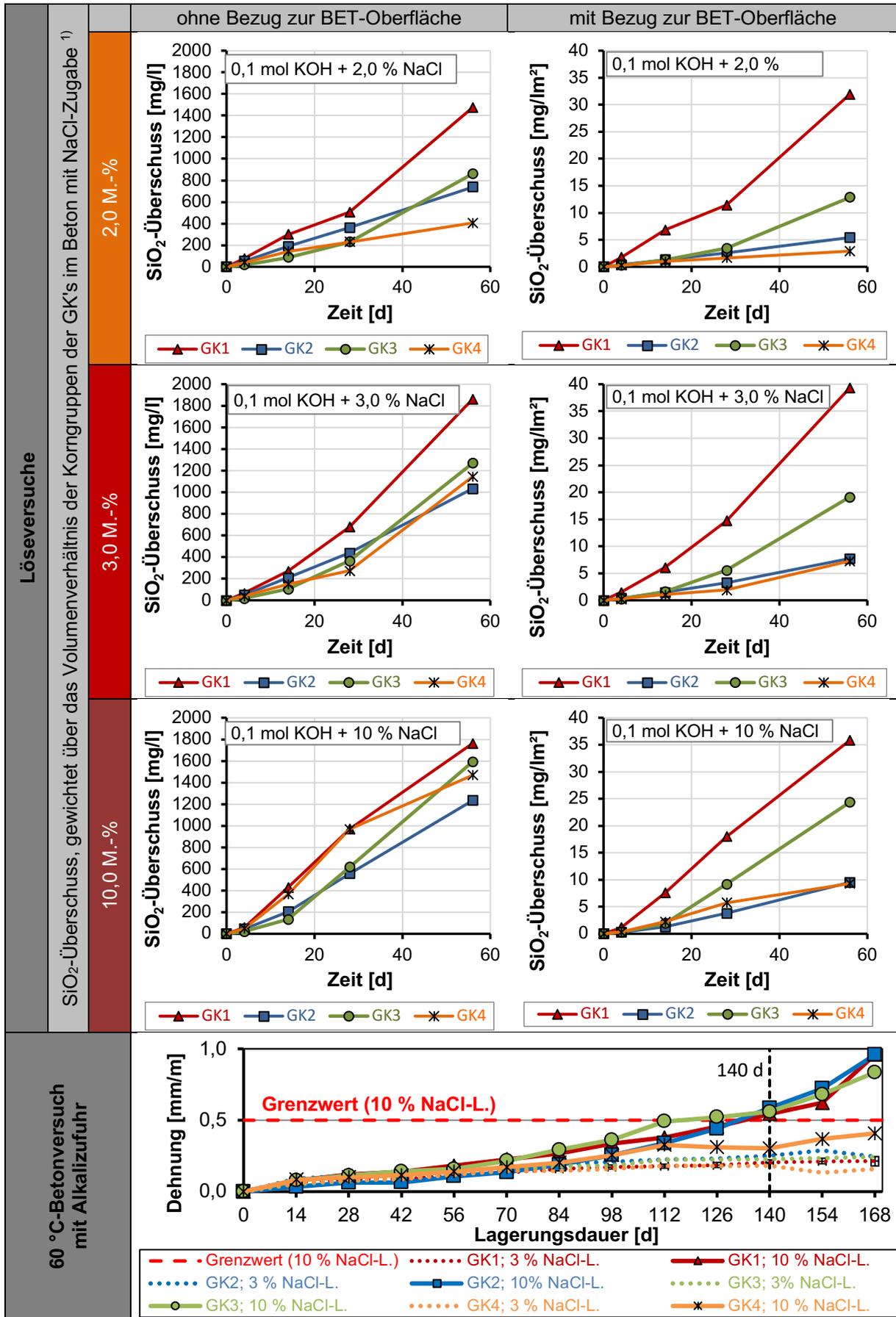


Abbildung 47b: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton 0/8 (Waschbeton)



1) ohne Berücksichtigung der Kornfraktion 16/22 [mm]

Abbildung 48a: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton (D>8)/ Unterbeton



1) ohne Berücksichtigung der Kornfraktion 16/22 [mm]

Abbildung 48b: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton (D>8)/ Unterbeton

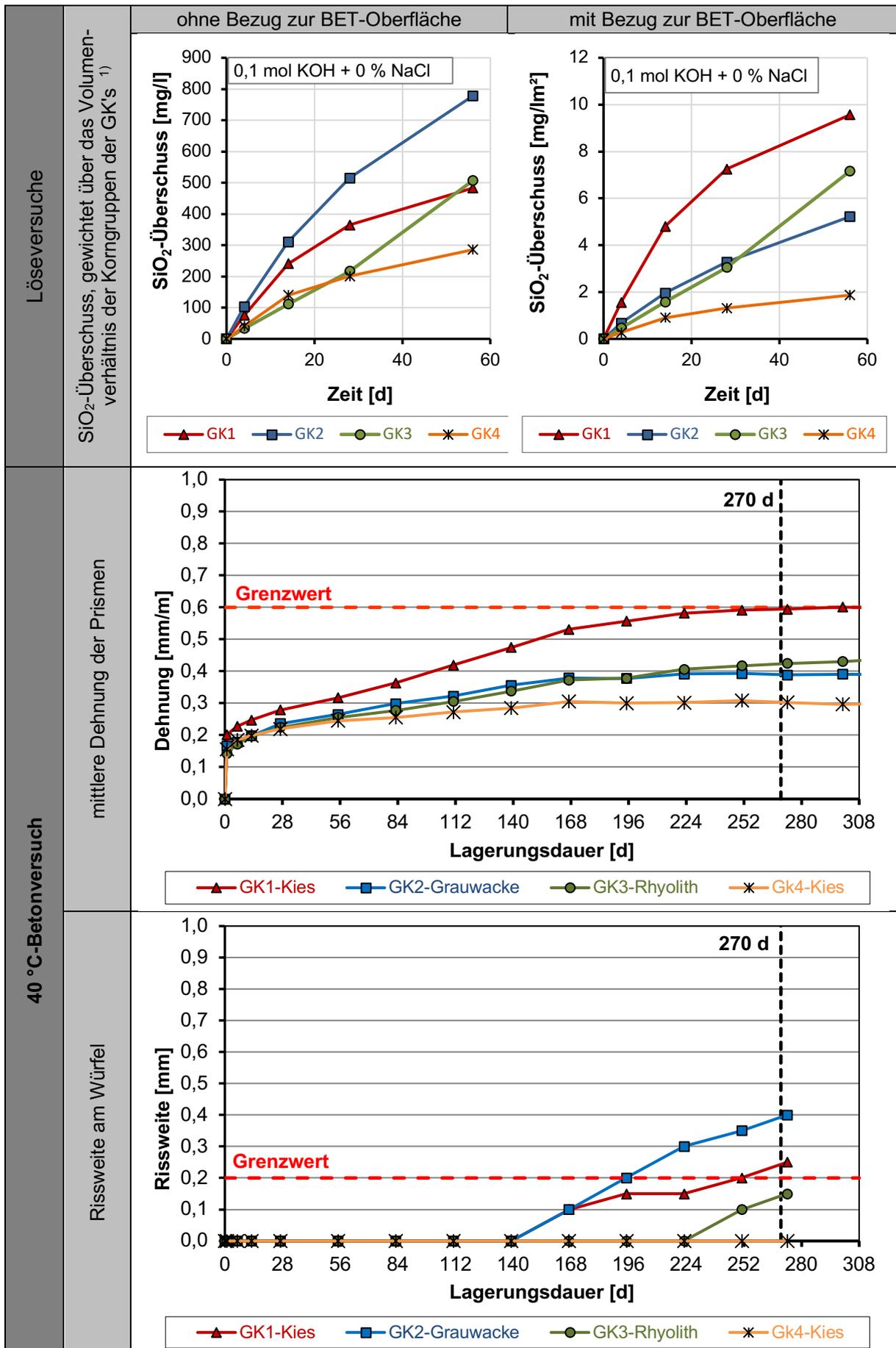
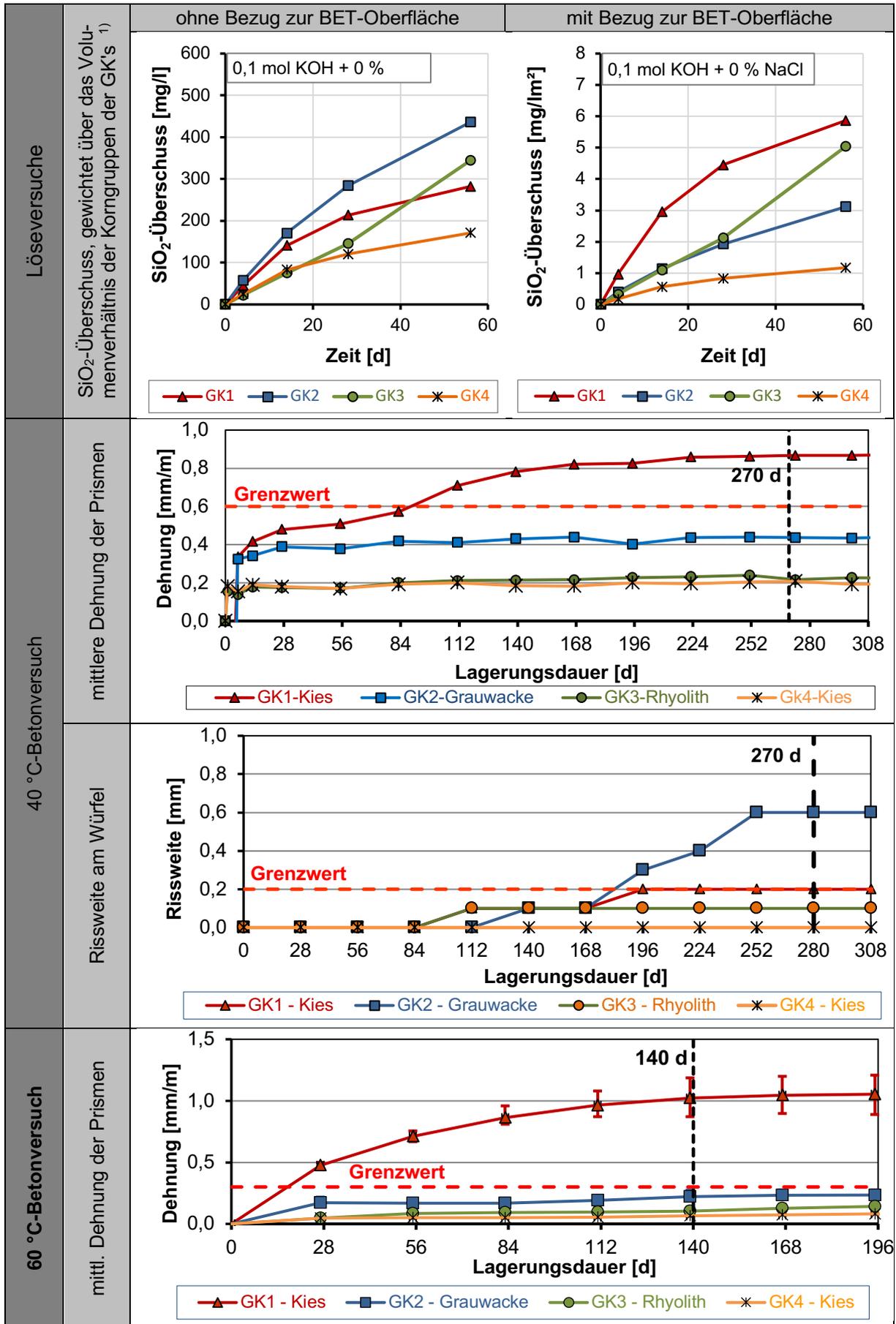


Abbildung 49: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 40 °C-Betonversuchs nach Alkalirichtlinie (Beton 0/16)



1) ohne Berücksichtigung der Kornfraktion 16/22 [mm]

Abbildung 50: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und der Betonversuche nach Alkalirichtlinie (Beton 0/22)

6 Zusammenfassende Betrachtungen und Ausblick

Zur Verifizierung des Einflusses des von außen zugänglichen Korngefüges auf die Löslichkeit von SiO_2 und des interagierenden Al_2O_3 in einer alkalischen Lösung ohne und mit definierter NaCl -Zugabe erfolgten exemplarisch an vier Gesteinskörnungen mit unterschiedlicher Alkaliempfindlichkeit (je ein Kies und ein gebrochenes Festgestein der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-S und EI-S) grundlegende Untersuchungen. Diese umfassten die Charakterisierung des Mineralbestandes und des Porengefüges aller Gesteinskörnungen, Löseversuche an Korngemengen und Einzelkörnern sowie alle Betonversuche nach dem ARS 04/2013 [6] und der Alkali-richtlinie des DAfStb [21]. Aufbauende Untersuchungen mit Mikroskopie und LIBS dienten der Bewertung der Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale sowie des Eintrags bzw. der Auslaugung von Alkalien bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen. Zusätzlich erfolgten zur Verifizierung der Leistungsfähigkeit der Löseversuche für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen vergleichende korrelative Betrachtungen zwischen den Ergebnissen der Löseversuche an Korngemengen und denen der Betonversuche.

Bei der Gesteinskörnung GK1 (EIII-S) handelt es sich um einen quarzreichen Kies mit geringen Anteilen von Mikroklin, Plagioglase/Albite und Muskovite. Als Gesteinskörnung GK2 (EIII-S) gelangte eine Grauwacke mit hohem Gehalten an Quarz und albitreichen Plagioglas als gebrochenes Festgestein zum Einsatz. Die Gesteinskörnung GK3 (EI-S) ist ein Rhyolith als gebrochenes Festgestein, dessen Mineralbestand auf einen Quarz-Feldspat-Porphyr schließen lässt. Die Gesteinskörnung GK4 (EI-S) ist ein sandsteinreicher Kies (Quarz-Feldspat-Kies).

Die vielfältigen an den Gesteinskörnungen ermittelten Porenstrukturkennwerte sind unterschiedlich im Kontext der Löseversuche zu bewerten. So führt der bisher im BTU-SP-Test verwendete Bezug des SiO_2 -Überschusses auf die offene Porosität nicht zwangsläufig zum gleichen Trend wie beim adäquaten Bezug auf die spezifische Oberfläche. So wurde beispielsweise für die Kornfraktion 8/16 der GK4 eine mittlere offene Porosität von 3,53 Vol.-% und eine mittlere spezifische Oberfläche von

0,89 m^2/g bestimmt. Bei der gleichen Kornfraktion von GK1 wird trotz signifikant geringerer mittlerer offener Porosität von 0,88 Vol.-% eine deutlich höhere mittlere spezifische Oberfläche von 1,94 m^2/g mit BET ermittelt. Aus diesem Grund erfährt der SiO_2 -Überschuss im Eluat beim Bezug auf die unterschiedlichen Porenstrukturparameter eine gegenläufige Bewertung.

Bei der zusätzlich durchgeführten Visualisierung und Quantifizierung der von außen zugänglichen Oberfläche an ausgewählten Einzelkörnern mit der Röntgen 3D-CT zeigte sich, dass basierend auf der limitierenden minimalen Ortsauflösung von ca. 11 bis 16,5 μm die untersuchten Einzelkörner der Grauwacke und des Rhyoliths aus dem Kies einen signifikant größeren von außen zugänglichen Oberflächenanteil als die aus dem gebrochenen Festgestein besitzen. Bemerkenswert ist aber auch, dass die tomografisch ermittelten von außen zugänglichen Oberflächenanteile bei den Einzelkörnern der einzelnen Gesteinsarten sehr stark schwanken. Dies gilt im besonderen Maße für alle bei den Kiesen GK1 und GK4 vorkommenden Gesteinsarten. Die BET-Analyse der tomografierten Einzelkörner ergab erwartungsgemäß, dass sich die so ermittelte spezifische Oberfläche aufgrund der höheren Ortsauflösung des Verfahrens ca. um den Faktor 1000 erhöht. Eine Korrelation zwischen den mit 3D-CT und BET ermittelten spezifischen Oberflächen ist nicht gegeben. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welcher von außen zugänglicher Porengrößenbereich für die im Löseversuch stattfindenden Transport- und Löseprozesse relevant ist. Es wird vermutet, dass aufgrund der hohen Temperatur des Eluationsmediums (80 °C) auch kleinere Poren und Risse (< 0,1 μm) an diesen Prozessen beteiligt sind. Aus diesem Grund wurde der bei den Löseversuchen ermittelte SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalt im Eluat auf die mittlere BET-Oberfläche der jeweiligen Kornfraktion bezogen.

Bei den Löseversuchen an den fraktionsspezifischen Korngemengen in 1 M KOH-Lösung der Gesteinskörnungen zeigte sich, dass sich mit zunehmender NaCl -Zugabe zum Eluationsmedium (0,5, 1,0, 2,0, 3,0 und 10,0 M.-%) die Auslaugung von SiO_2 erhöht und von Al_2O_3 vermindert. Auffallend ist allerdings, dass die Löslichkeit von Al_2O_3 bei GK4 und hier im besonderen Maße in der Kornfraktion 2/8 ohne und bei geringer NaCl -Zugabe wesentlich stärker als bei den anderen Gesteinskörnungen ausgeprägt ist. Dies ist

deshalb so erwähnenswert, weil dadurch mehr SiO_2 alumosilikatisch gebunden wird und so die schädigende AKR eine Verminderung erfährt.

Bei den zusätzlich durchgeführten Löseversuchen an den tomografierten Einzelkörnern in mit Zugabe von 1 M.-% NaCl zeigte sich, dass nur vereinzelt bei den untersuchten Gesteinsarten eine Korrelation zwischen dem SiO_2 - bzw. Al_2O_3 -Gehalt im Eluat und der absoluten BET-Oberfläche nachweisbar ist. Ursächlich hierfür ist neben dem Erfordernis der Durchführung weiterer Löseversuche zur statistischen Absicherung der Ergebnisse vermutlich der Umstand, dass neben der Oberfläche noch weitere Parameter, wie beispielsweise die mineralogische Zusammensetzung des Einzelkorns, maßgebend das Löseverhalten des Korns beeinflussen.

Bei den parallel zu den Löseversuchen durchgeführten Betonversuchen nach dem ARS 04/2013 [6] zeigte sich, dass unabhängig von der Betonart (Oberbeton 0/8 bzw. der Oberbeton ($D>8$)/Unterbeton) die Ergebnisse des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr und der Klimawechsellagerung zu einer unterschiedlichen Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung GK4 führt. So ist die Gesteinskörnung GK4 nur bei der KWL als alkaliempfindlich einzustufen. Bei der aufbauend nach der KWL durchgeführten Dünnschliffmikroskopie wies jedoch die Gesteinskörnung GK4 in den Fraktionen 8/16 und 16/22 keinerlei AKR-Schädigungen auf. Vielmehr gehen die hier vorgefundenen AKR-Merkmale ausschließlich von der Sandfraktion aus. Überlagert wird die schädigende AKR von einer stark ausgeprägten SEB. Dies stellt ein Stück weit die Einstufung der GK4 als alkaliempfindlich in Frage.

Ein adäquates Fazit muss aus den Ergebnissen der Betonversuche nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] gezogen werden. So wird hier die Gesteinskörnung GK2 nur im 40 °C-Betonversuch und nicht im 60 °C-Betonversuch als alkaliempfindlich eingestuft.

Aufschlussreich sind auch die Ergebnisse der vor und nach allen Betonversuchen durchgeführten LIBS-Analysen an den Vertikalschnitten der Betonprüfkörper. Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Nach 10 Zyklen des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr stellt sich im Kernbereich der Betonprüfkörper mit den pessimalen Betonrezepturen nach dem ARS 04/2013 [6]

eine gleichmäßige Natrium- und Chloridverteilung ein. Erwartungsgemäß erhöht sich dort mit zunehmender NaCl-Konzentration der Tausalzlösung der mittlere Na- und Cl-Gehalt. Wider Erwarten werden umlaufend in der Betonrandzone eine Abreicherung an Natrium und eine Anreicherung von Chlorid vorgefunden.

- Die 12 Zyklen der Klimawechsellagerung der Betonprüfkörper mit den pessimalen Rezepturen nach dem ARS 04/2013 führen bei der einseitigen Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser zu einer Auslaugung von Natrium bis in eine Tiefe von ca. 40 mm. Im Gegensatz dazu hat die einseitige Beaufschlagung der Betonprüfkörper mit 3,6 %iger NaCl-Lösung einen hohen Tausalzeintrag zur Folge. Dabei stellen sich im Kernbereich der Prüfkörper in der Regel geringere Na- und Cl-Konzentrationen als nach dem 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung ein. Wider Erwarten ist auch hier in der Betonrandzone der beaufschlagten Prüffläche eine Abreicherung an Natrium und eine Anreicherung an Chlorid erkennbar. In abgeschwächter Form tritt dies auch in der Betonrandzone der anderen Seitenflächen auf.
- Nach dem 40 °C- bzw. 60 °C-Betonversuch wurden in den Prüfkörpern mit der Betonrezeptur nach der Alkali-Richtlinie maximale Na-Auslaugungstiefen von 30 mm bzw. 20 mm ermittelt. Aufgrund des ungünstigen Oberfläche/Volumen-Verhältnisses sind die Auslaugungen in den Eckbereichen der Prüfkörper besonders groß.

Bei der Zusammenführung der Ergebnisse des 60 °C-Betonversuchs mit 3 %- bzw. 10 %-iger NaCl-Lösung mit denen der Löseversuche an den Korngemengen der einzelnen Gesteinskörnungen ist bei ausgewählten NaCl-Zugabemengen zum Eluat eine Korrelation zwischen den Dehnungen und dem gewichteten SiO_2 -Überschuss im Eluat nach 56tägigem Löseversuch erkennbar. So zeigt sich beispielsweise beim Waschbeton, dass der gewichtete SiO_2 -Überschuss im Eluat nach 56 Tagen mit Zugabe von 0,5 M.-% und 1,0 M.-% NaCl ohne Bezug auf die BET-Oberfläche zur gleichen Einstufung der Gesteinskörnungen wie bei den Dehnungen im 60 °C-Betonversuch mit 3 %iger NaCl-Lösung führt. Außerdem korrelieren die im 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung ermittelten Dehnungen mit dem gewichteten SiO_2 -Überschuss im Eluat bei Zugabe von 2 M.-% NaCl.

Auch hier liefert der Bezug auf die BET-Oberfläche keine zusätzlichen Erkenntnisse. Im Gegensatz dazu ist bei den Betonversuchen nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb [21] der Bezug des gewichteten SiO_2 -Überschusses auf die BET-Oberfläche zielführend. So führt hier die Relativierung des gewichteten SiO_2 -Überschusses durch den Bezug auf die BET-Oberfläche zur gleichen Einstufung der Gesteinskörnungen im Löseversuch und im 40°C- bzw. 60 °C-Betonversuch (Dehnungsmessung der Prismen).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die bisherigen Ergebnisse der korrelativen Betrachtung zwischen den Löseversuchen mit NaCl-Zugabe und den Betonversuchen nach dem ARS 04/2013 durchaus vielversprechend sind. Allerdings lässt die geringe Anzahl der bisher untersuchten Gesteinskörnungen noch keine verallgemeinernden Aussagen zu. Es wird deshalb empfohlen, die vergleichenden Untersuchungen zwischen den Löseversuchen an Kornmischungen der einzelnen Fraktionen und den Betonversuchen nach dem ARS 04/2013 [6] mit einer möglichst hohen Anzahl an Gesteinskörnungen fortzuführen. Der Untersuchungsumfang ist dabei wie folgt zu präzisieren:

- Verzicht auf Löseversuche in 1 M KOH-Lösung mit 10 M.-% NaCl-Zugabe
- Erhöhung der Einwaage der Gesteinskörnung bei Beibehaltung des Mischungsverhältnisses zwischen GK und Eluat von 1:10 (ggf. alternativ mehrere Ansätze)
- zusätzliche Durchführung adäquater Löseversuche mit der Kornfraktion 16/22 der jeweiligen Gesteinskörnung (Mindesteinwaage der GK: 270 bis 540 g)
- Erprobung alternativer Durchführung von Löseversuchen an Gemischen von Kornfraktionen, die der Sieblinie der Gesteinskörnung im Beton entsprechen
- Verzicht auf BET-Analysen der Gesteinskörnungen, da der Oberflächenbezug des SiO_2 -Überschusses bei den Löseversuchen in 0,1 M KOH-Lösung mit NaCl-Zugabe nicht zielführend ist (Dominanz anderer Einflussgrößen)

7 Literaturverzeichnis

- [1] Weise, F., Kind, T., Stelzner, L. und M. Wieland: *Dunkelfärbung der Betonfahrbahndecke im AKR - Kontext – Ursachenanalyse mit innovativer Prüftechnik*. In: Beton und Stahlbetonbau, 113 (2018), Heft 9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 647-655.
- [2] Angerer, R., Marquardt, D. et al.: *Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton*. Überarbeitung Dezember 2018.
- [3] ARS 12/2006 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 12/2006; Sachgebiet 06.1: Straßenbaustoffe; Anforderungen, Eigenschaften; 06.2: Straßenbaustoffe; Qualitätssicherung; Technische Regelwerke im Straßenbau; *Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 17.05.2006.
- [4] TL Beton-StB 07: *Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton*, FGSV, 2007.
- [5] RStO 12: Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement (Hrsg.) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV Verlag GmbH, Köln, 2012
- [6] ARS 04/2013: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013; Sachgebiet 06.1: Straßenbaustoffe; Anforderungen, Eigenschaften; 06.2: Straßenbaustoffe; Qualitätssicherung; Technische Regelwerke im Straßenbau; *Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Verkehrsblatt Heft 5, März 2013.
- [7] DIN EN 12620: *Gesteinskörnungen für Beton*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Juli 2013.
- [8] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen - TP B-StB 14: *Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion von Beton bei Alkalizufuhr von außen (FIB-Klimawechselanlage)*. Entwurf 2016.
- [9] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen - TP B-StB 14: *Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion von Beton bei Alkalizufuhr von außen (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen)*. Entwurf 2016.
- [10] Bachmann, R.: *Über das Zusammenspiel chemischer und physikalischer Gesteinsparameter zum besseren Verständnis des Ablaufs einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Dissertation, Cottbus, 2014.
- [11] Hüniger, K.-J.: *Zum Reaktionsmechanismus präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz bei ihrer Verwendung als Gesteinskörnung im Beton*. Cottbus: Habilitation, 2005.
- [12] Hill, S.: *Zur direkten Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz anhand deren Silicium- und Aluminiumlösungsverhalten*, Dissertation, Cottbus, 2004.
- [13] Stanton, T.: *Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate*. American Society of Civil Engineers, Nr. 66, pp. 59-81, 1940.
- [14] Powers, T and H. Steinour: *An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction Part 1 - The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion*. Journal of the American Concrete Institute, Bd. 26, Nr. 6, pp. 497-516, 1955.
- [15] Powers, T. and H. Steinour: *An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction Part 2 - A Hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete*.

- Journal of the American Concrete Institute, Bd. 51, Nr. 4, pp. 785-812, 1955.
- [16] Locher, F. und S. Sprung: *Ursache und Wirkungsweise der Alkali-reaktion*. In Betontechnische Berichte, Düsseldorf, Forschungsinstitut der Zementindustrie, 1973, pp. 101-123.
- [17] Chatterji, S., Thaulow, N. and A. Jensen: *Studies of alkali-silica-reaction. Part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism*. In: Cement and Concrete Research, Nr. 18, pp. 363-366, 1988.
- [18] Chatterji, S., Thaulow, N. and A. Jensen: *Studies of alkali-silica-reaction. Part 5. Verification of a newly proposed reaction mechanism*. In: Cement and Concrete Research, Nr. 19, pp. 177-183, 1989.
- [19] Stark, J.; Erfurt, D.; Freyburg, E.; Giebson, C.; Seyfarth, K. und B. Wicht: *Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Schriftenreihe des F. A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Weimar, 2008.
- [20] Qi, Y., Ziyun, W.: *Study of expansion mechanism of A.S.R. using sol-gel expansion method*. In: Mingshu, T., Min, D. (eds.): Proceedings of the 12th ICAAR, Beijing, China (2004), pp. 226-229.
- [21] DAfStb-Richtlinie: *Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Beuth Verlag, Berlin, 2013.
- [22] DIN 1045 Teil 2: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Berlin: Beuth Verlag GmbH, August 2014.*
- [23] DAfStb-Richtlinie: *Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [24] Kronemann, J.: *Untersuchung der zeitlichen Abhängigkeit von Löseprozessen in hochalkalischen Lösungen zur Charakterisierung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen*. Dissertation, Cottbus, 2015.
- [25] Nixon, P.J., Page, C.L., Canham, I., Bollinghaus, R.: *Influence of sodium chloride on the ASR*. Advances in Cement Research 1 (1988), pp. 99-105.
- [26] Kawamura, M., Takeuchi, K., Sugiyama, A.: *Mechanisms of expansion of mortars containing reactive aggregate in NaCl solution*. Cement and Concrete Research 24 (1994), pp. 621-632.
- [27] Dressler, A.: *Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton*. Dissertation, München, 2013.
- [28] Giebson, C.: *Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrhanddecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel*. Dissertation, Weimar, 2013.
- [29] DIN EN 1097 Teil 6: *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme*; Deutsche Fassung, Beuth Verlag Berlin, 2013.
- [30] DIN EN 1936: *Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität*. Deutsche Fassung, Beuth Verlag Berlin, 2007.
- [31] ISO 9277: *Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption - BET-Verfahren*. Beuth Verlag Berlin, 2010.
- [32] Schmidt-Döhl, F. und M. Heidemann: *Anwendung der Mikro-Röntgenfluoreszenz zur Baustoffuntersuchung*. Workshop TU Hamburg-Harburg, 16.3.2010, S. 1-34, 2010, <https://www.tuhh.de/t3resources/bp/Publikationen/WorkshopRFA16032010TUHH.pdf>
- [33] <https://www.rigaku.com/sites/default/files/bragg.jpg>
- [34] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/xrxdiffraction/powder.php>

- [35] Weise, F., Onel, Y. und J. Goebbels: *Analyse des Gefüge- und Feuchtezustandes in mineralischen Baustoffen mit der Mikro-Röntgen-3D-Computertomografie*. In: Bauphysik 29 (2007) Heft 3, S. 194-201.
- [36] Weise, F., Voland, K., Pirskawetz, S. und D. Meinel: *Analyse AKR-induzierter Schädigungsprozesse in Beton - Einsatz innovativer Prüftechniken*. In: Beton und Stahlbetonbau, 107 (2012), Heft 12, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 805-815.
- [37] Mathworks, T.: MATLAB (Version R2017b). Natick, MA, USA, 2018.
- [38] Young, I. T., Gerbrands, J. J., & van Vliet, L. J.: *Fundamentals of Image Processing (2.2 ed.)*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 1998.
- [39] Zack, G. W., Rogers, W. E., & Latt, S. A.: *Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency*. J Histochem Cytochem, 25(7), 741-753. doi:10.1177/25.7.70454, 1977.
- [40] Pringle, K. K.: *Visual Perception by a computer*. In A. Grasselli (Ed.), Automatic interpretation and classification of images (pp. 277-284). New York: Academic Press, 1969.
- [41] DIN ISO 9277 (2014): *Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Festkörpern mittels Gasadsorption – BET-Verfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Januar 2014.
- [42] ISO 9277 (2010): *Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [43] DIN ISO 15901-1 (2019): *Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, März 2019.
- [44] ISO 15901-1 (2016): *Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption — Part 1: Mercury Porosimetry*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, April 2016.
- [45] <https://www.thermofisher.com/de/de/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/icp-oes-information/icp-oes-system-technologies.html>
- [46] TP B-StB – Teil 1.1.09: *AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr)*. Ausgabe Juni 2018.
- [47] TP B-StB – Teil 1.1.10: *AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (Klimawechsellagerung)*. Ausgabe Juni 2018.
- [48] Müller, Ch., Weise, F., Borchers, I., Voland, K.: *Auswirkungen der Gefügedichte der Betone auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Abschlussbericht des AiF-Vorhabens 15248 N.
- [49] Müller, Ch., Borchers, I.; Eickschen, E.: *AKR-Prüfverfahren: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren*. In: Straße und Autobahn, Heft 5 2008, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 272-281.
- [50] Stark, J. et. al: *AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen*. In: beton, 12/2006 (56. Jahrgang), Verlag Bau+Technik GmbH, S.: 574-581.
- [51] ASTM C 856-11: *Standard practice for petrographic examination of hardened concrete*. Philadelphia, 2011.
- [52] Wiggerhauser, H.; Schaurich, D.; Wilsch, G.: *LIBS for non-destructive testing of element distributions on surfaces*. In: NDT&E International, vol. 31, no. 4, pp. 307-313, 1998.
- [53] Wilsch, G.; Weritz, F.; Schaurich, D.; Wiggerhauser, H.: *Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy*. In: Construction and Building Materials, vol. 19, no. 10, pp. 724-730, 2005.

- [54] Weritz, F.; Schaurich, D.; Wilsch, G.: *Detector comparison for sulfur and chlorine detection with laser induced breakdown spectroscopy in the near-infrared-region*. In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 62, no. 12, pp. 1504-1511, 2007.
- [55] Millar, S.; Wilsch, G.; Eichler, T.; Gottlieb, C.; Wiggerhauser, H.: *Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalysen*. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 110 (2015), Heft 8, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 501-510.
- [56] Taffe, S.; Wilsch, G.; Schaurich, D.; Weritz, F.: *Einsatz der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) im Bauwesen, Teil 1: Verfahrensbeschreibung und Durchführung von Zementanalysen*. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 102 (2008), Heft 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 14-15.
- [57] Taffe, S.; Wilsch, G.; Schaurich, D.; Weritz, F.: *Einsatz der Laser-Induzierten Breakdown, Teil 2: Ermittlung von bauschädlichen Salzen*. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 103 (2008), Heft S2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 14-15. (Nachdruck aus *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), Heft 8, S. 693–694).
- [58] Kramida, A.; Ralchenko, Yu; Reader, J.; NIST ASD TEAM: *NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.6)*, (Online). Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2018, May 8], National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [59] Weise, F., Millar, S. und G. Wilsch: *Analyse des Tausalzeintrags in Fahrbahndeckenbetone mit neuartiger Prüftechnik*. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 113 (2018), Heft 9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 656-666.
- [60] Millar, S.; Gottlieb, C.; Günther, T.; Sankat, N.; Wilsch, G.; Kruschwitz, S.: *Chlorine determination in cement-bound materials with Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) - a review and validation*. In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 147, pp. 1-8, 2018.

Bilder

- Abbildung 1a: Exemplarische Erscheinungsbilder für die Schadenskategorien [2]
- Abbildung 1b: Prüfmethode für die Einstufung hier betrachteter Gesteinskörnungen in die Alkaliempfindlichkeitsklassen
- Abbildung 2: Mögliche Verfahren für Eignungsnachweise durch anerkannte AKR-Gutachter zur Vermeidung von AKR-Schäden an Betonfahrbahndecken nach [6]
- Abbildung 3: Prüfablauf bei WS-Grundprüfung nach Verfahren V2 [6]
- Abbildung 4: Bewertungsmatrix des BTU-SP-Tests
- Abbildung 5: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes zur Erreichung der Zielstellung
- Abbildung 6: Beschreibung der eingesetzten MRFA-Analysetechnik
- Abbildung 7: Prinzip und Ergebnis der XRD-Messungen in Anlehnung an [33, 34]
- Abbildung 8: Messaufbau der 3D-CT für die Visualisierung und Quantifizierung der Risse und Poren im Einzelkorn
- Abbildung 9: Binarisierung des originalen 3D-Datensatzes A mit konservativem Grauschwellwert im Modul M1
- Abbildung 10.1: Binarisierung des originalen 3D-Datensatzes A mit realem Grauschwellwert im Modul M2
- Abbildung 10.2: Binarisierung der 1. Ableitung des originalen 3D-Datensatzes A mit dem ermittelten Gradientenschwellwert im Modul M2
- Abbildung 10.3: Multiplikation des binären 3D-Datensatzes T2 mit dem binären abgeleiteten 3D-Datensatz G2
- Abbildung 11: Multiplikation des binären 3D-Datensatzes T2 mit dem binären abgeleiteten 3D-Datensatz G2 mit anschließender Entfernung kleinerer Objekte
- Abbildung 12: BET-Diagramm für Mehrpunktemessung in Anlehnung an [41]
- Abbildung 13: Beschreibung der eingesetzten Analysetechnik für die Bestimmung der spezifischen Oberfläche mit BET-Auswerteverfahren
- Abbildung 14: Verwendetes Messgerät für die Hg-Druckporosimetrie
- Abbildung 15: Basiskomponenten der ICP-OES in Anlehnung an [45]

- Abbildung 16: Dehnungsmessung beim Schnellprüfverfahren
- Abbildung 17: Impressionen zur KWL
- Abbildung 18: Lagerungsregime in einem Wechselzyklus im 60 °C Betonversuch mit externer Alkalizufuhr
- Abbildung 19: Prüfprozedere bei der KWL
- Abbildung 20: Räumliche Einordnung herausgearbeiteter Scheiben aus den Betonprüfkörpern nach verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen
- Abbildung 21: Schematische Darstellung des Messprinzips von LIBS
- Abbildung 22: Beschreibung des verwendeten FiberLIBSlab-Systems
- Abbildung 23: Typisches LIBS-Spektrum für die Analyse einer Zementsteinprobe aus CEM I 42,5 R mit definierter NaCl-Zugabe ($c_{Cl} = 1,08 \text{ M.-%}$ und $c_{Na} = 0,57 \text{ M.-%}$) im UV- und NIR-Bereich
- Abbildung 24: Vorgehensweise bei der Ermittlung des Natriumtiefenprofils bei der Auswertung der LIBS-Flächenscans unter Nutzung des Ca-Ausschlusskriteriums zur Eliminierung der Gesteinskörnung (GK) am Beispiel des oberen Segments eines Bohrkerns aus der Plattenmitte eines BAB-Abschnitts
- Abbildung 25: Offene Porosität der für die 3D-CT ausgewählten Körner von den Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 in der Fraktion 8/16 mm, ermittelt aus 24-stündiger Wasseraufnahme
- Abbildung 26: Ergebnis der tomografischen Oberflächenanalyse der Einzelkörner aus der Fraktion 8/16 mm der Gesteinskörnungen GK1 und GK4 (Kiese)
- Abbildung 27: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner der Gesteinskörnung GK1 (Kies)
- Abbildung 28: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner der Gesteinskörnung GK4 (Kies)
- Abbildung 29: Ergebnis der tomografischen Oberflächenanalyse der Einzelkörner aus der Fraktion 8/16 mm der Gesteinskörnungen GK 2 und GK 4 (vergleichende Betrachtung der Grauwacke als Fest- und Lockergestein) sowie von GK 3 und GK 1 (vergleichende Betrachtung von Rhyolith als Fest- und Lockergestein)
- Abbildung 30: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner der Grauwacke aus dem Festgestein (GK2) und dem Kies (GK4)
- Abbildung 31: Visualisierte CT-Befunde ausgewählter Einzelkörner des Rhyoliths aus dem Festgestein (GK3) und dem Kies (GK1)
- Abbildung 32: Ergebnisvergleich der Oberflächenanalyse mit BET und Röntgen 3D-CT an den gesteinsartspezifischen Einzelkörnern der Kiese (GK1 und GK4)
- Abbildung 33: Ergebnisvergleich der Oberflächenanalyse mit BET und Röntgen 3D-CT an den Einzelkörnern der Grauwacke des Rhyoliths
- Abbildung 34: Ergebnis der BET-Analyse an Korngemengen der einzelnen Korngruppen der Gesteinskörnungen
- Abbildung 35: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK1 (Quarz/Quarzit)
- Abbildung 36: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK1 (Rhyolith)
- Abbildung 37: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK1 (Plutonit)
- Abbildung 38: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK2 (Festgestein Grauwacke)
- Abbildung 39: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK3 (Festgestein Rhyolith)
- Abbildung 40: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK4 (Sandstein)
- Abbildung 41: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Löseversuche mit 1 M KOH-Lösung und 1 M-% NaCl Zugabe an den Einzelkörnern von GK4 (Grauwacke)
- Abbildung 42: Löslichkeit von SiO_2 und Al_2O_3 der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK1 (Kies) -

Abbildung 43: Löslichkeit von SiO_2 und Al_2O_3 der Korngruppen 2/5 mm, 5/8 mm und 8/16 mm in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK2 (Grauwacke) -

Abbildung 44: Löslichkeit von SiO_2 und Al_2O_3 der Korngruppen 2/5 mm, 5/8 mm und 8/16 mm in ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK3 (Rhyolith)

Abbildung 45: Löslichkeit von SiO_2 und Al_2O_3 der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm in 1 M KOH-Lösung ohne und mit NaCl-Aufdotierung - Gesteinskörnung GK4 (Kies) –

Abbildung 46: Ergebnisse des AKR-Schnellprüfverfahrens nach Alkali-Richtlinie des DAfStb [21]

Abbildung 47a: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton 0/8 (Waschbeton)

Abbildung 47b: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton 0/8 (Waschbeton)

Abbildung 48a: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton (D>8)/ Unterbeton

Abbildung 48b: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr für den Oberbeton (D>8)/ Unterbeton

Abbildung 49: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und des 40 °C-Betonversuchs nach Alkalirichtlinie (Beton 0/16)

Abbildung 50: Zusammenfassung der Ergebnisse der Löseversuche der Gesteinskörnungen und der Betonversuche nach Alkalirichtlinie (Beton 0/22)

Tabelle 3a: Übersicht über die Vorgehensweise bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Tabelle 3b: Übersicht über die Vorgehensweise bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Tabelle 4: Bewertung der Schadensmerkmale bei der DS-Mikroskopie

Tabelle 5: Zuordnung der Wellenlänge zu ausgewählten Elementen [28]

Tabelle 6: Petrografische Zusammensetzung der Fraktionen der Gesteinskörnungen GK1 und GK4

Tabelle 7: Oxidische Zusammensetzung der Fraktionen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4, ermittelt mit Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse

Tabelle 8.1: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK1 (Kies), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle 8.2: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK2 (Grauwacke), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle 8.3: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK3 (Rhyolith), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle 8.4: Mineralogischer Phasenbestand der Gesteinskörnung GK4 (Kies), ermittelt mit Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle 9: Rohdichte, Wasseraufnahme der Korngruppen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4

Tabelle 10: Siebdurchgang der Korngruppen der Gesteinskörnungen GK1 bis GK4 und des WS-Prüfsands

Tabelle 11: Vergleich der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des verwendeten WS-Prüfzements (Charge: 02/2015)

Tabelle 12: Vergleich der chemischen Eigenschaften des verwendeten WS-Prüfzements (Charge: 02/2015)

Tabellen

Tabelle 1: Klassifikation der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung nach [21]

Tabelle 2: Bezeichnung, Gesteinsart und Korngruppen der Gesteinskörnungen

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

Wolf, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost € 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser € 16,50

S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Groschup, Große, Eger, Freudenstein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

Dürner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

Radenberg, Flottmann, Drewes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

Radenberg, Manke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

Bräu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Weise, Werner, Maier, Wilsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Geh-

len, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Webseite finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.