

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Kenngrößen zur Risikoabschätzung des Ettringittreibens von sulfathaltigen Böden

FE 05.0171/2012/BGB

Schlussbericht
Stand: 08.12.2014

Bearbeitung:
Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik (IGS)
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann
christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

Akad. Oberrat Dipl.-Ing. Bernd Zweschper
bernd.zweschper@igs.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Julia Knopp
julia.knopp@igs.uni-stuttgart.de

im Auftrag der
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
Brüderstraße 53
51401 Bergisch Gladbach

nur einige der Einflussfaktoren untersucht werden. In vielen Punkten besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Kurzfassung

Bei der Behandlung von sulfathaltigen Böden mit calciumbasierten Bindemitteln wurden immer wieder Schadensfälle beobachtet, die durch die Neubildung von Ettringitmineralen hervorgerufen wurden. Das Ziel des Forschungsprojektes war es, die Grundlagen für die Entwicklung einer praxistauglichen Prüfvorschrift zu erarbeiten. Mit Hilfe geeigneter Untersuchungen und Prüfverfahren soll es zukünftig möglich sein, Schadensfälle zu vermeiden. Dafür waren Kenngrößen und Richtwerte zur Beurteilung des Risikos von Treiberscheinungen durch Ettringitbildung bei der Bindemittelbehandlung von sulfathaltigen Böden festzulegen.

Zunächst wurde eine Literaturstudie durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass der Mineralbestand, das Wasserangebot, das chemische Milieu, die Temperatur, die Porenstruktur und der Überlagerungsdruck im Boden wesentliche Einflussfaktoren sind.

Im zweiten Arbeitsschritt wurden an vier verschiedenen Materialien Pulverquellversuche durchgeführt. Dabei wurden jeweils zwei Böden mit und ohne natürlichen Sulfatgehalt verwendet. Dem Versuchsmaterial ohne natürlichen Sulfatgehalt wurde Sulfat künstlich, in definierten Mengen zugesetzt. Als Ergebnis der Untersuchung können folgende Zusammenhänge genannt werden:

- Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und der Dehnung infolge Ettringitneubildung.
- Kritische Sulfatgehalte sind zum einen stark abhängig vom Boden (Bodenart) und den darin enthaltenen Mineralphasen, zum anderen werden sie durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst. Es konnte bestätigt werden, dass eine Behandlung mit Kalk bei gleichen Randbedingungen größere Hebungsbeträge verursacht, als die Verwendung des Bindemittels Zement.
- Als Ergebnis der Literaturstudie und der Versuche zeigte sich, dass nur eine geringe Gefährdung gegeben ist, wenn Böden mit Sulfatgehalten von weniger als 3.000 ppm mit Zement behandelt werden. Bei einer Behandlung mit Kalk besteht dagegen auch bei geringen Sulfatgehalten im Boden bereits ein Gefährdungspotential für Ettringittreiben.

Die Problematik des Ettringittreibens ist sehr komplex und von vielen Faktoren abhängig. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnten jedoch

Abstract

Parameters for risk assessment of ettringite swelling in sulfate soils

In the treatment of sulfate-containing soils with calcium-based binders, it always comes to cases of damage caused by the formation of the mineral ettringite. The aim of the research project was to develop the basis for a practical test specification. With the help of adequate research and testing, in the future it should be possible to avoid damage cases. First, a literature study was conducted. It became clear that the mineral content, the water supply, the chemical environment, the temperature, the pore structure and the overburden pressure in the soil are the key factors. In the second step, powder-swelling-tests have been carried out on four different materials. Therefore two soils with and two without natural sulfate content were used. The test material without natural sulfate content was artificially added with defined amounts of sulfate. The following relationships can be mentioned:

- There is a linear relationship between the sulfate content and the strain due to ettringite formation.
- Critical sulfate contents are strongly dependent on the soil and can be influenced by the choice of the binder. It could be confirmed that treatment with burnt lime under the same boundary conditions caused more heaving, as the use of cement binder.
- The literature study and the experiments showed that only a low risk exists when soils with sulfate concentrations of less than 3.000 ppm are treated with cement. In contrast, treatment with burnt lime even at low sulfate content in soil is already a hazard potential for ettringite formation.

The problem of ettringite formation is very complex and depends on many factors. In this research project, only some of the factors could be investigated. In many points there is still a need for further research.

Inhalt

1	Veranlassung und Problemstellung.....	7
2	Zielsetzung und Methodik	8
3	Stand der Technik und Wissenschaft	8
3.1	Bodenbehandlung mit Bindemitteln	8
3.1.1	Bindemittelarten	9
3.1.2	Wirkungsmechanismen	11
3.1.3	Einsatzbereiche	12
3.2	Sulfatreiben	12
3.2.1	Chemisch-mineralogische Grundlagen	12
3.2.2	Schadensmechanismen	13
3.2.3	Einflussfaktoren	13
3.2.4	Schadensfälle	14
3.3	Versuche zur Beurteilung von Treiberscheinungen.....	16
4	Experimentelle Arbeiten	19
4.1	Versuchsböden	19
4.1.1	Bodenmechanische Klassifikation.....	21
4.1.2	Mineralogische Analysen	22
4.2	Bindemittel.....	24
4.3	Quellhebungsversuche	24
4.3.1	Prüfeinrichtung	24
4.3.2	Pulverquellversuch	25
4.3.3	Probenmaterialaufbereitung	25
4.3.4	Einbau des Pulvers in Oedometerringe	26
4.3.5	Versuchsprogramm	27
4.3.6	Randbedingungen	28
4.3.7	Versuchsdurchführung	28
4.3.8	Versuchsdauer	28
4.3.9	Ergebnisse der Quellhebungsversuche	28
4.4	Einaxiale Druckversuche.....	40
4.4.1	Versuchsprogramm	40
4.4.2	Versuchsdurchführung	41
4.4.3	Ergebnisse der einaxialen Druckversuche	42
5	Grundlagen einer Prüfvorschrift.....	43
5.1	Kritische Einflussgrößen	43
5.1.1	Bindemittelart	43
5.1.2	Sulfatgehalt	44
5.2	Prüfverfahren zur Ermittlung des Quellpotentials.....	45
5.2.1	Versuchsprogramm	45
5.2.2	Prüfeinrichtung	45
5.2.3	Prüfkörper.....	46
5.2.4	Versuchsdurchführung	46
5.2.5	Randbedingungen	46
5.2.6	Versuchsdauer	46
5.2.7	Versuchsauswertung.....	47
5.2.8	Mineralogische Untersuchungen.....	47
6	Zusammenfassung und Fazit.....	47
7	Literaturverzeichnis	49

1 Veranlassung und Problemstellung

Die Behandlung von Böden mit verschiedenartigen calciumbasierten Bindemitteln (Kalk, Zement, Mischbindemittel) ist heute unter dem Druck der Ressourcenschonung und mit dem Fortschritt der Fräs- und Verdichtungstechnologie ein in zahlreichen Anwendungen – nicht zuletzt auch im Straßenbau – bewährtes Standardverfahren des Erdbaus, welches auch Einzug in eine Vielzahl von Vorschriften, Richtlinien und Merkblätter gehalten hat (z. B. ZTV E-StB 09). Man unterscheidet je nach Einsatzziel grundsätzlich die Begriffe Bodenverfestigung und Bodenverbesserung.

Bei der Verfestigung eines Bodens durch die Zugabe eines Bindemittels wird das Ziel verfolgt, den Boden tragfähig, frostbeständig und damit dauerhaft widerstandsfähig gegen Beanspruchungen aus Verkehr und Klima zu machen. Bei den Verfahren der Bodenverbesserung werden durch die Bindemittelzugabe infolge Entwässerung und Aggregatbildung der bindigen Bodenpartikel (Änderung der Bodenstruktur durch „Krümelbildung“ zunächst die Einbaufähigkeit und die Verdichtbarkeit zur Erleichterung der Ausführung von Erdbauarbeiten verbessert. Im Zuge der Langzeitreaktionen kommt es darüber hinaus als oft gewünschtem Nebeneffekt zu Festigkeitssteigerungen, die sich ggf. auch über Jahre entwickeln können. Qualifizierte Bodenverbesserungen sind per Definition (FGSV, 551, 2004) solche mit erhöhten Anforderungen, z. B. hinsichtlich des Frost- und des Tragfähigkeitsverhaltens. Die Bindemittelbehandlung kann auch zur Immobilisierung von Schadstoffen in belasteten Böden, Mineralstoffgemischen und Recyclingbaustoffen mit dem Ziel einer Wiederverwertung im Erdbau herangezogen werden (ZTV E-StB 09).

Bei der Bodenbehandlung hängt der Erfolg einer solchen Maßnahme u. a. entscheidend von der Wahl der Bindemittelart sowie der erforderlichen Zugabemengen ab. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang auch das angewendete Mischverfahren. Als Bindemittel kommen insbesondere Zemente nach DIN EN 197-1:2011-11, Baukalke (Feinkalke und Kalkhydrate) gemäß DIN EN 459-1:2010-12, hydraulische Boden- und Tragschichtbinder nach DIN 18506:2002-02 sowie Kombinationsbindemittel in Zugabemengen zwischen ungefähr 2 und 16 Gewichtsprozent zur Anwendung (FGSV 551, 2004).

Die grundsätzliche Eignung eines Bodens für die Bodenbehandlung sowie die anwendungsspezifische Festlegung der optimalen Rezeptur ist im Einzelfall aus den Ergebnissen einer Eignungs-

prüfung festzustellen (FGSV 591 / B11.1, 2005) (FGSV 591 / B11.5, 1991) (FGSV 892, 2010). Hierbei sind neben bodenmechanischen Kenngrößen wie Korngrößenverteilung, Plastizität, Konsistenz und Verwitterungsgrad insbesondere die mineralogischen Zusammensetzungen des Bodens und des verwendeten Bindemittels von maßgeblicher Bedeutung.

Trotz der zahlreichen positiven Erfahrungen und vorschriftsmäßiger Ausführung von Maßnahmen zur Bodenbehandlungen mit calciumbasierten Bindemitteln ist es in den letzten Jahren auch im Straßenbau immer wieder zu spektakulären Schadensfällen durch Quellhebungen gekommen. Ursächlich sind häufig die Schadensmechanismen des Sulfattreibens, welche nicht zuletzt auch aus dem Fachgebiet der Betontechnologie bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt und umfangreich untersucht sind (STARK & WICHT, 2001).

Erste systematische Untersuchungen über die bei Einwirkung von sulfathaltigen Lösungen ablaufenden Mineralreaktionen im Zementstein wurden um 1890 durchgeführt (MICHAELIS, 1896). Die gefügeschädigende Wirkung wurde damals bereits auf die Bildung einer komplexen, kristallwasserreichen Verbindung zurückgeführt, die in der Folge wegen ihres typischen nadelförmigen Erscheinungsbilds auch als „Zementbazillus“ bezeichnet wurden.

Aufgrund zahlreicher Untersuchungen in der Folge weiß man heute, dass die Hauptursache des Sulfattreibens in der Bildung von Ettringitkristallen zu suchen ist. Auch bei der Sulfatreaktion in bindemittelbehandelten Böden können sich unter bestimmten Randbedingungen Ettringit- und Thauwasit-Kristalle sowie deren Mischkristallglieder insbesondere im Porenraum bilden, was zu einer Zerstörung der Bodenstruktur infolge Volumenvergrößerung führen kann. Im Vergleich zum Beton sind die Mineralreaktionen im Boden aufgrund der zusätzlichen Beteiligung verschiedener Tonminerale allerdings oft komplexer. Sulfatträger im Boden ist oft natürlicher Gips ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oder seine kristallwasserfreie Variante Anhydrit, untergeordnet aber auch Eisen(II)-sulfat als natürliches Oxidationsprodukt des Minerals Pyrit (Eisen(II)-disulfid FeS_2).

Für die Reaktion des Sulfattreibens im Boden sind zwar Einflussfaktoren bekannt, quantitative Prüfmethoden und standardisierten Strategien zur Gefahrenabwehr liegen derzeit allerdings noch nicht vor (WITT, 2012).

2 Zielsetzung und Methodik

Im Regelwerk des Straßenbaus, aber auch darüber hinaus, gibt es bis heute kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren anhand dessen Ergebnis schon im Vorfeld einer Baumaßnahme eine standardisierte Risikoabschätzung des Ettringittreibens erfolgen kann. Das Ziel der Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens als Grundlage für eine zu entwickelnde Prüfvorschrift. Dafür sind Kenngrößen und Richtwerte zur Beurteilung des Risikos von Treiberscheinungen durch Ettringitbildung bei der Bindemittelbehandlung von sulfathaltigen Böden festzulegen.

Im ersten Arbeitsschritt wird eine umfangreiche Literaturrecherche zum Stand der Technik und der Wissenschaft durchgeführt. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf Richtwerte für den Sulfatgehalt von Böden bzw. wasserlösliche Anteile von Sulfaten in Böden sowie auf derzeit gebräuchliche Versuche zur Beurteilung von Quelldrücken und Quellhebungen bei Treiberscheinungen gelegt.

Im zweiten Schritt werden eigene Experimente an Böden mit natürlichem Sulfatgehalt durchgeführt. Es werden dabei solche Böden ausgewählt, bei denen es in der Vergangenheit auf Baustellen des Verkehrswegebbaus zu Schadensfällen infolge Ettringittreibens gekommen ist. Darüber hinaus werden in den Laborexperimenten auch in ihrem natürlichen Zustand sulfatfreie Böden untersucht, denen im Labor gezielt definierte Mengen an Sulfat zugesetzt wird. Die Ausgangsmaterialien werden zunächst boden- und felsmechanisch sowie mineralogisch klassifiziert. Nach Herstellung der Boden-Bindemittelgemische und Durchführung von Quellhebungsversuchen wird der Nachweis von Ettringitbildungen durch elektronenmikroskopische Aufnahmen (REM) und durch Röntgenbeugung (XRD) sowohl qualitativ, als auch quantitativ geführt. Zudem werden einaxiale Druckversuche zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung des bindemittelbehandelten Bodens durch die Treibreaktionen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Experimente werden systematisch ausgewertet und interpretiert. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse und im Abgleich mit Erfahrungswerten in der Literatur wird letztlich eine Basis für die Erarbeitung einfacher Analyse- und Bewertungsverfahren für die Baupraxis erarbeitet. Anhand der Ergebnisse soll im Einzelfall frühzeitig eine Risikoabschätzung für die Quellgefährdung durch Ettringitaufwuchs möglich sein, damit Maßnahmen zur Gefahrenabwehr eingeleitet werden können.

3 Stand der Technik und Wissenschaft

Bestimmte Ton- und Sulfatgesteine neigen bei Wasserzutritt aufgrund unterschiedlicher chemischer und mineralogischer Reaktionen zum Quellen. Die im Grundbau bedeutsamsten Typen von Treiberscheinungen sind in (LGRB Informationen 16, 2005) näher beschrieben. Allgemein bekannt sind insbesondere folgende Treibreaktionen:

- Quellen von Tonmineralen (Montmorillonit, Corrensit, ..) durch Einlagerung von Wasser zwischen den Elementarschichten der Schichtsilikate
- Anhydrit-Gips-Umwandlung
- Magnesiatreiben
- Ettringitreiben / Sulfatreiben

Unter Quellen versteht man i. Allg. Formänderungen durch Volumenzunahme, die nicht durch äußere Belastungen oder Systemänderungen, sondern vielmehr durch chemische Ursachen hervorgerufen werden. Wird die Volumenvergrößerung durch Quellen behindert, so entwickeln sich z. T. erhebliche Quelldrücke. So stellt beispielsweise der Bau eines Tunnels in anhydrithaltigem Gebirge eine besondere ingenieurtechnische Herausforderung dar. Hier unterscheidet man nach dem Stand der Technik zwei Grundprinzipien, wie den prognostizierten Quelldrücken auf die Tunnelschale begegnet werden kann. Beim Widerstandsprinzip wird die Tunnelschale so dimensioniert, dass etwaige Quelldrücke schadlos aufgenommen werden können. Das Ausweichprinzip arbeitet dagegen mit Pufferzonen, in welche das Gebirge hineinquellen kann, ohne dass sich signifikante, zusätzliche Drücke auf die Tunnelschale ausbilden können.

Im Zuge einer Bodenbehandlung durch calciumbasierte Bindemittel kann es unter bestimmten Randbedingungen zu Sulfatreiben kommen.

3.1 Bodenbehandlung mit Bindemitteln

In der ZTV E-StB 09 werden die Begriffe Bodenverfestigung und Bodenverbesserung definiert. Bodenverfestigungen sind demnach Verfahren, bei denen die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen Beanspruchungen durch Verkehr und Klima durch die Zugabe von Bindemitteln erhöht wird. Dadurch wird der Boden dauerhaft tragfähig und frostsicher. Bodenverbesserungen sind Verfahren zur Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit von Böden und zur Erleichterung der Ausführung von Bauarbeiten. Bodenverbesserungen können

durch die Zugabe von Bindemitteln oder von anderen geeigneten Baustoffen erzielt werden.

Insbesondere fein- oder gemischtkörnige Böden werden oft mit calciumbasierten Bindemitteln stabilisiert. Die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen sowie ihre physikalischen Effekte werden einerseits von bodenphysikalischen Eigenschaften, andererseits aber insbesondere auch vom Mineralbestand der Böden beeinflusst. Zu den maßgebenden bodenphysikalischen Eigenschaften zählen hierbei die Korngrößenverteilung, die Bodenstruktur, die Plastizität, der Wassergehalt und das Wasserbindevermögen. Bei Festgesteinen ist zudem der Grad der Verwitterung, welche zu Mineralumbildungen führen kann, zu nennen. Welche chemischen Reaktionen durch die Wechselwirkungen zwischen den im Boden enthaltenen Tonmineralen (verschiedene Zwei- und Dreischichtsilikate) und dem Bindemittel ablaufen sowie in welchem Umfang dies geschieht, wird nicht allein vom chemisch-mineralogischen Stoffangebot bestimmt. Entscheidenden Einfluss hat die Verteilung und die Zugänglichkeit der reaktiven Substanzen sowie deren spezifische Oberflächen. Für den Erfolg einer Bodenbehandlung mit Bindemitteln spielt deshalb nicht zuletzt auch das gewählte Bauverfahren beim Einmischen und Verdichten des Boden-Bindemittelgemischs eine wesentliche Rolle. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen kommt hier bei Bodenbehandlungen i. Allg. das Baumischverfahren (mixed-in-place) zur Anwendung. Nur maschinell, mit eigens für diesen Zweck konstruierten Geräten ist eine gleichmäßige Verteilung des Bindemittels im Boden zu erreichen. Der Gerätezug besteht dabei aus Bindemittel-Verteilgerät, Sprengwagen oder Sprühbalken sowie Misch- und Verdichtungsgerät. Das Mischgerät (z. B. Bodenfräse) fährt auf der für die Bodenbehandlung vorbereiteten Schicht und arbeitet das zuvor aufgebraute Bindemittel und dem ggf. erforderlichen Zugabewasser ein. Bei besonders hohen Anforderungen an eine gleichmäßige Qualität des Boden-Bindemittelgemischs kommen auch Spezialfräsen, zum Einsatz, die nach dem Fertigerprinzip arbeiten. Diese sind in der Lage, die Arbeitsschritte Zerkleinerung des Bodens sowie Dosierung und homogenes Einmischen von Bindemittel und Zugabewasser mit einem einzigen Gerät durchzuführen. Im Anschluss erfolgt das Verdichten mit den im Erdbau üblichen Geräten.

3.1.1 Bindemittelarten

Für Bodenbehandlung kommen Baukalke (Feinkalke und Kalke mit hydraulischen Eigenschaften nach (DIN EN 459-1:2010-12), Zemente (DIN EN

197-1:2011-11) sowie Kombinationsbindemittel, zu denen auch die hydraulischen Boden- und Tragschichtbinder (DIN 18506: 2002-02) zählen zum Einsatz. Hydraulische Bindemittel eignen sich insbesondere zur Behandlung grob- und gemischtkörniger Bodenarten. Für die Stabilisierung feinkörniger Böden eignen sie sich nur dann, wenn sich diese Böden mit den üblichen Verfahren zerkleinern und homogen durchmischen lassen. Ist dies nicht der Fall, sind i. Allg. Feinkalke die Bindemittel der Wahl. Ggf. können fein- und gemischtkörnige Böden in einem vorbereitenden Arbeitsschritt durch Einmischen von Baukalk für eine Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln verarbeitbar gemacht werden.

Zement:

Zemente sind hydraulische Bindemittel, d. h. fein gemahlene anorganische Stoffe, die mit Wasser gemischt Zementleim ergeben, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet. Nachdem Erhärten bleibt er auch unter Wasser fest und raumbeständig. Die DIN EN 197-1:2011-11 regelt die Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.

Die hydraulische Erhärtung von Zement beruht vorwiegend auf der Hydratation von Calciumsilikaten, jedoch können auch andere chemische Verbindungen (z. B. Aluminate) an der Erhärtung beteiligt sein. Der Massenanteil an reaktionsfähigem Calciumoxid (CaO) und reaktionsfähigem Siliziumdioxid (SiO₂) muss in Zementen mindestens 50% betragen (DIN EN 197-1:2011-11).

Für Bodenstabilisierungen wird vorwiegend Portlandzement CEM I (DIN EN 197-1:2011-11) verwendet, der zu mindestens 95 Massenprozent aus Portlandzementklinker besteht. Portlandzementklinker ist ein hydraulisches Material, das hauptsächlich aus den Klinkerphasen C₃S (Tricalciumsilikat 3CaO · SiO₂) und C₂S (Dicalciumsilikat 2CaO · SiO₂) bestehen muss. Die verbleibenden Anteile werden aus den Aluminium und Eisen enthaltenden Klinkerphasen C₂A, C₃A und C₂F sowie freiem Calciumoxid CaO gebildet. Das Massenverhältnis (CaO)/(SiO₂) muss mindestens 2,0 betragen. Calciumsulfat wird den anderen Bestandteilen des Zements bei seiner Herstellung planmäßig in Form von Gips (Calciumsulfatdihydrat CaSO₄ · 2H₂O), Halbhydrat (CaSO₄ · ½H₂O) oder Anhydrit (kristallwasserfreies Calciumsulfat CaSO₄) zur Regelung des Erstarrungsverhaltens zugegeben.

Portlandzemente mit hohem Sulfatwiderstand (CEM I-SR) werden mit Portlandzementklinker, dessen Gehalt an Tricalciumaluminat (C₃A) fünf

Massenprozent nicht überschreiten darf, hergestellt.

Baukalk:

Bei den Feinkalken gemäß (DIN EN 459-1:2010-12), die sich mit atmosphärischem Kohlenstoffdioxid verbinden und erhärten und keine hydraulischen Eigenschaften besitzen, werden die Untergruppen Weißkalk und Dolomitmalk unterschieden. Bei der Carbonatisierung der Hydrate durch Einwirkung von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid bildet sich festigkeitsentwickelndes Calciumcarbonat $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ (Calcit) (Bild 1).

landit), der durch kontrolliertes Löschen aus ungelöschtem Kalk entsteht, unterschieden.



Kalk mit hydraulischen Eigenschaften besteht hauptsächlich aus Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Calciumsilikaten und Calciumaluminaten. Er erstarrt und erhärtet nach Mischen mit Wasser (Hydratation). Die Reaktion mit atmosphärischem Kohlenstoffdioxid (Carbonatisierung) ist wie beim Zement Teil des Erhärtungsprozesses.

Kombinationsbindemittel aus Feinkalken und hydraulischen Anteilen kommen bei Bodenbehand-

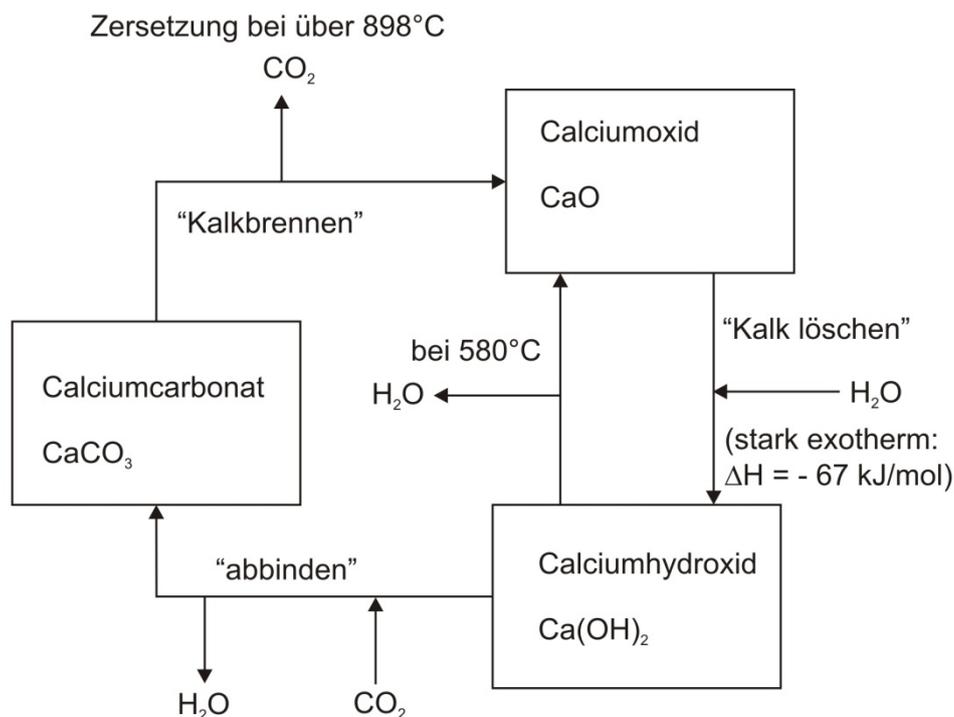


Bild 1: Technischer Kalkkreislauf (nach SCHNEIDER et al., 2009)



Bei dieser chemischen Umwandlung der alkalischen Bestandteile des Zementsteins durch Kohlenstoffdioxid in Calciumcarbonat sinkt der pH-Wert des Zementsteins von etwa 12,5 auf unter 10 ab, was im Stahlbetonbau zu Korrosionsschäden an oberflächennahen Bewehrungsstäben führen kann, da die Passivierung des Bewehrungsstahls nicht mehr sichergestellt ist.

Bei Weißkalken wird zwischen ungelöschtem Kalk (Brantkalk CaO), der bei Kontakt mit Wasser stark exotherm reagiert, und gelöschtem Kalk (Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, auch: Kalkhydrat, Port-

lungen dann zum Einsatz, wenn einerseits ein zu hoher natürlicher Wassergehalt des Bodens reduziert und dieser dadurch erdbautechnisch einbau- und verdichtungsfähig gemacht werden, andererseits das Tragfähigkeitsverhalten und die Witterungsbeständigkeit des eingebauten Boden-Bindemittelgemischs verbessert werden soll.

Boden- und Tragschichtbinder:

Hydraulische Boden- und Tragschichtbinder (HRB) nach (DIN 18506:2002-02) sind für die Zwecke des Straßen-, Erd- und Grundbaus speziell entwickelte, pulverförmige hydraulische Bindemittel, die aus den Hauptbestandteilen Portlandzementklinker nach (DIN EN 197-1:2011-11-), Baukalk nach

(DIN EN 459-1:2010-12-) und kalkreiche Flugasche hergestellt werden. Mit Wasser angemacht erhärten sie sowohl an der Luft als auch unter Wasser und bleiben auch unter Wasser fest. Als Erstarrungsregler enthalten Flugaschen wie Zemente Calciumsulfat in Form von Gips, Halbhydrat oder Anhydrit.

3.1.2 Wirkungsmechanismen

Die verschiedenartigen und verschieden stark ausgeprägten bodenmechanischen Effekte der Bindemittelbehandlung ergeben sich aus den unterschiedlichen Reaktionsmechanismen der Bindemittel mit dem Boden. Beim Einsatz von Zement kann durch das sich unmittelbar nach dem Einmischen im Porenraum des Bodens ausbildende Zementsteinskelett eine schnelle und hohe Verfestigung mit einer starken Zunahme der Druckfestigkeit und der Steifigkeit erzielt werden. Soll ein bindiger Boden im Sinne einer Bodenverbesserung erdbautechnisch bearbeit- und verdichtbar gemacht werden, so ist bei Böden mit einem zu hohen Wassergehalt Weißfeinkalk, andernfalls Kalkhydrat als Bindemittel zu benutzen. Durch den Einsatz von Kombinationsbindemitteln lassen sich die Vorteile beider Bindemittelarten i. Allg. gezielt kombinieren und zusätzlich der Bindemittelbedarf reduzieren (WITT, 2002) Die Bindemittelreaktionen werden u. a. auch von der Luft- oder Bodentemperatur beeinflusst. Bei Temperaturen kleiner $+5^{\circ}\text{C}$ lassen die Reaktionen stark nach, so dass unter solchen Temperaturbedingungen Bindemittelbehandlungen nur noch bedingt wirksam werden. Außerdem sollte auch die Temperatur des Boden-Bindemittelgemischs während der Abbindezeit möglichst nicht und keinesfalls während der ersten drei Tage unter $+5^{\circ}\text{C}$ absinken (ZTV E-StB 09).

Boden und Zement:

Die exotherme Reaktion zwischen Zement und dem in den Bodenporen enthaltenen Wasser – ggf. auch mit dem Zugabewasser – setzt unmittelbar nach dem Kontakt des Zements mit dem Wasser ein. Eine Ausnahme davon sind hydrophobierte Zemente, bei denen der Beginn des Abbindens durch die wasserabweisenden Eigenschaften des Zements verzögert wird. Die Hydratation erfolgt aufgrund von elektrostatischen Kräften zwischen Kationen und den Wasser-Dipolen. Es kommt zur Ausbildung von Hydrathüllen um die Ionen durch Wasserstoffbrücken. Der Zement erstarrt und beginnt hydraulisch zu erhärten. Es bildet sich eine skelettartige, die Bodenpartikel fixierende Zementmatrix im Porenraum.

Als unmittelbare Folge der Hydratation wird der pH-Wert des Porenwassers erhöht und es kommt begünstigt durch das alkalische Milieu zur Ablösung von Puzzolanen aus den Tonmineralen. Puzzolane bestehen hauptsächlich aus reaktionsfähigem Siliziumdioxid (SiO_2) und Aluminiumoxid bzw. Tonerde (Al_2O_3). Weitere Bestandteile sind Eisen(III)oxid (Fe_2O_3) sowie andere Oxide. Puzzolane erhärten nicht selbständig, sondern reagieren in Gegenwart von Wasser bei normaler Umgebungstemperatur mit gelöstem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) unter Entstehung von festigkeitsbildenden, hydratierten Tri- und Dicalciumsilikaten sowie Calciumaluminaten. Diese gelartigen Verbindungen sind denen ähnlich, die auch bei der Erhärtung hydraulischer Stoffe entstehen. Sie verkitten durch die einige Tage nach der Hydratation einsetzende und über sehr lange Zeiträume ablaufende puzzolanische Reaktion miteinander (FGSV 551).

Durch die primäre Skelettbildung, welche v. a. durch das Porenwasserdargebot gesteuert wird, sowie durch die sekundäre Verkittung der Partikel in der puzzolanischen Reaktion, welche in erster Linie von der Art der Tonminerale abhängig ist, wird die Festigkeit des Bodens enorm gesteigert. Tendenziell ist die Festigkeitsentwicklung in größeren Porenstrukturen, wie in Kiesen, stärker ausgeprägt als in feinporigeren Böden wie Löss oder Tonen. Mit der Festigkeit steigen auch der Steifemodul und die Kohäsion an. In organischen Böden stören Huminsäuren die Zementreaktionen (FGSV 551).

Insbesondere als Folge des variablen Bestands an Tonmineralen in behandelten Böden sind die im Boden-Bindemittelgemisch ablaufenden Reaktionen meist komplexer als die Zementreaktion im Beton. Dies ist auch der wesentliche Grund dafür, dass die bodenmechanischen Kennwerte zementverfestigter Böden nur bedingt vorhergesagt werden können. Es sind vielmehr spezielle Eignungsuntersuchungen für den Einzelfall notwendig (FGSV 591 / B11.1), 2005).

Boden und Baukalk:

Die Wirkungsweisen von Baukalken beruhen bei der Bodenstabilisierung auf chemischen und auf physikalischen Effekten. Nach ihrem zeitlichen Ablauf werden Sofort- und Langzeitreaktionen unterschieden. In der Sofortreaktion reagiert das in den Boden eingebrachte Calciumoxid CaO mit dem Bodenwasser zu Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dem Boden wird dabei Porenwasser durch chemische Bindung entzogen (1 kg CaO bindet etwa 320 cm^3 Wasser). Eine weitere Reduzierung des Wassergehalts ergibt sich als Folge der Wärmeentwicklung in der stark exothermen Reaktion durch

Verdunstung sowie durch die Belüftung beim Einmischvorgang.

Zudem findet durch die Zugabe des Kalks eine Umwandlung in der Bodenstruktur statt. In Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt wird der pH-Wert auf > 12 gesteigert. Das alkalische Milieu begünstigt den Austausch der an die Tonminerale ein- und angelagerten Kationen durch Ca^{2+} -Ionen. Die elektrostatischen Oberflächenladungen der Tonminerale werden dabei erniedrigt und es kommt zur Koagulation (Ausflockung) der Tonpartikel. Allgemein hat sich hierfür der Begriff Krümelbildung eingebürgert. Die Wirkungsweisen der Sofortreaktionen haben aus erdbautechnischer Sicht bodenverbessernden Charakter. Verbessert werden insbesondere die Einbaufähigkeit und die Verdichtbarkeit. Die Empfindlichkeit gegenüber Wassergehaltsänderungen nimmt deutlich ab, was aus baupraktischer Sicht die Witterungsabhängigkeit von Erdbaumaßnahmen entscheidend verbessern kann (FGSV 551).

Durch den erhöhten pH-Wert lösen sich im Zuge der Langzeitreaktion Silikate und Aluminate aus den Tonmineralen. Im weiteren kommt es zur Bildung von Calciumaluminathydraten und Calciumsilikathydraten und schließlich zur Festigkeitsentwicklung im Boden-Bindemittelgemisch durch Verkitterung in der puzzolanischen Reaktion.

Grundsätzlich sind i. Allg. die durch Kalkstabilisierung erreichbaren Festigkeiten deutlich kleiner als die durch Zementstabilisierung.

3.1.3 Einsatzbereiche

Die Einsatzbereiche von Bodenbehandlungen mit calciumbasierten Bindemitteln sind vielfältig. Bodenverfestigungen werden in der oberen Zone des Untergrunds oder Unterbaus von Straßen und Wegen aller Art sowie bei anderen Verkehrsflächen und Erdbauwerken ausgeführt (ZTV E-StB 09). Im Einzelnen lassen sich folgende Anwendungen unterscheiden (FLOSS, 2006):

- Verfestigung der Planumsschicht als gleichmäßig hochtragfähige Unterlage der Oberbauschichten,
- Voll- und Teilersatz der mineralischen Frostschutzschicht des Oberbaus durch frostsicheres Verfestigen des in der Planumsschicht anstehenden oder eingebauten Bodens,
- Verfestigen der mineralischen Frostschutzschicht im Oberbau,
- Befestigen von untergeordneten Straßen und Wegen und

- Verfestigen des Dammauflagers als lastverteilende Fundationsschicht und / oder der Dammschüttlagen zur Stabilisierung des Dammbauwerkes und der Anschlussbereiche bei Brückenbauwerken.

Bodenverbesserungen werden bei Erdarbeiten aller Art (z. B. Dammbau, Böschungen, Bauwerkshinterfüllungen, Planum von Verkehrsflächen) angewendet. Im Bereich von Planien und Böschungen bewirken Bodenverbesserungen einen Erosions- und Witterungsschutz.

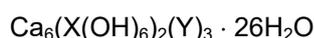
3.2 Sulfatreiben

Die Wirkungsweise des Sulfatreibens beruht auf der Volumenvergrößerung des Hydrogels infolge Mineralreaktionen, die zur Bildung von Mineralen aus der Gruppe der Ettringite führen. Die Ettringitnadeln, die sich in den Poren bilden, zählen zu sekundären Effekten und sind schädlich. Die primäre Bildung von Ettringit während des Erstarrens von Zement ist dagegen ein gewünschter Effekt, der durch einen planmäßig zugegebenen Anteil an Calciumsulfat als Erstarrungsregler im Zement herbeigefügt wird.

Thaumasit bildet sich nur bei Temperaturen kleiner 10°C . Im Unterschied zu Ettringit entwickelt Thaumasit einen geringen Quelldruck und wirkt daher nur wenig volumenexpansiv (WITT, 2012). Allerdings vermindert dieses Mineral bei seiner Kristallisation die Festigkeit des behandelten Bodens, insbesondere dann, wenn es sich als Umwandlungs- oder Zerfallsprodukt aus Ettringit bildet.

3.2.1 Chemisch-mineralogische Grundlagen

Die physikalischen und chemisch-mineralogischen Zusammenhänge des Ettringit- und Thaumasitaufwuchses wurden für den Bereich der Betontechnologie intensiv erforscht (STARK & WICHT, 2001). Für Minerale, die zur Gruppe der Ettringite zählen, kann die allgemeine chemische Summenformel wie folgt angegeben werden:

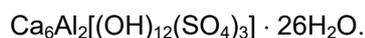


X ist hierbei die Substitution für ein dreiwertiges Metallkation wie Al^{3+} , Fe^{3+} oder Cr^{3+} . Y repräsentiert ein Oxyanion wie SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , SiO_4^{2-} oder CrO_4^{2-} . Weitere Minerale mit alternativen Zusammensetzungen sind möglich, im Boden allerdings unüblich (STARK & WICHT, 2001).

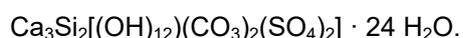
Ettringit (auch Woodfordit) ist ein Mineral aus der Mineralklasse der wasserhaltigen Sulfate mit frem-

den Anionen, Unterabteilung 7.DG.15: wasserhaltigen Sulfate mit fremden Anionen sowie großen bis mittelgroßen Kationen gemäß Mineralsystematik nach (STRUNZ & NICKEL, 2001). Ettringit kristallisiert nur unter sehr begrenzten chemisch-physikalisch-thermischen Randbedingungen bei einer Reaktion der Zement-Klinkerphase Calciumalumiathydrat mit sulfathaltigen Lösungen und entwickelt dabei meist gut ausgeprägte, prismatische oder nadelige, pseudo-hexagonale Kristalle und faserige Aggregate.

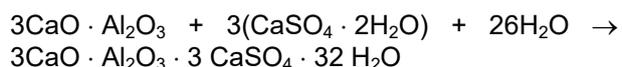
Es bilden sich Ketten aus $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$ -Oktaedern, die über gemeinsame Kanten mit CaO_8 -Polyedern verknüpft sind. Die in das Kristallgitter eingebauten Aluminium-Ionen sind über Hydroxygruppen an je zwei Ca^{2+} -Ionen gebunden. In den verbleibenden Hohlräumen sind die SO_4^{2-} -Tetraeder und die übrigen Wassermoleküle eingelagert. Dem zu Folge sind die einzelnen Säulen mit einer anionischen Schicht von $[(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]^{6-}$ umgeben. Das Wasser ist somit teilweise sehr locker an die Struktur des Ettringits gebunden und kann durch Trocknung oder erhöhte Temperaturen leicht abgespalten werden. Ettringit kann folglich mit unterschiedlichen Kristallwasseranteilen existieren. Mit einem Anteil von etwa 46 Gewichtsprozent zählt Ettringit zu den Mineralen mit dem höchsten Kristallwassergehalt überhaupt und ist daher relativ voluminös und leicht. Die chemische Summenformel von Ettringit lautet:



Thaumasit gehört in dieselbe Unterabteilung und kann eine feste Bindung als Mischkristall mit Ettringit eingehen. Thaumasit bildet sich aus Ettringit bei CO_2 - und SiO_2 -Zufuhr und besitzt die chemische Summenformel:



Im Frischbeton setzt die Ettringitbildung infolge der Reaktion der Zement-Klinkerphase Tricalciumaluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, Kurzformel: C_3A) mit Gips ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) unter Anwesenheit von Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sofort nach Wasserzugabe ein. Diese Reaktion ist zunächst erwünscht und trägt zur Erhärtung des Betons bei.



Die Reaktion setzt sich solange fort, bis die Sulfationenkonzentration in der Lösungsphase nicht mehr ausreicht. Findet zu einem späteren Zeitpunkt im erhärteten Beton weitere Ettringitbildung infolge unerwünschter Sulfatzufuhr statt, so wachsen diese sekundären Ettringitkristalle in den Mikroporen des Betons und können dort durch ihren

Kristallisationsdruck zur Strukturzerstörung führen. Entsprechende Schadensfälle sind seit vielen Jahrzehnten bekannt (STARK & WICHT, 2001).

Auch infolge unsachgemäßer Wärmebehandlung können Schädigungen durch Sulfatreiben auftreten. Der im Beton bereits bestehende Ettringit wird unter dem Einfluss der Wärme zersetzt, und im Porenraum verbleibt eine hohe Konzentration an Sulfat-Anionen $[\text{SO}_4]^{2-}$ (mobiles Sulfat). Nach Abschluss der Wärmebehandlung rekristallisiert das mobile Sulfat bei 20°C erneut zu Ettringit. Es kommt zu hohen Volumenausdehnungen. Durch fehlenden Kristallationsraum in den Mikroporen kommt es zu hohen Kristallationsdrücken, welche die Zugfestigkeit des Zements übersteigen und somit zu Rissbildungen im Beton führen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich Sulfat bei der Wärmebehandlung durch die beschleunigte Hydratation an nanokristallinen Calcium-Silikat-Hydrate (CSH-Phasen) adsorptiv bindet. Die CSH-Phasen dienen somit quasi als Sulfatdepot. Bei einer späteren Feuchtezufuhr wird das Sulfat wieder abgegeben und es kommt zu einer verspäteten, schädlichen Ettringitbildung (STARK & WICHT, 2001).

3.2.2 Schadensmechanismen

Die Schadensmechanismen des Sulfatreibens sind aus der Betontechnologie bekannt und weitgehend erforscht. Man unterscheidet lösenden und treibenden Angriff. Grundsätzlich kann der Angriff nur in Gegenwart von Feuchtigkeit stattfinden. Beim lösenden Angriff werden calciumhaltige Phasen des Zementsteins, insbesondere Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ angelöst und ausgewaschen. Die Schädigung beruht dabei auf Substanzverlust. Beim treibenden Angriff entstehen Reaktionsprodukte, die im Vergleich zu den Ausgangsstoffen ein größeres Volumen einnehmen und dadurch zu Quellhebungen oder Quelldrücken sowie zu Festigkeitsverlust durch die Zerstörung des Bodengefüges führen.

3.2.3 Einflussfaktoren

Es sind eine Reihe von Randbedingungen bekannt, die realisiert sein müssen, damit es zur Bildung von Ettringit kommen kann. Dazu zählen der Mineralbestand, das Wasserangebot, der Verwitterungszustand und die Porenstruktur des Bodens, das chemische Milieu und die Temperatur.

Mineralbestand:

Zunächst hat die Verfügbarkeit an bestimmten Mineralen elementaren Einfluss darauf, ob und in welchem Umfang die Treibreaktion stattfinden kann. Hierbei ist der für Sulfatreiben bei einer Bodenbehandlung mit calciumbasierten Bindemitteln als kritisch zu bezeichnenden Sulfatgehalt stets vom Anteil, der Art und der Verteilung der im Boden vorhandenen Tonmineralen abhängig. Liegt z.B. ein Verhältnis $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 1$ vor, so bilden sich Monosulfate, die sich dann zu Ettringit umkristallisieren.

Bei geringen Tonanteilen (< 10%) sind relativ hohe Sulfatgehalte (> 1% bzw. 10.000 ppm) zur Erzeugung signifikanter Quellhebungen erforderlich. In der Tendenz nimmt der kritische Sulfatgehalt mit zunehmendem Tonanteil des Bodens ab. Die Untergrenze für das Auftreten von Quellerscheinungen liegt etwa bei einem Sulfatgehalt von 0,3% bzw. 3.000 ppm. Festigkeitsverluste werden jedoch auch bei geringeren Sulfatgehalten beobachtet. In der Praxis wird für die Beurteilung der Gefährdung überwiegend der Sulfatgehalt des Bodens oder der des Eluats (Sulfatlösung) herangezogen. Tendenziell haben kaolinitische (nicht quellfähige) bindige Böden gegenüber smectitischen (quellfähige) Böden einen größeren Bestand an Aluminaten und somit unter ansonsten gleichen Bedingungen ein höheres Potential für schädigenden Ettringitaufwuchs (WITT, 2012).

Grundsätzlich ist nicht in erster Linie die Menge an den für die Treibreaktion erforderlichen Substanzen maßgebend, sondern vielmehr ihre Verteilung sowie die Größe der reaktiven Oberflächen.

Wasserangebot:

Damit die ggf. vorhandene Sulfate als Voraussetzung für die Treibreaktion in Lösung gehen können (d. h. mobilisiert werden), muss ausreichend Wasser verfügbar sein. Auch für den Transport des gelösten Sulfats muss ausreichend Wasser vorhanden sein. Dies ist z. B. bei Auftreten von Staunässe der Fall (WITT, 2012).

Chemisches Milieu / Alkalität:

Sulfatreiben findet nur in alkalischem chemischen Milieu statt. Die Bindemittelzugabe hat im Boden eine starke Erhöhung der Alkalität zur Folge. Bei einem pH-Wert > 10,5 werden Aluminat- und Silikationen aus den Tonmineralen des Bodens in großem Umfang freigesetzt und stehen dann für die Treibreaktion zur Verfügung (WITT, 2012). Durch die Bodenbehandlung mit calciumbasierten Bindemitteln ist das für das Sulfatreiben erforderliche alkalische Milieu i. Allg. immer realisiert

Temperatur:

Die Bodentemperatur hat starken Einfluss auf den Reaktionsmechanismus. Ettringitaufwuchs findet insbesondere im Temperaturintervall zwischen etwa 15°C und 20°C statt. Thaumasit kristallisiert bei Temperaturen unter 10°C (WITT, 2012).

Porenstruktur des Bodens:

Auch die Porenstruktur des Bodens beeinflusst die Treibreaktion. Ein zusammenhängendes Porensystem begünstigt den konvektiven Transport sulfathaltiger Lösungen durch das Bodengerüst. Da die schädigende Volumenzunahme infolge Ettringitaufwuchs aber in den Bodenporen stattfindet, kann eine gute Verdichtung des Bodens und damit eine Reduzierung der Porengröße die Quellgefährdung sogar erhöhen (WITT, 2012).

Überlagerungsdruck:

Da der bei behinderter Volumendehnung entstehende Quelldruck (bis ca. 5 MPa) erheblich ist, können Quellhebungen durch die im Straßenbau üblichen Überlagerungsdrücke nicht kompensiert werden (KELLER et al., 2002).

3.2.4 Schadensfälle

Zahlreiche Schadensfälle aus dem Bereich des Straßenbaus werden nicht nur in der deutschsprachigen Literatur erwähnt.

BAB A81, Autoanschlussstelle Eilhofen, Aufstieg Reisberg (MOSTHOF, 1998):

Im Jahre 1992 wurden im Bereich der Anschlussstelle Eilhofen die erste und zweite Fahrspur der A81 grundhaft erneuert. Die Oberfläche des angewitterten Gipskeupers wurde aufgefräst. Die Frästiefe betrug 30 cm. In Bereichen, in denen die Tragfähigkeit des Baugrunds einen Wert von 100 MPa unterschritt, wurde eine Sanierung des überfeuchteten Erdplanums mit etwa 12 kg/m² Weißfeinkalk (CaO) durchgeführt. Um den optimalen Wassergehalt für den Einbau des Boden-Bindemittelgemischs zu erhalten, wurde Leitungswasser aus dem Netz der Stadt Weinsberg zugesetzt (Bodenseewasser). Nach Aufbringen der Frostschutzschicht wurden die oberen 20 cm mit hydrophobiertem Zement (Pektacrete Cement, 35F) verfestigt (Zementmenge von 15 kg/m²). Abschließend wurde die neue Betonfahrbahn mit einer Dicke von 26 cm aufgebracht.

Wenige Jahre nach den durchgeführten Sanierungsmaßnahmen kam es zu Verkippen der Fahrbahnplatten. Sie wurden durch Hebungen von bis zu 11 cm verursacht. Zusätzlich sind in der Fahrbahn Längsrisse von mehreren zehn Metern Länge und einigen Zentimetern Breite aufgetreten.

Zur Untersuchung wurden fünf Bohrungen auf max. fünf Meter abgeteuft. Es konnten mit röntgenographischen Untersuchungen Ettringit / Thaumasil-Mischkristalle von ca. 15 Gew.-% in der kalkverbesserten Schicht nachgewiesen werden. In der zementverfestigten Frostschutzschicht konnten keine Ettringit / Thaumasil-Kristalle gefunden werden.

BAB A81, Autobahnzubringer K1077 bei Gärtringen, Herrenberg (KELLER et al., 2002, FRANK, 1997):

Am im Jahre 1995 erstellten Autobahnzubringer K1077 zur A81, AS Gärtringen traten im ersten von zwei Bauabschnitten bereits im Jahr nach der Fertigstellung Schäden auf. Es handelte sich um Hebungen des Baugrunds um bis zu 30 cm und Längsrisse in der Asphaltdecke von einer Länge bis zu 6 m bei einer Breite von ca. 2 cm. Am zweiten Bauabschnitt traten keine Schäden auf.

Die Straße wurde auf einer ca. 20 Jahre alten Dammschüttung aus Abraum des Schönbuchtunnels hergestellt. Der Tunnel führt durch die Schichten des Gipskeupers. Durch einen Einsturz während der Bauarbeiten am Tunnel befindet sich möglicherweise auch Betonbruch in der Auffüllung. Zu Beginn der Bauarbeiten des Autobahnzubringers wurde die oberste, ca. 1,5 m dicke verwitterte Schicht abgetragen, zerkleinert und mit 2-3 Gew.-% Kalk stabilisiert. Unter der Fahrbahndecke befindet sich eine 0,5 m dicke Schottertragschicht, die eine bessere Entwässerung gewährleisten soll. Zusätzlich wurde eine Drainage neben der Straße hergestellt.

Bei Sichtung der Schäden war auffällig, dass die Hebungen häufig im Bereich von Kanaldeckeln auftraten. Beim Öffnen einer Schürfgrube direkt an der Spitze einer Verkehrsinsel trat bereits während der Aushubmaßnahmen ab einer Tiefe von 60-70 cm unter dem Planum eine Wasseransammlung zu Tage. Innerhalb weniger Minuten standen 30 cm Wasser im Schurf, welcher neben dem Entwässerungssystem erstellt worden war. Es wurden drei der vier Schürfgruben in einem Abstand von 0,5 m vom Straßenrand angelegt. In den drei Schürfgruben konnte Ettringit/Thaumasil in unterschiedlichen Konzentrationen festgestellt werden. Es trat fein verteilt, in Nestern oder als Kruste um Betonbruchstücke auf. Die vierte Grube wurde etwa 5 m von der Straße entfernt als Vergleichsgrube angelegt, um den Einfluss der Kalkzugabe untersuchen zu können.

Gipshaltige Sedimente mit Betonbruch (FRANK, 1997):

In Stuttgart-Bad Cannstatt sind an Häusern und Erschließungsbauwerken, ca. zwei Jahre nach Herstellung, Hebungsschäden aufgetreten. Die Hebungen betragen bis zu 18 cm. Aufgrabungen ergaben, dass bis zu einer Tiefe von 1,8 m Auffüllungsmaterial vorlag. Es bestand aus Betonbruch, Dolomit, Kalkstein, Tonstein, Tonmergelstein und Sulfatgestein. Unter dem Auffüllungsmaterial lag Lösslehm vor. Nach Auflassung der Schürfgruben konnte Wasserzutritt festgestellt werden. Anhydrit-Gips-Umwandlung konnte als Schadensursache ausgeschlossen werden, da ausschließlich Gips gefunden wurde und in dem kurzen Zeitraum eine Anhydrit-Hydratation sehr unwahrscheinlich ist. In den Sedimenten konnten bis zu 20 Gew.-% Ettringit/Thaumasil röntgenographisch nachgewiesen werden. Gipsbruch und Beton waren von einer dünnen Kruste aus Ettringit überzogen.

BAB A38 & A71, Schäden durch treibmineralbildende Böden (HECHT, 2010) (HECHT & KRINGS, 2009) (WITT, 2014):

An den neu gebauten Bundesautobahnen 38 & 71 kam es zu Schadensfällen infolge Hebungen durch Sulfatreiben.

Im Falle der A38 wurde der östlich der Landesgrenze Niedersachsen/Thüringen anstehende gipshaltige Boden mit einem Mischbindemittel (bestehend aus 35% Branntkalk (CaO) sowie 60% Portlandzement (HECHT, 2010 sowie HECHT & KRINGS, 2009)) über eine wechselnde Dicke von 30 bis 90 cm behandelt. Im Zuge der Schadensanalyse wurden im unbehandelten Boden keine Treibminerale, in den behandelten Zonen bis zu 5,1 Massenprozent Ettringit und bis zu 13,4 Massenprozent Thaumasil nachgewiesen. Es traten Hebungen von bis zu 12 cm auf.

Als Ursache für die Hebungen an der A71 nahe des Schmücketunnels (nördlich A38-südlich B85) wurde zunächst die Bildung von Ettringit/Thaumasil vermutet. Die durchgeführten Analysen ergaben allerdings nur untergeordnet anstehenden Gips, dafür wurde aber Dolomit in größerem Umfang erkundet. In den dolomithaltigen Proben kam es zu erheblichen Hebungen (5% der Probenhöhe) einhergehend mit einer Neubildung von Magnesiumsalzen (Magnesiatreiben).

Im Laufe des Winters 2013/2014 traten beim weiteren Streckenbau der BAB 71 (nördlich B85 – AS Sömmerda-Ost) an im Herbst 2013 verbesserten Planien und Dammböschungen Schäden auf. Die Dämme wurden fast vollständig im Sommer und Herbst 2013 aus dem Abtrag geschüttet. Die Böden sind aus dem Bereich des

Mittleren und Unteren Gipskeuper. Der Gipsanteil wurde zu ca. 26 M.-% ermittelt. In der Planung der Baumaßnahme wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es wurde im Ergebnis der Experimente, mit dem eingesetzten Bindemittel nur ein geringes Quellpotential vermutet. Die äußere Zone der Dammböschungen und das Planum wurden daraufhin im Herbst 2013 mit einem Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand verbessert. Das Planum wurde mit einer Schutzlage aus Frostschutzmaterial überschüttet. Im Frühjahr 2014 wurde an fertiggestellten und überschütteten Planien eine Auflockerung mit einem Verlust der Festigkeit und der Tragfähigkeit der Oberflächen der Erdbauwerke festgestellt. Im Laufe des Sommers 2014 verfestigte sich das Planum teilweise wieder.

Stewart Avenue & Owens Street, Las Vegas, Nevada, USA (MITCHELL, 1986), (HUNTER, 1988):

Aus der amerikanischen Fachliteratur ist der Schadensfall Stewart Avenue & Owens Street in Las Vegas ein vielzitiertes Beispiel. Die Stewart Avenue ist eine der großen Ost-West-Verbindungen der Stadt. Im Jahre 1976 wurde die Straße von zwei auf vier Fahrspuren erweitert. Der Aufbau der Fahrbahn bestand aus 10 cm Asphalt, 13 cm Auffüllung und 30 cm kalkstabilisiertem Boden. Der Boden war mit 4,5 Gew.-% Branntkalk behandelt und nach mindestens 16 h verdichtet worden. Der Mineralbestand des bindemittelbehandelten Bodens enthielt neben Quarz, Feldspat und Muskovit die Tonminerale Sepiolith, Montmorillonit sowie untergeordnet Kaolinit und Kaolinit-Montmorillonit. Calcit ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) und Gips waren ebenfalls in großer Menge vorhanden.

Sechs Monate nach dem Bau sind erste Hebungen aufgetreten, nach zwei Jahren schwere Schäden, wobei der gesamte Straßenkörper um 30-60 cm angehoben wurde. Es traten schwere Schäden direkt neben vollkommen ungeschädigten Bereichen auf. In dem insgesamt 5 km langen Bauabschnitt wurden 32 Schürfgruben in schwer geschädigten, moderat geschädigten und ungeschädigten Bereichen geöffnet. In schwer geschädigten Gebieten war der Boden weich und grau und hatte die mechanischen Eigenschaften eines plastischen Schluffs. In ungeschädigten Gebieten war der Boden extrem hart, zementartig und bräunlich. Zwischen diesen beiden Extremen traten Übergangszustände in jeglicher Ausprägung auf. Die durchgeführten Untersuchungen (Elektronenmikroskop (REM) und Röntgendiffraktometrie (XRD)) ergaben, dass Proben aus geschädigten Bereichen zwischen 20 und 40 Vol.-% an Thaumasil enthiel-

ten. Kalk und Gips sowie Polyhalit wurden ebenfalls festgestellt. In einer Sulfatlösung konnte im Labor eine weitere Quellung von bis zu 12 Vol.-% erzeugt werden. Ungeschädigte bzw. unbehandelte Proben wiesen lediglich eine Quellung von 6 Vol.-% auf.

Ausführlich werden die in Deutschland aufgetretenen Schadensfälle von KELLER et al. (2002) beschrieben. HARRIS (2005) und RAJASEKARAN (2005) geben einen ausführlichen Überblick über aufgetretene Schadensfälle in den USA. Im Rahmen einer Diplomarbeit der HTWK Leipzig in Zusammenarbeit mit der DB ProjektBau GmbH wurden aufgetretene Schadensfälle in Deutschland, USA und Großbritannien dokumentiert (SCHREBER, 2011).

3.3 Versuche zur Beurteilung von Treiberscheinungen

Zur ersten groben Abschätzung der Quellgefährdung kann mittels Feldversuche qualitativ bestimmt werden, ob sulfathaltige Böden vorhanden sind. Eine Zusammenfassung möglicher Feldversuche findet sich in (HARRIS, 2002), einer Studie aus den USA. Im Rahmen der bereits erwähnten Diplomarbeit an der HTWK Leipzig (SCHREBER, 2011) wurde eine Zusammenfassung der von HARRIS (2002) erwähnten Versuche in Ergänzung Deutscher Normen erstellt.

Im Folgenden werden einige der Versuche vorgestellt.

- Sichtprüfung mit anschließendem Salzsäuretest: Sulfate treten meist in Form von Calciumsulfat (Gips) und/oder Anhydrit auf. Calciumsulfatkristalle sind farblos, häufig aber gelblich, rötlich, durch Bitumeneinschlüsse grau bis braun gefärbt. Gips reagiert mit Salzsäure nur sehr schwach. Daher ist mittels eines Salzsäuretests im Feld die Unterscheidung zu den karbonatischen Sintern, die sehr stark auf Salzsäure reagieren, möglich,
- Elektrische Leitfähigkeit des Bodensättigungs-extraktes: Nach HARRIS (2002) veröffentlichten BREDENKAMP & LYTTON (1995) einen einfachen Feldversuch um qualitativ festzustellen, ob Sulfate im Boden vorhanden sind. Hierbei wird eine Bodenprobe mit destilliertem Wasser vermischt und die elektrische Leitfähigkeit der Lösung bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Indexwert für die vorhandene Ionenkonzentration. Zwischen verschiedenen Ionen kann allerdings nicht unterschieden werden. In den USA wird dieses Verfahren als erste Risikoein-

schätzung vor einer Bodenbehandlung verwendet und ist in der TxDOT Designation: TEX-146-E (2005) genormt.

- pH-Wert-Bestimmung: Der pH-Wert ist ein Maß für den Säuregrad eines Bodens. Sulfatsaure Böden haben einen pH-Wert von < 4 und entstehen durch den chemischen Prozess der Pyritoxidation. Bei Böden mit einem natürlichen Sulfatgehalt wie z.B. Gipskeuper ist der pH-Wert höher. Der pH-Wert eine Gipslösung liegt bei etwa 7.
- Aceton-Test: Nach HARRIS (2002) entwickelten BOWER & HUSS (1948) einen qualitativen Feldversuch, mit dem geprüft werden kann, ob im Boden Sulfat enthalten ist. Aus einer Bodenprobe wird mit destilliertem Wasser eine Suspension hergestellt, die anschließend gefiltert wird. Wenn sich nach Zugabe von Aceton ein weißer Niederschlag bildet, ist Sulfat vorhanden.
- Sulfidbestimmung: Nach HARRIS (2002) wurde von McCLELLAN et. al, (1998) ein Feldversuch beschrieben, bei dem Gasblasen beobachtet werden, die einer Bodenprobe entweichen, wenn Sulfide enthalten sind, Hierfür wird Natriumazid in einer Jodlösung in eine Bodenprobe gemischt. Natriumazid und Jod reagieren nur zusammen, wenn Sulfid als Katalysator vorhanden ist. Es entsteht dabei Natriumjodid und molekularer Stickstoff, der zu einer Blasenbildung führt.
- Bariumchlorid-Test: Sulfate können chemisch mit Bariumchlorid nachgewiesen werden. Der gelöste Boden wird zunächst mit Salzsäure angesäuert um vorhandene Carbonate zu lösen. Anschließend wird eine Bariumchloridlösung hinzugegeben. Bei Vorhandensein von Sulfaten bildet sich das in Wasser unlösliche Bariumsulfat, welches als weißer Niederschlag ausfällt. Über die ausgefallte Menge, kann der Sulfatgehalt zudem auch quantitativ bestimmt werden (HARRIS, 2002).
- Verfahren nach DIN 4030-2:2008: Grundsätzlich werden nach DIN 4030-2:2008 Wasserproben untersucht. Daher sind die in der DIN 4030 beschriebenen Schnellprüfungen nur an Wasserproben möglich. Für den Schnelltest benötigt die Wasserprobe einen pH-Wert zwischen 4 und 8. Wasserproben mit einem pH-Wert kleiner 4 werden daher mit Natriumacetat, Wasserproben mit einem pH-Wert größer 8 mit Ascorbinsäure versetzt. Anschließend werden Teststäbe mit Bariumchlorid und Thorin als Indikator in die Probe eingetaucht. Bei Vorhan-

densein von Sulfat färbt sich die Beurteilungszone des Teststabes. Anhand einer Farbskala kann auf den Sulfatgehalt geschlossen werden. Wenn der Boden einen zu niedrigen Durchfeuchtungsgrad hat und keine Wasserprobe entnommen werden kann, ist eine Bodenprobe zu nehmen und das Referenzverfahren, welches in der DIN 4030-2:2008, Abs. 6.3 erläutert wird, durchzuführen. Sulfat wird hier gravimetrisch als Bariumsulfat bestimmt (Bariumchlorid-Test).

- Bestimmung des Sulfatgehalts im Eluat: Die Herstellung des Eluats soll nach LAGA M20 TR, Teil III, 2004 nach dem Kapitel 3 der LAGA-Richtlinie EW 98S (Standardverfahren) erfolgen. Bei Bodenproben sind nach LAGA M20 TR, Teil III, 2004 die Vorgaben des Anhang E der DIN EN 12457-4: 2002 bezüglich der Durchführung der Elution zu beachten. 2012 wurde die LAGA EW 98S zurückgezogen. Alternativ zu verwenden ist das Verfahren nach DIN EN 12457-4:2002. Die LAGA M20 TR, Teil III 2004 gibt als Analyseverfahren für die Sulfatbestimmung die DIN 38405-5: 1985 vor, nach der die im Eluat enthaltenen Sulfationen gegen Bariumionen als Bariumsulfat ausgefällt werden (Bariumchlorid-Test).

Bei einer Bodenverbesserung sollte in Verdachtsfällen der Sulfatgehalt nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ bestimmt werden. Dies erfordert mineralogische und chemische Analysen.

- Mittels mineralogischer Untersuchungen (z.B. röntgendiffraktometrische Messung) ist es möglich, den Sulfatträger und den Mengenanteil im Boden zu bestimmen. Für Reihenuntersuchungen von Baugrundproben sind mineralogische Verfahren allerdings nicht geeignet, da sie sehr aufwändig sind. Es empfehlen sich chemische Analysen,
- Ionenchromatographie (DIN EN ISO 10304-1:2009): Hierbei handelt es sich um eine analytische Methode. Mit Hilfe des chromatographischen Verfahrens können Stoffe anhand Ihrer Ladung getrennt werden. Grundlage für die Trennung ist ein Ionenaustauschprozess zwischen der mobilen Phase und den am Trägermaterial gebundenen Austauschgruppen. Eine genaue Erläuterung der Geräte und der Messung sind in der DIN EN ISO 10304-1:2009 enthalten.

Muss von einer mittleren bis hohen Gefährdung ausgegangen werden, so empfehlen sich für eine fundierte Prognose Quellhebungs- und ggf. auf-

wändigere Quelldruckversuche an Proben des Boden-Bindemittelgemischs nach PAUL (1986).

- Versuche zur Bestimmung der maximalen Quellhebung: Beim Freiquellversuch werden zylindrische Proben im allseitig unbehinderten Zustand gewässert und die Axialdehnung mit Hilfe einer Messuhr über die Zeit erfasst. Freiquellversuche sind sehr preiswert, allerdings kann die Probe zerfallen. Die Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (PAUL, 1986) empfiehlt daher Quellhebungsversuche, bei denen die Proben vor der Wässerung in steife Metallringe eingebaut werden.
- Versuche zur Bestimmung des maximalen Quelldrucks: Maximale Quelldrücke werden bei allseitig behinderter Verformung einer gewässerten Probe gemessen. Versuchsapparaturen hierfür wurden von MADSEN (1976) und PIMENTEL (1996) entwickelt. Mit der Versuchsapparatur von PIMENTEL (1996) ist es zudem möglich, kombinierte Quelldruck- Quellhebungsversuche durchzuführen.

Aus der Betontechnologie sind zudem zahlreiche Verfahren (auch Schnellverfahren) zur Prüfung des Sulfatwiderstands von Zement bekannt (STARK & WICHT, 2001).

Obwohl die Reaktionsmechanismen wie oben beschrieben hinlänglich untersucht wurden und daher bekannt sind, steht der Baupraxis weiterhin kein standardisiertes Prüfverfahren zur Verfügung, mit dem das Gefährdungspotential für das Auftreten von Sulfatreiben bei der Behandlung eines tonigen Bodens mit calciumbasierten Bindemittel im Einzelfall bereits im Vorfeld einer Baumaßnahme zuverlässig abgeschätzt werden kann.

Es fehlen aber auch eindeutig definierte Kenngrößen einschließlich einer baupraktischen Angabe von Grenzwerten, für als potentiell schadensrelevant zu betrachtende Sulfatgehalte von Böden. Es gibt daher derzeit keine klar definierten Anwendungsgrenzen der Behandlung sulfathaltiger, toniger Böden mit calciumbasierten Bindemitteln.

Dies sind zunächst zu schaffende Grundvoraussetzungen, um frühzeitig Strategien zur Gefahrenabwehr entwickeln und umsetzen zu können bzw. ggf. auch um das Verfahren der Bodenbehandlung mit calciumbasierten Bindemitteln auszuschließen.

3.4 Kritische Sulfatgehalte

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Anhaltswerte für sogenannte kritische Sulfatgehalte, ab denen von mittleren bis höheren Gefährdungen durch

Ettringitreiben ausgegangen werden kann, zu ermitteln.

In der deutschsprachigen Literatur (u.a. WITT, 2012) werden baupraktisch kritische, d.h. potentiell schädigungsrelevante Sulfatgehalte mit einer geringen Gefährdung ab 3.000 ppm und mit einer hohen Gefährdung ab 8.000 ppm angegeben.

Die von WITT (2012) angegebenen Grenzwerte finden sich auch in der Technischen Vorschrift vom Texas Department of Transportation, (2005) und in der UNI EN 1744-1.

Die untere Grenze von 3.000 ppm wird auch von DERMATAS & MITCHELL (1992) bestätigt. Dagegen geben LITTLE et al. (2010) und PETRY & LITTLE (1992) an, dass bereits ein Sulfatgehalt von 2.000 ppm potentiell schädigungsrelevant ist.

Eine hohe Gefährdung wurde von HUNTER (1988) ab einem Sulfatgehalt von 10.000 ppm ermittelt. TIDWELL & McCALLISTER (1997) stellen fest, dass oberhalb eines Sulfatgehalts von 12.000 ppm ein signifikantes Hebungproblem bei Verwendung von Kalk als Bindemittel besteht.

3.5 Kritische Gesteine/Böden

Werden sulfat- oder sulfidhaltige Böden oder Gesteine mit Bindemittel behandelt, besteht das Risiko von Schäden durch Ettringitreiben. Im Vorfeld einer Bodenbehandlung mit Bindemittel sollte daher sicher ausgeschlossen werden, dass der Boden Sulfat oder Sulfid enthält. Ist dies nicht der Fall, sollte der Sulfat-/ Sulfidgehalt bestimmt und ggf. weitere Versuche durchgeführt werden.

Dabei geben die stratigraphische Einordnung der jeweiligen Baugrundsichten und die geotechnische Erkundung bereits deutliche Hinweise auf ein mögliches Risiko.

Sulfatführende Böden oder Gesteine finden sich in Deutschland beispielsweise in den Schichten des Zechsteins, des Oberen Buntsandsteins, des Gipskeupers oder des Mittleren Muschelkalks.

Dagegen sind vor allem Tone und Tonsteine des Tertiärs, der Kreide und des Jura (z. B. Posidonienschiefer) dafür bekannt, dass sie Pyrit (oder Markasit) führen. In den Verwitterungszonen ist das Sulfid oxidiert und zu Sulfat, in Form von Gips umgewandelt.

Ergänzend sind die in Norddeutschland weit verbreiteten Moor- und Marschenböden zu nennen, die oft schwefelhaltige Minerale sowie organische Schwefelverbindungen aufweisen (LANGER et al., 2007).

Berichte und Karten zum Vorkommen von sulfathaltigen Böden und Gesteinen werden von den jeweiligen geologischen Landesämtern herausgegeben.

4 Experimentelle Arbeiten

Der Beantwortung der im vorherigen genannten offenen Fragestellungen soll sich im Rahmen der Forschungsarbeit insbesondere durch eigene experimentelle Arbeiten genähert werden. Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus diesen labortechnischen Untersuchungen sollen nach Abgleich mit entsprechenden, in der Literatur dokumentierten Untersuchungen als Basis für die Entwicklung einer Prüfvorschrift zur Beurteilung des Risikos von Sulfatreiben durch Ettringitbildung bei Bindemittelbehandlungen toniger Böden dienen. Aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen sollen dafür auch Richtwerte für die Treibreaktion maßgeblich beeinflussende Faktoren abgeleitet werden.

Im Labor werden zunächst Probekörper für die Untersuchungen hergestellt. Dafür werden vier unterschiedliche natürliche Versuchsmaterialien ausgewählt. Zwei Materialien weisen einen natürlich Sulfatgehalt auf, die beiden anderen sind sulfatfrei. Die natürlich sulfatfreien Materialien werden im Labor mit einer festgelegten Zugabemenge an Sulfat versetzt. Diese Ausgangsmaterialien werden mineralogisch und bodenmechanisch klassifiziert (vergleiche Abschnitt 4.1).

Als calciumbasierte Bindemittel werden in den Experimenten die bei Bodenbehandlungen üblichen Bindemittel Portlandzement und Weißfeinkalk verwendet.

Es werden Quellhebungsversuche und einaxiale Druckversuche durchgeführt. Da aus der labortechnischen Untersuchung der sich bei Behinderung der Quellhebungen ausbildenden Quelldrücke für die baupraktischen Anwendungen im Straßenbau kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten ist, wird hier auf die Durchführung von Quelldruckversuchen verzichtet. Begründet ist dies in der Größenordnung der Quelldrücke, die bei meh-

renen Megapascal liegen kann. Derart hohe Drücke können von den bei Erdbauwerken im Straßenbau üblichen Überlagerungsdrücken keinesfalls überdrückt werden (WITT, 2012). Abschnitt 4.3 behandelt die verwendeten Versuchsanordnung, die Versuchsbedingungen und die Ergebnisse der Quellhebungsversuche. Die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche werden in Abschnitt 4.4 zusammengestellt und bewertet.

4.1 Versuchsböden

Insgesamt wurden vier verschiedene Materialien für die Laborversuche verwendet. Die Entnahmestellen sind in Anlage 1 abgebildet. Als Versuchsböden wurden Böden und Halbfestgesteine ausgewählt, wie sie typischerweise im Straßenbau in Süddeutschland angetroffen bzw. eingesetzt werden. Ausgewählt wurden zwei natürlich sulfathaltige und zwei natürlich sulfatfreie Böden, um bei letzteren für die Versuche einen definierten Sulfatgehalt durch künstliche Sulfatzugabe einstellen zu können. Hinsichtlich der sulfatfreien Böden wurden zwei Materialien völlig unterschiedlicher Genese, Zusammensetzung und Verwitterungszustandes ausgewählt. Die sulfathaltigen Materialien sind stratigraphisch der Gipskeuper-Formation zuzurechnen. Sie unterscheiden sich aber hinsichtlich ihrer Mineralogie und ihres Verwitterungszustandes (Festgestein / Verwitterungslehm) deutlich. Die gewählten Versuchsböden decken damit eine große Bandbreite hinsichtlich Genese, Mineralogie und Verwitterungszustand ab.

Als Versuchsmaterialien mit natürlichem Sulfatgehalt werden folgende zwei Böden bzw. Verwitterungsprodukte von Festgesteinen verwendet:

Probenmaterial 1 „Gipstagebau Epfendorf-Trichtingen (GB ET)“:

Der Gipssteinbruch befindet sich im südlichen Baden-Württemberg im Landkreis Rottweil in der Nähe der Stadt Oberndorf am Neckar. Die Rohstoffgewinnungsstelle wird beim Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) mit der Nummer RG 7717-3 geführt. Im Steinbruch abgebaut wird Gipsgestein des Keupers, der obersten

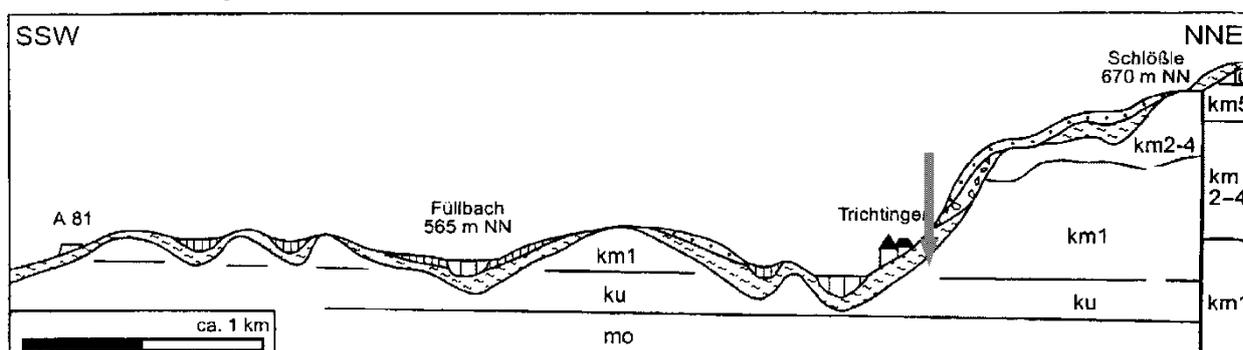


Bild 2: Geologische Situation am Gipssteinbruch Trichtingen (LGRB, Informationen 13, thematische erweitert)

der drei lithostratigraphischen Gruppen des Germanischen Trias. Der Abbau findet in dem hier sechs bis acht Meter mächtigen Profil der Grundgipsschichten, d. h. im Bereich der Untergrenze der Untergruppe des Mittleren Keupers (auch: Gipskeuper oder nach neuerer Bezeichnung: Grabfeld-Formation) zwischen Bochinger Horizont und Grenzdolomit statt (zur geologischen Situation am Steinbruch siehe auch Bild 2 und die Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 7717).

Die Probe wurde im Steinbruchgebiet aus der Füllung einer Einsturzdoline entnommen. Das Material besteht aus in den Karsthohlraum nachgestürzten, teilweise ausgelaugten Verwitterungsschluffen der Roten Grundgipsletten, in die in wechselndem Maße mürbe bis mäßig harte, bröckelig verwitterte Gipssteinstücke von grauer bis schmutzig weißer Farbe eingebettet sind. Entnommen wurden ca. 30 kg Material.

Probenmaterial 2 „Wagenburgtunnel Stuttgart, Versuchsquerschlag II (WT VQ II)“

Der im Jahre 1957 für den Straßenverkehr freigegebene Wagenburgtunnel in Stuttgart durchfährt von West nach Ost ansteigend hauptsächlich im Bereich der Schichten der Grabenfeld-Formation, des Mittleren Keupers. Neben der dem Straßenverkehr vorbehaltenen Südröhre existiert eine als Sohlstollen ausgebildete Nordröhre. Hier ist bis heute das beim Tunnelbau durchhörtere Gebirge in geologischen Fenstern einsehbar. Es handelt sich hauptsächlich um harte, dunkelgraue Mergel mit weißlichen, fein verteilten Gipsbänder aus Faser-gips sowie ebenfalls mit Fasergips geheilten senk-

rechten und geneigten Klüften. Im höheren Bereich des Ostportals werden in den oberen Bereichen des Mittleren Keupers bunte, überwiegend graurote Mergel erschlossen (zur geologischen Situation im Wagenburgtunnel siehe auch Bild 3 und die Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 7221).

Aufgrund der anhydritführenden Gesteinsschichten kommt es bis zum heutigen Tage zu Quellhebungen als Folge der Anhydrit-Gips-Umwandlung. Zur näheren Erforschung dieser Quellvorgänge wurden von der Nordröhre ausgehend zwei Versuchsquerschläge nach Norden angelegt. Versuchsquerschlag I wurde nur der Tunnelluft ausgesetzt, Versuchsquerschlag II wurde dagegen intensiv bewässert, wodurch die Anhydrit-Gips-Umwandlung in erheblichem Umfang provoziert wurde und starke Sohlhebungen aufgetreten sind. In diesem Bereich der aufgequollenen Sohle des Versuchsquerschlags II wurde Probenmaterial 2 entnommen.

Neben den beiden beschriebenen Versuchsmaterialien mit natürlichem Sulfatgehalt wurden zwei weitere Versuchsmaterialien gewählt, die im natürlichen Zustand sulfatfrei sind und denen erst im Labor eine festgelegte Menge an Sulfat zugesetzt werden sollte.

Probenmaterial 3 „Wagenburgtunnel Stuttgart, Geologisches Fenster F3 (WT F3)“

Das geologische Fenster F3 befindet sich im östlichen, höher gelegenen Tunnelabschnitt. Die durchhörtere Gesteinsschichten des Mittleren

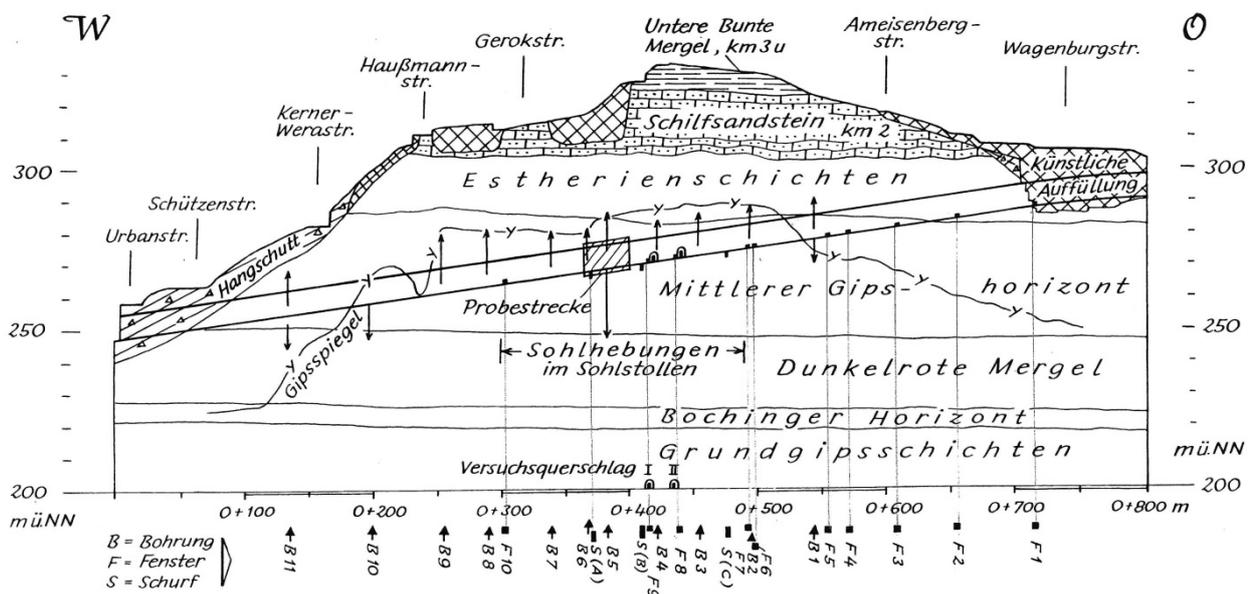


Bild 3: Geologische Situation im Stuttgarter Wagenburgtunnel (Quelle: MPA Universität Stuttgart, unveröffentlicht)

Keupers liegen hier oberhalb des Gipsspiegels und sind deshalb weitestgehend ausgelaugt. Die verwitterten bis angewitterten feinkörnigen Tonsteine besitzen überwiegend eine rotbraune Färbung. Das Gebirge tritt im geologischen Fenster teilweise tropfnass bis feucht zu Tage. Das Probenmaterial 3 wurde aus dem beschriebenen geologischen Fenster entnommen. Zur geologischen Situation im Wagenburgtunnel siehe auch Bild 3 und die Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 7221.

Probenmaterial 4 „Bindige Deckschichten, bmk Steinbruchbetriebe, Werk Robert Bopp, Talheim bei Heilbronn (LL HN)“

Bei diesem Probenmaterial handelt es sich um einen klassischen Lösslehm, welcher die im Steinbruch abgebauten Schichten des Hauptmuschelkalks in einer Mächtigkeit von ca. fünf bis zehn Metern überdeckt. Das Material wird bereits seit vielen Jahren in verschiedenen Forschungsarbeiten des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart verwendet. Bei Löss handelt es sich genetisch um glaziale, äolische Sedimente. Der sog. Primärlöss ist zunächst durch physikalische Verwitterungsprozesse entstanden. Die Verwitterungsprodukte wurden in der Folge durch Windeinwirkung abtransportiert und später sedimentiert. Löss ist ein gelbbraunes bis gelbgraues, poröses Sediment, welches sich hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten und Kalk zusammensetzt. Bodenmechanisch ist er als schwach toniger, schwach feinsandiger Schluff mit geringer Plastizität anzusprechen.

Der sog. Sekundärlöss entsteht aus Primärlöss durch chemischen Verwitterung und Umlagerungsvorgänge, wodurch sich sowohl sein Mineralbestand, als auch seine bodenmechanischen Eigenschaften verändern. Er entkalkt dabei und verlehmt durch die Umwandlung der Feldspäte in Tonminerale. Diese Verlehmung ist stets mit einer visuell auffälligen Verbraunung durch Umbildung von Eisenhydroxid verbunden. Bodenmechanisch ist Lösslehm als toniger bis stark toniger, schwach feinsandiger bis sandiger Schluff einzustufen, der durch ein plastisches Verhalten und durch geringe Porosität gekennzeichnet ist. (FEESER, 1975) und (RILLING, 1994). Entnommen wurden ca. 30 kg Material.

4.1.1 Bodenmechanische Klassifikation

Eine klassische bodenmechanische Klassifikation wurde an den Probenmaterialien 1 und 4 durchgeführt.

Die Korngrößenverteilung beschreibt den Boden aufgrund der geometrischen Ausdehnung seiner Bestandteile und deren Massenanteile. Bei der Bestimmung gemäß DIN 18123 (DIN 18123:2011-04) wird das Probenmaterial zunächst bei 105°C im Trocknungsofen getrocknet. Nach Abkühlen wird das Material durch den aufeinander gesetzten Siebsatz gesiebt. Die Masse der Rückstände auf den einzelnen Sieben und in der Auffangschale wird gewogen und die jeweiligen Siebdurchgänge bezogen auf die Summen der Trockenmasse berechnet. Die quantitative Bestimmung des Kalkgehalts wurde im Labor nach Scheibler gemäß DIN 18129 (DIN 18129:2011-07) durchgeführt. Bei der Säurebehandlung von Karbonatmineralien wird Kohlendioxid gasförmig frei, wobei die Kationen in ein wasserlösliches Salz überführt werden. Der Kalkgehalt ist der Massenanteil an Gesamtkarbonat bezogen auf die Masse des trockenen Bodens. Der Karbonatanteil des Bodens wird durch eine gasometrische CO₂-Bestimmung ermittelt. Für die Volumenbestimmung des CO₂-Gases wird eine Gasometer benutzt. Die trockene, pulverisierte Probe wird mit Salzsäure benetzt. Die entstehende Gasmenge wird mit dem Gasometer gemessen und die Masse an Calciumkarbonat unter Berücksichtigung von Luftdruck und Temperatur bestimmt.

Bindige Böden können gemäß DIN 18122 (DIN 18122-1:1997-07) anhand ihrer Konsistenzgrenzen beschrieben werden. Diese Zustandsgrenzen sind ein Maß für die Bildsamkeit des Bodens (Plastizität) und für seine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehalts. Bestimmt werden hierfür die Fließgrenze w_L , die Ausrollgrenze w_P und die Schrumpfgrenze w_S . Die Plastizitätszahl I_P und die Konsistenzzahl I_C lassen sich anschließend berechnen. Zur Bestimmung der Fließgrenze werden ca. 200-300 g feuchtes Material zu einer Paste aufbereitet. Die Probe wird dann mit einem Spachtel luftblasenfrei in die Casagrande-Schale eingestrichen. Mit dem Furchenzieher ist eine Furche, die bis auf den Grund der Schale reicht, zu ziehen. Die Schale wird dann auf die Grundplatte mit konstanter Geschwindigkeit geschlagen, bis sich die Furche am Schalenboden auf einer Länge von ca. 1 cm schließt. Die dazu erforderliche Schlagzahl wird dokumentiert und der Wassergehalt einer Probe aus der Schlagschalenmitte bestimmt. Der Versuch wird dreimal mit jeweils veränderten Wassergehalten wiederholt. Die aus dem Versuchen ermittelten Wassergehalte werden in Abhängigkeit der Schlagzahlen semilogarithmisch dargestellt. Der Wassergehalt der Probe, bei der sich die Furche nach 25 Schlägen schließt entspricht der Fließgrenze. Zur Bestim-

mung der Ausrollgrenze wird Material auf einer wassersaugenden, nicht fasernden Unterlage zu 3 mm dicken Walzen ausgerollt. Dann wird die Teilprobe so lange wieder zusammengeknetet und neu ausgerollt, bis sie bei 3 mm Dicke zu zerbröckeln beginnt. Die Wassergehaltsbestimmung ist an einer Probe von etwa 5 g durchzuführen.

Beim Probenmaterial 1 (Epfendorf-Trichtingen, Bild 4) handelt es sich um einen gemischtkörnigen Verwitterungsboden der Bodengruppe SU nach DIN 18196 (DIN 18196:2011-05). Die Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß DIN 18123 (DIN 18123:2011-04) gestaltet sich bedingt durch die enthaltenen Minerale (Ausflockung bei der Sedimentationsanalyse) sowie durch den Verwitterungszustand schwierig. Aus den Untersuchungen allein des Feinkornanteils entsprechend der Versuche nach DIN 18122 (DIN 18122-1:1997-07) ergibt sich ein leicht plastischer Ton (Bodengruppe TL). Die Kalkgehaltsbestimmung nach Scheibler gemäß DIN 18129 (DIN 18129:2011-07) liefert einen hohen Wert von bis zu 76%. Der Kalcitanteil liegt somit bei ca. 8% und der Dolomitanteil bei ca. 68%. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Anlage 2 abgebildet.

Beim Lösslehm aus Talheim (Probenmaterial 4, Bild 5) handelt es sich granulometrisch um einen stark schluffigen, tonigen Sand, welcher nach seinen plastischen Eigenschaften als mittelpastischer Ton (Bodengruppe TM) anzusprechen ist. Bei einem Kalkgehalt (bestimmt nach Scheibler) von um 1% kann er als weitestgehend entkalkt bezeichnet werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Anlage 3 abgebildet.



Bild 4: Aufbereitetes Probenmaterial 1 (Trichtingen)

Für die beiden Versuchsmaterialien aus dem Stuttgarter Wagenburgtunnel ist eine bodenmechanische Klassifikation nicht sinnvoll, da es sich jeweils um mehr oder weniger stark angewitterte Festgesteine handelt. Bild 6 zeigt Probenmaterial

2, Bild 7 Probenmaterial 3. Zur Charakterisierung dieser Materialien sind daher allein mineralogische Untersuchungen zweckmäßig.



Bild 5: Aufbereitetes Probenmaterial 4 (Lösslehm, Talheim)

4.1.2 Mineralogische Analysen

Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung des Mineralbestandes der Probenmaterialien wird hier die Methode der Röntgendiffraktometrie (XRD) verwendet. Die Röntgendiffraktometrie oder Röntgenbeugung stellt eine grundlegende Methode zur Bestimmung des Mineralbestands von Gesteinsmaterial dar. Die erforderliche Röntgenstrahlung wird durch eine Röntgenröhre erzeugt.



Bild 6: Probenmaterial 2 (Wagenburgtunnel, VQ II)

Durch Beschuss einer Zielanode mit hochenergetischen Elektronen aus einem Kathoden-Glühdraht wird sowohl eine kontinuierliche Röntgenstrahlung als auch eine charakteristische Röntgenstrahlung des Anodenmaterials erzeugt. Die charakteristische Strahlung besteht aus mehreren diskreten Spektrallinien, die sich als XRD-Spektren graphisch darstellen lassen. Für die rein qualitative Auswertung müssen zunächst die charakteristischen Spektrallinien aller enthaltenen Minerale

erkannt und dadurch der Mineralbestand rein qualitativ vollständig identifiziert werden können. Die eindeutige Identifikation aller enthaltenen Minerale ist die Grundvoraussetzung für die Verlässlichkeit der sich anschließenden Quantifizierung des Mineralbestandes mittels der Rietveld-Methode. Die Rietveld-Methode ist ein Rechenverfahren zur quantitativen Phasenanalyse einer pulverförmigen polykristallinen Substanz. Es werden dabei in einem iterativen Prozess rechnerisch Spektren erzeugt und solange variiert, bis diese mit den gemessenen Spektren weitestgehend übereinstimmen (DIENER, 2002).



Bild 7: Probenmaterial 3 (Wagenburgtunnel F3)

Die mineralogischen Untersuchungen wurden vom Institut für Mineralogie und Geochemie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. Die XRD-Spektren der vier Probenmaterialien sind in Anlage 4 abgebildet. Die wesentlichen Ergebnisse der mineralogischen Analysen sind in Tab. 1 zusammenfassend ausgewertet.

Zur quantitativen diffraktometrischen Bestimmung des Mineralbestandes wurden die Proben bei 40° getrocknet, anschließend homogenisiert und ein Aliquot schonend analysenfein aufgemahlen. An allen Pulverproben wurden dann folgende analytische Untersuchungen durchgeführt:

- Röntgenographische Bestimmung aller kristallinen Bestandteile der Probe,
- Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehalts: Aus dem Kohlenstoffgehalt kann der Anteil an Carbonatmineralen (z.B. Calcit) berechnet werden, wenn dieses Material röntgenographisch nachgewiesen wird,
- Bestimmung des Schwefelgehalts: Schwefel ist in oberflächennahen Böden überwiegend in Sulfaten, selten in Metallsulfiden, gebunden. Die Sulfate sind i. Allg. entweder Gips und/oder Anhydrit. Aus der quantitativ bestimmten

Schwefelmenge können die Gehalte der schwefelführenden Phase in den Proben berechnet werden.

Die quantitative Bestimmung der kristallinen Phase in den Proben wurde wie folgt durchgeführt:

1. Die Anteile der einzelnen Mineralphasen wurden aus den integralen Linienintensitäten charakteristischer Röntgenreflexe anhand von aktuellen Kalibrierkurven unter Berücksichtigung der gemessenen chemischen Parameter bestimmt.
2. Die Gesamtmenge an Schichtsilikaten wurde als Differenz zu der Summe der unter 1. genannten Minerale berechnet. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die Schichtsilikate oft sehr feinkristallin bzw. schlecht kristallisiert in Sedimenten bzw. Böden auftreten, was zur Verminderung der Röntgenintensität führt.
3. Die Unterscheidung und quantitative Bestimmung der Tonminerale erfolgte aus den integralen Röntgenintensitäten luftgetrockneter, in Ethylenglycol gequollener und bei 550°C gebrannter Texturpräparate.
4. Die Gips/ Anhydritmengen wurden aus den Schwefelgehalten berechnet.

Die Ergebnisse der quantitativen Mineralbestimmung sind in Tab. 1 zusammengestellt.

In Anlage 4 sind die Pulverdiffraktogramme, Scanbereich 3-63° der vier Materialien dargestellt. Die identifizierten Minerale sind als Liniendiffraktogramm unterlegt. Die Diagramme, Scanbereich 2-22° in Anlage 4 geben die Diffraktogramme der Texturpräparate wieder. In schwarz dargestellt die luftgetrockneten (T), in Grün die in Ethylenglycol gequollen (Q) und in Rot die bei 550°C gebrannten Texturpräparate.

Probenmaterial 1 (Trichtingen) enthält zum Großteil Dolomit (54%), Illit (25%) und Calcit (2%), was letztlich auch das Ergebnis des durchgeführten Versuchs zur Bestimmung des Kalkgehalts nach Scheibler bestätigt. Daneben enthält der Verwitterungsboden Anteile quellfähiger Tonminerale (2%), Kaolinit (2%), Quarz (4%) und einen Gipsanteil von rund 8%. Anlage 2: Bild 1 zeigt das XRD-Spektrum des Probenmaterials 1.

Probenmaterial 2 (Wagenburgtunnel, VQ II) enthält als Hauptbestandteil Gips (43%), auch Anteile an Anhydrit (9,3%) sind noch nachweisbar. Das Probenmaterial enthält neben Illit (17%) und Quarz (10%) einen Anteil an quellfähigen Tonmineralen (15%). Zudem sind geringe Anteile Kaolinit (2%), Feldspat (1%), Calcit (2%) und Dolomit (1%) ent-

	Probenmaterial 1	Probenmaterial 2	Probenmaterial 3	Probenmaterial 4
Quellf. Tone	2	15	23	6
Illit	25	17	44	58
Kaolinit	2	2	1	2
Gips	8,1	43	0,2	-
Anhydrit	-	9,3	0,2	0,1
Quarz	4	10	6	23
Feldspat	2,2	1	1,7	10
Calcit	2	2	6	1
Dolomit	54	1	18	0,5
C	6,76	0,28	2,88	0,12
S	1,50	10,16	0,99	0,01

Tab. 1: Ergebnisse der mineralogischen Analyse mittels XRD (Angaben in %)

halten. In Anlage 2: Bild 2 ist das XRD-Spektrum des Probenmaterials 2 dargestellt.

Probenmaterial 3 (Wagenburgtunnel, F3) besteht zum Großteil aus Illit (44%). Des Weiteren ist ein signifikanter Anteil an quellfähigen Tonmineralen (23%), Dolomit (18%) sowie etwas weniger Calcit (6%), Quarz (6%) und Kaolinit (1%) enthalten. Das Material enthält weder Gips- noch Anhydrit. Das XRD-Spektrum des Probenmaterials 3 ist in Anlage 2: Bild 3 abgebildet.

Probenmaterial 4 (Heilbronn) besteht im Wesentlichen aus Illit (58%) und Quarz (23%). Auch hier ist ein Anteil quellfähiger Tonminerale (6%) enthalten. Zudem sind geringe Anteile Kaolinit (2%), Feldspat (10%) und Calcit (1%) vorhanden. Das Material enthält weder Gips- noch Anhydrit. Das XRD-

Spektrum des Probenmaterials 4 ist in Anlage 2: Bild 4 abgebildet.

Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) können später in den bindemittelbehandelten Probenmaterialien ggf. Ettringitkristallbildungen auch visuell nachgewiesen werden.

4.2 Bindemittel

Da die Mineralreaktion des Ettringitreibens bei der Behandlung sulfathaltiger, toniger Böden mit calciumbasierten Bindemitteln nur untergeordnet von der verwendeten Bindemittelart und -zugabemenge abhängt (WITT, 2012) werden in den Untersuchungen die Bindemittel Portlandzement

CEM I nach DIN EN 197-1:2011-11, 2011 und Weißfeinkalk nach DIN EN 459-1:2010-12, 2010 mit einer Zugabemenge von jeweils 4 Massenprozent verwendet. Als Referenzproben werden Versuche ohne Bindemittel durchgeführt. Um den Einfluss des Bindemittelgehalts zu untersuchen, werden zudem an einem Probenmaterial Versuche mit 2 Massenprozent Bindemittel durchgeführt. Insbesondere bei der Verwendung von Portlandzement ist das für die Bildung von Ettringit erforderliche Stoffangebot in jedem Fall unabhängig von der Tonmineralogie des behandelten Bodens gegeben. Bei der Verwendung von Baukalk sind die im Boden enthaltenen Tonminerale hingegen bedeutsam, da sie das für die Mineralreaktion des Ettringitreibens erforderliche, reaktionsfähige Aluminiumoxid (Al_2O_3) bereitstellen.

Die gewählte Zugabemenge von 4 Massenprozent Bindemittel ist ausreichend, um die Ettringitbildung versuchstechnisch zu provozieren, solange die anderen, für die Mineralneubildung erforderlichen Randbedingungen (siehe Abschnitt 3.2.3) realisiert sind.

4.3 Quellhebungsversuche

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden Quellversuche am Versuchsmaterial (siehe Abschnitt 4.1) durchgeführt. Wie bereits erläutert, konzentriert sich die Ausführung der Quellversuche auf Quellhebungsversuche, da aus der labor-technischen Untersuchung der Quelldrücke für die baupraktischen Anwendungen im Straßenbau kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten ist.

Zur Bestimmung der maximalen Quellhebung können sogenannte Freiquellversuche durchgeführt werden (ISRM, 1989). Freiquellversuche sind eine Versuchsmethode mit sehr geringem Aufwand, allerdings kann die Probe während des Versuches zerfallen. Als Alternative empfiehlt daher die deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Quellhebungsversuche durchzuführen, bei denen die Proben in steifen Metallringen, sogenannten Oedometerringen eingebaut sind (PAUL, 1986).

Im Folgenden wird die Versuchsanordnung und die Probenherstellung ausführlich beschrieben. Auf das Versuchsprogramm, und die ersten Ergebnisse wird im Anschluss näher eingegangen.

4.3.1 Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung (siehe Bild 8) besteht aus einer Prüfkörper-Bewässerungseinheit und einer Präzisionsmessuhr zur Messung der Quellhebungen.

Die Prüfkörper-Bewässerungseinheit ist wie ein vereinfachtes Oedometergerät aufgebaut. Die Probe (Anfangshöhe ca. 20 mm) befindet sich in einem Edelstahl-Oedometerring (1), der in einen Edelstahlpf (2) gesetzt wird. Bewässert wird die Probe von oben und unten über Filterplatten (3 und 4). An der oberen Filterplatte (4) ist ein Stift (5) angebracht, an dem die Hebungen ohne weitere Auflast gemessen werden können.

Damit die Quellhebungen nur in eine Richtung auftreten und der Oedometerring nicht „abheben“ kann, sind im Rand des Ringes zwei Gewindelöcher gebohrt und im Prüftopf befinden sich zwei Schrauben (6) mit denen der Ring festgeschraubt werden kann.

Die verwendeten Präzisionsmessuhren (7) haben eine Auflösung von 0,001 mm und sind an Stativen befestigt.

Zu Verfügung stehen insgesamt 22 Versuchsstände.

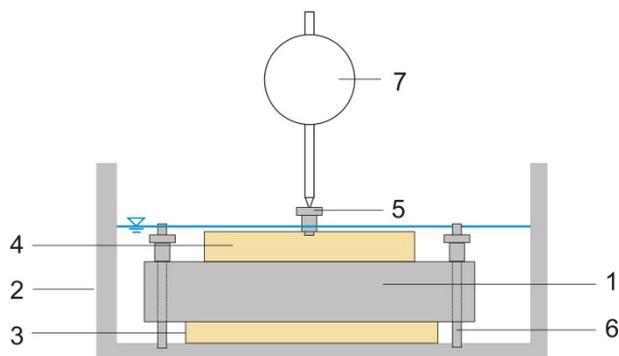


Bild 8: Prüfeinrichtung zur Messung der Quellhebung

4.3.2 Pulverquellversuch

Der Pulverquellversuch wurde erstmal von THURO (1993) beschrieben. Gesteine sind oft zu mürbe und zu sensibel für ein Herausbohren aus dem Muttergestein. Außerdem ist es oft schwierig, den natürlichen Wassergehalt zu erhalten, da sich dieser beim Kontakt mit Luft verändert. Es ist kaum

möglich, ungestörtes Material zu testen (RAUH & THURO, 2007) (THURO, 1993).

Beim Pulverquellversuch kann jegliches Material geprüft werden, egal ob es sich um pulverisiertes, gestörtes oder zerbrochenes Material handelt. Es werden keine Ansprüche an die Entnahmetechnik gestellt. Auch die Probenart bzw. -geometrie spielt keine Rolle. Zusätzlich sind punktuelle Untersuchungen bzw. Untersuchungen von sehr dünnen Lagen möglich. Wegen der hohen spezifischen Oberfläche des Pulvers können Mineralreaktionen wesentlich schneller stattfinden als in festen Prüfkörpern, so dass sich die Versuchsdauer reduziert (THURO, 1993). Einen möglichen Nachteil des Pulverquellversuchs stellt die Probenaufbereitung dar, da das natürliche Gefüge verändert wird. Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche des Pulvers kann zunächst eine Wasseranlagerung an Ionen bzw. Körnern erfolgen sobald die Proben mit demineralisiertem Wasser in Kontakt kommen. Die Folge ist eine starke Quellhebung (THURO, 1993), (RAUH & THURO, 2007). Dies kann dazu führen, dass auch nicht quellfähiges Material ein scheinbares Quellen aufweist. Mit kleiner werdender Korngröße nehmen diese Hydratationseffekte zu und überlagern anfangs die Quellvorgänge infolge von Mineralreaktionen. Auch in der Literatur zu Pulverquellversuchen finden sich hierzu Hinweise (u.a. RAUH & THURO, 2007).

4.3.3 Probenmaterialaufbereitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Versuchsmaterial homogen mit Bindemitteln und bei den Versuchsböden ohne geogenen Sulfatgehalt zusätzlich mit Calciumsulfat-Dihydrat vermengt. Um es homogen vermischen und in den Oedometerring einbauen zu können, wurden alle vier Materialien zu einem Pulver mit einer Korngröße $\leq 0,5$ mm aufbereitet. Die Aufbereitung hierfür wird im Folgenden für alle Materialien erläutert.

4.3.3.1 Probenmaterial 1

Der Verwitterungslehm aus dem Gipsbruch Epfendorf-Trichtingen (siehe Abschnitt 4.1) hat einen natürlichen Wassergehalt von 14,0%. Für die Pulveraufbereitung wurde das Material zunächst bei 60°C im Ofen getrocknet und anschließend in einem Backenbrecher gebrochen, um die im Boden enthaltenden Dolomitteilchen zu zerkleinern. Auf die Korngröße $\leq 0,5$ mm wurde es dann gesiebt.

Anfangs wurde das Material bei 100°C im Ofen getrocknet, gemörsert und anschließend gesiebt.

Dies führte dazu, dass die Dolomitstückchen abgeseibt wurden, da es nicht möglich war, diese mit dem Mörser zu zerkleinern. Eine Ofentrocknung bei 100° beeinflusst zudem die Mineralogie des Materials.

4.3.3.2 Probenmaterial 2 und 3

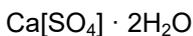
Bei den Probenmaterialien 2 und 3 (siehe Abschnitt 4.1) handelt es sich um Gesteine aus dem Wagenburgtunnel. Auch diese beiden Materialien wurden in einem Backenbrecher zerkleinert und anschließend auf eine Korngröße $\leq 0,5$ mm gesiebt.

4.3.3.3 Probenmaterial 4

Der Lösslehm aus Talheim-Heilbronn hat einen natürlichen Wassergehalt von 9,5%. Nach der Ofentrocknung bei 60°C konnte das Material mit einem Mörser zerkleinert und auf eine Korngröße $\leq 0,5$ mm gesiebt werden.

4.3.3.4 Mischungsberechnung

Sulfat wurde bei den Materialien ohne geogenen Sulfatgehalt über Zugabe von Calciumsulfat-Dihydrat beigemischt. Hierfür musste zunächst der Sulfatanteil im Calciumsulfat-Dihydrat bestimmt werden. Berechnet wurde dieser über das Verhältnis der Molmassen. Calciumsulfat-Dihydrat (Molmasse 172,17 g/mol) besteht aus Sulfat mit einer Molmasse von 96,06 g/mol, H₂O mit einer Molmasse von 18,02 g/mol und Calcium mit einer Molmasse von 40,08 g/mol. Die chemische Formel von Calciumsulfat-Dihydrat lautet:



Daraus folgt, dass Calciumsulfat-Dihydrat zu 55,79 M.-% aus Sulfat besteht.

Die Probenzusammensetzung wurde daher beispielsweise für einen 160 g schweren Prüfkörper wie folgt festgelegt:

Probenmenge	160 g
4% Bindemittel	$0,04 \cdot 160 = 6,4$ g Bindemittel
10.000 ppm Sulfat	$0,01 \cdot 160 = 1,6$ g Sulfat und somit 2,87 g Calciumsulfat-Dihydrat
Bodenmaterial	$160 - 6,4 - 2,87 = 150,73$ g Bodenmaterial

Tab. 2: Beispiel einer Mischungsberechnung

4.3.3.5 Mischungsherstellung

Das gemahlene bzw. gemörserte Material wird homogen mit Bindemitteln und bei den Versuchsböden ohne geogenen Sulfatgehalt zusätzlich mit Calciumsulfat-Dihydrat vermengt. Hierfür werden alle abgewogen Bestandteile in eine Schüssel gegeben und unter Rühren und Schütteln homogenisiert. Der Vorgang dauert ca. 10 Minuten.

4.3.4 Einbau des Pulvers in Oedometerringe

Die Oedometerringe haben einen Innendurchmesser von ca. 70 mm und eine Höhe von ca. 20 mm.

Zum Einbau des Pulvers in die Oedometerringe (siehe Bild 9) wird eine hydraulische Presse verwendet. Der Oedometerring wird hierfür auf den Hydraulikzylinder gelegt. Als Einfüllhilfe und zur Führung des Druckstempels während des Pressvorgangs wird ein Führungsring aufgelegt. Ziel ist es, möglichst konstante Einbaudichten zu erhalten. Die Probenmenge wird entsprechend proportioniert (Bild 9a).

Nachdem das Material durch Hochfahren des Zylinders mit Hilfe eines Druckstempels (Bild 9b und c) mit ca. 100 kN in den Ring gepresst wurde, kann der Oedometerring mit Probe aus der Presse entnommen (Bild 9d) und im Versuchsstand eingebaut werden.

In Bild 10 ist der Vorgang des Probeneinbaus skizziert.

4.3.1.1. Probenkennwerte

Der Wassergehalt des Materials beim Probeneinbau (bestimmt nach DIN 18121-1:1998-04) lag bei den in Tab. 3 angegebenen Werten. Zur Bestimmung des Wassergehalts wurden jeweils 3 Proben bei 105°C im Ofen bis zur Massenkonstanz getrocknet. Probenmaterial 1 und 4 wurden vor dem Einbau getrocknet.

Probenmaterial	Wassergehalt w ₀
1: GB ET	0% (bei 60°C getrocknet)
2: WT VQ II	8%
3: WT F3	3%
4: LLHN	0% (bei 60°C getrocknet)

Tab. 3: Einbauwassergehalt w₀

Die Proben wurden mit den in Anlage 13: Tab. 1 bis Tab. 4 angegebenen Feuchtdichten hergestellt. Die gemittelten Werte sind in Tab. 4 angegeben.

Die Feuchtdichten wurden anhand des bekannten Ringvolumens und der Masse berechnet. Anhand des Wassergehalts w_0 und der Feuchtdichte kann die Trockendichte der Probe bestimmt werden.

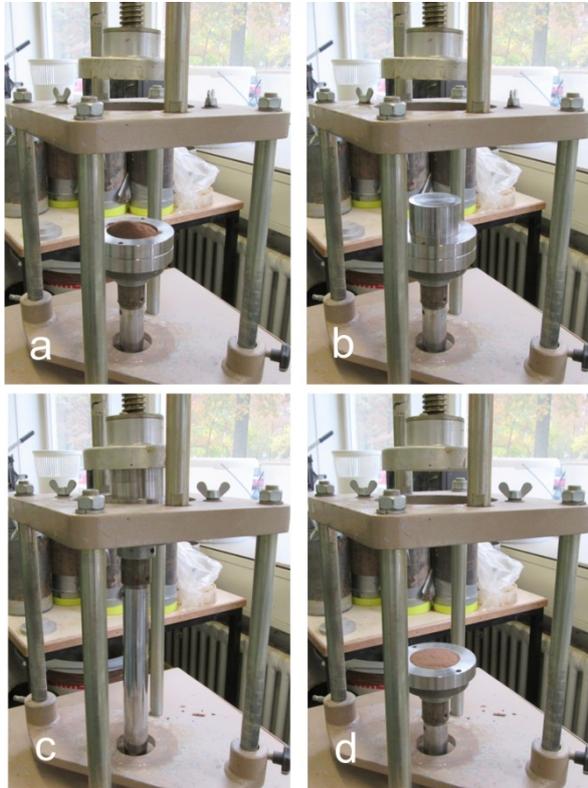


Bild 9: Einbau Probenmaterial in Oedometerring

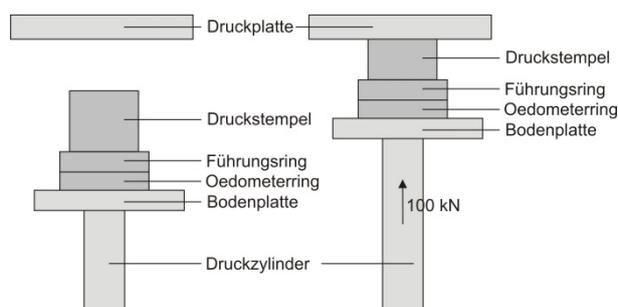


Bild 10: Prinzipskizze Einbau Probenmaterial in Oedometerring

Probenmaterial	Feuchtdichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
1: GB ET	1,92	1,92
2: WT VQ II	1,84	1,70
3: WT F3	2,03	1,97
4: LLHN	1,80	1,80

Tab. 4: Feucht- und Trockendichten der Presslinge (Mittelwert)

Über die Korndichten und die Trockendichten der Materialien können die Porenzahlen der Proben

berechnet werden (siehe Tab. 5). Zur Bestimmung der Korndichte wurde das Pyknometerverfahren angewendet. Hierbei werden ca. 20 g Trockenmasse (zuvor bei 105°C im Ofen getrocknet) in einen 100 cm³ Pyknometer eingefüllt. Nachdem etwas Wasser hinzugefügt wurde, werden durch Kochen sämtliche Luft- bzw. Gasdurchlässe beseitigt. Das restliche Volumen wird dann mit destilliertem, entlüftetem Wasser aufgefüllt.

Anhand der Porenzahlen ist es möglich den theoretischen, maximalen Wassergehalt zu bestimmen und diesen nach Versuchsende mit dem gemessenen Wassergehalt zu vergleichen.

Probenmaterial	Korndichte [g/cm ³]	Porenzahl e [-]
1: GB ET	2,786	0,46
2: WT VQ II	2,870	0,64
3: WT F3	2,792	0,42
4: LLHN	2,713	0,55

Tab. 5: Mittlere Porenzahl der Presslinge

4.3.5 Versuchsprogramm

Die Versuchsmatrix ist in Anlage 5 dargestellt.

Da der Bindemittelgehalt im Vergleich zum Sulfatgehalt einen geringen Einfluss auf die Ettringitbildung hat, sieht das Versuchsprogramm vor, den Sulfatgehalt in vier Stufen zwischen 10.000 ppm und 0 ppm zu variieren, hingegen die Bindemittelzugabe konstant zu halten. Nach Untersuchungen von WITT (2012) sind der Sulfatgehalt, dessen Verteilung sowie die Art und die Menge der im Boden enthaltenen Tonminerale bestimmende Faktoren.

Zu Gunsten einer stärkeren Variation des Sulfatgehalts wurde daher vorgesehen, bei den Probenmaterialien ohne natürlichen Sulfatgehalt (Probenmaterial 3 und 4) jeweils die Zugabemenge an Portlandzement und Weißfeinkalk mit 4 M.-% konstant zu wählen und den zugegebenen Sulfatgehalt in vier Stufen zwischen 0 und 10.000 ppm zu variieren. Auch bei den natürlich sulfathaltigen Böden wurde dies in der Versuchsmatrix entsprechend berücksichtigt. Exemplarisch werden am Probenmaterial 2 (Wagenburgtunnel) zwei verschiedene Zugabemengen von Weißfeinkalk getestet.

Die in der Literatur dokumentierten Angaben zum kritischen Sulfatgehalt (siehe Abs. 3.3) unterscheiden sich zum Teil erheblich. Die Werte liegen teilweise über 10.000 ppm. Daher wird exemplarisch

am Probenmaterial 3 die Zugabemenge des Sulfats zwischen 0 und 40.000 ppm variiert.

Sobald die Proben mit dem demineralisierten Wasser in Kontakt kommen, setzt eine starke Quellhebung ein, die auf Hydratationseffekte im Pulverquellversuch zurückzuführen ist. Außerdem enthalten die beschriebenen Probenmaterialien quellfähige Tonminerale und Anhydrit, die ebenfalls zu Quellvorgängen führen können. Aus diesem Grund werden Versuche ohne Zugabe von Sulfat in den Probenmaterialien 3 und 4 und ohne Zugabe von Bindemittel in den Probenmaterialien 1 und 2 durchgeführt, um identifizieren zu können, welche Hebunganteile infolge der Ettringitbildung entstanden sind.

Der Einfluss der Bindemittelzugaben auf die Quellhebung im Vergleich zum bindemittelfreien Zustand, bei den Materialien ohne natürlichen Sulfatgehalt, wird für das Probenmaterial 3 beispielhaft untersucht.

Für jede Konfiguration werden 2 Versuche durchgeführt, um später begründete Aussagen treffen zu können (Redundanz).

Im Hinblick auf die Projektdauer von nur 18 Monaten und dem Umfang der Versuchsmatrix wurde entschieden, die Versuche nach spätestens 60 Tagen zu beenden.

4.3.6 Randbedingungen

Die Bodentemperatur hat starken Einfluss auf den Reaktionsmechanismus. Ettringitaufwuchs findet insbesondere im Temperaturintervall zwischen etwa 15°C und 20°C statt. Thaumasil kristallisiert bei Temperaturen unter 10°C (WITT, 2012). Daher wird während der Versuche die Temperatur im Labor konstant auf 18°C gehalten.

Damit die ggf. vorhandene Sulfate als Voraussetzung für die Treibreaktion in Lösung gehen können muss für den Transport des gelösten Sulfats ausreichend Wasser vorhanden sein, was dadurch gewährleistet wurde, dass der Probekörper im Oedometerversuchsstand stets unter Wasser gelagert war. Während der Versuche wurde verdunstetes Wasser nachgefüllt.

4.3.7 Versuchsdurchführung

Der Oedometerring mit Probe wird in den Versuchsstand eingebaut. Die Messuhr wird ausgerichtet. Durch Zugabe von demineralisiertem Wasser wird der Quellprozess eingeleitet.

Die Versuche werden anfangs alle 30 Sekunden, dann jede Stunde abgelesen. Nach ca. 10 Stunden werden die Hebungen nur noch alle 24 Stunden erfasst.

4.3.8 Versuchsdauer

Über die Dauer der Quellhebungsversuche werden in der Literatur unterschiedliche Angaben gemacht. WITT (2011) berichtet von Quellhebungsversuchen, bei denen nach etwa 30 bis 45 Tagen die maximalen Hebungen erreicht wurden. Der Quellprozess begann kurz nach der Wässerung der Probe.

Bei den Versuchen von KELLER et al. (2002) werden erst nach 240 Tagen die maximalen Quellhebungen erreicht. Hier begann der Quellprozess der auf die Bildung von Ettringitmineralen zurückzuführen ist nach ca. 1 bis 3 Tagen.

Während der Vorplanung des Streckenbaus der BAB 71 (nördlich B85 – AS Sömmerda-Ost) wurden umfangreiche Quellhebungsversuche durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 6 Monate. Quellhebungen wurden auch nach dieser Zeit noch keine erfasst. Während des Baus traten aber Schäden auf, die auf eine Ettringitneubildung zurückgeführt werden konnten.

In Hinblick auf die Projektdauer und dem Umfang der Versuchsmatrix werden die Versuche im vorliegenden Fall nach 60 Tagen beendet.

4.3.9 Ergebnisse der Quellhebungsversuche

Sobald die Prüfkörper mit dem Wasser in Berührung kommen, setzen starke Dehnungen ein, die auf eine Wasseranlagerung an Ionen bzw. Körnern zurückzuführen sind. Dieser bereits in Abschnitt 4.3.2 erläuterte Hydratationseffekt kann durch eine exponentielle Annäherung beschrieben werden. Die zeitliche Änderung der Dehnungen infolge des Hydratationseffektes ε_{hyd} ist proportional zur Differenz zum Endzustand $\varepsilon_{hyd\infty}$. Daher kann der Hydratationseffekt über folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$-\tau_{hyd} \cdot \frac{d\varepsilon_{hyd}}{dt} = \varepsilon_{hyd} - \varepsilon_{hyd\infty} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Lösung der Differentialgleichung lautet:

$$\varepsilon_{hyd}(t) = \varepsilon_{hyd\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{hyd\infty}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{hyd}}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Wobei ε_0 die Dehnung zum Zeitpunkt $t=0$ und $\varepsilon_{hyd\infty}$ den maximalen Dehnungsanteil infolge Hydratation für $t \rightarrow \infty$ beschreibt. Der Zeitparameter τ

gibt allgemein den Zeitraum an, den ein exponentiell ansteigender Prozess benötigt, um auf 63,2% seines Endwertes anzusteigen.

Mit

$$a_{hyd} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_{hyd\infty}) \quad (\text{Gl. 3})$$

ergibt sich:

$$\varepsilon_{hyd}(t) = \varepsilon_{hyd\infty} - a_{hyd} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{hyd}}} \quad (\text{Gl. 4})$$

a_{hyd} entspricht hierbei dem Betrag der Quelldehnung infolge Hydratation für $t \rightarrow \infty$.

Nachdem der initiale Hebungsprozess abgeschlossen ist, tritt bei den Versuchen mit Bindemittel- bzw. Sulfatzugabe nach einer Stagnation von einigen Stunden eine weitere Dehnung ein, die auf die Kristallisation von Ettringitmineralien zurückgeführt werden kann. Auch dieser Prozess lässt sich durch eine exponentielle Annäherung beschreiben. Zu Beginn ist das Angebot an freien Sulfationen groß und die Zunahme der Dehnungen infolge Kristallisation von Ettringitmineralien steigt schnell an. Diese Dehnungszunahme wird mit der Zeit geringer. Die Reaktion setzt sich solange fort, bis die Sulfationenkonzentration in der Lösungsphase nicht mehr ausreicht und ein maximaler Dehnungsbetrag $\varepsilon_{ett\infty}$ erreicht ist.

Es ergibt sich somit:

$$\varepsilon_{ett}(t) = \varepsilon_{ett\infty} - a_{ett} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ett}}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Beide Prozesse überlagern sich, sodass sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} - a_{hyd} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{hyd}}} - a_{ett} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ett}}} \quad (\text{Gl. 6})$$

Anhand von Kurvenanpassungen der Messwerte aus den einzelnen Versuchen an die Gleichung 6 kann sowohl der Betrag der initialen Dehnung infolge Hydratation a_{hyd} als auch der Betrag der Dehnungen infolge Ettringitbildung a_{ett} ermittelt werden. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass in den Bereichen, in denen sich beide Prozesse überlagern, die Dehnungen getrennt berechnet werden können. Ein Nachteil ist, dass teilweise die Kurvenanpassung die Endzustände leicht über- bzw. unterschätzt.

Zur Kontrolle der Kurvenanpassungen wurden für das Probenmaterial 4 die Dehnungsanteile direkt aus den Messwerten ermittelt. Hierfür wurde der Mittelwert der Dehnung während der Stagnation ausgerechnet. Dieser entspricht dem Betrag der Dehnung infolge des Hydratationseffekts. Um die Dehnungen infolge Ettringitbildung zu ermitteln,

wurde die Differenz zwischen diesem Mittelwert und der maximal im Versuch erreichten Dehnungen gebildet. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 4.3.9.4 bei der Auswertung der Ergebnisse des Probenmaterials 4 erläutert.

4.3.9.1 Probenmaterial 1

Probenmaterial 1 ist ein Verwitterungslehm aus einem Gipsbruch bei Epfendorf-Trichtingen mit einem natürlichen Sulfatgehalt.

In Anlage 6: Bild 1 ist der Gesamtverlauf der Quellhebungsversuche linear und in Anlage 6: Bild 2 semilogarithmisch dargestellt. Sobald die Proben mit dem demineralisierten Wasser in Kontakt kommen, setzen starke Quellhebung ein, die auf die in Abschnitt 4.3.2 erläuterten Hydratationseffekte zurückgeführt werden können. Bei den Referenzproben ohne Bindemittelzugabe war diese Anfangshebung erwartungsgemäß höher als bei den Proben mit Bindemittelzugabe, was auf die stabilisierende Wirkung des Bindemittels zurückzuführen ist. Über vergleichbare Beobachtungen berichten PUPPALA et al. (2005).

Nach einer Stagnation von einigen Stunden setzen bei den Versuchen mit Bindemittelzugabe weitere Dehnung ein. Die Versuche ohne Bindemittelzugabe zeigen keine weiteren Dehnungen.

Dieser weitere Dehnungseffekt bei den bindemittelstabilisierten Proben kann auf die Kristallisation von Ettringitmineralien zurückgeführt werden, was durch stichprobenartige, mineralogische Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) bestätigt wurde. Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sind in Tab. 6 angegeben. In Anlage 6: Bild 3 bis Bild 5 sind die XRD-Spektren der bindemittelstabilisierten Proben und in Anlage 4: Bild 1 die Ergebnisse des Naturmaterials abgebildet.

Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) konnten in den bindemittelbehandelten Probenmaterialien Ettringitkristallbildungen auch visuell nachgewiesen werden. In Anlage 6: Bild 6 bis Bild 16 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen abgebildet. Deutlich ist die großflächige Verteilung der Ettringitnadeln zu erkennen. Beispielhaft ist in Bild 11 eine REM-Aufnahme an der Probe (Versuch 1.14) abgebildet.

Über Kurvenanpassungen wurden die Parameter der Gleichung 6 ermittelt, die in Tab. 7 angegeben sind.

Für die zementstabilisierten Proben konnten die Messwerte gut an die Gleichung 6 angepasst werden.

Bindemittel	ohne Bindemittel	4% WFK	4% CEM I	
	60°C	60°C	100°C	60°C
Trocknung	60°C	60°C	100°C	60°C
Versuch		2.4b	1.13	1.14
Quellf. Tone	2	8	6	2
Illit	25	14	15	24
Kaolinit	2	2	-	-
Gips	8,1	9,3	4,9	10
Anhydrit	-	-	-	-
Ettringit	-	2	3	5
Quarz	4	5	3	2
Feldspat	2,2	3,2	1,8	3
Calcit	2	17	1	2
Dolomit	54	39	65	51
C	6,76	6,69	7,88	6,427
S	1,50	1,73	0,91	1,86

Tab. 6: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) am Probenmaterial 1 (Angaben in %). C für Kohlenstoff, S für Schwefel.

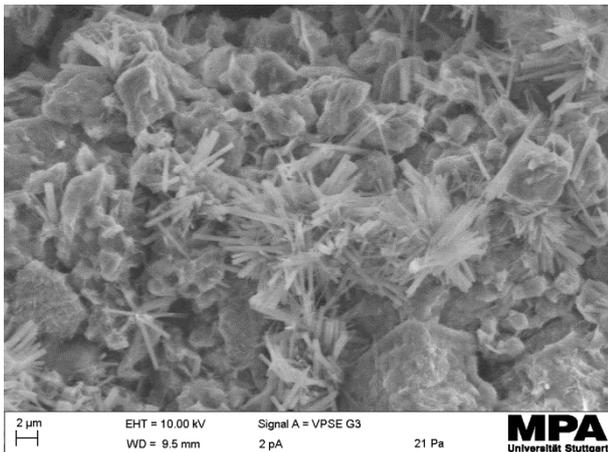


Bild 11: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende (Versuch 1.14). Deutlich erkennbar ist die großflächige Verteilung der Ettringitnadeln.

Für die kalkstabilisierten Proben funktionierte die Anpassung an Gleichung 6 nicht. Dies lag vermutlich daran, dass sich die Dehnungen infolge Ettringitbildung in den kalkstabilisierten Proben nach der vorgegebenen Versuchszeit von 60 Tagen noch nicht weit genug entwickelt hatten. Nach 60 Tagen ist der Anstieg der Dehnungen immer

noch sehr steil. Aus diesem Grund werden parallel zu diesem Forschungsvorhaben Langzeitversuche in der Bundesanstalt für Straßenwesen am Probenmaterial 1 mit einer Kalkzugabe von 4% durchgeführt. Die Dehnungen infolge der Ettringitbildung nach ca. 60 Tagen wurden bei den kalkstabilisierten Proben aus den Messwerten abgelesen und sind in Tab. 8 angegeben.

Die Messwerte der Referenzproben ohne Bindemittelzugabe wurden an die Gleichung 4 angepasst, da hier nach der Stagnation keine weiteren Dehnungen auftreten.

Die Versuchskurven der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Kurvenanpassungen sind in Anhang 6: Bild 17 bis 22 dargestellt.

Versuch	Bindemittel	ε_{∞}	a_{hyd}	τ_{hyd}	a_{ett}	τ_{ett}
1.14	4%	26,03	11,81	0,009	13,21	30,95
4.3	CEM I	37,99	21,32	0,007	18,4	37,00
2.4b	4%	Kurvenanpassung an Gl. 6 hier nicht möglich				
2.3	WFK					
2.1	Keine Bindemittelzugabe	13,48	12,75	0,016	-	-
2.2		14,08	13,24	0,021	-	-

Tab. 7: Ergebnisse der Kurvenanpassungen der Versuchsergebnisse an die Gleichung 6 für das Probenmaterial 1. (CEM I: Zementzugabe, WFK: Weißfeinkalkzugabe)

Versuch	Bindemittel	$\varepsilon_{60 \text{ Tage}}$ [%]	Mittelwert Hebung bei Stagnation [%]	$\varepsilon_{\text{ett}, 60 \text{ Tage}}$ [%]
2.4b	4%	34,18	10,39	23,78
2.3	WFK	30,84	8,14	22,70

Tab. 8: Aus den Messwerten abgelesene Hebungen nach 60 Tagen Versuchszeit der kalkstabilisierten Proben (Probenmaterial 1)

Um eine Abhängigkeit der Dehnungen infolge Ettringitbildung vom Bindemittelgehalt und der Art des Bindemittels zu untersuchen, wurden die über Kurvenanpassungen berechneten Dehnungen a_{ett} für die zementstabilisierten Proben (Tab. 7) und die aus den Messwerten abgelesenen Werte für die kalkstabilisierten Proben (Tab. 8) in Abhängigkeit des jeweils hinzugegebenen Bindemittelgehalts aufgetragen (Bild 12).

Es zeigt sich eine Abhängigkeit der Dehnung infolge Ettringitreiben vom Bindemittelgehalt. Je höher der Bindemittelgehalt desto ausgeprägter sind die Quellhebungen. Dieser Zusammenhang kann über eine lineare Beziehung zwischen der Dehnung infolge Ettringitreiben und dem Bindemittelgehalt b beschrieben werden.

$$\varepsilon_{ett} = a + H_b \cdot b \quad (\text{Gl. 7})$$

Wobei b den Bindemittelgehalt und ε_{ett} die Dehnungen infolge Ettringitreiben angibt. Die Steigung der Geraden wird mit dem Beiwert H_b beschrieben, der ein Maß für die Dehnungen infolge Ettringitreiben für 1% Bindemittel angibt.

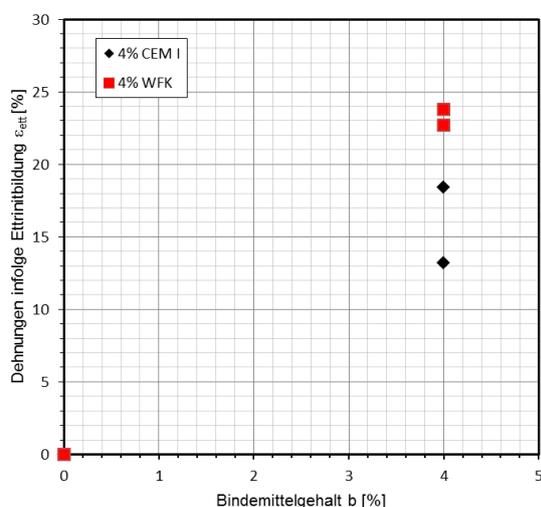


Bild 12: Probenmaterial 1. Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Bindemittelgehalts. (CEM I: Zementzugabe, WFK: Weißfeinkalkzugabe)

In Anlage 6: Bild 23 sind Kurvenanpassungen der Messwerte an die Gleichung 7 dargestellt. Bei den zementstabilisierten Proben ergibt sich ein Beiwert H_b von 3,95 [-] und für die kalkstabilisierten Proben ein Beiwert H_b von 5,81 [-]. Es ergeben sich hier also bei einer Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk stärkere Dehnungen als bei einer Bodenbehandlung mit Portlandzement.

Um weitere Aussagen über den Einfluss des Bindemittelgehalts und der Bindemittelart treffen zu können, müssten zunächst weitere Versuche durchgeführt werden. Ratsam ist es, Versuche mit 2% und 6% Bindemittelzugabe, sowohl Weißfeinkalk als auch Portlandzement, durchzuführen, um den linearen Zusammenhang zu bestätigen.

Das Material für den ersten Versuch mit dem Probenmaterial 1 war bei 100°C im Ofen getrocknet, gemörsert und anschließend gesiebt worden. Dies führte dazu, dass die Dolomitstückchen abgesiebt wurden, da es nicht möglich war, diese mit dem Mörser zu zerkleinern. Ob das Material im Anschluss vollständig dolomitfrei war, ist mineralo-

gisch jedoch nicht untersucht worden. Aus diesem Grund wurde für alle weiteren Versuche ein Backenbrecher eingesetzt, mit dem dann auch die Dolomitstückchen gebrochen werden konnten. Da nicht auszuschließen ist, dass die Trocknung bei 100°C zu einer Beeinflussung der Mineralogie führt, wurde im Folgenden das Material nur noch bei 60 °C getrocknet und der Versuch wiederholt. In Anlage 6: Bilder 24 und 25 sind die Ergebnisse des Versuches mit bei 100°C im Vergleich zu dem bei 60°C getrockneten Material dargestellt. Deutlich ist hier ein Unterschied in den erreichten Dehnungen zu beobachten. Der Versuch 1.13 (bei 100°C getrocknet und ohne Dolomit) erzielt deutlich niedrigere Dehnungen als der Versuch 1.14 (bei 60°C getrocknet, mit aufgemahlenen Dolomit).

4.3.9.2 Probenmaterial 2

Probenmaterial 2 ist ein Gestein aus dem Wagenburgtunnel bei Stuttgart, abgebaut in einem Versuchsquerschlag unterhalb des Gipshorizontes. Das Material hat daher einen natürlichen Sulfatgehalt. Im Material sind 43% Gips enthalten (siehe Tab. 9) Der Versuchsquerschlag wurde laufend bewässert, weshalb die Anhydrit-Gips-Umwandlung weitestgehend abgeschlossen sein dürfte.

In Anlage 7: Bild 1 ist der Gesamtverlauf der Quellhebungsversuche dargestellt. Auch hier kommt es, sobald die Proben mit dem demineralisierten Wasser in Kontakt kommen, zu einer starken Quellhebung, die auf die Hydratationseffekte im Pulverquellversuch zurückgeführt werden kann. Die Anfangshebung bei den Referenzproben (ohne Bindemittelzugabe) war auch hier wie erwartet höher als bei den Proben mit Bindemittelzugabe. Dies ist auf die stabilisierende Wirkung des Bindemittels zurückzuführen. Anlage 7: Bild 2 zeigt eine semilogarithmische Darstellung der Zusammenhänge.

Wie bei Probenmaterial 1 finden nach einer Stagnation von einigen Stunden weitere Hebungseffekte statt. Die Proben ohne Bindemittel zeigen hier eine im Mittel etwas größere Quellhebung als die bindemittelstabilisierten Proben. Vermutlich kann bei diesem Material das natürliche Sulfat nur schwer gelöst werden und steht zur Ettringitbildung vorerst nicht zu Verfügung. Die Hebungen, die in Anlage 7: Bild 1 und 2 dargestellt sind dürften zunächst auf Anhydritquellen zurückzuführen sein. Durch die Zugabe von Bindemittel kann in diesem Fall die gewünschte stabilisierende Wirkung erreicht werden, ohne dass schädliche Auswirkungen durch eine Ettringitbildung auftreten.

Nach ca. 60 Tagen treten in den bindemittelstabilisierten Proben weitere Hebungen ein, die eventuell auf ein Ettringitreiben zurückzuführen sind. Dies würde auch die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie erklären. Es ergab sich hier bei der zementstabilisierten Probe ein Ettringitgehalt von 4%. Untersucht wurde eine Probe (Versuch 1.4), die bei Ausbau einen starken Dehnungsanstieg zeigte, der kurz zuvor eingesetzt hatte. In der kalkstabilisierten Probe wurden bei der Röntgendiffraktometrie keine Ettringitkristalle gefunden. Untersucht wurde hier eine Probe (Versuch 3.21), die bei Ausbau seit einiger Zeit keine weiteren Dehnungen zeigte.

Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sind in Tab. 9 angegeben. In Anlage 7: Bild 3 und 4 sind die XRD-Spektren der bindemittelstabilisierten Proben und in Anlage 4: Bild 2 die Ergebnisse des Naturmaterials abgebildet

Bindemittel	ohne Bindemittel	4% WFK	4% CEM I
Versuch		3.21	1.4
Quellf. Tone	15	15	18
Illit	17	11	11
Kaolinit	2	1	1
Gips	43	43,9	46
Anhydrit	9,3	16,8	3,4
Ettringit	-	-	4
Quarz	10	8	9
Feldspat	1	1,7	3
Calcit	2	3	2
Dolomit	1	-	1
C	0,28	0,32	0,38
S	10,16	12,14	9,43

Tab. 9: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) am Probenmaterial 2 (Angaben in %). C für Kohlenstoff, S für Schwefel.

Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) konnten die bindemittelstabilisierten Proben nach Ettringitkristallbildungen untersucht werden. In Anlage 7: Bild 5 bis Bild 11 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen abgebildet. In der zementstabilisierten Probe (Versuch 1.4) konnten Ettringitkristalle nachgewiesen werden (Anlage 7: Bild 5 bis 8). Allerdings war die Ettringitkristallbildung zum Zeitpunkt der Aufnahme

noch nicht weit fortgeschritten. In der kalkstabilisierten Probe (Anlage 7: Bild 9 bis 11) wurden keine Ettringitkristalle gefunden.

Da die Versuchsdauer auf 60 Tage beschränkt war, konnten die Versuche nicht länger ausgeführt werden. Aus diesem Grund werden Langzeitversuche in der Bundesanstalt für Straßenwesen am Probenmaterial 2 mit einer Kalkzugabe von 4% durchgeführt.

4.3.9.3 Probenmaterial 3

Probenmaterial 3 ist ein Gestein aus dem Wagenburgtunnel bei Stuttgart, abgebaut in einem geologischen Fenster oberhalb des Gipshorizontes und daher ohne geogenen Sulfatgehalt.

Die Zugabemenge an Portlandzement und Weißfeinkalk wurde hier mit 4 M.-% konstant gewählt und der zugegebene Sulfatgehalt in vier Stufen zwischen 0 und 40.000 ppm variiert. Der Einfluss der Bindemittelzugaben auf die Quellhebung im Vergleich zum bindemittelfreien Zustand wird auch für das Probenmaterial 3 untersucht (siehe Anlage 5).

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der zementstabilisierten Proben vorgestellt. Im Anschluss wird auf die kalkstabilisierten Proben eingegangen. Zuletzt werden die Bindemittel miteinander verglichen.

Zementstabilisierte Versuche

In Anlage 8: Bild 1 ist der Gesamtverlauf der Quellhebungsversuche linear und in Anlage 8: Bild 2 semilogarithmisch dargestellt.

Auffällig ist auch hier (Anlage 8: Bild 2) die höhere und länger andauernde Anfangshebung der Proben ohne Bindemittel- und Sulfatzugabe, was wieder auf die stabilisierende Wirkung des Bindemittels zurückzuführen ist.

Nach einer Stagnation von einigen Stunden treten bei den Proben mit Sulfatzugabe, wie bereits bei Probenmaterial 1 beobachtet, erneut Dehnungen auf. Proben ohne Sulfatzugabe - sowohl die Bindemittelstabilisierten, als auch die ohne Bindemittelzugabe - zeigen auch hier keine weiteren Dehnungserscheinungen.

Dieser weitere Dehnungseffekt kann auch hier auf die Kristallisation von Ettringitmineralien zurückgeführt werden, was durch die stichprobenartige mineralogische Untersuchung (Röntgendiffraktometrie) bestätigt wurde. Die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchung sind

in Tab. 10 angegeben. In Anlage 8: Bild 3 bis Bild 5 sind die XRD-Spektren der bindemittelstabilisierten Proben und in Anlage 4: Bild 3 die Ergebnisse des Naturmaterials abgebildet.

Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) konnten in den drei bereits im XRD untersuchten Proben (Versuch 3.11, 1.9 und 2.13a) Ettringitkristallbildungen auch visuell nachgewiesen werden. In Anlage 8: Bild 6 bis Bild 16 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen abgebildet.

Über Kurvenanpassungen wurden die Parameter der Gleichung 6 ermittelt und in Tab. 11 angegeben. Die Messwerte der Referenzproben ohne Bindemittelzugabe wurden wieder an die Gleichung 4 angepasst, da hier nach der Stagnation keine weiteren Dehnungen auftraten. Die Versuchskurven der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Kurvenanpassungen sind in Anhang 8: Bild 17 bis 34 dargestellt.

Bindemittel		4% WFK		4% CEM I	
		10.000 ppm	40.000 ppm	10.000 ppm	
Sulfat	ohne Bindemittel				
Versuch		3.11	1.9	2.13a	
Quellf. Tone	23	13	17	18	
Illit	44	40	39	39	
Kaolinit	1	7	2	3	
Gips	0,2	-	8	1,9	
Anhydrit	0,2	-	-	-	
Ettringit	-	5	5	3	
Quarz	6	7	6	7	
Feldspat	1,7	1	1	2,1	
Calcit	6	10	8	9	
Dolomit	18	16	15	18	
C	2,88	3,14	2,72	3,15	
S	0,09	0,41	1,41	0,36	

Tab. 10: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) am Probenmaterial 3 (Angaben in %). C für Kohlenstoff, S für Schwefel.

Es ist anzumerken, dass die Dehnungen, die auf die Ettringitbildung zurückgeführt werden können, in den Versuchen mit 40.000 und 20.000 ppm Sulfatgehalt unerwartet niedrig (ca. 3%) ausfallen. Die Versuche mit einem Sulfatgehalt von 10.000 ppm und weniger ergaben höhere Dehnungen. Da

die Versuche mit 40.000 und 20.000 ppm zu Beginn des Forschungsvorhabens und die Versuche mit 0 bis 10.000 ppm Sulfat zu einem späteren Zeitpunkt ausgeführt wurden, wurde vermutet, dass sich das Probenmaterial während der Lagerung chemisch-mineralogisch verändert haben könnte.

Ver-such	Sulfat [ppm]	ϵ_{∞} [%]	a_{hyd} [%]	τ_{hyd} [d]	a_{ett} [%]	τ_{ett} [d]
1.9	40.000	15,86	12,83	0,004	2,45	8,74
1.9a		12,04	7,91	0,005	3,5	10,21
1.10		13,09	11,13	0,004	1,97	7,18
1.11	20.000	10,18	5,21	0,004	1,34	11,08
1.12		8,44	6,24	0,005	1,57	8,87
2.13	10.000	22,43	12,71	0,007	9,49	13,93
2.13a		16,73	7,92	0,003	8,83	13,84
2.14		21,12	12,52	0,004	9,61	12,87
4.21	8.000	12,29	6,55	0,005	5,17	12,36
2.15		17,07	11,12	0,004	5,32	24,27
2.17	5.000	11,66	8,66	0,002	2,83	6,55
2.18		11,79	9,9	0,005	1,93	7,37
2.19	3.000	10,86	9,42	0,004	1,12	5,22
2.20		8,52	7,85	0,005	0,53	4,4
2.21	Kein Sulfat	6,11	5,0	0,004	-	-
2.22		9,95	8,52	0,003	-	-
1.7	Kein Bindemittel kein Sulfat	15,12	14,28	0,016	-	-
1.8		12,85	11,53	0,017	-	-

Tab. 11: Ergebnisse der Kurvenanpassungen an die Gl. 6 für das Probenmaterial 3 und einer Zugabe von 4% Portlandzement (CEM I) bzw. ohne Zugabe von Bindemittel und Sulfat. Das Sulfat wurde über Calciumsulfat-Dihydrat zugegeben.

Daher wurde der Versuch 1.9a (eine Wiederholung vom Versuch 1.9) durchgeführt. Auch hier ergab sich aber wieder eine unerwartet niedrige Dehnung. Die Untersuchung mittels Röntgendiffraktometrie (Tab. 10) nach Versuchsende ergab aber, dass in der untersuchten Proben mit 40.000 ppm Sulfat und 4% Portlandzement größere Mengen Ettringitminerale enthalten waren als in der untersuchten Probe mit 10.000 ppm und 4% Portlandzement. Die Ergebnisse der

Elektronenmikroskopaufnahmen des Versuches 1.9 (40.000 ppm Sulfat, 4% Portlandzement) zeigen deutlich eine großflächige, dichte Verteilung (Anlage 8: Bilder 11 und 12) von Ettringitkristallen. Allerdings ist auch zu beobachten, dass die Kristallnadeln nur relativ kurz ausgebildet sind (Anlage 8: Bild 13). Die REM-Aufnahmen des Versuches 2.13a (10.000 ppm Sulfat, 4% Portlandzement) zeigen dagegen eine deutlich weiter auseinanderliegende Bildung von Ettringitkristallen. Diese Beobachtung stimmt mit dem Ergebnis der Röntgendiffraktometrie überein. Allerdings stellt sich weiterhin die Frage, weshalb die Dehnungen, die auf die Ettringitbildung zurückgeführt werden können, in den Versuchen mit 40.000 und 20.000 ppm unerwartet niedrig ausfallen. Eine Ursache könnte sein, dass hier die Versuchszeit nicht ausreichend war und die Ettringitkristalle daher noch nicht vollständig auskristallisiert sind.

Um eine Abhängigkeit der Dehnungen infolge Ettringitbildung vom Sulfatgehalt zu untersuchen, wurden die über Kurvenanpassungen berechneten Hebungen a_{ett} in Abhängigkeit des jeweils hinzugegebenen Sulfatgehalts dargestellt (Bild 13).

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Hebung infolge Ettringittreiben vom Sulfatgehalt. Je höher der Sulfatgehalt, desto ausgeprägter sind die Quellhebungen. Dieser Zusammenhang kann über eine lineare Beziehung zwischen der Dehnung infolge Ettringittreiben und dem Sulfatgehalt beschrieben werden.

$$\varepsilon_{ett} = a + H_s \cdot s \quad (\text{Gl. 8})$$

Wobei s den Sulfatgehalt und ε_{ett} die Dehnungen infolge Ettringittreiben angibt. Die Steigung der Geraden wird mit dem Hebungsbeiwert H_s beschrieben, der ein Maß für die Hebungen infolge Ettringittreiben für 1 ppm Sulfatgehalt angibt.

In Anlage 8: Bild 36 ist die Kurvenanpassung der Messwerte an die Gleichung 8 dargestellt. Für die zementstabilisierten Versuche am Probenmaterial 4 ergibt sich ein Hebungsbeiwert von 0,000951 [%/ppm].

Das Sulfat wurde über Calciumsulfat-Dihydrat zugegeben (siehe Absatz 4.3.3) und es stellte sich die Frage, ob die Löslichkeit des Calciumsulfats ausreichend ist. In Ergänzung zum Versuchsprogramm wurde daher ein Versuch mit Zugabe von Natriumsulfat durchgeführt. Das Ergebnis der Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ist in Tab. 12 angegeben. Die Versuchskurve und die Kurvenanpassung sind in Anlage 8: Bild 35 abgebildet. Ein Unterschied in den Dehnungen infolge Ettringitkristallisation zwischen den Versuchen mit Calciumsulfat-Dihydrat (Versuche 2.13, 2.13a und

2.14) und Natriumsulfat (Versuch N3) ist nicht ersichtlich.

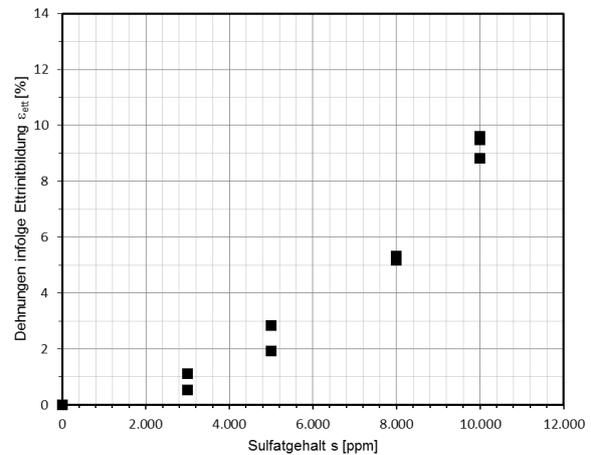


Bild 13: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Das Probenmaterial 3 wurde mit 4% Portlandzement stabilisiert. Das Sulfat wurde über Calciumsulfat-Dihydrat zugegeben.

Ver-such	Sulfat [ppm]	ε_{∞} [%]	a_{hyd} [%]	τ_{hyd} [d]	a_{ett} [%]	τ_{ett} [d]
N3	10.000	20,34	9,79	0,005	10,11	4,11

Tab. 12: Ergebnisse der Kurvenanpassungen an die Gl. 6 für das Probenmaterial 3 und einer Zugabe von 4% Portlandzement (CEM I). Das Sulfat wurde über Natriumsulfat zugegeben.

Kalkstabilisierte Versuche

Der Gesamtverlauf aller Versuche ist in Anlage 8: Bild 37 linear und in Anlage 8: Bild 38 semilogarithmisch dargestellt.

Über Kurvenanpassungen wurden die Parameter der Gleichung 6 ermittelt und sind in Tab. 13 angegeben. Die Versuchskurven der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Kurvenanpassungen sind in Anlage 8: Bild 39 bis 48 dargestellt. Die Messwerte der Referenzproben ohne Bindemittelzugabe wurden wieder an die Gleichung 4 angepasst, da auch hier nach der Stagnation keine weiteren Dehnungen auftreten.

Auch bei den kalkstabilisierten Proben treten aufgrund des Hydratationseffekts zu Beginn der Versuche Dehnungen auf, die nach kurzer Zeit abgeschlossen sind. Auch hier sind die Anfangshebung der Proben ohne Bindemittel- und Sulfatzugabe (Versuche 1.7 und 1.8) vergleichsweise hoch, was wieder auf die stabilisierende Wirkung des Bindemittels zurückzuführen ist. Auffällig sind hier die deutlich höheren initialen Dehnungen der Proben ohne Sulfat- aber mit Weißfeinkalkzugabe (Versuche 3.19 und 3.20). Zudem findet bei diesen Ver-

suchen der Hydratationseffekt langsamer statt. In der semilogarithmischen Darstellung (Anlage 8: Bild 38) ist zu sehen, dass die im Anschluss an die Hydratation auftretende Stagnation bei den kalkstabilisierenden Proben kürzer andauert als bei den zementstabilisierten Proben (Anlage 8: Bild 2). Die Kristallisation des Ettringits beginnt hier vermutlich früher. Dies würde erklären, weshalb Proben ohne Sulfatzugabe länger und stärker hydratisieren, da das Ettringit primär eine stabilisierende Wirkung hat.

Um eine Abhängigkeit der Dehnungen vom Sulfatgehalt zu untersuchen, wurden die über Kurvenanpassungen berechneten Hebungen a_{ett} in Abhängigkeit des jeweils hinzugegebenen Sulfatgehalts dargestellt (Bild 14).

Es zeigt sich erneut eine deutliche Abhängigkeit der Hebung vom Sulfatgehalt. Je höher der Sulfatgehalt, desto ausgeprägter sind die Quellhebungen. Auch hier lässt sich diese Abhängigkeit der Hebungen vom Sulfatgehalt über den linearen Zusammenhang (Gleichung 8) beschreiben. In Anlage 8: Bild 49 ist die Kurvenanpassung an die Gleichung 8 dargestellt. Es ergibt sich hier ein Hebungsbeiwert H_s von 0,00247 [%/ppm].

Ver-such	Sulfat [ppm]	ε_{∞} [%]	a_{hyd} [%]	τ_{hyd} [d]	a_{ett} [%]	τ_{ett} [d]
4.23	10.000	32,69	6,24	0,007	25,12	13,81
3.12		33,52	7,97	0,007	23,82	16,08
4.25	8.000	26,79	7,01	0,005	18,51	8,81
3.14		30,83	8,19	0,006	21,72	8,30
3.16	5.000	21,61	6,25	0,003	14,67	3,52
3.15		23,17	7,55	0,002	15,35	3,00
3.17	3.000	14,23	6,78	0,003	7,15	1,33
4.24		13,19	5,5	0,002	6,93	1,16
3.19	Kein Sulfat	17,61	15,32	0,011	-	-
3.20		20,81	18,5	0,011	-	-
1.7	Kein Bindemittel kein Sulfat	15,12	14,28	0,016	-	-
1.8		12,85	11,53	0,017	-	-

Tab. 13: Ergebnisse der Kurvenanpassungen an die Gleichung 6 für das Probenmaterial 3 und einer Zugabe von 4% Weißfeinkalk (WFK). Das Sulfat wurde über Calciumsulfat-Dihydrat zugegeben

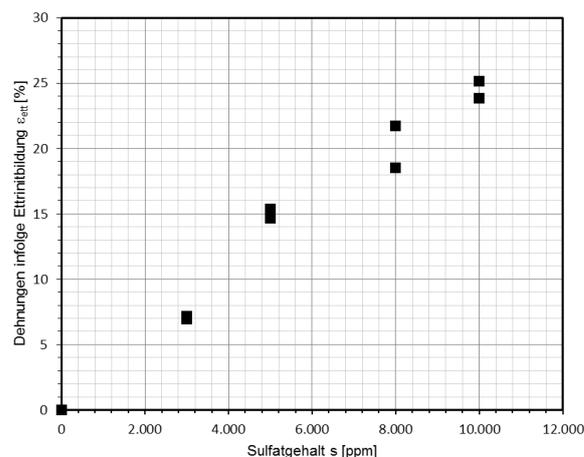


Bild 14: Dehnungen infolge Ettringittreibens in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Das Probenmaterial 3 wurde mit 4% Weißfeinkalk stabilisiert

Vergleich zwischen kalk- und bindemittelstabilisierten Proben

Im Wesentlichen ist das Verhalten der zement- und kalkstabilisierten Versuche beim Probenmaterial 3 ähnlich. Nach einer initialen Dehnung aufgrund von Hydratation folgt eine Stagnation von einigen Stunden. Im Anschluss treten bei den bindemittelstabilisierten Proben mit Sulfatzugabe weitere Dehnungen auf, die auf die Bildung von Ettringitmineralien zurückzuführen sind.

Der über Kurvenanpassungen berechnete Zeitparameter τ_{hyd} für die initialen Dehnungen infolge von Hydratation ist für die Versuche mit Sulfat- und Weißfeinkalkzugabe sowie für die Versuche mit Sulfat- und Zementzugabe annähernd gleich. Auch die Hydratationsdehnungen sind vergleichbar. Bei den Versuchen ohne Sulfatzugabe ist jedoch ein Unterschied im Hydratationsverhalten erkennbar. Die kalkstabilisierten, sulfatfreien Proben zeigen höhere Dehnungen infolge des Hydratationseffektes, als die zementstabilisierten, sulfatfreien Proben.

Unterschiedlich ist auch das Verhalten der Proben während der Stagnation nach den Hydratationsdehnungen. Bei den kalkstabilisierten Proben treten deutlich früher erneute Dehnungen auf, die auf eine Ettringitbildung zurückzuführen sind.

Ein Unterschied zeigt sich außerdem in den im Anschluss an die Stagnation auftretenden Dehnungen. Hier erreichen die kalkstabilisierten Proben bei identischem Sulfatgehalt deutlich höhere Dehnungen, was sich auch im Beiwert H_s wieder spiegelt. In Bild 15 sind vergleichend die über Kurvenanpassungen berechneten Dehnungen infolge Ettringittreibens in Abhängigkeit des Sulfatgehalts dargestellt. Deutlich sind hier die bei gleichem

Sulfatgehalt höheren Dehnungen der kalkstabilisierten Proben erkennbar. In Anlage 8: Bild 50 sind die Berechnungen der Beiwerte H_s vergleichend dargestellt.

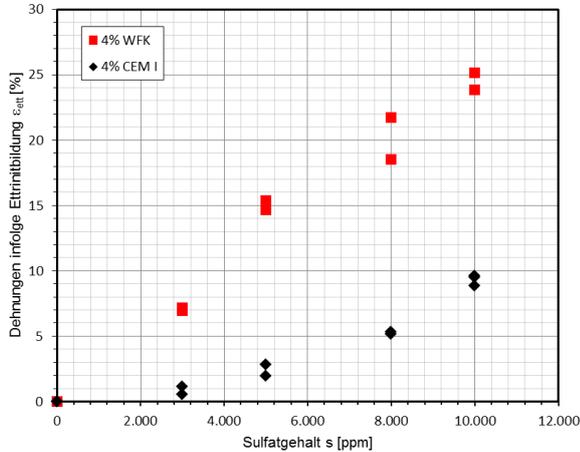


Bild 15: Dehnungen infolge Ettringittreibens in Abhängigkeit des Sulfatgehalts Probenmaterial 3. (WFK: Weißfeinkalk, CEM I: Portlandzement)

4.3.9.4 Probenmaterial 4

Probenmaterial 4 ist ein Lösslehm aus Talheim bei Heilbronn ohne natürlichen Sulfatgehalt.

Die Zugabemenge an Portlandzement und Weißfeinkalk wurde hier mit 4 M.-% konstant gewählt und der zugegebene Sulfatgehalt in vier Stufen zwischen 0 und 10.000 ppm variiert.

Versuche ohne Bindemittelzugabe wurden an diesem Material nicht durchgeführt (siehe Anlage 5).

Als Referenzproben wurden Proben mit einer Bindemittelstabilisierung, aber ohne Sulfatzugabe untersucht.

Im Folgenden werden nun zunächst die Ergebnisse der zementstabilisierten Proben vorgestellt. Im Anschluss wird auf die kalkstabilisierten Proben eingegangen. Zuletzt werden die Bindemittel miteinander verglichen.

Zementstabilisierte Proben

Der Gesamtverlauf aller Versuche mit Zugabe Portlandzement ist in Anlage 9: Bild 1 linear und in Anlage 9: Bild 2 semilogarithmisch dargestellt.

Über Kurvenanpassungen wurden auch für dieses Probenmaterial die Parameter der Gleichung 6 ermittelt und in Tab. 14 angegeben. Die Messwerte der Versuche ohne Sulfatzugabe wurden an die Gleichung 4 angepasst, da hier keine Kristallisation von Ettringitmineralien stattfindet. In Anlage 9:

Bilder 3 bis 12 sind die Messwerte der einzelnen Versuche und die Kurvenanpassungen dargestellt.

Der über Kurvenanpassungen berechnete Zeitparameter τ_{hyd} gibt an, nach welcher Zeit 63,2% der Dehnungen infolge Hydratation abgeschlossen sind. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit dem Probenmaterial 3.

Die Stagnation nach der Anfangshebung aufgrund der Hydratation ist bei den zementstabilisierten Probenmaterial 4 ebenfalls vergleichbar zu den Versuchsergebnissen am zementstabilisierten Probenmaterial 3.

Der semilogarithmischen Darstellung in Anlage 9: Bild 2 ist zu entnehmen, dass bereits nach kurzer Zeit ein erneuter Anstieg der Dehnungen in den Proben mit Sulfatzugabe eintritt. Dieser Effekt kann auf die Kristallisation von Ettringitmineralien zurückgeführt werden. Dies wurde durch die stichprobenartige mineralogische Untersuchung bestätigt. Untersucht wurde jeweils eine kalk- und eine zementstabilisierte Probe mit einer Zugabemenge von 10.000 ppm Sulfat. Die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchung sind in Tab.15 angegeben. In Anlage 9: Bild 13 und 14 sind die XRD-Spektren der Versuche dargestellt.

Ver-such	Sulfatzu-gabe [ppm]	ϵ_{∞} [%]	a_{hyd} [%]	τ_{hyd} [d]	a_{ett} [%]	τ_{ett} [d]
4.29	10.000	22,97	8,75	0,002	13,75	2,23
1.15		26,73	11,28	0,003	14,85	2,3
2.11	8.000	26,33	14,18	0,002	11,48	1,50
2.12		30,02	15,41	0,005	14,04	1,77
2.7	5.000	18,49	12,27	0,003	5,60	1,26
2.8		23,28	19,05	0,003	5,06	1,79
2.9	3.000	19,23	17,52	0,004	1,64	5,24
2.10		14,75	10,22	0,003	2,36	0,87
2.5	Kein Sulfat	9,94	8,96	0,003	-	-
2.6		15,4	13,91	0,002	-	-

Tab. 14 Ergebnisse der Kurvenanpassungen an die Gleichung 6 bzw. 4 für das Probenmaterial 4 und einer Zugabe von 4% Portlandzement (CEM I)

Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) konnten in dem Versuch 1.15 Ettringitkristallbildungen nachgewiesen werden. In Anlage 9: Bild 15 bis Bild 20 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen abgebildet.

Um eine Abhängigkeit der Hebungen infolge Ettringitbildung zu untersuchen wurden, die über Kurvenanpassungen berechneten Hebungen a_{ett} in Abhängigkeit des jeweils hinzugegebenen Sulfatgehalts aufgetragen (Bild 16). Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Hebung vom Sulfatgehalt. Je höher der Sulfatgehalt, desto ausgeprägter sind die Quellhebungen. Dieser Zusammenhang kann wie beim Probenmaterial 3 über eine lineare Beziehung (Gleichung 8) zwischen der Dehnung infolge Ettringittreiben und dem Sulfatgehalt beschrieben werden. In Anlage 9: Bild 21 ist die Kurvenanpassung an die Gleichung 8 dargestellt. Für die zementstabilisierten Versuche am Probenmaterial 4 ergibt sich ein Hebungsbeiwert H_s von 0,00157 [%/ppm].

Zur Kontrolle der Kurvenanpassung wurden hier die Dehnungsanteile direkt aus den Messwerten ermittelt. Es ergeben sich dabei die in Tab. 16 angegebenen Werte. In Anlage 9: Bild 3 bis 12 sind die Berechnungen für die einzelnen Versuche angegeben. In Anlage 9: Bild 22 sind beide Verfahren der Dehnungsermittlung in einem Diagramm gegenüber gestellt. Beide Verfahren erzielen annähernd identische Ergebnisse.

	Naturmaterial	4% CEM I 10.000 ppm Sulfat Versuch 1.15	4% WFK 10.000 ppm Sulfat Versuch 3.2
Quellf. Tone	6	18	2
Illit	58	45	64
Kaolinit	2	-	2
Gips	-	-	-
Anhydrit	0,1	-	2
Ettringit	-	6	2
Quarz	23	23	20
Feldspat	10	6	5
Calcit	1	2	2
Dolomit	0,5	-	1
C	0,12	0,30	0,37
S	0,01	0,42	0,36

Tab. 15 Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie (XRD) am Probenmaterial 4 (Angaben in %)

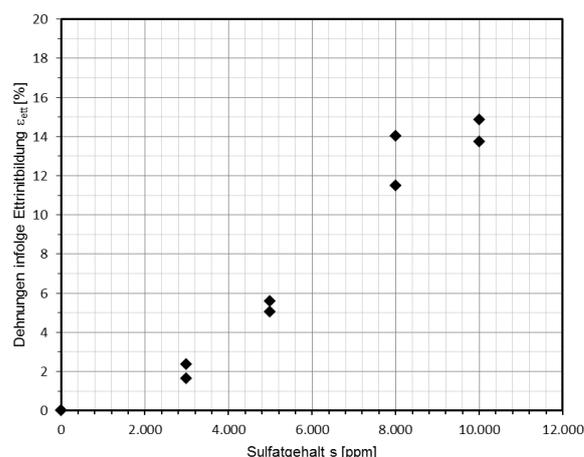


Bild 16: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Das Probenmaterial 4 wurde mit 4% Portlandzement stabilisiert.

Versuch	Sulfatzugabe [ppm]	ϵ_{Ende} [%]	Mittelwert Dehnung bei Stagnation [%]	ϵ_{ett} [%]
4.29	10.000	22,6	10,07	12,53
1.15		26,55	12,7	13,85
2.11	8.000	26,22	15,98	10,24
2.12		29,9	17,14	12,76
2.7	5.000	18,57	13,39	5,19
2.8		23,3	17,94	5,36
2.9	3.000	19,4	17,168	2,21
2.10		14,925	12,59	2,34
2.5	Kein Sulfat	9,965		-
2.6		15,45		-

Tab. 16: Ablesung der Hebungen aus den Versuchswerten für das Probenmaterial 4 und einer Zugabe von 4% Portlandzement (CEM I)

In Ergänzung zum Versuchsprogramm wurden auch am Probenmaterial 4 Versuche mit Zugabe von Natriumsulfat ausgeführt. Das Ergebnis der Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ist in Tab. 17 angegeben. Die Versuchskurve und die Kurvenanpassung sind in Anlage 9: Bild 23 und 24 abgebildet. Ein Unterschied in den Dehnungen infolge Ettringitkristallisation zwischen den Versuchen mit Calciumsulfat-Dihydrat (Versuche 4.29 und 1.15) und Natriumsulfat (Versuche N1 und N2) ist ersichtlich. In den Versuchen mit Natriumsulfat ergeben sich größere Dehnungen.

Ver-such	Sulfat [ppm]	ϵ_{∞} [%]	a_{hyd} [%]	τ_{hyd} [d]	a_{ett} [%]	τ_{ett} [d]
N1	10.000	44,25	23,41	0,009	19,28	1,58
N2	10.000	54,2	29,32	0,011	24,1	1,41

Tab. 17: Ergebnisse der Kurvenanpassungen an die Gl. 6 für das Probenmaterial 4 und einer Zugabe von 4% Portlandzement (CEM I). Das Sulfat wurde über Natriumsulfat zugegeben.

Kalkstabilisierte Proben

Der Gesamtverlauf aller Versuche mit Zugabe von Weißfeinkalk ist in Anlage 9: Bild 25 linear und in Anlage 9: Bild 26 semilogarithmisch dargestellt.

Über Kurvenanpassungen wurden die Parameter der Gleichung 6 ermittelt und sind in Tab. 18 angegeben. Die Messwerte der Versuche ohne Sulfatzugabe wurden an die Gleichung 4 angepasst, da hier keine Kristallisation von Ettringitmineralien stattfindet. In Anlage 9: Bild 27 bis 37 sind die Messwerte der einzelnen Versuche und die Kurvenanpassungen dargestellt.

Ver-such	Sulfatzugabe [ppm]	ϵ_{∞} [%]	a_{hyd} [%]	τ_{hyd} [d]	a_{ett} [%]	τ_{ett} [d]
3.2	10.000	28,62	13,75	0,003	15,53	1,08
4.30		26,71	6,76	0,002	18,84	0,96
3.4	8.000	28,23	13,98	0,003	12,23	0,59
4.31		24,75	8,26	0,003	15,26	0,59
3.5	5.000	24,96	15,35	0,006	9,36	0,39
4.32		18,22	8,18	0,001	9,15	0,28
3.6		22,72	13,49	0,002	8,94	0,29
3.7	3.000	12,50	7,59	0,001	4,97	0,15
3.8		18,18	12,60	0,003	5,2	0,26
3.10	Kein Sulfat	20,84	19,90	0,005	-	-
3.9	Sulfat	13,65	10,2	0,007	-	-

Tab. 18 Ergebnisse der Kurvenanpassungen an die Gleichung 6 für das Probenmaterial 4 und einer Zugabe von 4% Weißfeinkalk (WFK)

Nach einer Stagnation von einigen Stunden treten auch hier erneute Dehnungen ein, die auf die Kristallisation von Ettringitmineralien zurückzuführen sind. Dies wurde durch eine mineralogische Untersuchung (XRD) bestätigt (siehe Tab. 15).

In Bild 17 sind die über Kurvenanpassungen berechneten Dehnungen infolge Ettringitreiben in Abhängigkeit des Sulfatgehalts aufgetragen. Es

zeigt sich erneut eine deutliche Abhängigkeit der Hebung vom Sulfatgehalt. Je höher der Sulfatgehalt, desto ausgeprägter sind die Quellhebungen. Auch hier lässt sich diese Abhängigkeit der Hebungen infolge Ettringitbildung vom Sulfatgehalt über einen linearen Zusammenhang (Gleichung 8) beschreiben. In Anlage 9: Bild 38 ist die Kurvenanpassung an die Gleichung 8 dargestellt. Es ergibt sich hier ein Hebungsbeiwert H_s von 0,00168 [%/ppm].

Zur Kontrolle der Kurvenanpassungen wurden auch hier die Hebungen direkt aus den Messwerten ermittelt. Daraus ergeben sich die in Tab. 19 angegebenen Werte. In Anlage 9: Bild 27 bis 37 sind die Berechnungen für die einzelnen Versuche angegeben. In Anlage 9: Bild 39 sind beide Verfahren der Dehnungsermittlung in einem Diagramm gegenüber gestellt. Beide Verfahren erzielen auch für die kalkstabilisierten Versuche annähernd identische Ergebnisse.

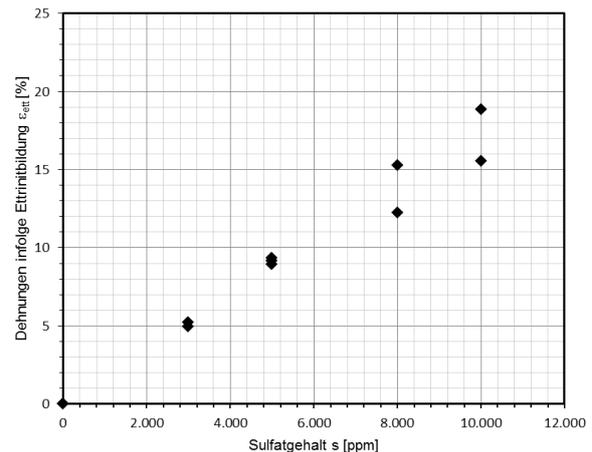


Bild 17: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Das Probenmaterial 4 wurde mit 4% Weißfeinkalk stabilisiert.

Vergleich der zement- und kalkstabilisierten Proben

Im Wesentlichen ist das Verhalten der zement- und kalkstabilisierten Versuche auch beim Probenmaterial 4 gleich. Nach initialen Hebungen infolge Hydratation folgt eine Stagnation von einigen Stunden. Im Anschluss treten bei den bindemittelstabilisierten Proben mit Sulfatzugabe weitere Hebungen auf, die auf die Bildung von Ettringitmineralien zurückgeführt werden können.

Der über Kurvenanpassungen berechnete Zeitparameter τ_{hyd} für die initialen Dehnungen infolge Hydratation ist für die Versuche mit Sulfat- und Weißfeinkalkzugabe annähernd gleich wie bei den Versuchen mit Sulfat- und Zementzugabe. Auch die Hebungen sind vergleichbar.

Unterschiedlich ist das Verhalten der Proben während der Stagnation nach den Hydratationsdehnungen. Bei den kalkstabilisierten Proben setzen deutlich früher erneute Dehnungen ein, die auf eine Ettringitbildung zurückzuführen sind als bei den zementstabilisierten Proben (Vergleich Anlage 9: Bild 2 mit Bild 26).

Versuch	Sulfatzugabe [ppm]	ϵ_{Ende} [%]	Mittelwert Hebung bei Stagnation [%]	ϵ_{ett} [%]
3.2	10.000	28,78	13,43	15,34
4.30		26,67	8,16	18,81
3.4	8.000	28,30	15,93	12,38
3.5	5.000	24,96	14,22	10,74
4.32		18,15	9,60	8,55
3.6		22,94	14,04	8,90
3.7	3.000	13,24	8,06	5,18
3.8		18,22	12,91	5,31
3.10	Keine Sulfatzugabe	21,19		-
3.9		13,79		-

Tab. 19: Abgelesene Hebungen der Versuche mit Probenmaterial 4 und Zugabe von 4% Weißfeinkalk (WFK)

Ein Unterschied zeigt sich außerdem in den im Anschluss an die Stagnation auftretenden Dehnungen. Hier erreichen die kalkstabilisierten Proben bei identischem Sulfatgehalt höhere Dehnungen (Bild 18). In Anlage 9: Bild 40 sind vergleichend die über Kurvenanpassungen berechneten Dehnungen infolge Ettringitreiben in Abhängigkeit des Sulfatgehalts und die Kurvenanpassungen an die Gleichung 8 dargestellt.

4.3.9.5 Weitere Versuchsergebnisse

Parallel zu diesem Forschungsvorhaben wurden in der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Versuche am Probenmaterial 1 und 2 bei 18°C und bei 5°C durchgeführt, deren Ergebnisse uns zu Verfügung gestellt wurden. Das Versuchsprogramm ist in Tab. 20 angegeben.

Eingebaut wurden vier Proben aus Probenmaterial 1 mit 4% Weißfeinkalk. Zwei Versuche wurden in einem Klimaschrank bei 18°C (Proben 7 und 8), zwei in einem Kühlsschrank bei 5°C (Proben 9 und 10) durchgeführt. Zudem wurden am Probenmaterial 1 zwei Versuche mit einem Weißfeinkalkgehalt

von 2% und einer Umgebungstemperatur von 18°C (Proben 5 und 6) ausgeführt.

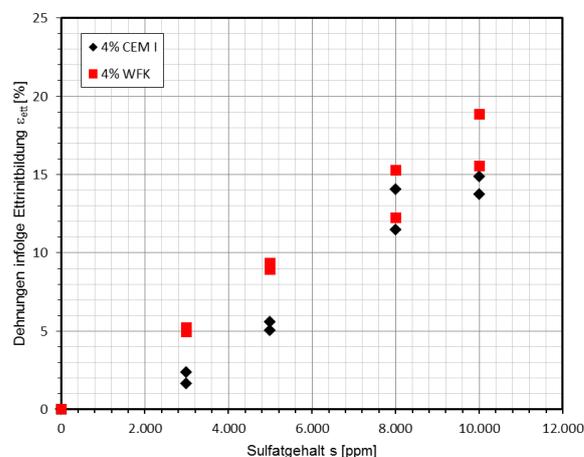


Bild 18: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts Probenmaterial 4 (WFK: Weißfeinkalk, CEM I: Portlandzement)

Die gemessenen Dehnungsverläufe sind in Anlage 10: Bild 1 und Bild 2 abgebildet. Für alle vier Proben wurde die Dehnung infolge der Hydratation von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) herausgerechnet. In Tab. 21 sind vergleichend die Dehnungen ohne die Anfangshebungen bei 18°C und bei 5°C angegeben. Die im Anschluss stattfindenden Hebungen fallen bei 5°C weit stärker aus, als bei 18°C. KELLER et al. (2002) haben anhand von Schlammversuchen festgestellt, dass die Reaktionstemperatur den pH-Wert maßgeblich beeinflusst. Der pH-Wert war bei ihren Versuchen bei 4°C durchweg höher als bei 25°C, da bei niedrigen Temperaturen die Reaktionen langsamer ablaufen also die Erhöhung des pH-Werts infolge der Bindemittelzugabe länger andauert.

Weißfeinkalk	18 °C		5 °C
	Probenmaterial 1	Probenmaterial 2	Probenmaterial 1
2%	Probe 5	Probe 1	/
	Probe 6	Probe 2	
4%	Probe 7	Probe 3	Probe 9
	Probe 8	Probe 4	Probe 10

Tab. 20: Versuchsprogramm BASt

Auffallend bei den 2014 in der BASt erzielten Versuchsergebnissen ist, dass bei den mit 2% und mit 4% Weißfeinkalk vermengten Proben die Hebungen annähernd gleich groß sind, also keine Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt erkennen lassen.

Die Proben wurden bisher nicht mineralogisch untersucht. Bei den Proben 9 und 10 (4% WFK, Umgebungstemperatur 5°C) kam es während der

Versuche zu einer starken Ausfällung von Kristallen (weiß/durchschienen). Vermutlich handelt es sich um Gips, allerdings ist dies noch nicht überprüft.

Die am gleichen Material in der Universität Stuttgart durchgeführten Versuche (vergl. Abs. 4.3.9.1) ergaben bei einer Umgebungstemperatur von 18°C und einer Zugabe von 4% Weißfeinkalk deutlich stärkere Hebungen (Vergleich Tab. 21 Ergebnisse Probe 7 und 8 mit Tab. 22 Versuch 2.4b und 2.3). Die Ursache hierfür ist nicht geklärt.

Am Probenmaterial 2 wurden jeweils zwei Versuche mit 2% Weißfeinkalk (Proben 1 und 2) und mit 4% Weißfeinkalk (Proben 3 und 4) und einer Umgebungstemperatur von 18°C ausgeführt. Ziel war zu prüfen, ob es im Langzeitverhalten zu Quellhebungen kommt, die auf eine Ettringitbildung zurückgeführt werden können. Die Ergebnisse liegen bisher noch nicht vor, da zum aktuellen Zeitpunkt die Versuchsdauer erst bei 70 Tagen liegt, also die in Abs. 4.3.9.2 beschriebenen Versuchsabläufe noch nicht überschritten hat.

Weißfeinkalk	Versuch	Temperatur	Dehnung [%]
2%	Probe 5	18°C	7,5
	Probe 6		5,2
4%	Probe 7		4,8
	Probe 8		6,0
4%	Probe 9	5°C	19,5
	Probe 10		20,6

Tab. 21: Vergleich der Dehnungen (Probenmaterial 1 mit 4% WFK) ohne die Hydratationsdehnungen bei 5°C und bei 18°C. Durchführung BAST.

Weißfeinkalk	Versuch	Temperatur	Dehnung [%]
4%	2.4b	18°C	23,8
	2.3		22,7

Tab. 22: Ergebnisse Probenmaterial 1 mit 4% WFK ohne die Hydratationsdehnungen bei 18°C. Durchführung Universität Stuttgart.

4.3.9.6 Ergebnisse der pH-Wert Messungen

Während der Versuche muss für den Transport des gelösten Sulfats ausreichend Wasser vorhanden sein, was dadurch gewährleistet wurde, dass der Probekörper im Oedometerversuchsstand stets unter Wasser gelagert war. Während der Versuche wurde verdunstetes Wasser nachgefüllt.

Es besteht die Möglichkeit, dass das Sulfat aus der Probe in das umgebende Wasser diffundiert. Deshalb wurde während der Versuche in regelmäßigen Abständen der pH-Wert im „freien Wasser“ außerhalb der Probe, d.h. im Topf des Oedometerstandes gemessen und Veränderungen protokolliert.

Das in den Versuchen eingesetzte demineralisierte Wasser hat einen pH-Wert von 6,9.

Die Ergebnisse der pH-Messungen sind in Anlage 11: Bild 1 bis 5 dargestellt.

Es ist kein eindeutiger Unterschied zwischen Versuchen mit und ohne Sulfatgehalt feststellbar. Der pH-Wert des Wassers steigt zu Beginn der Versuche unabhängig vom Sulfatgehalt und Probenmaterial auf ca. 11 an und geht während der Versuche sowohl bei den Proben mit, als auch bei den Proben ohne Sulfatzugabe auf etwa 9. Vermutlich ist der Anstieg des pH-Wertes auf die Wirkung des Bindemittels zurückzuführen. Im Porenwasser innerhalb der Probe herrscht vermutlich ein höherer pH-Wert als die im „freien Wasser“ außerhalb der Probe gemessenen Werte.

Da kein eindeutiger Unterschied in den Versuchen mit und ohne Sulfatgehalt feststellbar ist, kann vorbehaltlich genauer Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass der Sulfatgehalt während der Versuchsdauer in der Probe erhalten geblieben ist.

4.4 Einaxiale Druckversuche

Der Versuch nach DIN 18136 (DIN 18136:2003-11) dient zur Feststellung der einaxialen Druckfestigkeit bei konstanter Stauchungsgeschwindigkeit und unbehinderter Seitendehnung. Die einaxiale Druckfestigkeit q_u entspricht dem Höchstwert der einaxialen Druckspannung σ .

Einaxiale Druckversuche werden im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt, um den Einfluss des Ettringitreibens auf die Langzeitfestigkeit bindemittelstabilisierter Böden zu testen.

4.4.1 Versuchsprogramm

Die einaxialen Druckversuche werden an den beiden Versuchsmaterialien mit Lockergesteincharakter (Probenmaterial 1 und 4) durchgeführt.

Probenmaterial 1 hat einen natürlichen Sulfatgehalt. Hier werden jeweils 4 Proben mit 4% Zementzugabe (CEM I) und 4 Proben mit 4% Weißfeinkalkzugabe (WFK) hergestellt. Probenma-

terial 4 hat keinen natürlichen Sulfatgehalt. Hier werden analog der Quellhebungsversuche definierte Sulfatmengen hinzugegeben. Der Bindemittelgehalt wird konstant gehalten. Es werden Versuche mit Zugabe von Zement und Zugabe von Weißfeinkalk durchgeführt. Auch hier werden pro Mischungsverhältnis 4 Probekörper hergestellt.

Die Festigkeiten der Probekörper werden jeweils an 2 Proben nach 28 Tagen und nach 6 Monaten ermittelt.

In Tab. 23 ist das Versuchsprogramm dargestellt.

	4% CEM I	4% Weißfeinkalk
Probenmaterial 1: GB ET		
Probenmaterial 4: LLHN	10.000 ppm	10.000 ppm
	8.000 ppm	8.000 ppm
	5.000 ppm	5.000 ppm
	3.000 ppm	3.000 ppm
	0	0

Tab. 23: Versuchsprogramm einaxiale Druckversuche

4.4.2 Versuchsdurchführung

Die Herstellung und Lagerung der Probekörper sowie die Lagerung und Behandlung bis zur Prüfung erfolgen gemäß (FGSV 591 / B11.1, 2005) und (FGSV 591 / B11.5, 1991). Mit der Herstellung der Probekörper wird nach einer Wartezeit von 60 ± 15 Minuten nach dem Mischen begonnen. Die für jeden Probekörper erforderliche Materialmenge wird dann in drei gleiche Teilmengen geteilt. Die Teilmengen werden wie beim Proctorversuch lagenweise in die Probekörperform eingebracht und verdichtet. Vor Aufbringen der nächstfolgenden Schicht wird die bereits verdichtete Schicht sorgfältig aufgeraut, um eine gute Verbindung der Schichten zu erreichen. Die Probekörper werden nach ausreichender Erhärtung, frühestens 20 Stunden nach dem Verdichten, entformt. Sie werden bis dahin bei einer Temperatur von $15 - 25$ °C gelagert und gegen Verdunstung geschützt. Nach dem Entformen werden die Probekörper bei einer Temperatur 20 ± 2 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 95% gelagert.

Nach 28 Tagen bzw. 6 Monaten wird der Probekörper zentrisch in die Prüfmaschine eingebaut und die Axialkraft bei einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit gemessen. Die empfohlene Versuchsgeschwindigkeit liegt gemäß DIN 18136 (DIN 18136:2003-11) bei ca. 1% der Anfangshöhe

des Probekörpers pro Minute. Bei verkitteten oder stabilisierten Böden mit einer erwarteten Bruchstauung $\epsilon_u < 4\%$ ist eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,2% der Anfangshöhe des Probekörpers pro Minute einzuhalten. Der Versuch ist beendet, wenn der Bruch eingetreten ist, d.h. die gemessene Axialkraft nicht weiter ansteigt oder die Stauung der Probe einen Wert von 20% erreicht hat.

Bild 19 zeigt die verwendete Druckprüfmaschine.

Nach der Empfehlung Nr. 1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (MUTSCHLER, 2004) sollen einaxiale Druckversuche an zylindrischen Probekörpern durchgeführt werden, deren Länge l etwa dem zweifachen des Durchmessers d entsprechen soll. Probekörper mit einer Länge im Bereich $1,5 d < l < 2,5 d$ sind gut geeignet. Aufgrund des Einflusses der Endflächenreibung können zu hohe Festigkeitswerte ermittelt werden, wenn das Verhältnis der Länge l des Probekörpers zu seinem Durchmesser d kleiner als 2 ist. In solchen Fällen ist die an zu kurzen Probekörpern bestimmte Druckfestigkeit σ_u gemäß Gleichung 9 auf den Wert $\sigma_{u(2)}$ abzumindern (OBERT & DUVALL, 1967).



Bild 19: Einaxialer Druckversuche: Prüfpresse

$$\sigma_{u(2)} = \frac{8 \cdot \sigma_u}{7 + 2 \cdot \frac{d}{l}} \quad (\text{Gl. 9})$$

Im vorliegenden Fall wurden Probekörper mit einer Länge l von 12 cm und einem Durchmesser d von 10 cm genutzt. Es ergibt sich somit ein Verhältnis $h/d = 1,2$. Die im Versuch ermittelten Druckfestigkeiten mussten daher nach Gleichung 9 abgemindert werden.

4.4.3 Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Probenmaterial 1

Das Material wurde zum einen im natürlichen und zum anderen als Vergleich im pulverisierten Zustand analog der Quellversuche in die zylindrischen Probekörperformen eingebaut.

In Tab. 24 sind die abgeminderten einaxialen Druckfestigkeiten des Probenmaterials 1 (natürliches Material) nach 28 Tagen und nach 6 Monaten angegeben. In Anlage 12: Bild 1 und 2 sind die Versuchskurven abgebildet. Die Druckspannungen in den Diagrammen entsprechen den Messwerten und sind daher noch nicht abgemindert.

Bindemittel	Druckfestigkeit [kPa]	Druckfestigkeit [kPa]
	nach 28 Tage	nach 6 Monate
CEM I	1.154,8	2142,2
	-	1322,5
WFK	698,4	1278,8
	676,6	1573,9

Tab. 24: Abgeminderte Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 1 (Natürliches Material)

Sowohl die kalk- als auch die zementstabilisierten Proben ergeben nach 6 Monaten deutlich höhere einaxiale Druckfestigkeiten. Ein Festigkeitsverlust infolge Ettringitbildung ist nicht feststellbar.

In Anlage 12: Bild 3 bis 5 sind die Bruchbilder der einzelnen Probekörper nach 28 Tagen und in Anlage 12: Bild 6 bis 9 die Bruchbilder der einzelnen Probekörper nach 6 Monaten abgebildet.

Probenmaterial 4

In Tab. 25 sind die abgeminderten einaxialen Druckfestigkeiten des zementstabilisierten Probenmaterials 4 nach 28 Tagen und nach 6 Monaten angegeben. In Anlage 12: Bild 10 und Bild 11 sind die Versuchskurven der einzelnen Versuche abgebildet. Die Druckspannungen in den Diagrammen sind auch hier noch nicht abgemindert.

In Tab. 26 sind die abgeminderten einaxialen Druckfestigkeiten des kalkstabilisierten Probenmaterials 4 nach 28 Tagen und nach 6 Monaten angegeben. In Anlage 12: Bild 12 und Bild 13 sind die Versuchskurven der einzelnen Versuche abgebildet. Die Druckspannungen sind in den Diagrammen noch nicht abgemindert.

Bindemittel	Sulfatgehalt [ppm]	Druckfestigkeit [kPa]	Druckfestigkeit [kPa]	Veränderung der Festigkeit 28 d./6 M [%]
		nach 28 Tage	nach 6 Monate	
CEM I	10.000	1.399,7	1.770,6	8,8
		1.692,8	1.639,5	
	8.000	1.730,7	1.661,3	-2,2
		1.577,3	1.573,9	
	5.000	1.645,0	1.552,0	-8,9
		1.785,6	1.595,7	
	3.000	1.723,7	1.672,3	9,9
		1.181,5	1.530,2	
	Kein Sulfat	1.480,61	1.497,4	9,3
		1.461,1	1.770,6	

Tab. 25: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 4 und Zugabe Portlandzement als Bindemittel

In Anlage 12: Bild 16 bis Bild 35 sind die Bruchbilder der Probekörper aus Lösslehm (Probenmaterial 4) nach 28 Tagen und in Anlage 12: Bild 36 bis Bild 55 die Bruchbilder der Probekörper aus Lösslehm nach 6 Monaten abgebildet.

Um eine mögliche Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Sulfatgehalt zu untersuchen, wurden die abgeminderten Druckfestigkeiten nach 28 Tagen und nach 6 Monaten in Abhängigkeit des Sulfatgehalts dargestellt (Anlage 12: Bild 14 und 15).

Bei den kalkstabilisierten Proben ist festzustellen, dass ein höherer Sulfatgehalt mit einer höheren einaxialen Druckfestigkeit nach 28 Tagen (Blaue Quadrate Anlage 12: Bild 14) verbunden ist. Dies liegt vermutlich an der zunächst stabilisierenden Wirkung des Ettringits. Nach 6 Monaten hat die Druckfestigkeit bei den Versuchen ohne Sulfatzugabe deutlich zugenommen (Tab. 26). Bei den Versuchen mit Sulfatzugabe fällt der Anstieg dagegen deutlich geringer aus. Die Probekörper mit 10.000 ppm Sulfatgehalt zeigen keinen Festigkeitsgewinn bzw. einen leichten Festigkeitsverlust. Je größer der Sulfatgehalt einer Probe ist, desto geringer ist der Festigkeitsgewinn nach 6 Monaten.

Die zementstabilisierten Proben zeigen nach 28 Tagen (Rote Quadrate Anlage 12: Bild 14) keine Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Sulfatgehalt der Probe. Auffällig ist allerdings, dass sowohl bei den Proben mit Sulfatzugabe als auch bei den Proben ohne Sulfatzugabe nach 6 Mona-

ten Lagerung kaum ein Festigkeitsgewinn feststellbar ist (Tab. 25).

Im Ergebnis konnte mit den einaxialen Druckversuchen auch im Falle eines Ettringitwachstums kein zeitabhängiger Festigkeitsverlust nachgewiesen werden.

Bindemittel	Sulfatgehalt [ppm]	Druckfestigkeit [kPa] nach 28 Tage	Druckfestigkeit [kPa] nach 6 Monate	Veränderung der Festigkeit 28 d./6 M [%]
WFK	10.000	3.295,0	3.322,6	-10,8
		3.187,0	2.601,3	
	8.000	2.845,4	3.770,8	25,8
		2.796,6	3.825,4	
	5.000	2.958,3	3.180,6	8,4
		2.745,4	3.044,0	
	3.000	2.152,8	3.858,2	39,1
		2.496,8	3.783,4	
	Kein Sulfat	1.368,5	3.038,5	51,1
		1.648,7	3.125,9	

Tab. 26: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 4 und Zugabe Weißfeinkalk als Bindemittel

5 Grundlagen einer Prüfvorschrift

Ziel der Forschungsarbeit war es, Grundlagen für die Entwicklung einer praxistauglichen Prüfvorschrift zu erarbeiten. Hierzu sollten Kenngrößen und deren Richtwerte zur Beurteilung des Risikos von Treiberscheinungen durch Ettringitbildung bei der Bindemittelstabilisierung von sulfathaltigen Böden identifiziert werden. Dies wurde zum einen über eine umfassende Literaturstudie und zum anderen durch Laboruntersuchungen erreicht.

5.1 Kritische Einflussgrößen

Es sind verschiedene Randbedingungen bekannt, die die Bildung von Ettringitkristallen begünstigen. In Abs. 3.2.3 wurden bereits die aus der Literatur bekannten Einflussfaktoren erläutert. In den experimentellen Untersuchungen wurden nun der Einfluss der Art des Zuschlagstoffes und des Sulfatgehalts untersucht.

In Tab. 27 sind die in Versuchen ermittelten Dehnungen infolge Ettringitbildung für das Probenmaterial 1 angegeben.

4% CEM I			4% WFK		
Ver-such	ϵ_{ett} [%]	Mittelwert ϵ_{ett} [%]	Ver-such	ϵ_{ett} [%]	Mittelwert ϵ_{ett} [%]
1.14	13,2	15,8	2.4b	23,8	23,3
4.3	18,4		2.3	22,7	

Tab. 27: Dehnungen infolge Ettringitbildung Probenmaterial 1 (CEM I: Portlandzement, WFK: Weißfeinkalk). Das Material hat einen natürlichen Gipsgehalt von 8,1%.

In den Tabellen 28 und 29 sind die in Versuchen ermittelten Dehnungen infolge Ettringitbildung für die Probenmaterialien 3 und 4 angegeben.

Sulfat [ppm]	4% CEM I			4% WFK		
	Ver-such	ϵ_{ett} [%]	Mittelwert ϵ_{ett} [%]	Ver-such	ϵ_{ett} [%]	Mittelwert ϵ_{ett} [%]
3.000	2.19	1,1	0,8	3.17	7,2	7,0
	2.20	0,5		4.24	6,9	
5.000	2.17	2,8	2,4	3.16	14,7	15,0
	2.18	1,9		3.15	15,4	
8.000	4.21	5,2	5,3	4.25	18,5	20,1
	2.15	5,3		3.14	21,7	
10.000	2.13	9,5	9,3	4.23	25,1	24,5
	2.13a	8,8		3.12	23,8	
	2.14	9,6		-	-	

Tab. 28: Dehnungen infolge Ettringitbildung Probenmaterial 3 (CEM I: Portlandzement, WFK: Weißfeinkalk)

5.1.1 Bindemittelart

Besonders kritisch erscheint nach KELLER et al. (2002) die Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk von verwitterten, gipshaltigen Böden. Wird stattdessen Zement verwendet, so verringert sich das Schadensrisiko beträchtlich.

Diese Beobachtungen konnten bestätigt werden. In den Tab. 27 bis 29 sind die Dehnungen infolge Ettringitreibens in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt und der Bindemittelart angegeben. Bei Verwen-

derung von Weißfeinkalk zeigten sich in den Versuchen deutlich größere Hebungen.

Es ist daher zu empfehlen, in Böden mit einem kritischen Sulfatgehalt auf eine Bindemittelstabilisierung mit Weißfeinkalk generell zu verzichten.

Sulfat [ppm]	4% CEM I			4% WFK		
	Ver-such	ϵ_{ett} [%]	Mittel-wert ϵ_{ett} [%]	Ver-such	ϵ_{ett} [%]	Mittel-wert ϵ_{ett} [%]
3.000	2.9	1,6	2,0	3.7	45,0	5,0
	2.10	2,4		3.8	5,2	
5.000	2.7	5,6	5,3	3.5	9,4	9,2
	2.8	5,1		4.32	9,2	
	-	-		3.6	8,9	
8.000	2.11	11,5	12,8	3.4	12,2	13,8
	2.12	14,0		4.31	15,3	
10.000	4.29	13,8	14,3	3.2	15,5	17,2
	1.15	14,8		4.30	18,8	

Tab. 29: Dehnungen infolge Ettringitbildung Probenmaterial 4 (CEM I: Portlandzement, WFK: Weißfeinkalk)

5.1.2 Sulfatgehalt

Unabhängig von der Gesteins- bzw. Bodenart und der Art des Bindemittels zeigen die Versuchsergebnisse einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und dem Grad der Hebung durch Ettringitreiben.

Die ermittelten Dehnungen liegen zwischen 1% und 25%. Damit fallen sie tendenziell höher aus als die von WITT (2011) veröffentlichten Ergebnisse. Diese zeigten Hebungen die zwischen 5% und 13% bei Sulfatgehalten von 5.000 ppm bis 15.000 ppm.

In der deutschsprachigen Literatur (u.a. WITT, 2012) wird angegeben, dass Sulfatgehalte ab 3.000 ppm potentiell schädigungsrelevant sind. Allerdings wird das Gefährdungspotential als gering angesehen. Eine hohe Gefährdung ist ab Sulfatgehalten von mehr als 8.000 ppm anzunehmen. Die diesbezüglich von WITT (2012) angegebenen Grenzwerte finden sich auch in der Technischen Vorschrift des Texas Department of Transportation (2005) und in der UNI EN 1744-1:2013.

Ein geringes Gefährdungspotential für einen Sulfatgehalt von 3.000 ppm kann auf Basis der

eigenen vorliegenden Versuche nur bei Verwendung von Portlandzement bestätigt werden. Sowohl Probenmaterial 3 als auch 4 zeigen in diesem Fall bei einem Sulfatgehalt von 3.000 ppm Hebungen bis maximal 2%. Bei einer Stabilisierung mit Weißfeinkalk zeigen sich für Probenmaterial 3 und 4 hingegen bereits bei einem Sulfatgehalt von 3.000 ppm Hebungen von 5% bis 7% infolge Ettringitreibens. Je nach Anwendungsfall besteht daher bereits bei relativ geringen Sulfatgehalten ein Gefährdungs- bzw. Schadensrisiko. Den mineralogischen Nachweis, dass sich die aufgetretenen Hebungen auf eine Ettringitbildung zurückführen lassen, wurde nur für Proben der Materialien 3 und 4 mit einer Zugabemenge von 10.000 ppm Sulfat exemplarisch erbracht.

Es zeigt sich, dass der „kritische Sulfatgehalt“ zum einen stark von der Bodenart abhängt und zum anderen auch durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst wird.

In erster Näherung können, basierend auf den in den Versuchen gewonnenen Versuchsergebnissen, die in Tab. 30 (bzw. Bild 20 und 21) angegebenen Bandbreiten für die in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt erwarteten Dehnungen für eine Risikobewertung herangezogen werden. WITT (2011) ermittelt bei Versuchen mit einem Mischbindemittel die in Tab. 31 angegebenen Hebungen.

Sulfatgehalt	3.000 ppm	5.000 ppm	8.000 ppm	10.000 ppm
4% WFK	6,1%	11,5%	16,9%	20,8%
Standardabweichung	1,1%	3,2%	4,1%	4,5%
4% CEM I	1,4%	3,9%	9,0%	11,3%
Standardabweichung	0,8%	1,8%	4,5%	2,8%

Tab. 30: gemittelte Bandbreiten der Dehnungen (in [%]) infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts

Sulfatgehalt	5.000 ppm	8.000 ppm	15.000 ppm
Mischbindemittel (WITT, 2011)	6%	9%	12%

Tab. 31: gemittelte Bandbreiten der Dehnungen (in [%]) infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts nach WITT (2011)

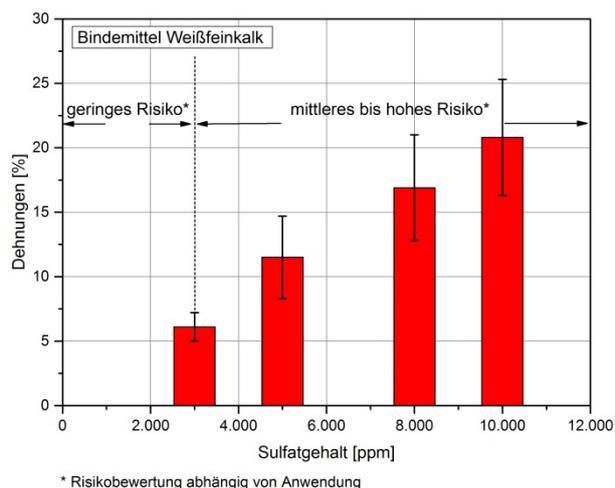


Bild 20: gemittelte Dehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts für kalkbehandelte Böden (Grundlage zur Risikobewertung)

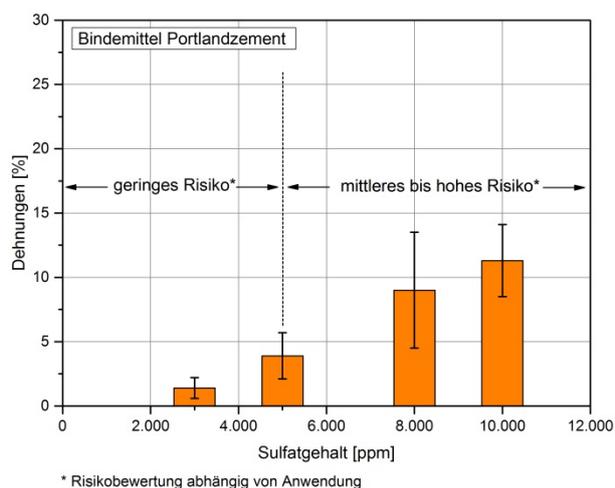


Bild 21: gemittelte Dehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts für zementbehandelte Böden (Grundlage zur Risikobewertung)

5.2 Prüfverfahren zur Ermittlung des Quellpotentials

Grundsätzlich kann zur Abschätzung des Schadenrisikos nach dem Ablaufplan in Bild 22 vorgegangen werden.

Muss von einer mittleren bis hohen Gefährdung ausgegangen werden, so empfehlen sich für eine fundierte Prognose Quellhebungsversuche an Proben des Boden-Bindemittelgemischs. Im Folgenden wird ein Vorgehen zur qualifizierten Durchführung solcher Quellhebungsversuche vorgeschlagen.

5.2.1 Versuchsprogramm

Die Versuche sind mit dem geplanten Bindemittelgehalt durchzuführen, ggf. kann eine Variation des Bindemittelgehalts sinnvoll sein.

Zudem ist es ratsam, Referenzproben ohne Bindemittelzugabe herzustellen, um später eindeutig beurteilen zu können, welche Dehnungen infolge der Ettringitbildung entstanden sind.

Um versuchsimmanente Streuungen erkennen und bewerten zu können, sollte jeder Versuch an mindestens zwei Proben (Doppelproben) durchgeführt werden.

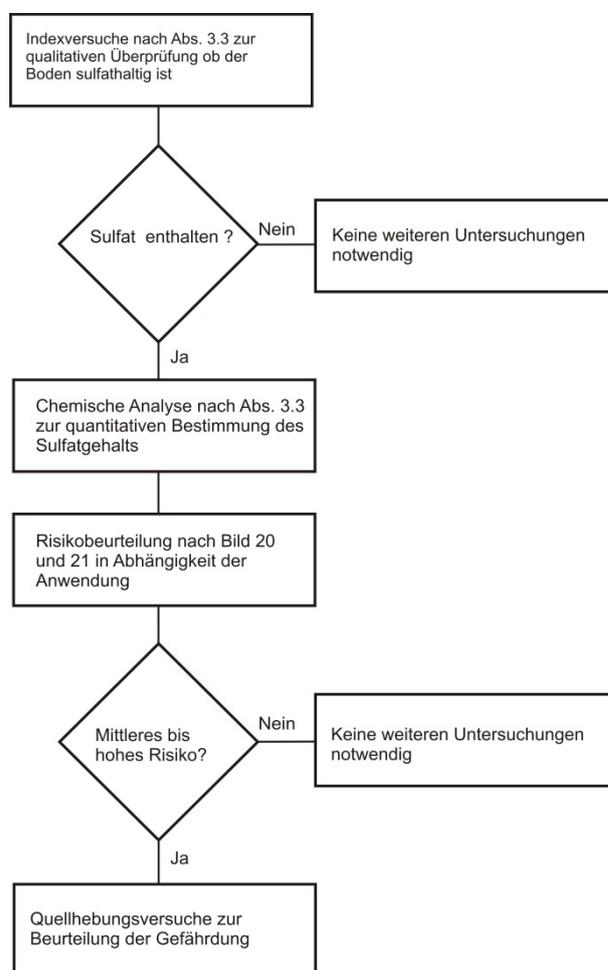


Bild 22: Ablaufplan zur Abschätzung des Schadenrisikos

5.2.2 Prüfeinrichtung

Für die Prüfeinrichtung kann die Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels (PAUL, 1986) für Quellversuche an Gesteinsproben genutzt werden.

- Die Probe befindet sich in einem Oedometerring, welcher ausreichend starr ist

und aus korrosionsfreien, polierten Metall besteht. Die Innenabmessungen des Oedometerring sind so zu wählen, dass ein Verhältnis $d/l = 3,5$ gegeben ist.

- Die Wasserzufuhr erfolgt über Filterplatten, die über und unter der Probe anzuordnen sind. Die Oedometerzelle muss mindestens bis zur Oberkante der oberen Filterplatte mit demineralisiertem Wasser befüllt werden. Wichtig ist bei den Filterplatten ein möglichst geringes Eigen-gewicht zu berücksichtigen.
- Zur Messung der axialen Verformungen können Präzisionsmessuhren oder elektrische Weggeber verwendet werden. Da ein Verkippen der Proben während des Versuches kaum vermeidbar ist, sollte die Verformungsmessung in der Probenachse erfolgen.

5.2.3 Prüfkörper

Es ist zu empfehlen Pulverquellversuche nach THURO (1993) durchzuführen, da zum einen so punktuelle Untersuchungen bzw. Untersuchungen von sehr dünnen Lagen möglich sind. Zum anderen sind Pulverquellversuche wesentlich schneller durchführbar, da chemische Reaktionen aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche des Pulvers schneller ablaufen können als in festen Prüfkörpern.

Folgende Punkte sind bei der Prüfkörperherstellung zu beachten:

- Das Probenmaterial wird bei einer Temperatur von maximal 60°C im Trockenofen vorgetrocknet.
- Das getrocknete Material wird anschließend zermahlen und auf eine Korngröße $\leq 0,5$ mm gesiebt. Dabei ist zu beachten, dass die Mineralogie der Proben möglichst nicht verändert wird (z.B. absieben bestimmter Minerale). Ist es mit einem Mörser händisch nicht möglich alle Gesteinskörner zu zermahlen, ist ein Backenbrecher zu nutzen.
- Das pulverisierte Material wird homogen mit den Zugabestoffen vermengt.
- Das Material ist anschließend mittels einer Presse in den Oedometerring einzubauen. Eine Presskraft von 100 kN hat sich im Rahmen der Forschungsarbeit bewährt, der Pressdruck sollte aber grundsätzlich in Abhängigkeit von der gewünschten Dichte gewählt werden.

5.2.4 Versuchsdurchführung

Der Oedometerring mit Probe wird in den Versuchsstand eingebaut. Die Messuhr wird ausgerichtet. Durch Zugabe von demineralisiertem Wasser wird der Quellprozess eingeleitet.

Die Versuche müssen anfangs alle paar Sekunden, dann alle Stunde abgelesen werden. Nach ca. 24 Stunden ist es ausreichend, die Hebungen täglich zu erfassen.

5.2.5 Randbedingungen

- Während der Versuche ist die Temperatur im Labor konstant auf 15°C bis 20°C zu halten, um die Ettringitbildung zu ermöglichen. Die Temperatur ist im Protokoll bei jeder Messung festzuhalten.
- Da eine Beurteilung einer möglichen Thaumasitbildung auf der Basis von Versuchen zur Ettringitbildung nach derzeitigem Kenntnisstand nicht abschließend möglich ist, wird zur Untersuchung einer Thaumasitbildung grundsätzlich empfohlen zusätzliche Versuche mit gleichem Material aber einer Temperatur von kleiner 10°C (z. B. 5°C) durchzuführen,
- Der Probekörper im Oedometerversuchsstand ist stets unter Wasser zu halten, um das Sulfat zu lösen und zu transportieren. Ggf. verdunstetes Wasser ist zu ersetzen.

5.2.6 Versuchsdauer

Die Versuchsdauer ist stark materialabhängig und muss projektbezogen festgelegt werden. Die minimale Versuchsdauer sollte 60 Tage betragen, da nach allen Erfahrungswerten eine Ettringitbildung innerhalb dieses Zeitraumes bei baupraktische üblichen Bindemittelgehalten in der Regel weitgehend abgeschlossen ist.

Anzumerken ist, dass sowohl in der Literatur (WITT, 2011 und KELLER, 2002) als auch in unseren Versuchen die sekundären Hebungsprozesse nach spätestens 4 Tagen begonnen haben.

Eine Ausnahme war in unseren Versuchen das Probenmaterial 2. Hier laufen allerdings noch die Langzeitversuche, die klären ob es auch erst nach mehreren Monaten zu Hebungen, die auf eine Ettringitneubildung schließen lassen, kommen kann. Auch die Versuche die während der Vorplanung der BAB 71 durchgeführt wurden, zeigten nach 6 Monaten noch keine Quellhebungen, später während des Baus traten aber Schäden auf, die

auf ein Sulfatreiben zurückgeführt werden konnten (MITTAG & HÜNERBEIN, 2012).

5.2.7 Versuchsauswertung

Für alle Messungen sind die Dehnungen ε zu errechnen und in Abhängigkeit der Zeit t darzustellen.

Beim Pulverquellversuch sind die Quelldehnungen einerseits auf die Quelleigenschaften der Probe, andererseits aber auch auf die Hydratation des gemahlten Korns zurückzuführen. Die Anfangshebungen, die auf die Hydratation zurückzuführen sind müssen aus den Versuchsergebnissen herausgerechnet werden.

Die errechneten Dehnungen infolge Ettringitbildung können dann in Abhängigkeit des Bindemittelgehalts dargestellt werden.

5.2.8 Mineralogische Untersuchungen

Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung des Mineralbestandes wird nach Versuchsende eine Röntgendiffraktometrie empfohlen. Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen kann zudem auch die Verteilung und Ausbildung von Ettringitkristallen aufgenommen werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

In dem hier dokumentierten Forschungsprojekt wurden kritische Einflussgrößen für die Ettringitbildung untersucht. Ziel war es, Grundlagen für die Entwicklung einer praxistauglichen Prüfvorschrift zu erarbeiten.

Im ersten Arbeitsschritt wurde eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt, Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die verschiedenen Einflussfaktoren, die eine Ettringitbildung begünstigen, gelegt (Abs. 3.2.3). Diese Auswertung zeigte, dass insbesondere der Mineralbestand, das Wasserangebot, das chemische Milieu, die Temperatur, die Porenstruktur und der Überlagerungsdruck als wesentliche Einflussfaktoren genannt werden.

Im zweiten Arbeitsschritt wurden experimentelle Untersuchungen an vier verschiedenen Böden durchgeführt. Zunächst wurde anhand von Pulverquellversuchen das Quellverhalten der vier Materialien untersucht. Hierbei wurden zwei Materialien mit einem natürlichen (Probenmaterial 1 und 2) und zwei ohne natürlichen (Probenmaterial 3 und 4) Sulfatgehalt verwendet. Probenmaterial 3 und 4 wurde Sulfat künstlich in definierten Mengen hin-

zugegeben. Da alle vier Materialien zu Pulver aufbereitet wurden, bevor sie mit den Zugabestoffen homogenisiert und in Oedometerringe gepresst wurden, kam es zu Beginn der Versuche zu initialen Dehnungen infolge Hydratation. Im Anschluss kam es nach einer Stagnation zu weiteren Dehnungen, die auf eine Ettringitbildung zurückgeführt werden konnten. Hinsichtlich der durch Ettringitbildung bedingten Dehnungen konnten folgende Zusammenhänge festgestellt werden:

- Für Probenmaterial 1 ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Bindemittelgehalt und der Dehnung infolge Ettringitbildung. Allerdings muss dieser Zusammenhang noch bestätigt werden, da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur wenige Bindemittelgehalte untersucht werden konnten.
- Probenmaterial 2 zeigte keine eindeutigen Dehnungen infolge Ettringitbildung, da vermutlich die Versuchsdauer von 60 Tagen nicht ausreichend war.
- Für Probenmaterial 3 und 4 konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und der Dehnung infolge Ettringitbildung festgestellt werden.
- Für Probenmaterial 3 und 4 ergaben sich bei den zementstabilisierten Proben und einem Sulfatgehalt von 3.000 ppm ca. 2% bis 5% Hebungen. Es konnte daher bestätigt werden, dass unterhalb von 3.000 ppm bei Verwendung von Zement nur eine geringe Gefährdung gegeben ist. Bei einer Stabilisierung mit Weißfeinkalk hingegen zeigen Probenmaterial 3 und 4 bereits bei einem Sulfatgehalt von 3.000 ppm Hebungen von 5% bis 7%, so dass hier bereits ein Gefährdungspotential besteht. Für eine Abschätzung der in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt und eingesetzten Bindemittel zu erwartenden Hebungen können die Richtwerte der Tab. 30 (bzw. Bilder 20 und 21) entnommen werden. Es zeigt sich, dass ‚kritische Sulfatgehalte‘ zum einen stark materialabhängig sind und zum anderen durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst werden. Dabei konnte bestätigt werden, dass eine Bindemittelstabilisierung mit Weißfeinkalk kritischer ist als die Verwendung von Portlandzement.

Als weitere experimentelle Untersuchungen wurden einaxiale Druckversuche am Probenmaterial 1 und 4 durchgeführt, um den Einfluss des Ettringitreibens auf die Langzeitfestigkeit bindemittelstabilisierter Böden zu testen. Probenmaterial 1 hat einen natürlichen Sulfatgehalt und wurde mit 4% Portlandzement bzw. 4% Weißfeinkalk stabili-

siert. Es konnte keine entfestigende Wirkung festgestellt werden. Nach 6 Monaten lagen die Druckfestigkeiten deutlich höher als nach 28 Tagen. Probenmaterial 4 wurden definierte Mengen an Sulfat zugegeben und mit 4% Portlandzement bzw. 4% Weißfeinkalk stabilisiert. Hier konnte bei den kalkstabilisierten Proben ein Einfluss festgestellt werden: Nach 28 Tagen ergab sich mit zunehmendem Sulfatgehalt eine höhere einaxiale Druckfestigkeit, was auf die primär stabilisierende Wirkung des Ettringits zurückzuführen ist. Nach 6 Monaten ergab sich mit zunehmendem Sulfatgehalt eine geringere Festigkeitszunahme. Je größer der Sulfatgehalt ist, umso geringer ist der Festigkeitsgewinn nach 6 Monaten.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnten nur wenige der vielen Randbedingungen, die die Kristallisation von Ettringitmineralien begünstigen, untersucht werden. Der Einfluss folgender Faktoren konnte nicht untersucht und bewertet werden, so dass hier offene Fragen bleiben:

- Verdichtungsgrad (Porenstruktur): Ein zusammenhängendes Porensystem begünstigt zum einen den Transport des Sulfats durch das Bodengerüst und erhöht somit das Quellpotential. Zum anderen ermöglicht aber eine geringe Verdichtung und ein damit verbundenes großes Porenvolumen, dass das Ettringit in die Poren wächst und somit zu weniger Hebungen führt als bei einer höheren Verdichtung (WITT, 2012). Es ist erforderlich, hierzu Versuche auszuführen, bei denen die Porenstruktur variiert wird. In den für dieses Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen wurde das Porenvolumen weitestgehend konstant gehalten.
- Einfluss der Umgebungstemperatur: Die Bodentemperatur hat einen starken Einfluss auf den Reaktionsmechanismus. Ettringit bildet sich bei Temperaturen zwischen 15°C und 20°C. Thaumasil kristallisiert bei Temperaturen unter 10°C (WITT, 2012). Es wurden in der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vergleichende Versuche in einer Umgebungstemperatur von 5°C und von 18°C durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass bei 5°C wesentlich höhere Hebungen auftraten als bei 18°C. Allerdings ergaben Proben vom gleichen Material, die von uns in der Universität Stuttgart durchgeführt wurden, bei 18°C deutlich größere Hebungen als die Versuche in der BASt bei 18°C. Es besteht weiterhin die Frage, ob durch die kühlen Temperaturen und die damit verbundene Thaumasilbildung stärkere Hebungen auftreten als bei wärmeren Temperaturen. Ein weiterer zu untersuchender Punkt ist die endfestigende

Wirkung des Thaumasil. In Abs. 3.2.4 wird der Schadensfall an der A 71 in Sömmerda beschrieben. Hier kam es im Winter an verbesserten Planien zu einer Auflockerung, die im Laufe des Sommers teilweise wieder zurückging. In der Summe ist die insbesondere für die Baumaßnahme wichtige Frage der Temperaturabhängigkeit des Reaktionspotentials von bindemittelverbesserten sulfathaltigen Böden noch nicht geklärt.

- Einfluss des Bindemittelgehalts: Zu Gunsten einer stärkeren Variation des Sulfatgehalts wurde der Bindemittelgehalt im Forschungsvorhaben konstant gehalten. Allerdings hat der Bindemittelgehalt einen Einfluss auf die Ettringitbildung. Daher wird empfohlen die Versuchsmatrix zu erweitern, um den Einfluss des Bindemittelgehalts genauer zu untersuchen.
- Einfluss der Struktur: Bisher wurden nur Pulverquellversuche durchgeführt, da diese zu schnellen Ergebnissen führen. Die Struktur des anstehenden Bodens wird hier jedoch im Rahmen der Probenherstellung vollständig zerstört. Es erscheint daher sinnvoll, Versuche an natürlichem, nicht aufbereitetem Material durchzuführen, um die natürlichen für die Baumaßnahme relevanten Bedingungen auf der Baustelle besser abbilden zu können. Hierzu wird die Fortsetzung der Versuche an den Probenmaterialien 1 bis 4 empfohlen.
- Einfluss von Frost-Tau-Wechsel: Schadensfällen wurden oft nach den kalten Wintermonaten beobachtet. Eine Ursache hierfür könnte, neben der Thaumasilbildung bei kühlen Temperaturen, der Einfluss von Frost-Tau-Wechseln sein. Während der Frostphase dehnt sich das Porenwasser aus und führt zu Rissen in der Bodenstruktur. Das Porenvolumen vergrößert sich. Anschließend taut das Wasser und steht zum Sulfattransport zu Verfügung. Der Einfluss von Frost-Tau-Wechseln auf die Ettringitbildung sollte daher ebenfalls untersucht werden.
- Anwendbarkeit der Indexversuche zur qualitativen Sulfatbestimmung im Feld: Zur ersten groben Abschätzung der Quellgefährdung können die in Abs. 3.3 beschriebenen Feldversuche durchgeführt werden. Die Versuche wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes nicht untersucht und können daher bisher nicht bewertet werden. Als Grundlage für die Erarbeitung einer Prüfvorschrift besteht hier Forschungsbedarf,

- Einfluss des Dolomit-Gehalts: KELLER et al. (2002) berichten, dass Proben mit hohem Dolomit-Gehalten größere Mengen an Ettringit-/Thaumasitneubildungen enthalten als Proben mit hohem Tonmineralegehalt. Auch im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde ein Einfluss des Dolomit-Gehalts festgestellt. Dies bezüglich empfehlen sich weitere Untersuchungen.

7 Literaturverzeichnis

- BOWER, C.A. & HUSS, R.B. (1948). Rapid Conductometric Method for Estimating Gypsum in Soils, *Soil Science* 66, S. 199-204.
- BREDENKAMP, S. & LYTTON, R. (1995). Reduction of Sulfate Swell in Expansive Clay Subgrades in the Dallas District. Report 1994-5, TTI, Texas Department of Transportation.
- DERMATAS, J. K., & MITCHELL, D. (1992). Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions, *Innovations and Users of lime*. Ausgabe 1135, S. 41 – 64, American Society for Testing and Materials
- DIENER, R. (2002) Die siliziklastischen Sedimente der synorogenen Hochwipfel-Formation im Karbon der Westkarawanken, Dissertation Uni Stuttgart.
- DIN 18121-1:1998-04, Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung.
- DIN 18122-1:1997-07, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.
- DIN 18123:2011-04, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- DIN 18129:2011-07, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Kalkgehaltsbestimmung.
- DIN 18136:2003-11, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch.
- DIN 18196:2011-05, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- DIN 18506:2002-02, Hydraulische Boden- und Tragschichtbinder - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien.
- DIN 38405-D5:1985, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Anionen (Gruppe D), Bestimmung der Sulfat-Ionen (D5).
- DIN 38414-S4:1984, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).
- DIN 4030-2:2008, Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 2: Entnahme und Analyse von Wasser und Bodenproben.
- DIN EN 12457-4:2002, Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung - Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/ Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung).
- DIN EN 197-1:2011-11, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.
- DIN EN 459-1:2010-12, Baukalk - Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien.
- DIN EN ISO 10304-1:2009, Wasserbeschaffenheit-Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Phosphat und Sulfat.
- FEESER, V. (1975). Die Bedeutung des Kalziumkarbonats für die bodenphysikalischen Eigenschaften von Löss, Mitteilung Baugrundinstitut, Universität Stuttgart.
- FGSV 551 (2004). Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, FGSV-Verlag.
- FGSV 591 / B11.1 (2005), Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau - Teil B 11.1: Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln, TP BF-StB B11.1, FGSV-Verlag
- FGSV 591 / B11.5 (1991), Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im

- Straßenbau - Teil B 11.5: Eignungsprüfung bei Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen mit Feinkalk und Kalkhydrat TP BF-StB B11.5, FGSV-Verlag
- FGSV 892 (2010), Technische Prüfvorschrift für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton.
- FLOSS, R. (2006). Handbuch ZTVE Kommentar und Compendium Erd- und Felsbau. Saarwellingen: Kirschbaum Verlag Bonn.
- FRANK, S. (1997). Synthese von Ettringit, Thaumazit und deren Mischkristallen zur Deutung von Sohlhebung in sulfathaltigen Keupersedimenten. Diplomarbeit, Universität Stuttgart.
- GEOLOGISCHE KARTE VON BADEN- WÜRTTEMBERG (1975) Blatt 7221, Stuttgart-Südost mit Erläuterungen, Herausgegeben vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg.
- GEOLOGISCHE KARTE VON BADEN- WÜRTTEMBERG (1975) Blatt 7717 Oberndorf mit Erläuterungen, Herausgegeben vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg.
- HARRIS, P. (2002). Laboratory and Field Procedures for Measuring the Sulfate Content of Texas Soil. Develop Guidelines and procedures for Stabilisation of Sulfate Soils. Report 4240-1, Texas Transportation Institute.
- HARRIS, P. (2005). Experimental Studies on Ettringite-Induced Heaving in Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, S. 325-337.
- HARRIS, P., HOLD, J., SEBESTA, S., SCULLION, T. (2011). Recommendations for Stabilization of High-Sulfate Soils in Texas. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1952, 71-79.
- HECHT, T (2010). Fahrbahnanhebungen infolge von Treibmineralbildung in bindemittelverbesserten gipshaltigen Böden. 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau.
- HECHT, T & KRINGS, M. (2009). Besondere Erfahrungen beim Erdbau mit treibmineralbildenden Böden. Vortrag 16. Brandenburgischer Bauingenieurtag, Cottbus.
- HUNTER, D. (1988). Lime-Induced Heave In Sulfate-Bearing Clay Soils. J. Geotech. Engrg, 150-167.
- ISRM (1989). Suggested Methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech., S. 415-426.
- KELLER, P., MOSTHOF, A., LAPTEV, V., & GILDE, S. (2002). Gipskeuper: Baugrundrisiken durch die Bildung von Ettringit/Thaumazit. 3. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TA Esslingen (Herausgeber: H. Schad, Stuttgart)
- LAGA EW 98 (2012), Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen von Abfällen, verunreinigten Böden und Materialien aus dem Altlastenbereich. Herstellung und Untersuchung von wässrigen Eluaten. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 33.
- LAGA M20 TR (2004), Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Teil III: Probennahme und Analytik. Technische Regeln, Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20.
- LANGER, A., PLUQUET, E., & LARM, A., (2007). Untersuchung zur Freisetzung von Sulfat, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- LGRB, Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg, Informationen 16 (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg 2005).
- LGRB, Informationen 13 (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg).
- LITTLE, D., NAIR, S., & HERBERT, B. (2010). Addressing Sulfate-Induced Heave in Lime Treated Soils. J. Geotech. Geoenviron. Eng., S. 110-118.
- LUKAS, W. (1975). Betonzerstörung durch SO₃-Angriff unter Bildung von Thaumazit und Woodfordit. Cement and Concrete Research, Nr. 5, S. 503-517.
- MADSEN (1976). Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldrucks nach der DLVO-Theorie, Dissertation, ETH Zürich.

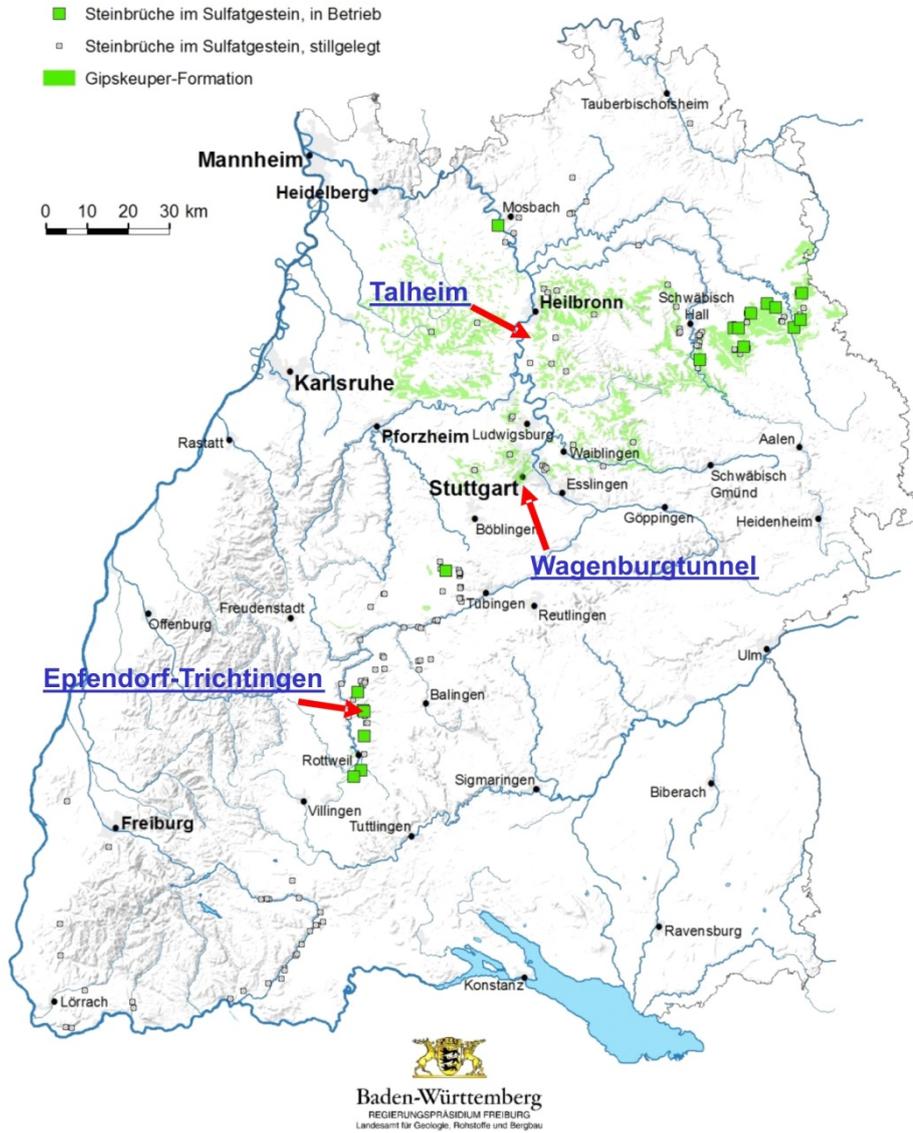
- McCLELLAN, G.H., EADES, J.L. & JOHNSON, N.A. (1998). Simple Field Method to Detect Sulfide Sulfur in Rocks. *Environmental and Engineering Geoscience* 4, Nummer 1, S. 115-116.
- MICHAELIS, W. (1896). *Der Zement-Bazillus*. Tonindustrie-Zeitung, Ausgabe 16, S. 105-106.
- MITCHELL, J. K. (1986). Practical Problems from surprising soil behavior.
- MITCHELL, J. K. & DERMATAS, D. (1992). Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. *ASTM Symposium in Innovations and Users of lime*. San Francisco.
- MITTAG, A. & HÜNERBEIN, U. (2012). Bericht zu Untersuchungen des Quell- und Festigkeitsverhalten von Boden-Bindemittel-Gemischen im Rahmen von Eignungsuntersuchungen für die Bodenverbesserung sulfathaltiger Böden. Forschungsbericht Geotechnik und Umweltgeologie GmbH. Unveröffentlicht.
- MUTSCHLER, Th. (2004). Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern. *Bautechnik Heft 16*, S. 825 – 833.
- MOSTHOF, A. (1998). Bauschäden infolge von Hebungen durch die Bildung von Ettringit/Thaumasit am Reisberg, Bundesautobahn A81.
- OBERT, L. & DUVALL, W. I. (1967). *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. John Wiles & Sons, New York.
- PAUL, A. (1986). Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Quellversuche an Gesteinsproben. *Bautechnik Heft 3*, S. 100-104.
- PETRY, T. M. & LITTLE, D. N. (1992). Update on sulfate-induced heave in treated clays: Prob-lematic sulfate levels. *Transp. Res. Rec.*, S. 51-55.
- PIMENTEL (1996). Quellverhalten von diagenetisch verfestigten Tonstein, Doktorarbeit, Universität Karlsruhe.
- PUPPALA, A. J., INTHARASOMBAT, N., & VEMPATI, R. K. (2005). Experimental Studies on Ettringite-Induced Heaving in Soils. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, S. 325-337.
- RAJASEKARAN, G. (2005). Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean Engineering*, Vol. 32, S. 1133-1159.
- RAUH, F. & THURO, K. (2007). Rasche und optimierte Vorhersage von Quelleigenschaften bei Tonen mithilfe des Pulverquellversuchs. 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum "Junge Ingenieurgeologen". Bochum.
- RILLING, B. (1994). Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit bindiger Schüttstoffe am Beispiel von Lößlehm.
- ROLLINGS, R. S. & BURKES, J. P. (1999). Sulfate Attack On Cement-Stabilized Sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, S. 364-372.
- SCHNEIDER, K.-J., SAHNER, G. & RAST, R (2009). *Mauerwerksbau*, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin.
- SCHREBER, M. (2011). Bauen von bindemittelstabilisierten Erdkörpern für Hochgeschwindigkeitstrassen der Deutschen Bahn in Gebieten mit gipshaltigen Böden. Diplomarbeit, HTWK Leipzig.
- STARK, J. & WICHT, B. (2001). *Dauerhaftigkeit von Beton: der Baustoff als Werkstoff*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- STRUNZ, H. & NICKEL, E. (2001). *Strunz Mineralogical Tables. Chemical-structural Mineral Classification System*. 9. Auflage. Schweizerbart, Stuttgart
- TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, (2005) *Guidelines for Treatment of Sulfate Rich Soils and Bases in pavement Structures*.
- THURO, K. (1993). Der Pulver-Quellversuch - ein neuer Quellhebungsversuch, *Geotechnik* 16, S. 101-106.
- TIDWELL, L. & McCALLISTER, L. (1997). Double Lime Treatment to Minimize Sulfate-Lime Induced Heave Expansive Clays. *US Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi*.
- TxDOT Designation: TEX-146-E (2005). Conductivity test for field detection of sulfates in soil.

- UNI EN 1744-1: 2013, Tests for chemical properties of aggregates - Part 1: Chemical analysis.
- WITT, K. J. (2002). Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7, Bauhaus-Universität Weimar, S. 1-12.
- WITT, K. J. (2012). Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln. 8. Erdbaufachtagung, Leipzig.
- WITT, K. J. (2011). Erwünschte und unerwünschte Reaktionsmechanismen bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln. Vortrag. GBB und BetonMarketing Süd, Vortragsveranstaltung Zementstabilisierte Böden.
- WITT, K. J. (2014). BAB 71 Sömmerda-AD Südharz (A38). VKE 5344: nördl. B85 – nördl. AS Sömmerda-Ost. Geotechnische Beratung zur Quellproblematik. Bericht 1. Unveröffentlicht.
- ZTV E-StB 09, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau.

Anlagen

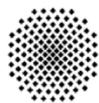
Anlagenverzeichnis		Seite
Anlage 1	Lageplan der Entnahmeorte	54
Anlage 2	Klassifikation Probenmaterial 1	55
Anlage 3	Klassifikation Probenmaterial 4	59
Anlage 4	XRD-Spektren des Naturmaterials	63
Anlage 5	Versuchsprogramm	67
Anlage 6	Versuchsergebnisse Probenmaterial 1 (GBET)	68
Anlage 7	Versuchsergebnisse Probenmaterial 2 (WTVQII)	82
Anlage 8	Versuchsergebnisse Probenmaterial 3 (WTF3)	89
Anlage 9	Versuchsergebnisse Probenmaterial 4 (LLHN)	116
Anlage 10	Probenmaterial 1 bei 5°C	137
Anlage 11	pH-Wert Messungen	138
Anlage 12	Einaxiale Druckversuche am natürlichen Material	141
Anlage 13	Probenkennwerte	160

Anlage 1 Lageplan der Entnahmeorte



Anlage 1, Bild 1: Steinbrüche im Sulfatgestein in Baden-Württemberg Stand 05/2011 (Quelle: Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Rohstoffgewinnung in Baden-Württemberg, Karte 8:Steinbrüche in Sulfatgestein, thematisch erweitert)

Anlage 2 Klassifikation Probenmaterial 1



Universität Stuttgart



Bestimmung der Korngrößenverteilung

(Siebung und Sedimentation) nach DIN 18123

FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringitreiben

Laborant: Mö
Datum: 18. 04. 2013
Labor-Nr.: 13-008

Aufschluss 1: Epfendorf-Trichtingen

Entnahmestelle: Gipsbruch

Bodenart: Verwitterungslehm km1

Geologie:

Arbeitsweise:

Siebung und Sedimentation

d_{10} [mm]:

d_{60} [mm]:

$U = d_{60} / d_{10} =$

Kornkennzahl: 24/24/38/14

Flockt aus, Werte 15 min und 45 min sind geschätzt

Aufschluss 2:

Entnahmestelle:

Bodenart:

Geologie:

Arbeitsweise:

Sedimentation

d_{10} [mm]:

d_{60} [mm]:

$U = d_{60} / d_{10} =$

Kornkennzahl: --/--/--

Aufschluss 3:

Entnahmestelle:

Bodenart:

Geologie:

Arbeitsweise:

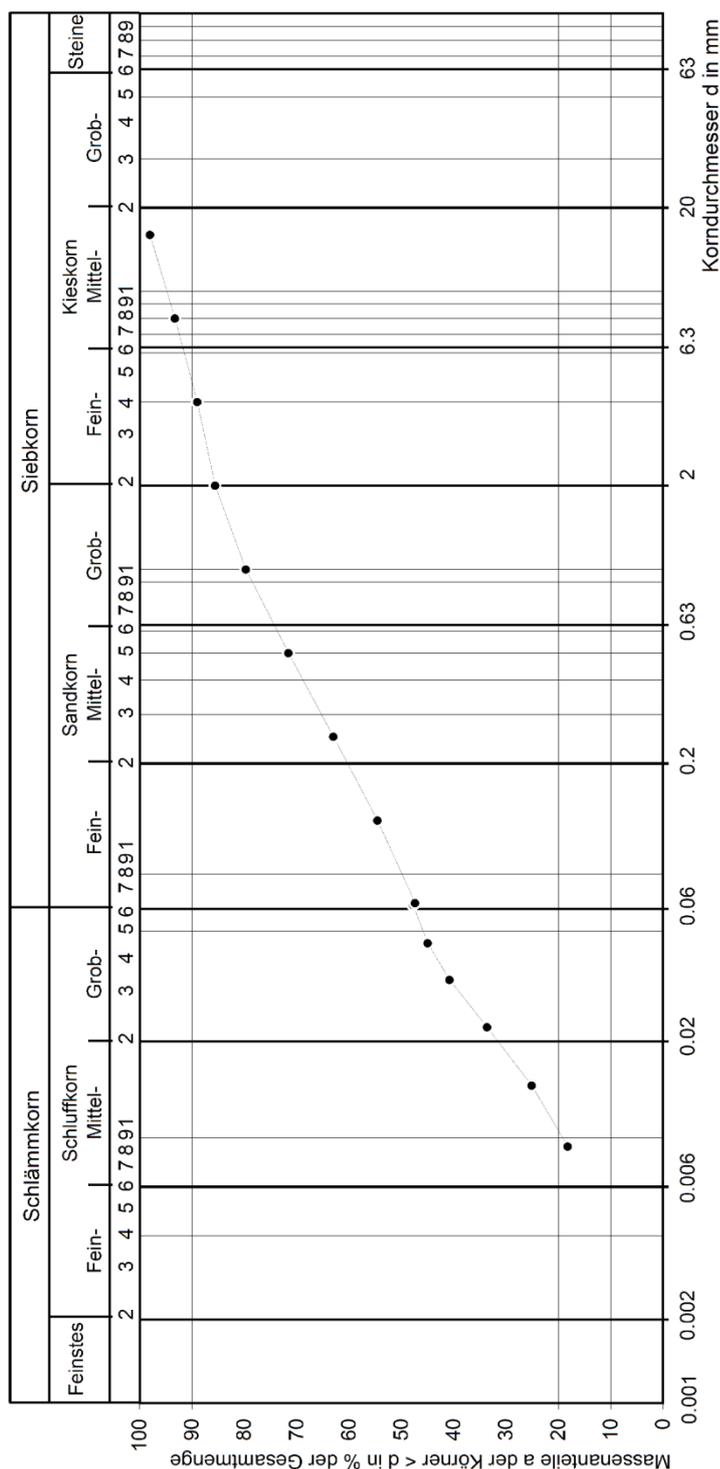
Sedimentation

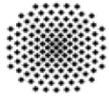
d_{10} [mm]:

d_{60} [mm]:

$U = d_{60} / d_{10} =$

Kornkennzahl: --/--/--





Bestimmung der Zustandsgrenzen Fließ- und Ausrollgrenze

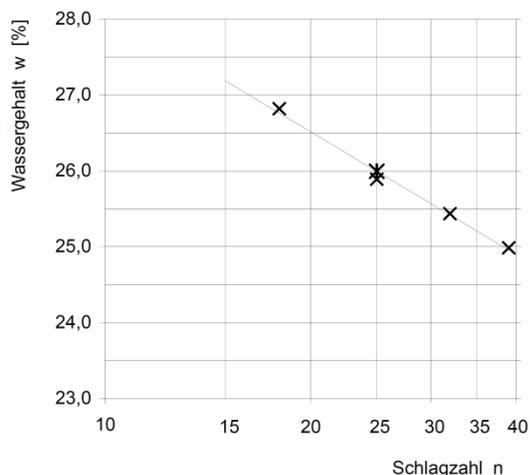
nach DIN 18 122, Teil 1

FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringitreiben

Aufschluss: Epfendorf-Trichtingen
Entnahmestelle: Gipsbruch
Bodenart/Geologie: Verwitterungslehm km1

Laborant: Mö
Labor-Nr.: L13-008
Datum: 18.04.2013

		Fließgrenze				Ausrollgrenze		
		39	32	25	18			
Zahl der Schläge		39	32	25	18			
Behälter Nr.		4	105	36	315	327	100	715
feuchte Probe mit Behälter	m_r+m_B [g]	117,40	108,45	128,50	127,05	103,41	103,40	106,78
trockene Probe mit Behälter	m_d+m_B [g]	112,92	103,20	122,46	120,53	102,47	102,29	105,77
Behälter	m_B [g]	94,99	82,56	99,13	96,22	95,99	94,73	98,77
trockene Probe	m_d [g]	17,93	20,64	23,33	24,31	6,48	7,56	7,00
Wassergehalt	w [%]	25,0	25,4	25,9	26,8	14,5	14,7	14,4



Natürlicher Wassergehalt $w_n = 15,7 \%$

Überkornanteil ($d > 0,4 \text{ mm}$) $\ddot{u} =$

Wassergehalt ($d < 0,4 \text{ mm}$) $w_{<0,4} =$

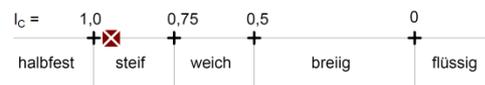
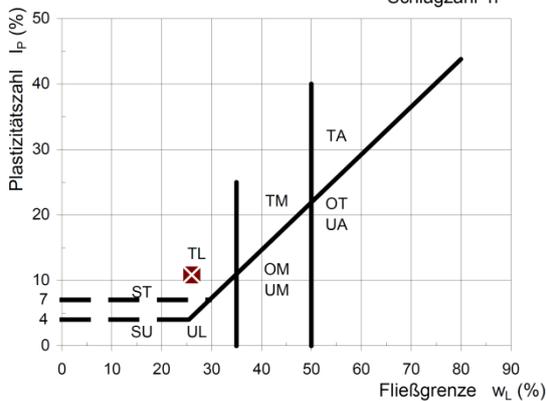
Fließgrenze $w_L = 26,0 \%$

Ausrollgrenze ¹⁾ $w_P^{(1)} = 15,1 \%$

Schrumpfgrenze ²⁾ $w_S^{(2)} = 12,4 \%$

Plastizitätszahl $I_P = w_L - w_P = 10,9 \%$

Konsistenzzahl $I_C = (w_L - w) / I_P = 0,95$



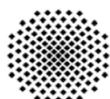
Tonanteil $d < 0,002 \text{ mm}$ $(m_T/m_d) =$

Aktivitätszahl $I_A = I_P / (m_T/m_d) =$

Bemerkungen:

¹⁾ Korrektur Ausrollgerät: $w_P = w_P / 0.9382 = 0.38$

²⁾ empirisch nach KRABBE: $w_S = w_L - 1.25 * I_P$



Kalkgehaltsbestimmung

nach DIN 18129

FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringittreiben

Labor-Nr.: L13-008

Laborant: Mö

Proben:

Aufschluss:	Gipssteinbruch Epfendorf-Trichtingen			
Entnahmetiefe:	30 min	30 min	ca 4 Stunden	ca 7 Stunden
Datum:	19.04.2013	19.04.2013	19.04.2013	23.04.2013

Versuchswerte:

Trockenmasse m_d [g]	1,0835	0,6049	0,3937	0,3751
Temperatur T [°C]	20,3	20,7	21,2	19,6
absoluter Luftdruck p_{abs} [hPa]	1018,3	1018,3	1018,3	1017,6
abgelesenes Gasvolumen (Zwischenablesung nach 30 sec.) V_G' [cm ³]	38,0	18,8	11,0	7,2
abgelesenes Gasvolumen bei Versuchsende V_G [cm ³]	110,0	84,0	55,8	67,8

Auswertung:

Dichte des CO ₂ -Gases bei $p_n = 1000$ hPa und bei $T_n = 0^\circ\text{C}$ (Normzustand) ρ_a [g/cm ³]	0,001977	0,001977	0,001977	0,001977
Ausdehnungskoeffizient für CO ₂ β [K ⁻¹]	0,003726	0,003726	0,003726	0,003726
Verhältniszahl der molaren Massen von CaCO ₃ und CO ₂ : M [-]	2,274	2,274	2,274	2,274
Volumen des CO ₂ -Gases bei $p_n = 1000$ hPa und bei $T_n = 0^\circ\text{C}$ (Normzustand) nach 30 sec. V_0' [cm ³]	35,4	17,5	10,2	6,7
Volumen des CO ₂ -Gases bei $p_n = 1000$ hPa und bei $T_n = 0^\circ\text{C}$ (Normzustand) bei Versuchsende V_0 [cm ³]	102,503543	78,182137	51,838185	63,297885
Masse des Karbonatanteils m_{Ca} [g]	0,460825	0,351483	0,233049	0,284568
Masse des Kalzitanteils m'_{Ca} [g]	0,159194	0,078665	0,045942	0,030220

Ergebnisse:

Kalkgehalt V_{Ca} [%]	42,53	58,11	59,19	75,86
Kalzitanteil V'_{Ca} [%]	14,69	13,00	11,67	8,06
Dolomitanteil V''_{Ca} [%]	27,84	45,10	47,53	67,81

Anlage 3 Klassifikation Probenmaterial 4



Universität Stuttgart



Bestimmung der Korngrößenverteilung

(Siebung und Sedimentation) nach DIN 18123

FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringitreiben

Laborant: Mö
Datum: 11. 06. 2013
Labor-Nr.: L13-008

Aufschluss 1: HN-Talheim
Entnahmestelle: bmk Steinbruch Bopp

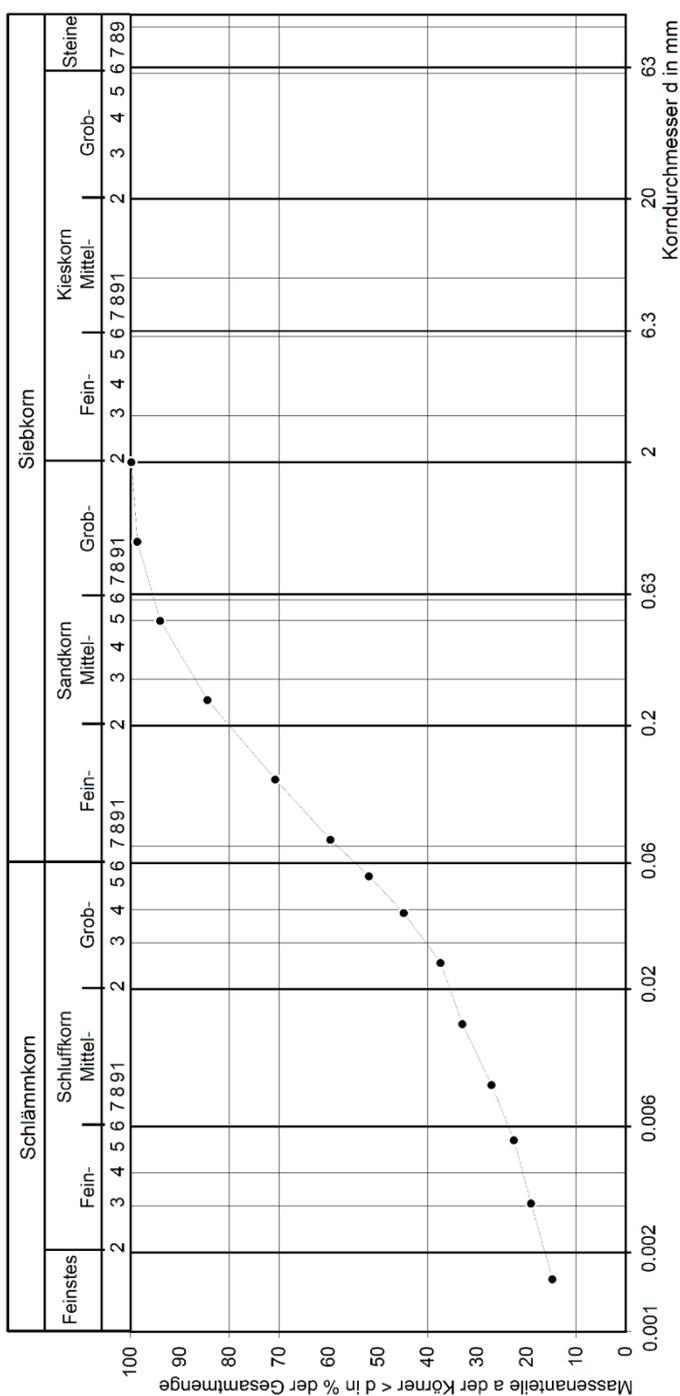
●
Bodenart: Lösslehm
Geologie:
Arbeitsweise:
Sedimentation
 d_{10} [mm]:
 d_{60} [mm]:
 $U = d_{60} / d_{10} =$
Kornkennzahl: 16/39/45/--

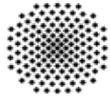
Aufschluss 2:
Entnahmestelle:

▲
Bodenart:
Geologie:
Arbeitsweise:
Sedimentation
 d_{10} [mm]:
 d_{60} [mm]:
 $U = d_{60} / d_{10} =$
Kornkennzahl: --/--/--

Aufschluss 3:
Entnahmestelle:

■
Bodenart:
Geologie:
Arbeitsweise:
Sedimentation
 d_{10} [mm]:
 d_{60} [mm]:
 $U = d_{60} / d_{10} =$
Kornkennzahl: --/--/--





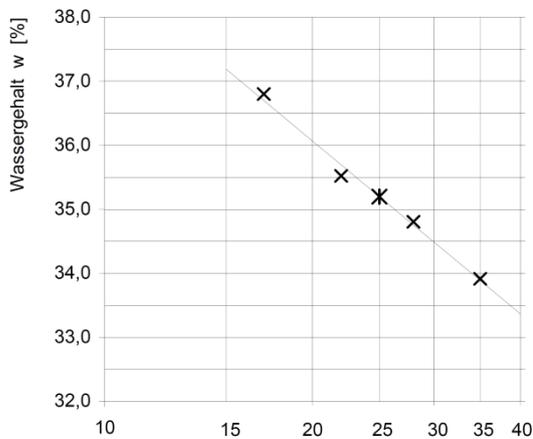
**Bestimmung der Zustandsgrenzen
Fließ- und Ausrollgrenze**

nach DIN 18 122, Teil 1

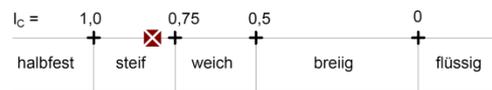
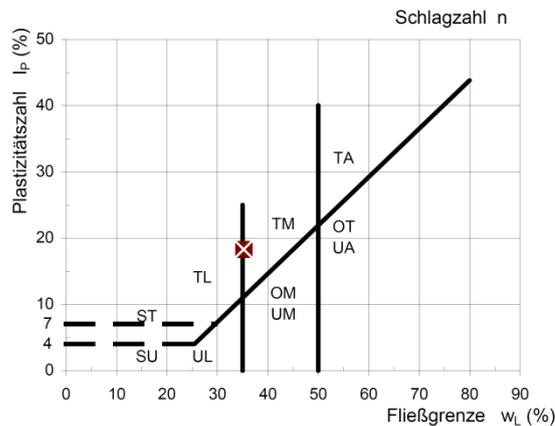
FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringittreiben

Aufschluss: HN-Talheim Laborant: Mö
 Entnahmestelle: bmk Steinbruch Bopp Labor-Nr.: L13-008
 Bodenart/Geologie: Lösslehm Datum: 11.06.2013

		Fließgrenze				Ausrollgrenze		
		35	28	22	17	4	46	45
Zahl der Schläge								
Behälter Nr.		2	306	23	327	4	46	45
feuchte Probe mit Behälter	m_f+m_B [g]	119,52	117,69	122,82	126,39	102,97	106,59	104,10
trockene Probe mit Behälter	m_d+m_B [g]	113,09	111,54	115,56	118,21	101,85	105,30	102,84
Behälter	m_B [g]	94,13	93,87	95,12	95,98	94,98	97,34	95,05
trockene Probe	m_d [g]	18,96	17,67	20,44	22,23	6,87	7,96	7,79
Wassergehalt	w [%]	33,9	34,8	35,5	36,8	16,3	16,2	16,2



Natürlicher Wassergehalt $w_n = 18,4\%$
 Überkornanteil ($d > 0,4$ mm) $\ddot{u} = 9,0\%$
 Wassergehalt ($d < 0,4$ mm) $w_{<0,4} = 20,2\%$
 Fließgrenze $w_L = 35,2\%$
 Ausrollgrenze ¹⁾ $w_P^{1)} = 16,9\%$
 Schrumpfgrenze ²⁾ $w_S^{2)} = 12,3\%$
 Plastizitätszahl $I_P = w_L - w_P = 18,3\%$
 Konsistenzzahl $I_C = (w_L - w) / I_P = 0,82$



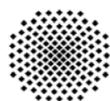
Tonanteil $d < 0,002$ mm $(m_T/m_d) = 16,0\%$

Aktivitätszahl $I_A = I_P / (m_T/m_d) = 1,14$

Bemerkungen: Material $< 0,4$ mm

¹⁾ Korrektur Ausrollgerät: $w_P = w_P / 0,9382 - 0,38$

²⁾ empirisch nach KRABBE: $w_S = w_L - 1,25 * I_P$



Kalkgehaltsbestimmung

nach DIN 18129

FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringitreiben

Labor-Nr.: L13-008

Laborant: Mö

Proben:

Aufschluss:	HN-Talheim, bmk Steinbruch Bopp		
Entnahmetiefe:	Lösslehm		
Datum:	12.06.2013	12.06.2013	12.06.2013

Versuchswerte:

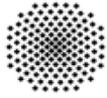
Trockenmasse m_d [g]	0,6887	2,0957	1,6097
Temperatur T [°C]	22,0	22,0	23,0
absoluter Luftdruck p_{abs} [hPa]	1019,6	1019,6	1019,6
abgelesenes Gasvolumen (Zwischenablesung nach 30 sec.) V_G' [cm ³]	2,2	1,5	0,7
abgelesenes Gasvolumen bei Versuchsende V_G [cm ³]	3,0	3,0	1,0

Auswertung:

Dichte des CO ₂ -Gases bei $p_n = 1000$ hPa und bei $T_n = 0^\circ\text{C}$ (Normzustand) ρ_a [g/cm ³]	0,001977	0,001977	0,001977
Ausdehnungskoeffizient für CO ₂ β [K ⁻¹]	0,003726	0,003726	0,003726
Verhältniszahl der molaren Massen von CaCO ₃ und CO ₂ : M [-]	2,274	2,274	2,274
Volumen des CO ₂ -Gases bei $p_n = 1000$ hPa und bei $T_n = 0^\circ\text{C}$ (Normzustand) nach 30 sec. V'_0 [cm ³]	2,0	1,4	0,6
Volumen des CO ₂ -Gases bei $p_n = 1000$ hPa und bei $T_n = 0^\circ\text{C}$ (Normzustand) bei Versuchsende V_0 [cm ³]	2,782990	2,782990	0,924529
Masse des Karbonatanteils m_{Ca} [g]	0,012511	0,012511	0,004156
Masse des Kalzitanteils m'_{Ca} [g]	0,009175	0,006256	0,002909

Ergebnisse:

Kalkgehalt V_{Ca} [%]	1,82	0,60	0,26
Kalzitanteil V'_{Ca} [%]	1,33	0,30	0,18
Dolomitanteil V''_{Ca} [%]	0,48	0,30	0,08



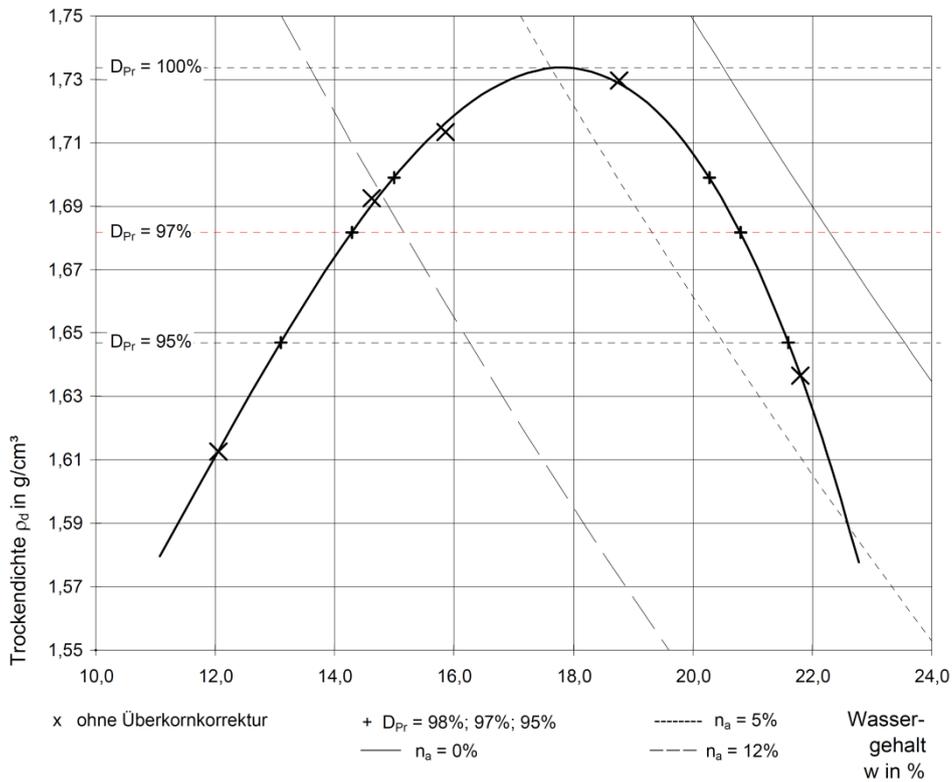
Bestimmung der Proctordichte

Proctorversuch DIN 18127 - P 100 Y

FE 05.171/2012/BGB – Risikoabschätzung Ettringitreiben

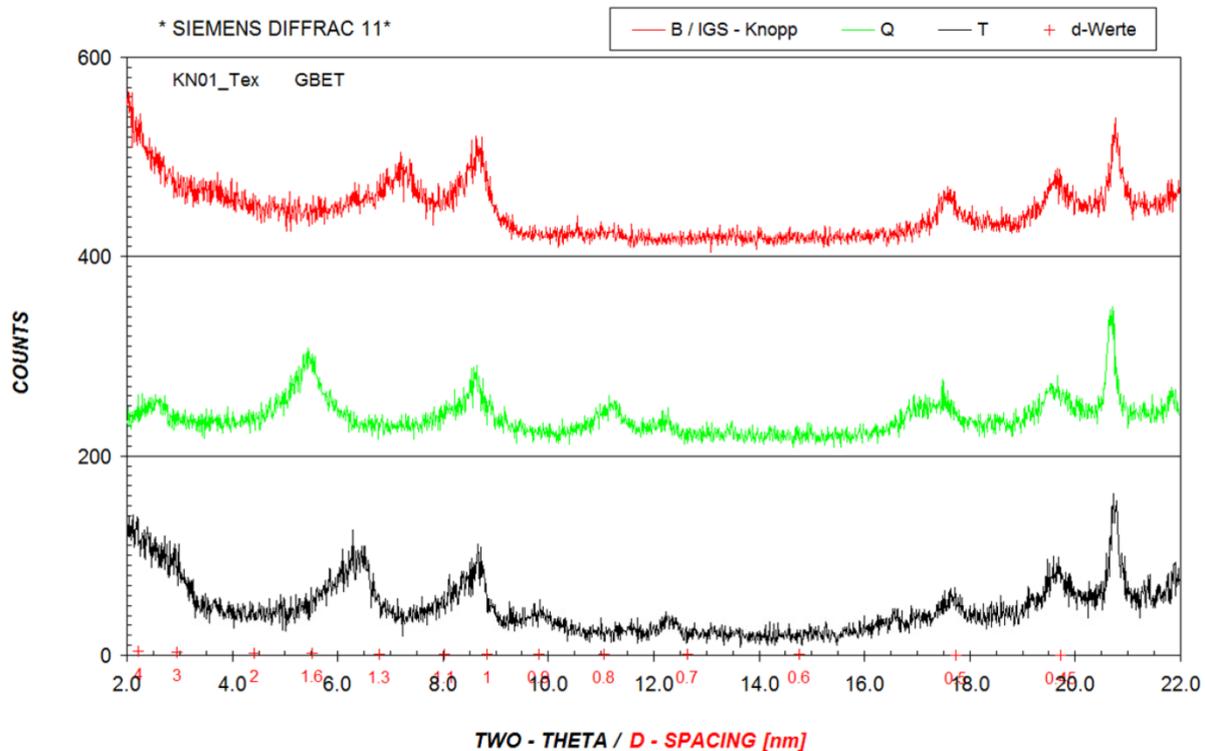
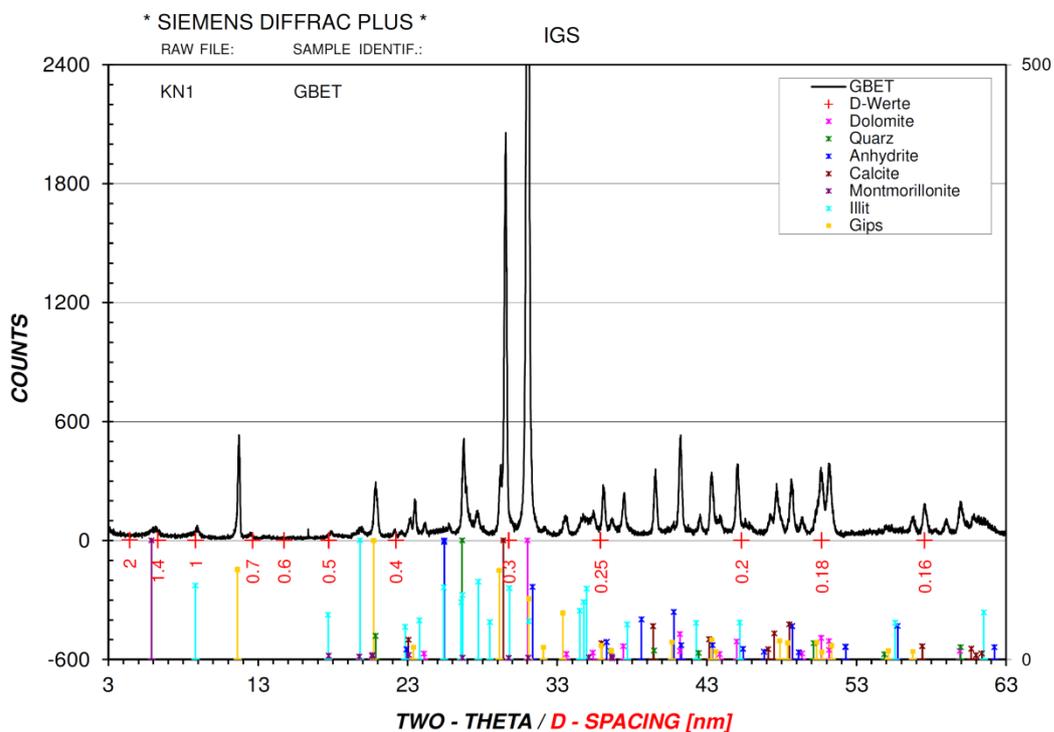
ausgeführt durch:	Mö	Aufschluß:	HN-Talheim
Datum:	10. 06.2013	Entnahmetiefe:	bmk Steinbruch Bopp
geprüft durch:	Zwe	Bodenart:	S, u*, t
Labor-Nr.	L13-008	Geologie:	Lösslehm

Zylinderdurchmesser	100 mm	natürlicher Wassergehalt	w =	18,4 %
Zylinderhöhe	120 mm	Korndichte	$\rho_s =$	2,69 g/cm ³
Fallgewicht	2,5 kg	Überkorn:		
Fallhöhe	300 mm	zulässiges Größtkorn	d =	20,0 mm
Anzahl der Schläge je Schicht	25	Wassergehalt	w _ü =	%
Anzahl der Schichten	3	Korndichte	$\rho_{sü} =$	g/cm ³
Versuch ohne Stahlplatte	2659	Anteil	ü =	0,0 %

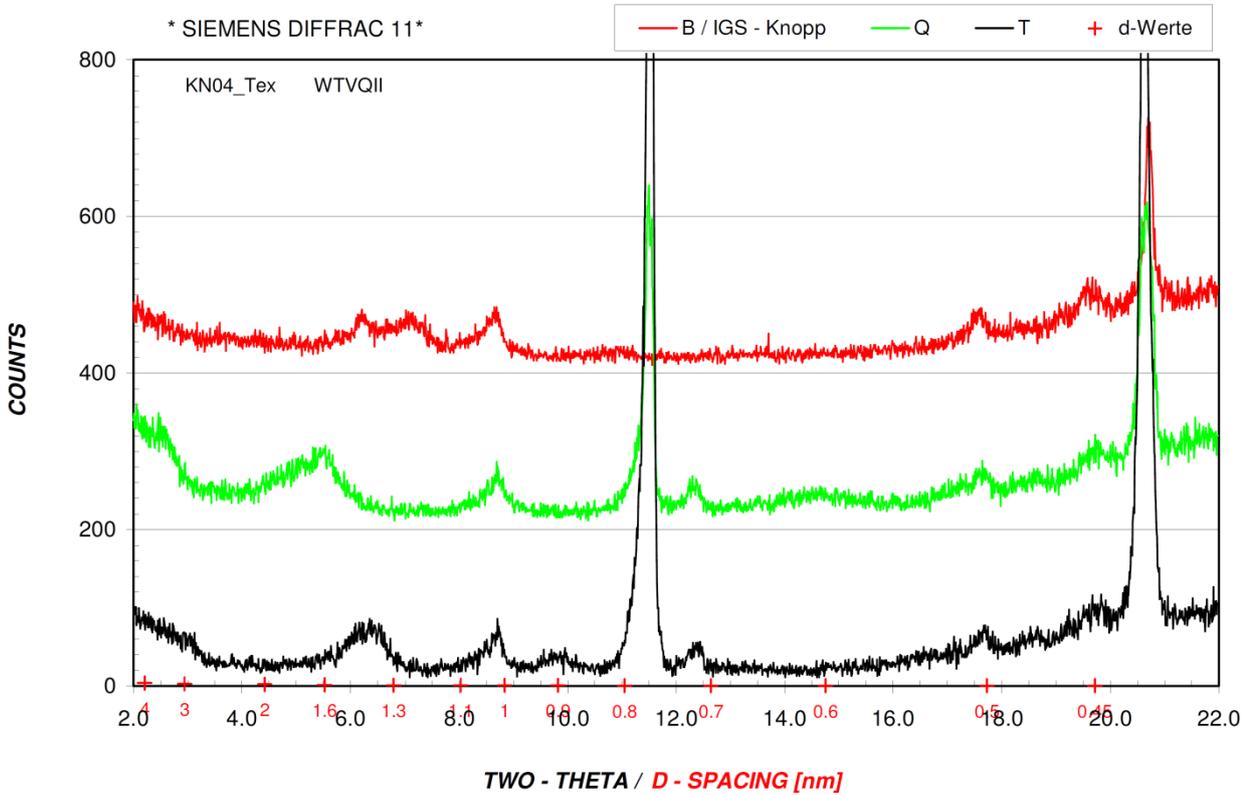
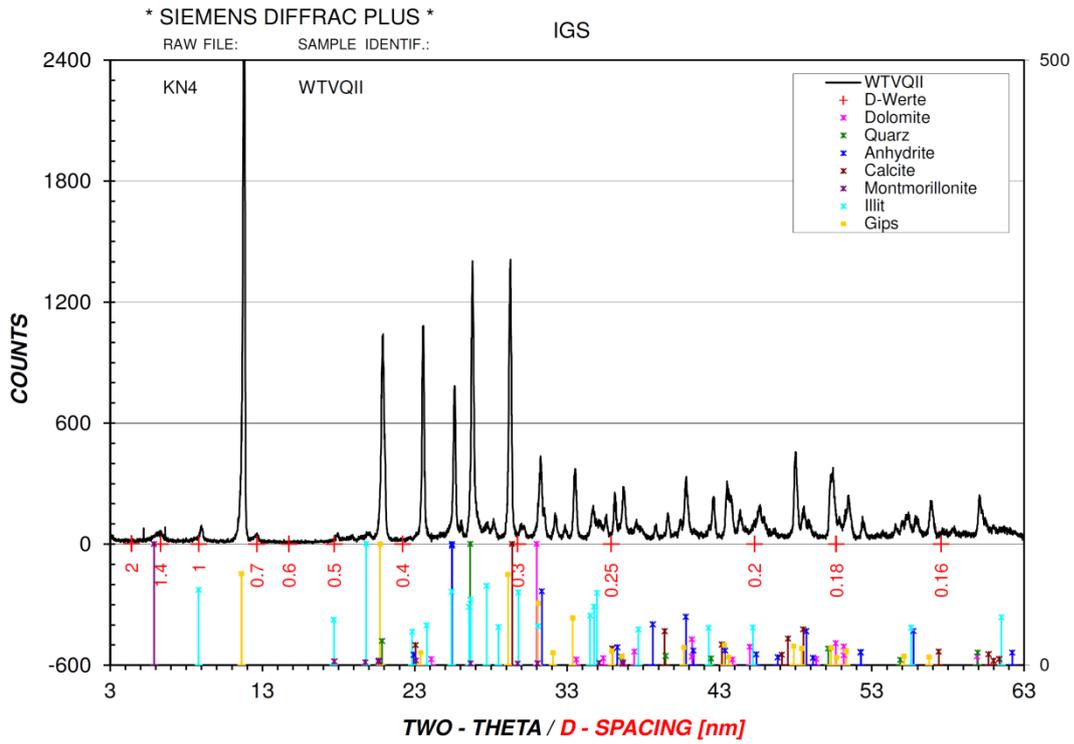


	Proctordichte [g/cm ³]	zugehöriger Wassergehalt [%]	
ohne Überkornkorrektur	$\rho_{Pr} = 1,734$	$w_{Pr} = 17,8$	
mit Überkornkorrektur	$\rho'_{Pr} =$	$w'_{Pr} =$	
für $D_{Pr} = 98\%$	$\rho_d = 1,699$	min. $w_{98\%} = 15,0$	max. $w_{98\%} = 20,3$
für $D_{Pr} = 97\%$	$\rho_d = 1,682$	min. $w_{97\%} = 14,3$	max. $w_{97\%} = 20,8$
für $D_{Pr} = 95\%$	$\rho_d = 1,647$	min. $w_{95\%} = 13,1$	max. $w_{95\%} = 21,6$

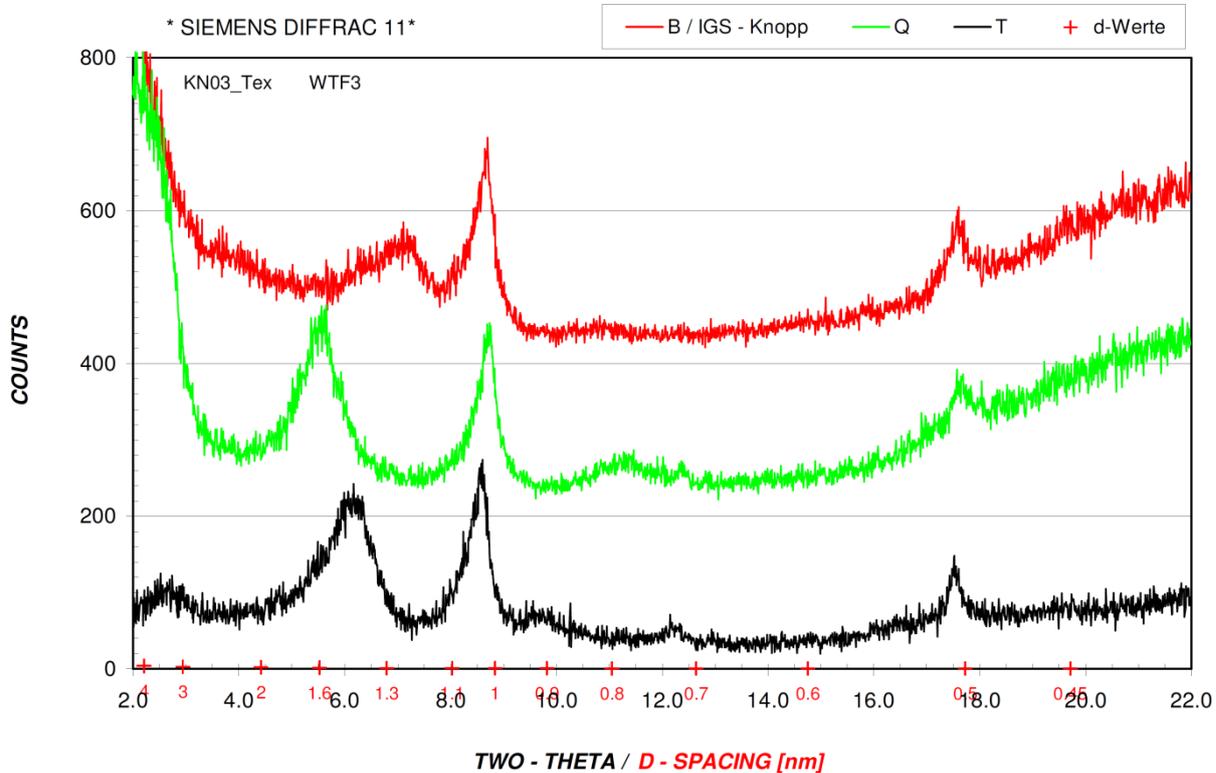
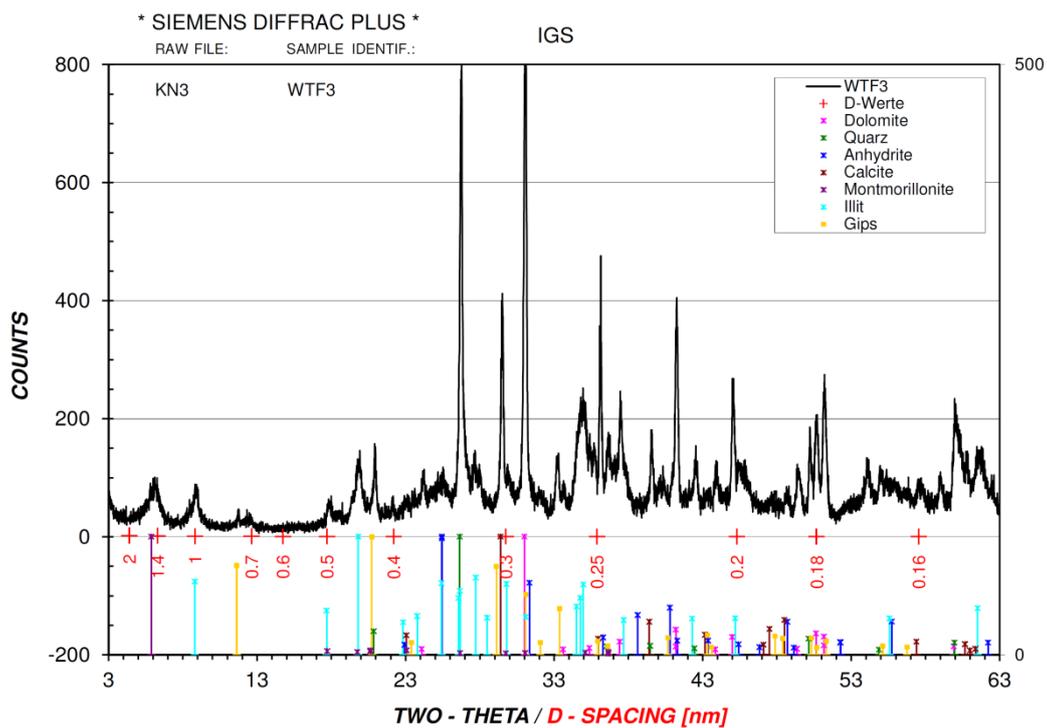
Anlage 4 XRD-Spektren des Naturmaterials



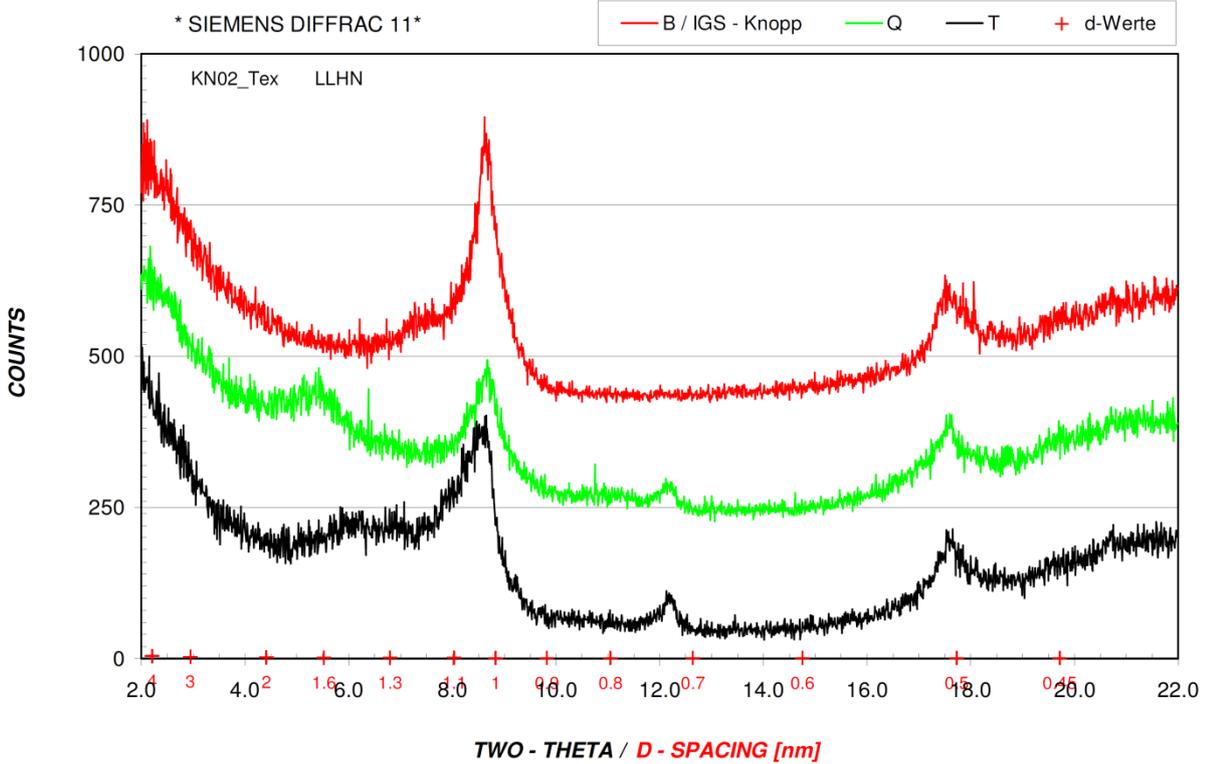
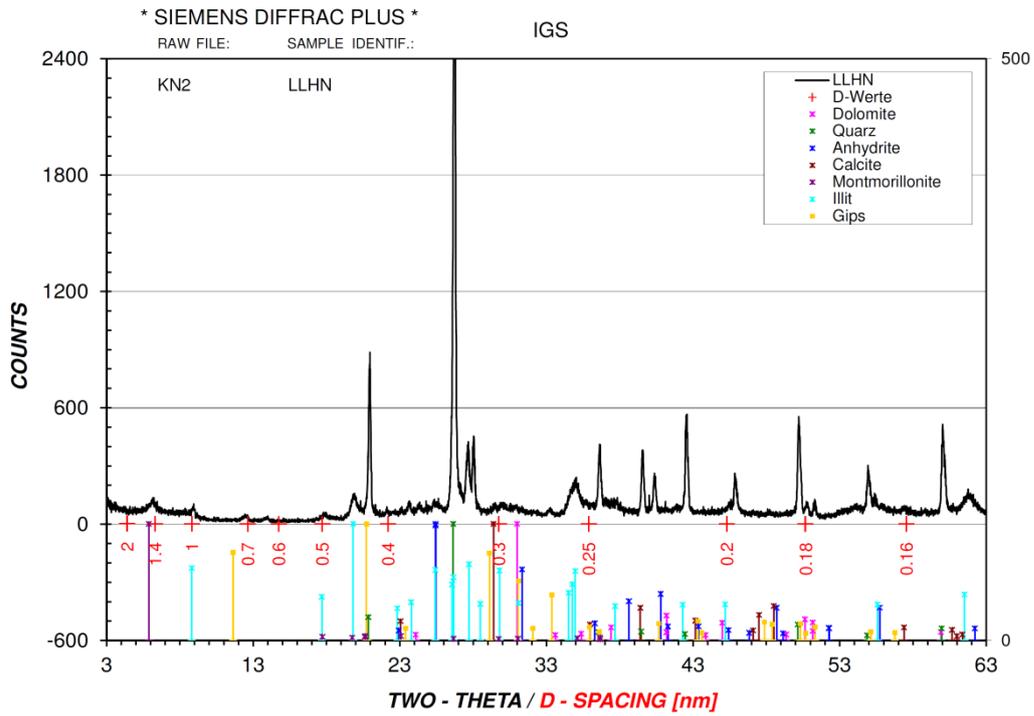
Anlage 4, Bild 1: Probenmaterial 1 (Trichtingen)



Anlage 4, Bild 2: Probenmaterial 2 (Wagenburgtunnel, Versuchsquerschlag II)



Anlage 4, Bild 3: Probnmaterial 3 (Wagenburgtunnel, geologisches Fenster 3)

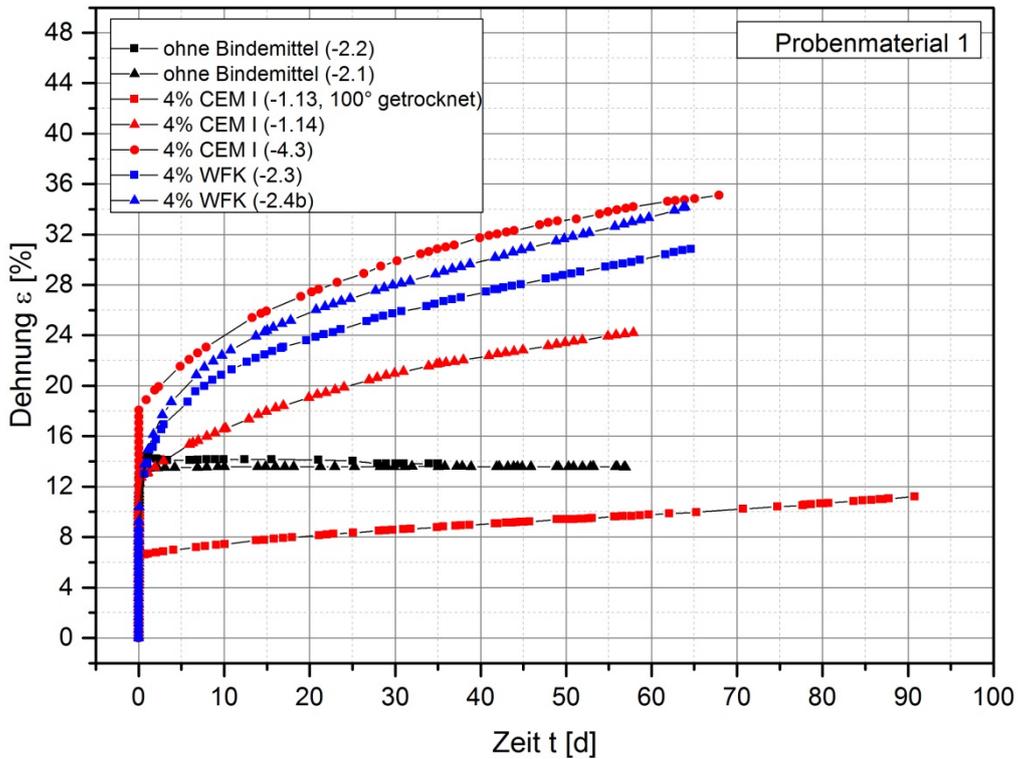


Anlage 4, Bild 4: Probenmaterial 4 (Heilbronn)

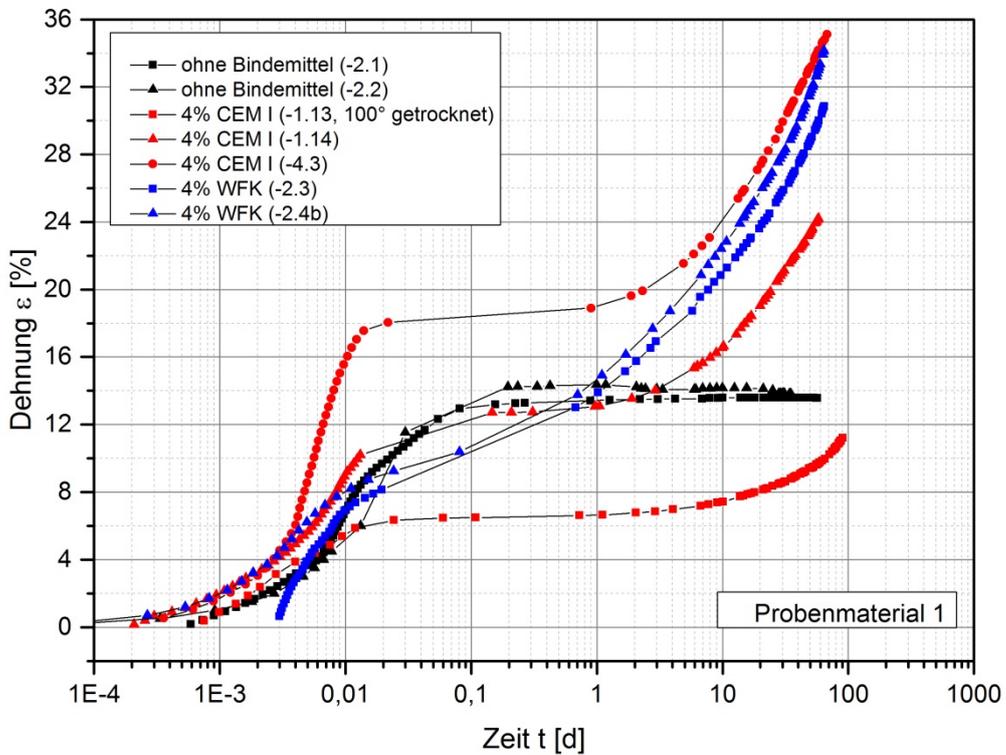
Anlage 5 Versuchsprogramm

Boden	Bindemittel	0%	Portlandzement	Weißfeinkalk	
			4%	2%	4%
Probenmaterial 1: Gipsbruch Eppendorf-Trichtingen (GB ET)					
Probenmaterial 2: Wagenburgtunnel Versuchsquerschlag II (WT VQ II)					
Probenmaterial 3: Wagenburgtunnel geologisches Fenster 3 (WT F3)			+ 40.000 ppm Sulfat		
			+ 20.000 ppm Sulfat		
			+ 10.000 ppm Sulfat		+ 10.000 ppm Sulfat
			+ 8.000 ppm Sulfat		+ 8.000 ppm Sulfat
			+ 5.000 ppm Sulfat		+ 5.000 ppm Sulfat
			+ 3.000 ppm Sulfat		+ 3.000 ppm Sulfat
			+ 0 ppm Sulfat		+ 0 ppm Sulfat
Probenmaterial 4: Lösslehm Heilbronn (LL HN)			+ 10.000 ppm Sulfat		+ 10.000 ppm Sulfat
			+ 8.000 ppm Sulfat		+ 8.000 ppm Sulfat
			+ 5.000 ppm Sulfat		+ 5.000 ppm Sulfat
			+ 3.000 ppm Sulfat		+ 3.000 ppm Sulfat
			+ 0 ppm Sulfat		+ 0 ppm Sulfat

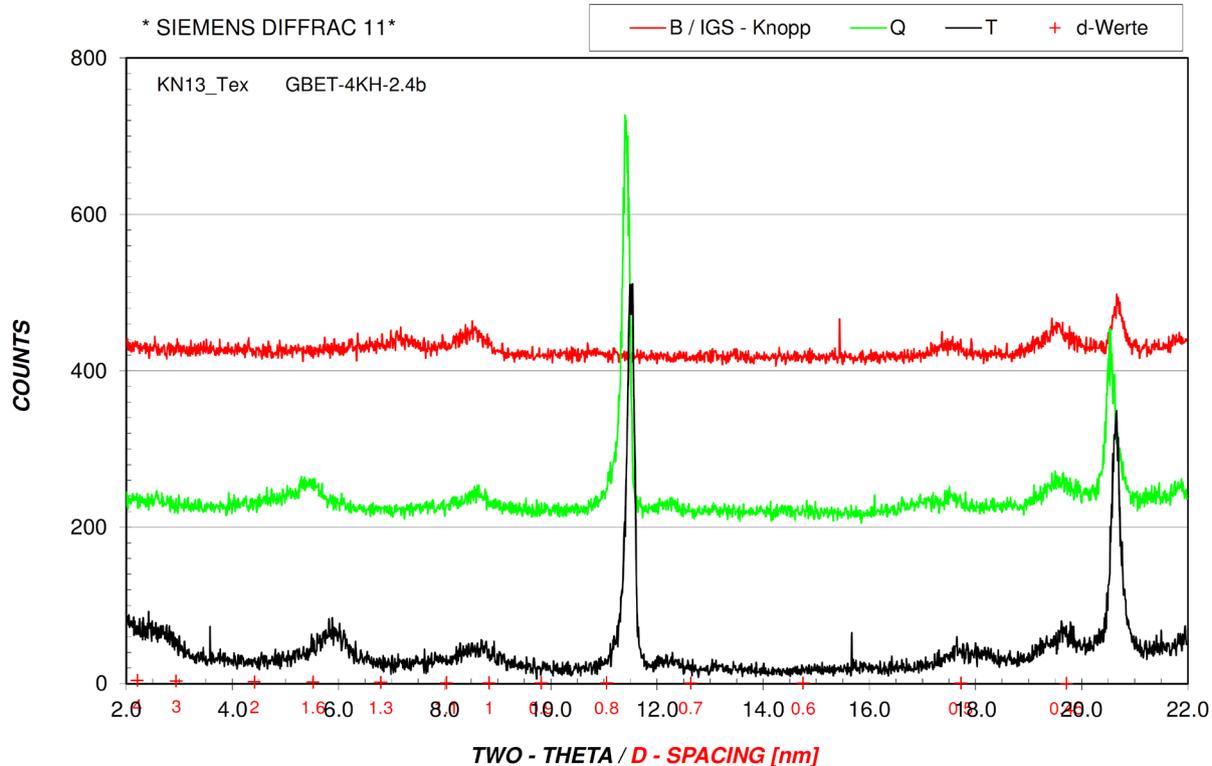
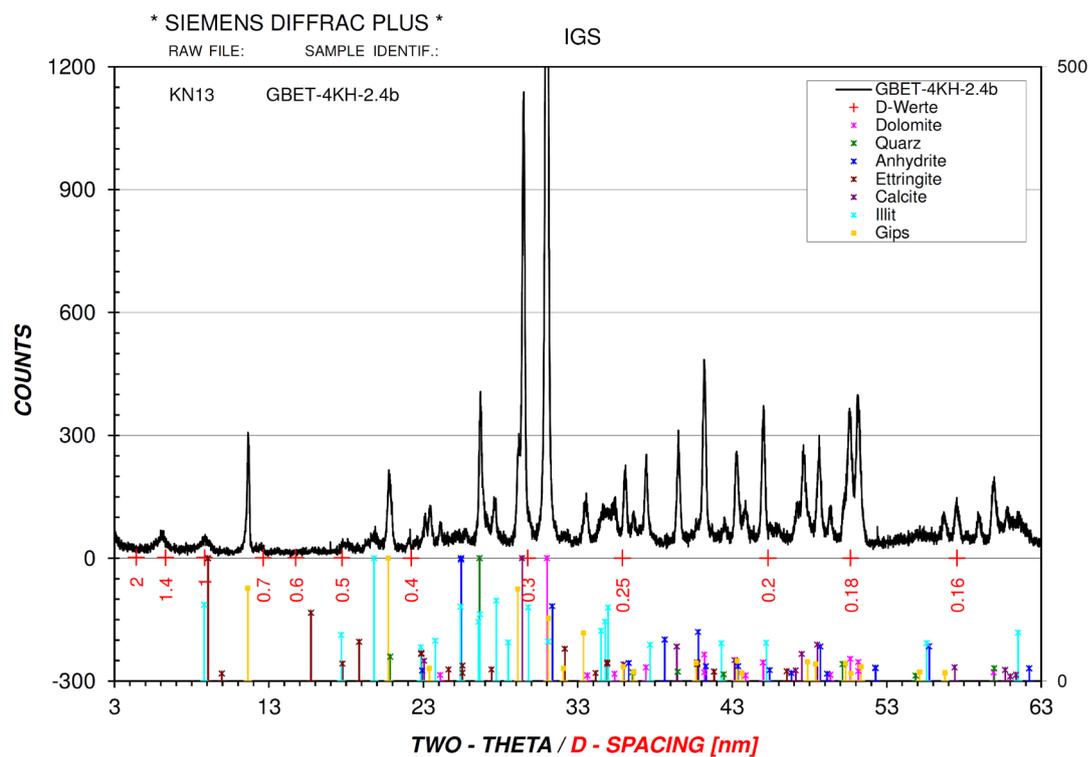
Anlage 6 Versuchsergebnisse Probenmaterial 1 (GBET)



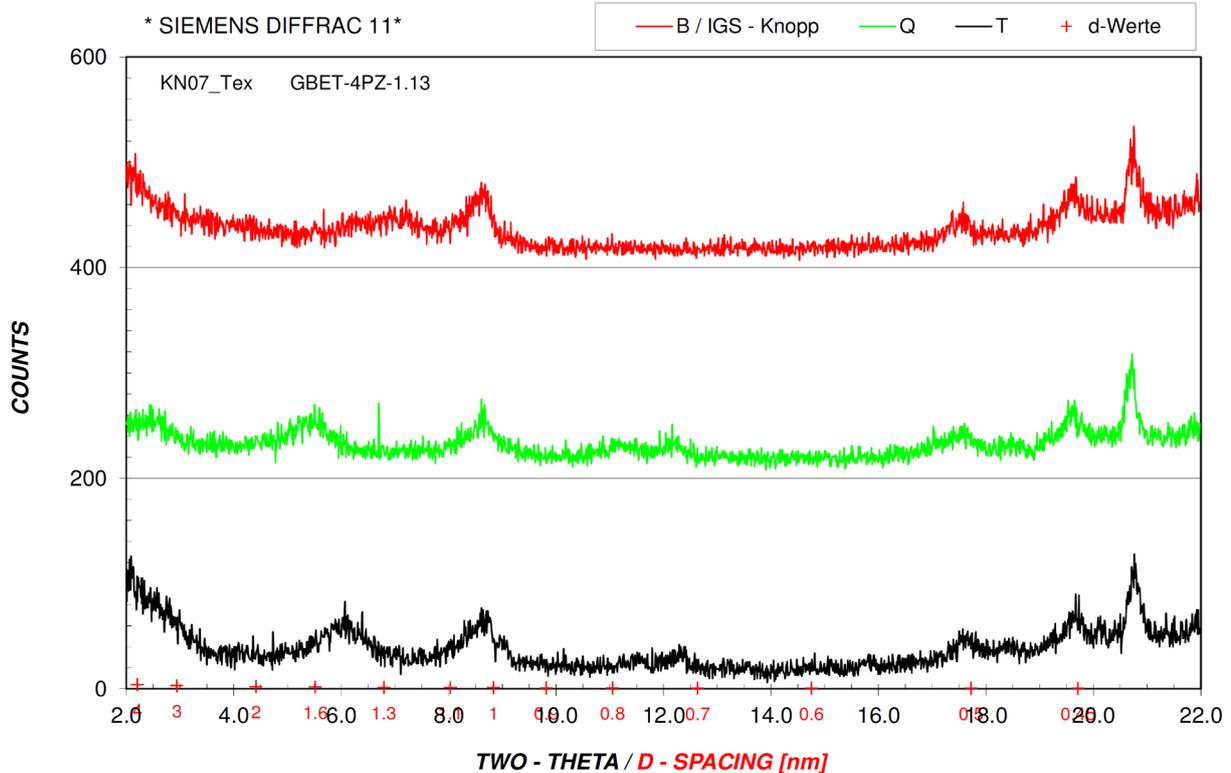
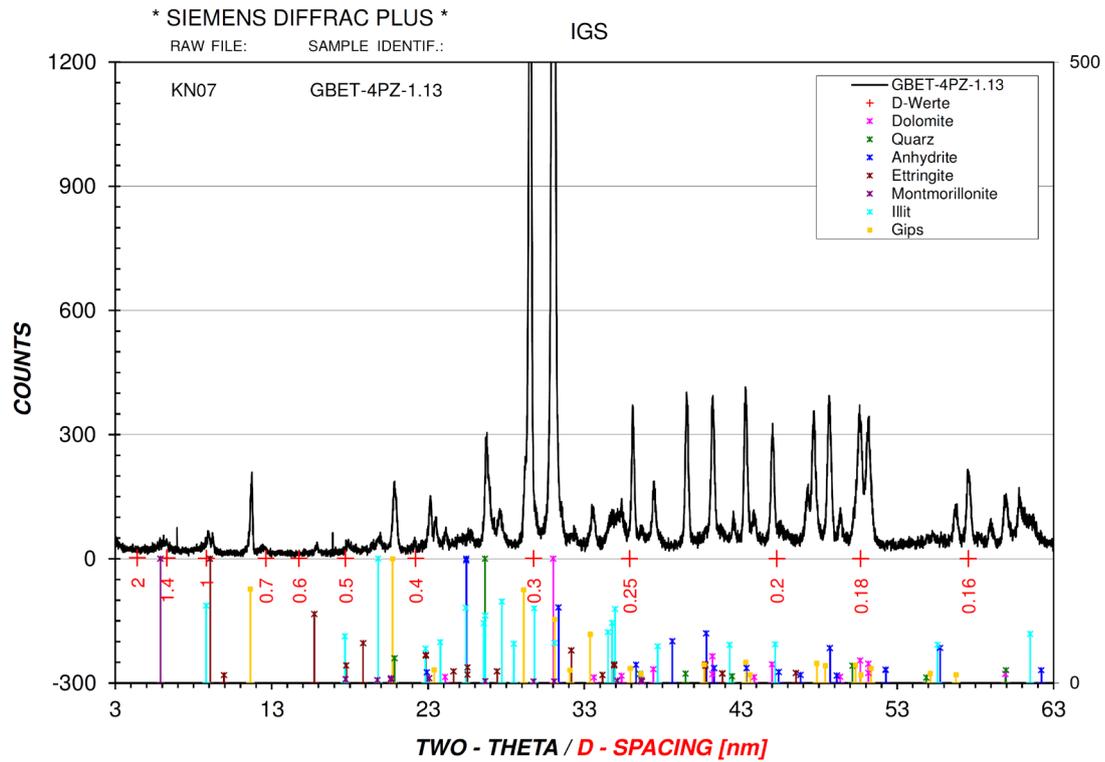
Anlage 6, Bild 1: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen)



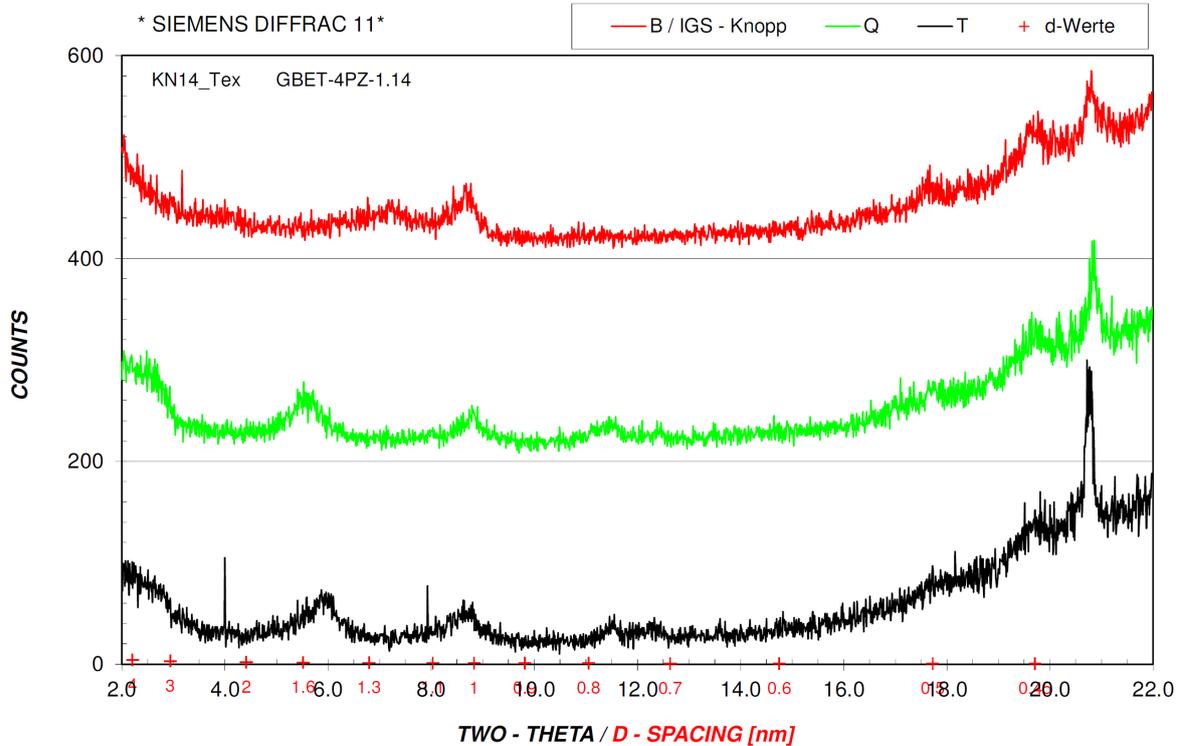
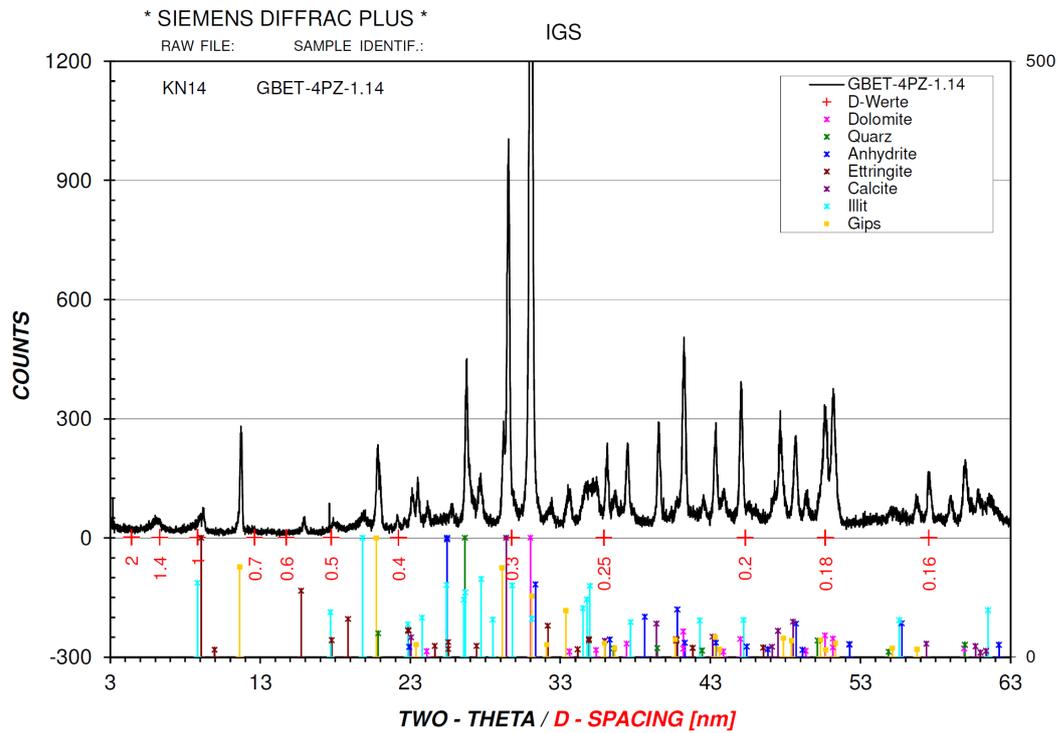
Anlage 6, Bild 2: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs (Zeit t in Tagen)



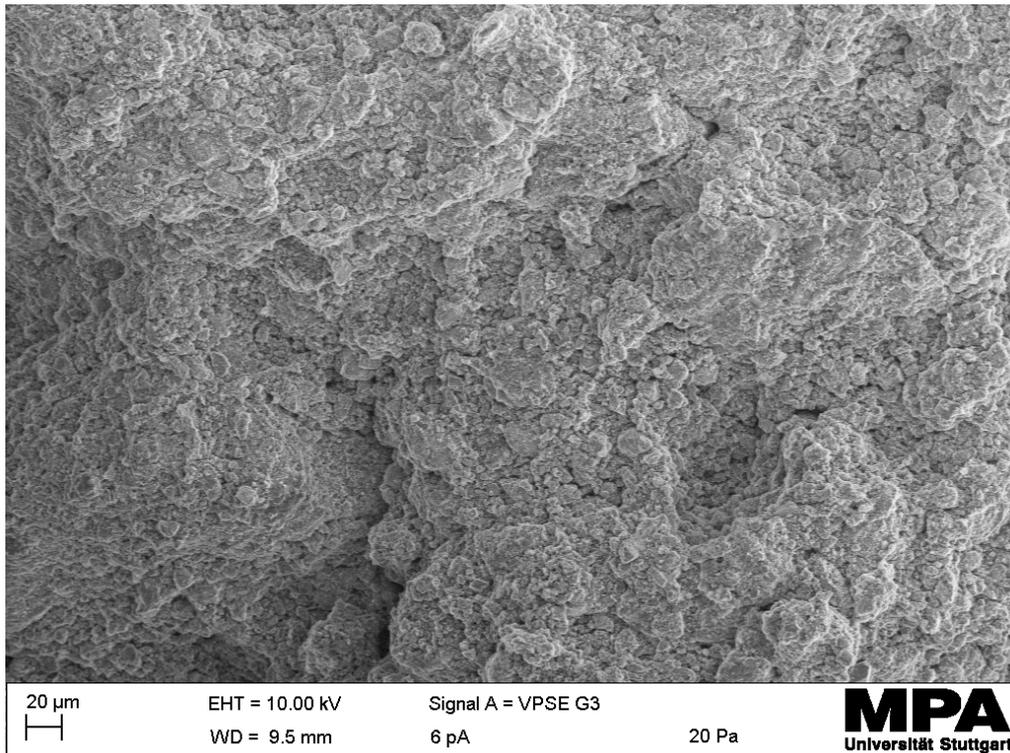
Anlage 6, Bild 3: XRD-Spektrum Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet (Versuch 2.4b)



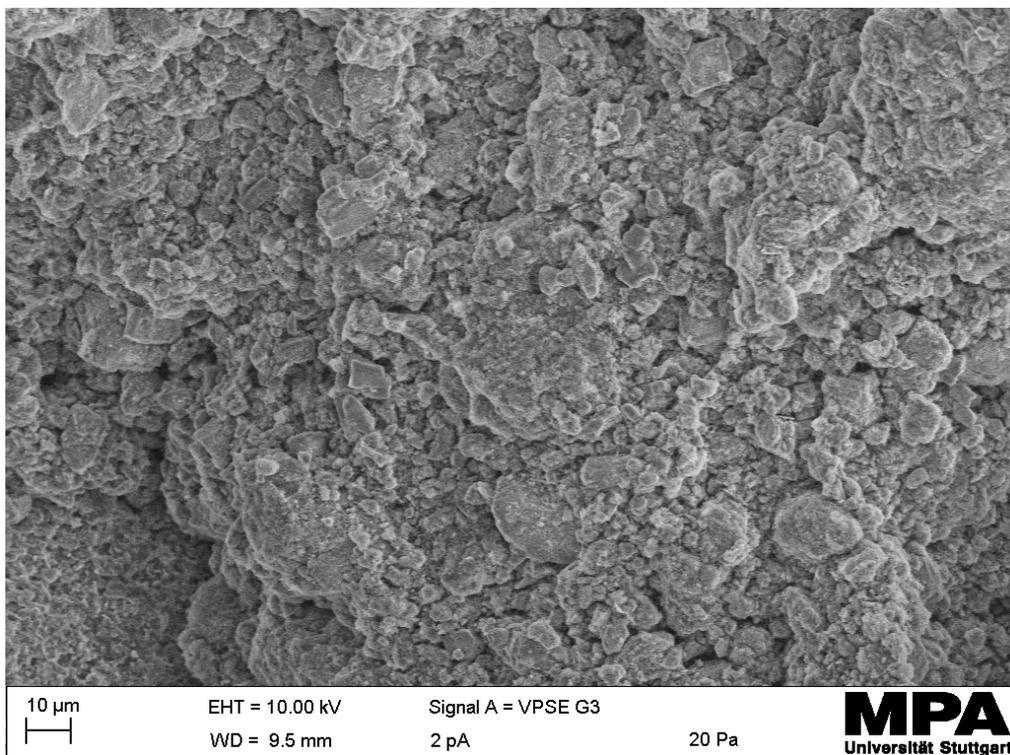
Anlage 6, Bild 4: XRD-Spektrum Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 100°C im Ofen getrocknet (Versuch 1.13)



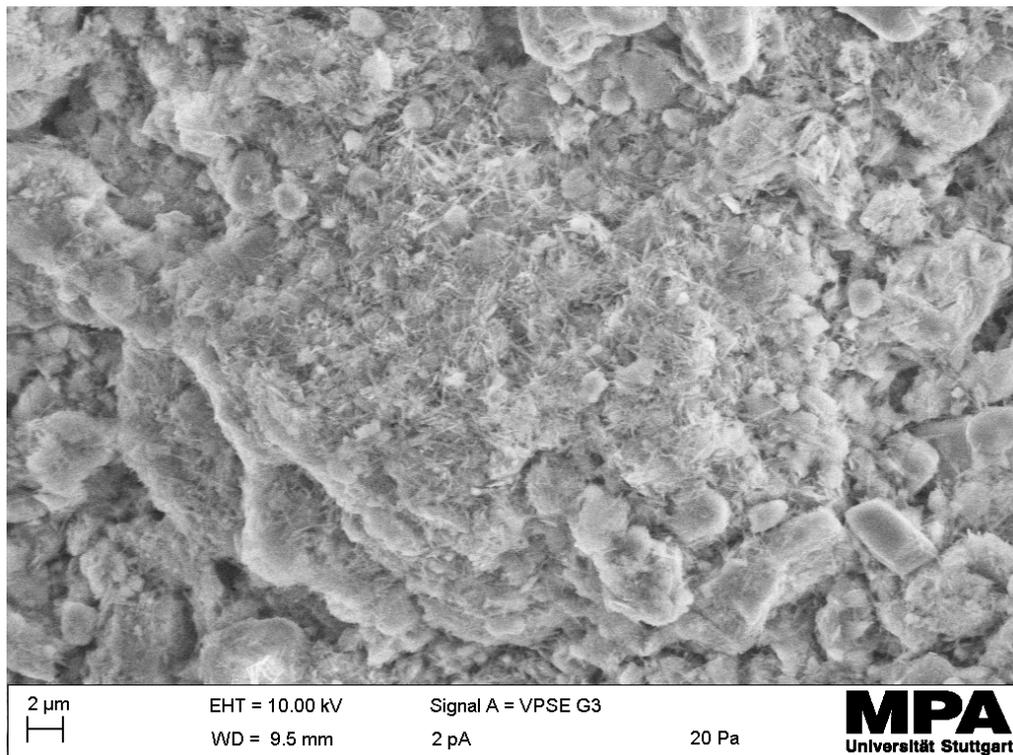
Anlage 6, Bild 5: XRD-Spektrum Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet (Versuch 1.14)



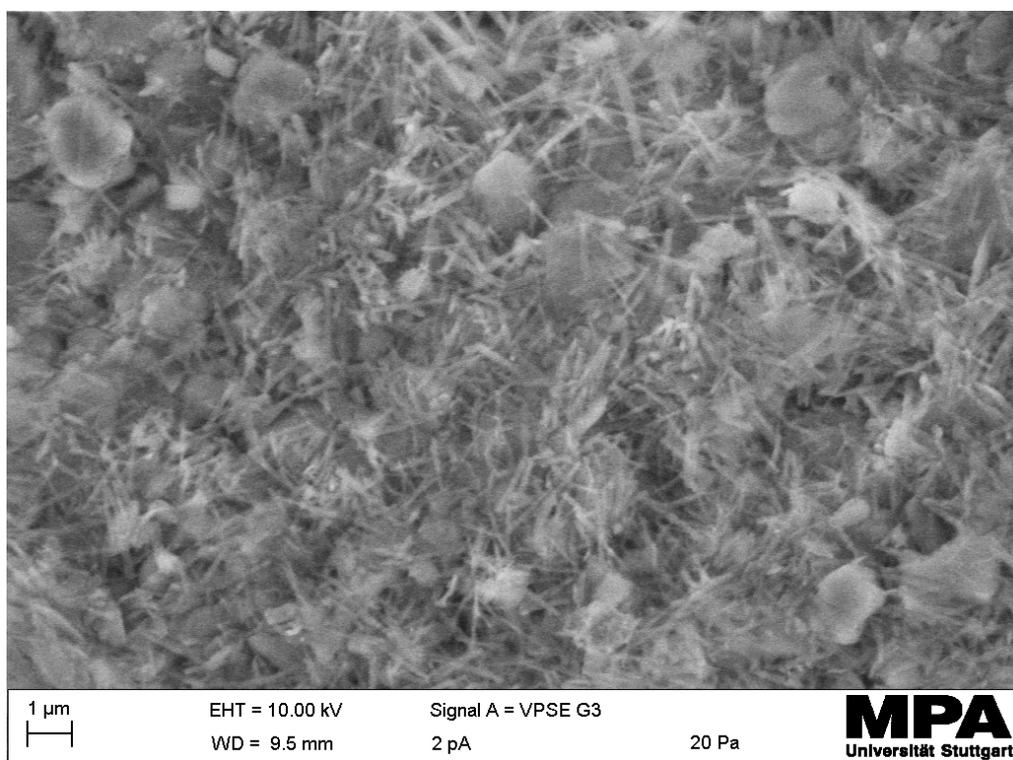
Anlage 6, Bild 6: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 2.4b). In dieser Vergrößerung sind noch keine Ettringitkristalle erkennbar.



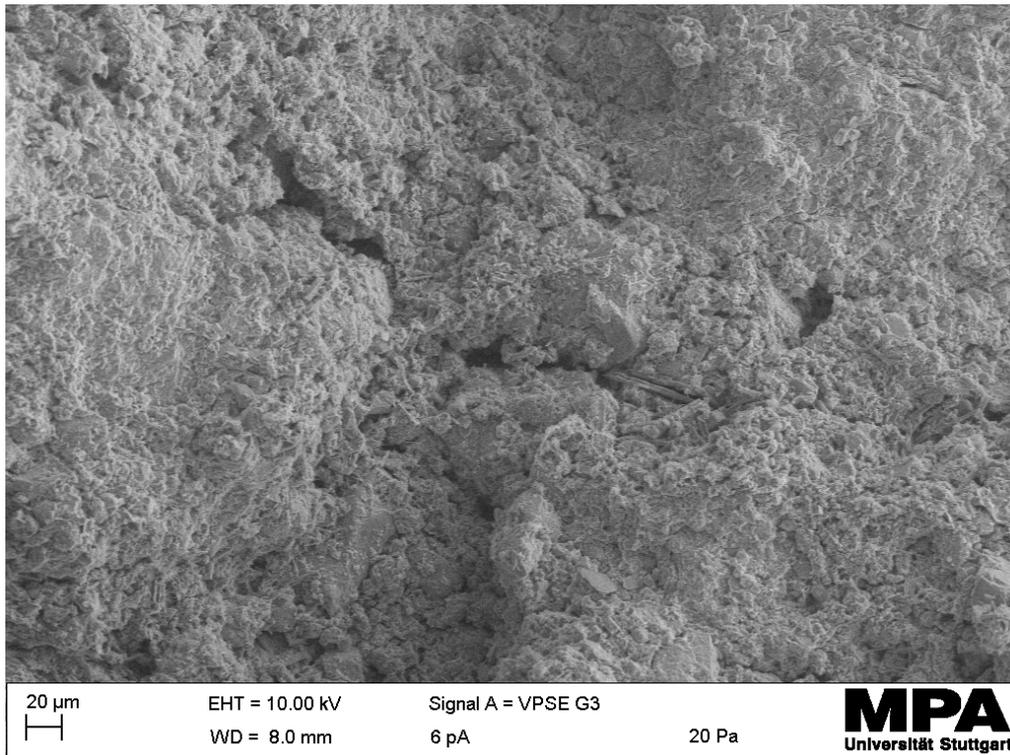
Anlage 6, Bild 7: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 2.4b).



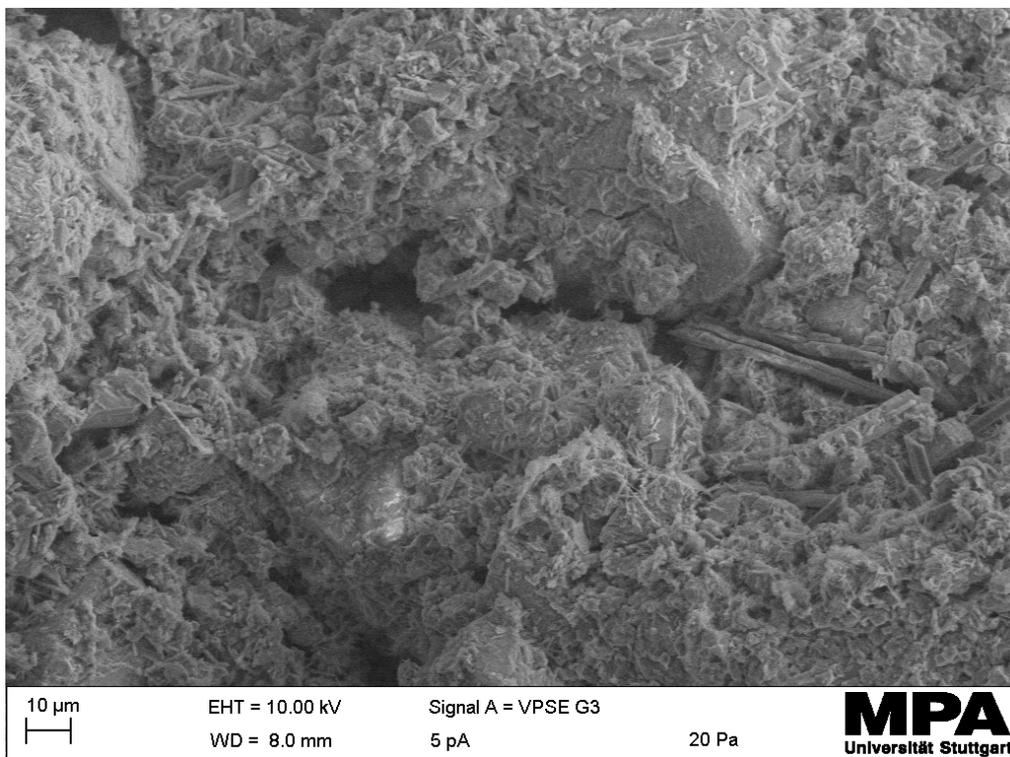
Anlage 6, Bild 8: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 2.4b). Großflächige Verteilung von Ettringitnadeln sichtbar.



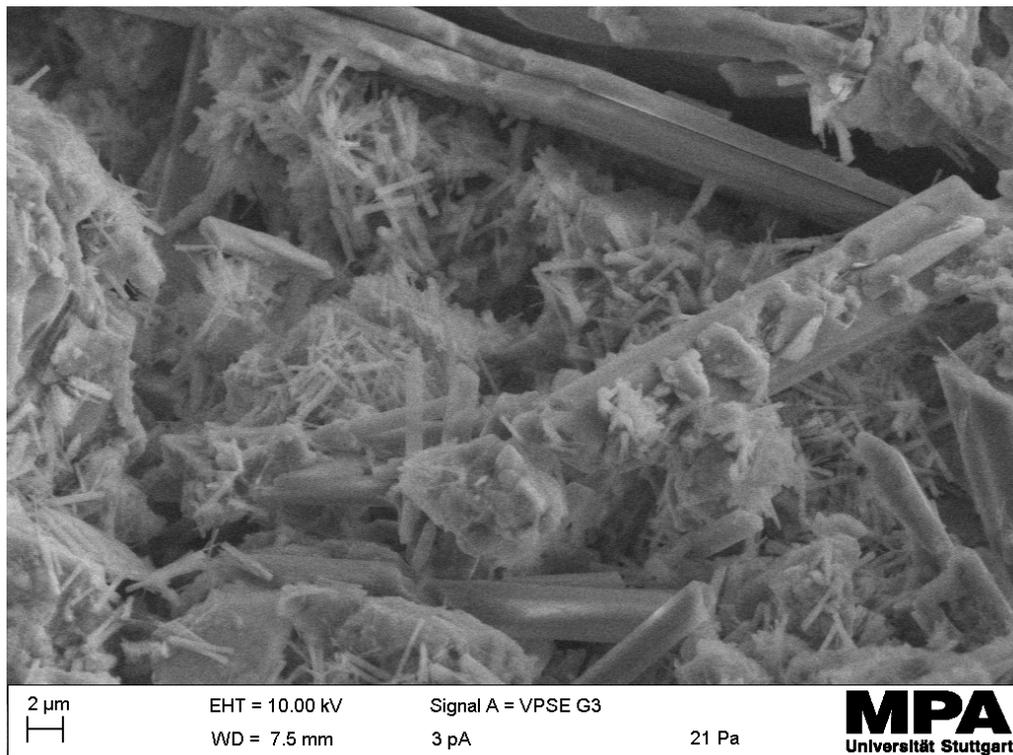
Anlage 6, Bild 9: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 2.4b). Großflächige Verteilung von Ettringitnadeln.



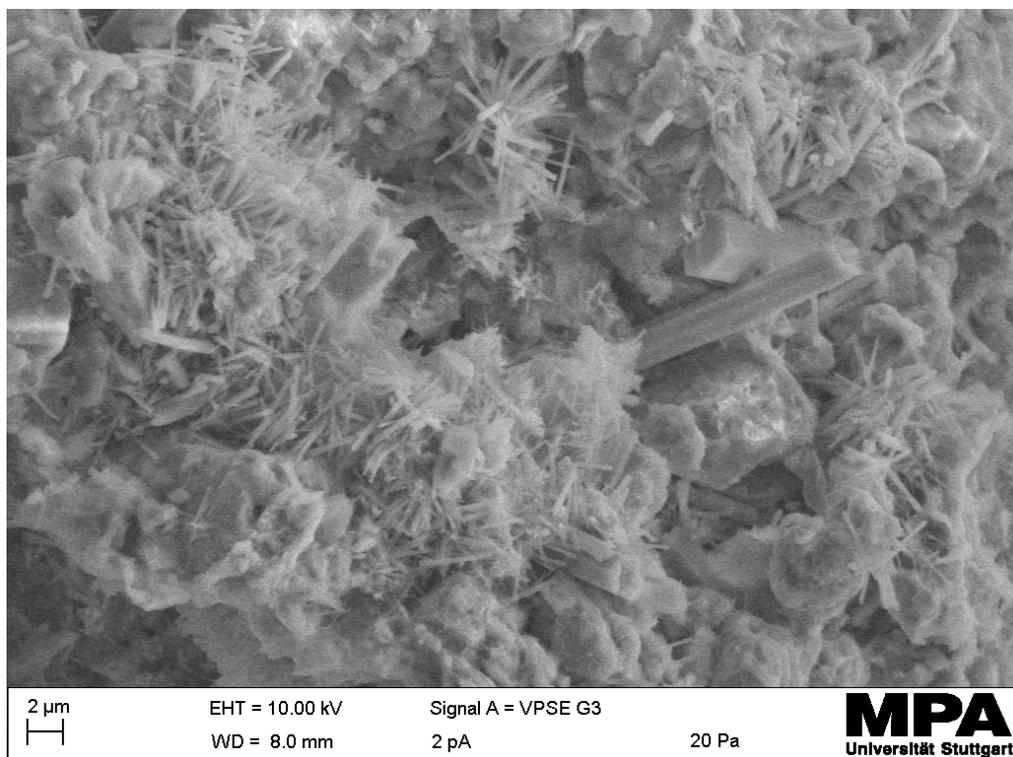
Anlage 6, Bild 10: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 100°C im Ofen getrocknet, vermutlich kein Dolomit enthalten (Versuch 1.13)



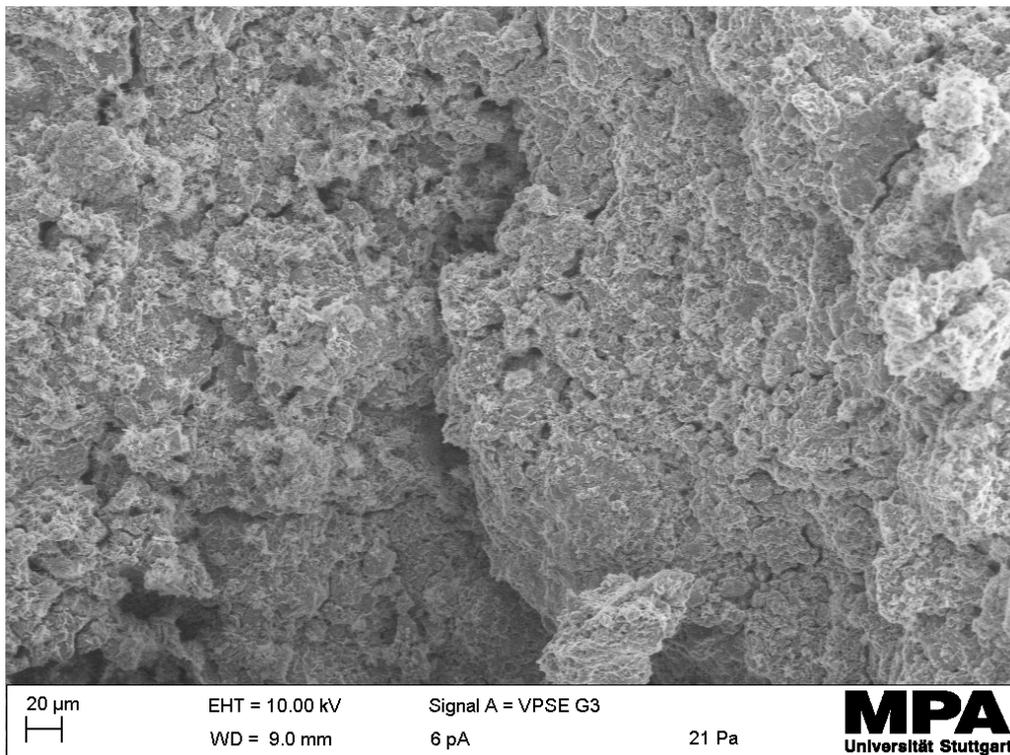
Anlage 6, Bild 11: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 100°C im Ofen getrocknet, vermutlich kein Dolomit enthalten (Versuch 1.13). Ettringitnadeln und blättchenförmige Tonminerale erkennbar.



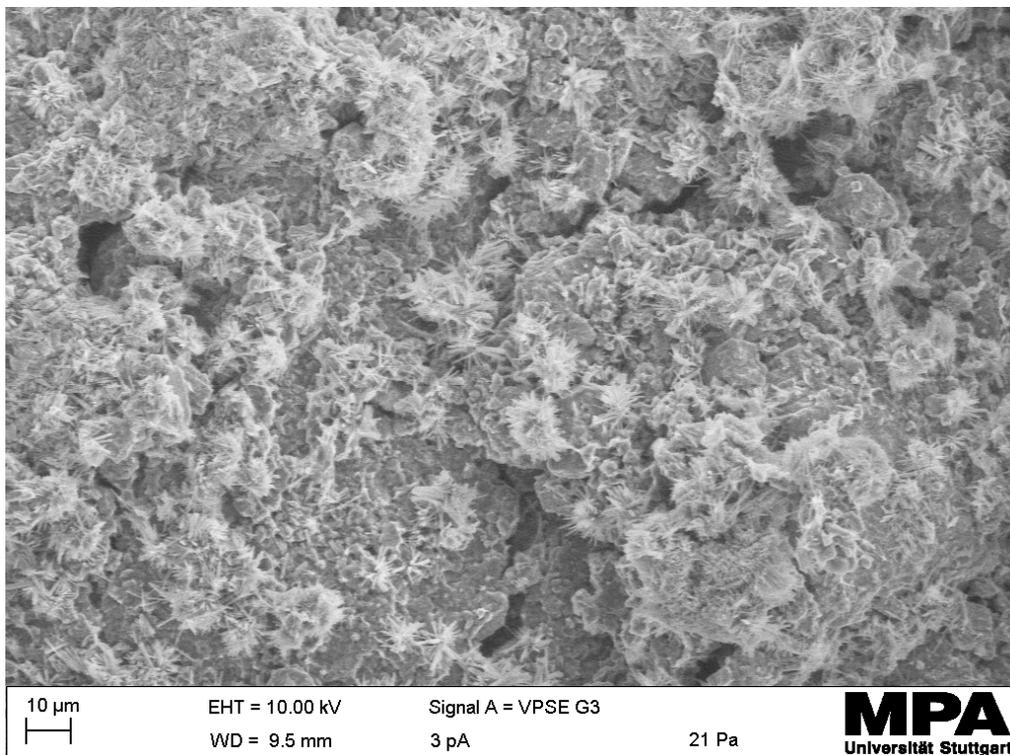
Anlage 6, Bild 12: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 100°C im Ofen getrocknet, vermutlich kein Dolomit enthalten (Versuch 1.13). Ettringitnadeln und blättchenförmige Tonminerale erkennbar.



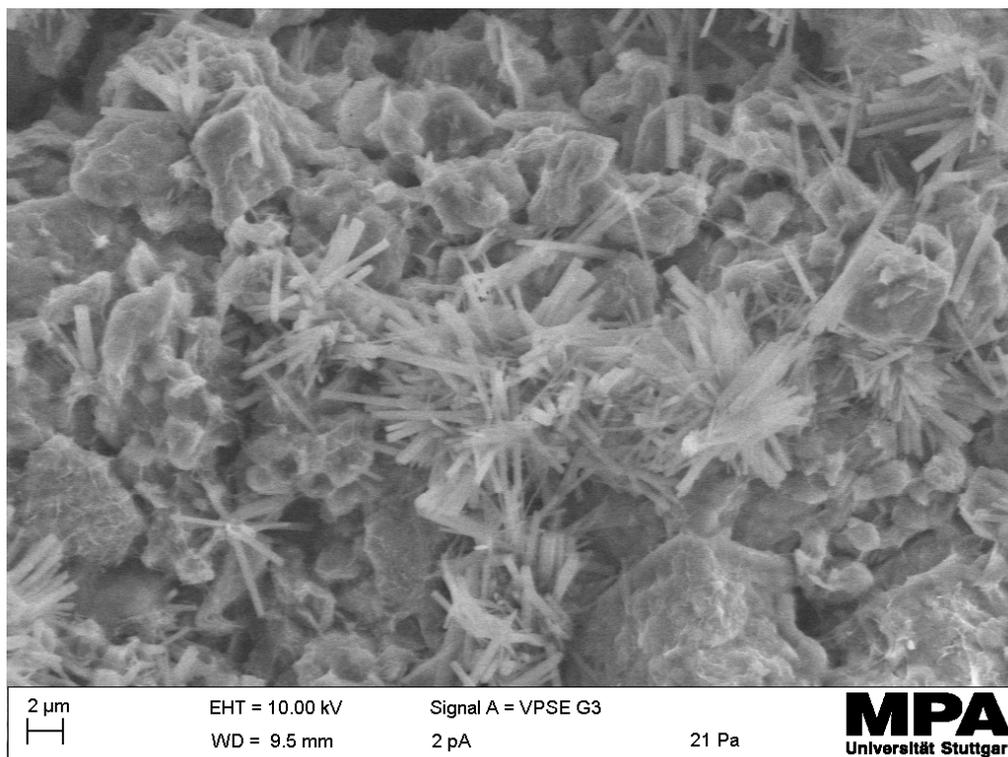
Anlage 6, Bild 13: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 100°C im Ofen getrocknet, vermutlich kein Dolomit enthalten (Versuch 1.13). Großflächige Verteilung der Ettringitkristalle erkennbar.



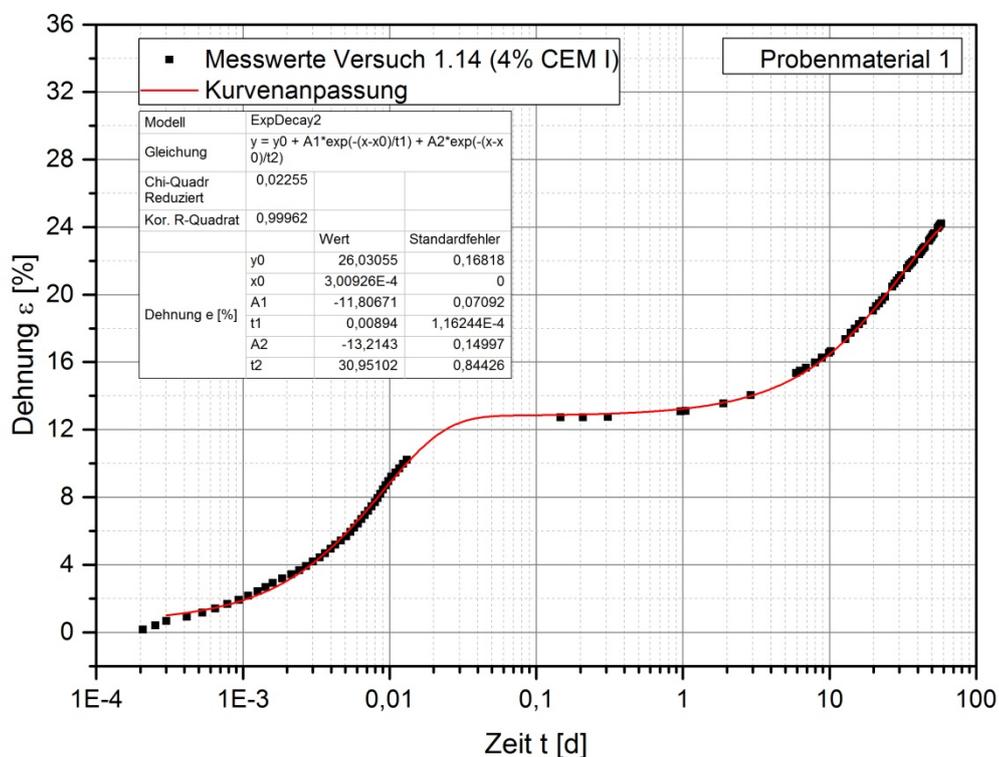
Anlage 6, Bild 14: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 1.14)



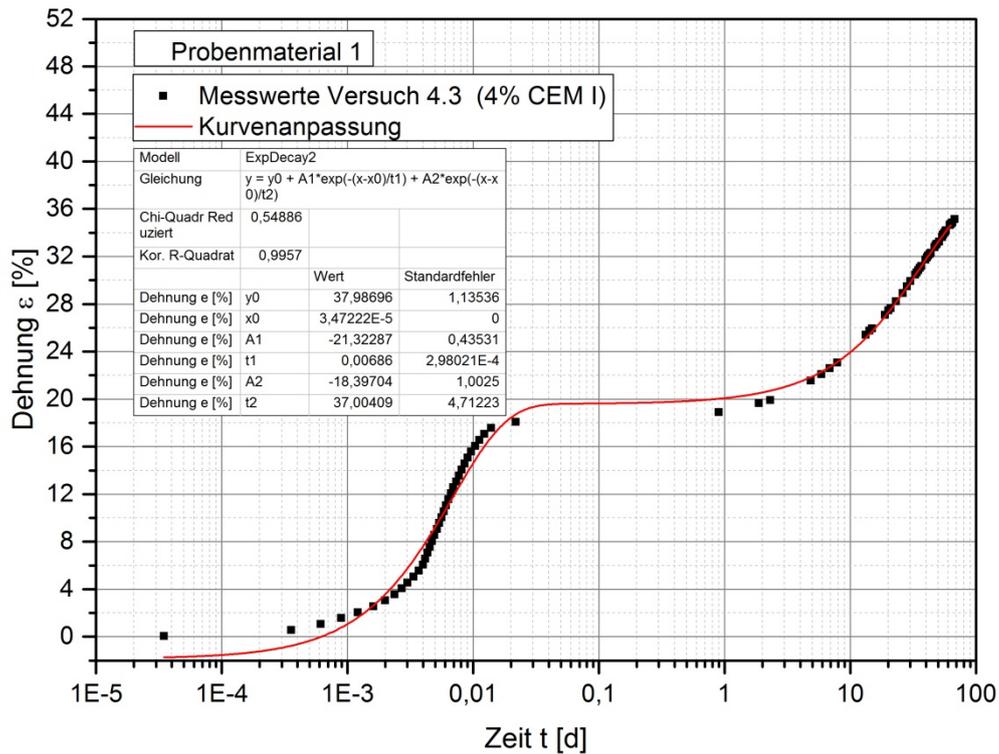
Anlage 6, Bild 15: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 1.14). Großflächige Verteilung der Ettringitkristallbildungen erkennbar.



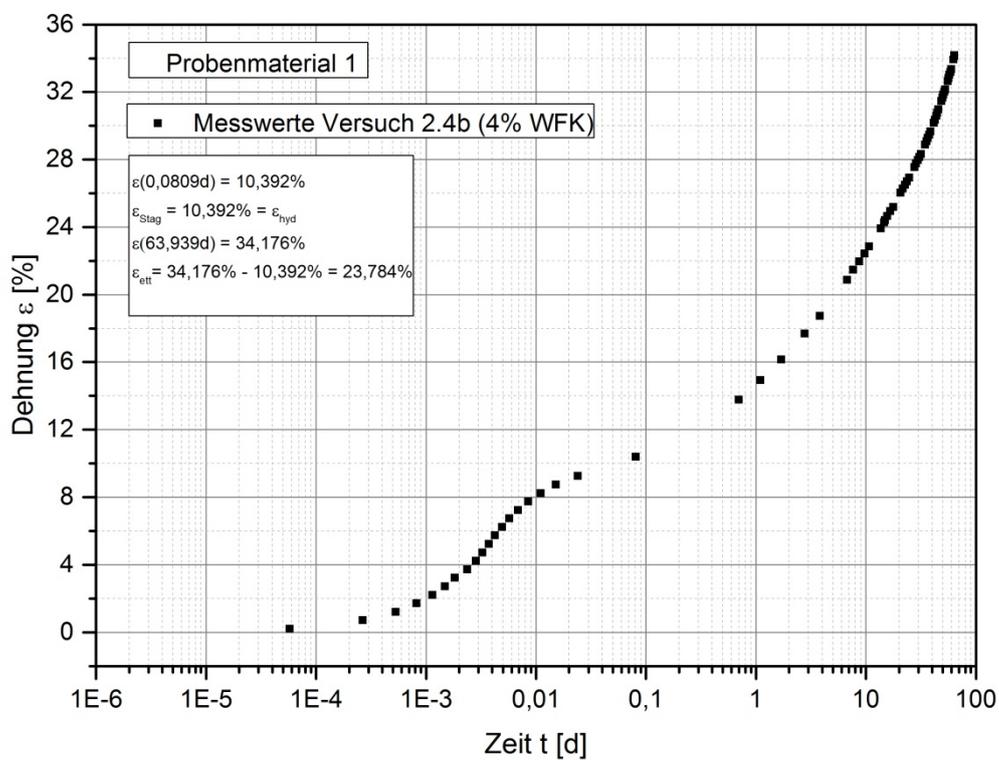
Anlage 6, Bild 16: REM-Aufnahme Probenmaterial 1 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende. Probenmaterial wurde vor Versuch bei 60°C im Ofen getrocknet, Dolomit enthalten (Versuch 1.14). Lange, dünne Ettringitnadeln deutlich erkennbar.



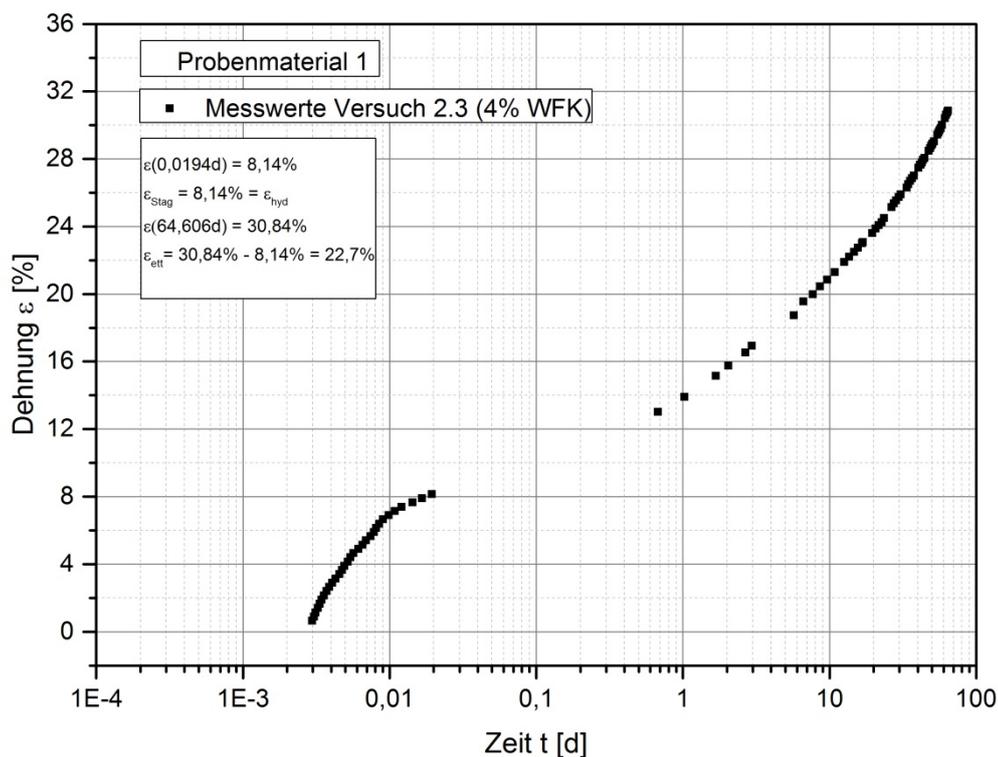
Anlage 6, Bild 17: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.14 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



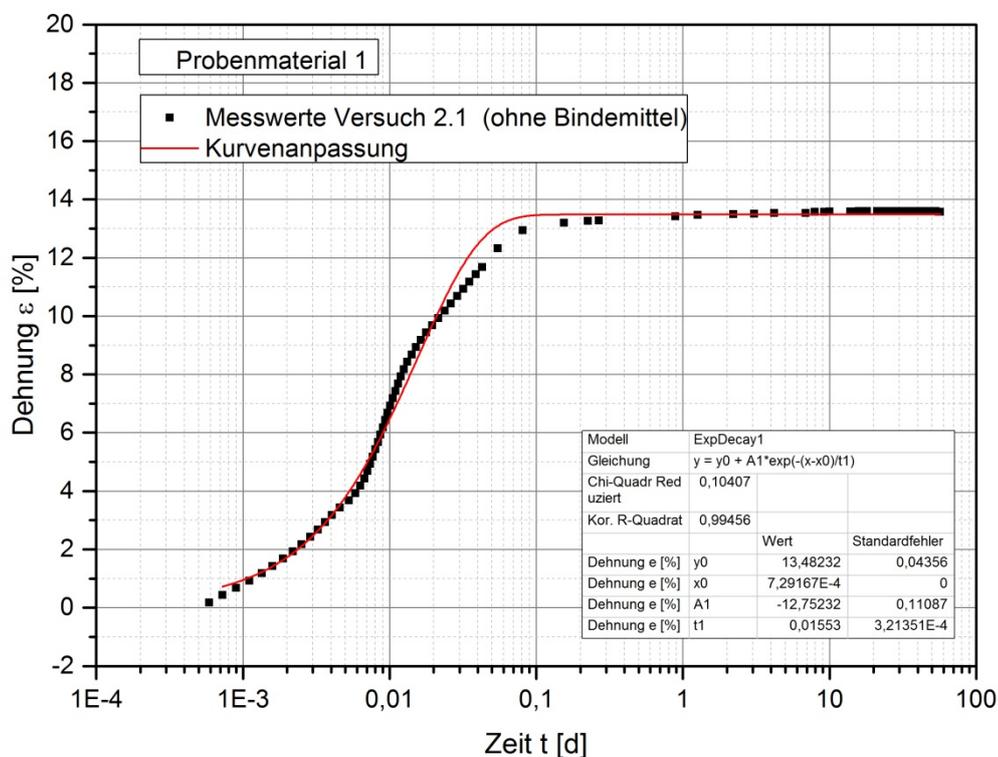
Anlage 6, Bild 18: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.14 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



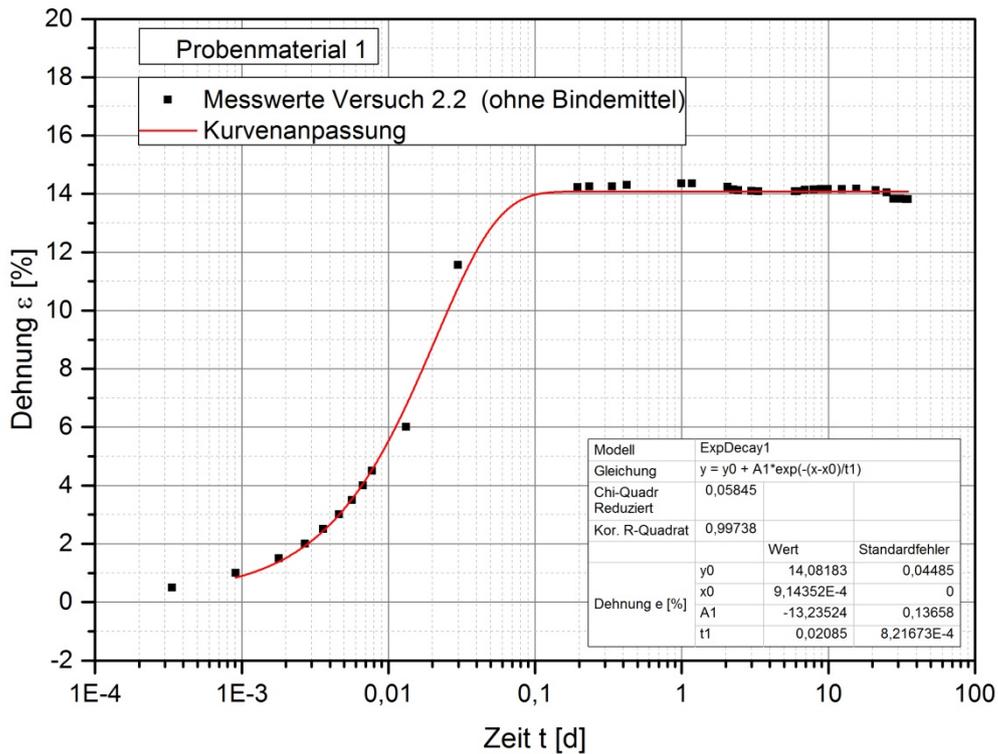
Anlage 6, Bild 19: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.4b (Zeit t in Tagen). Eine Kurvenanpassung an Gleichung 6 war hier nicht möglich.



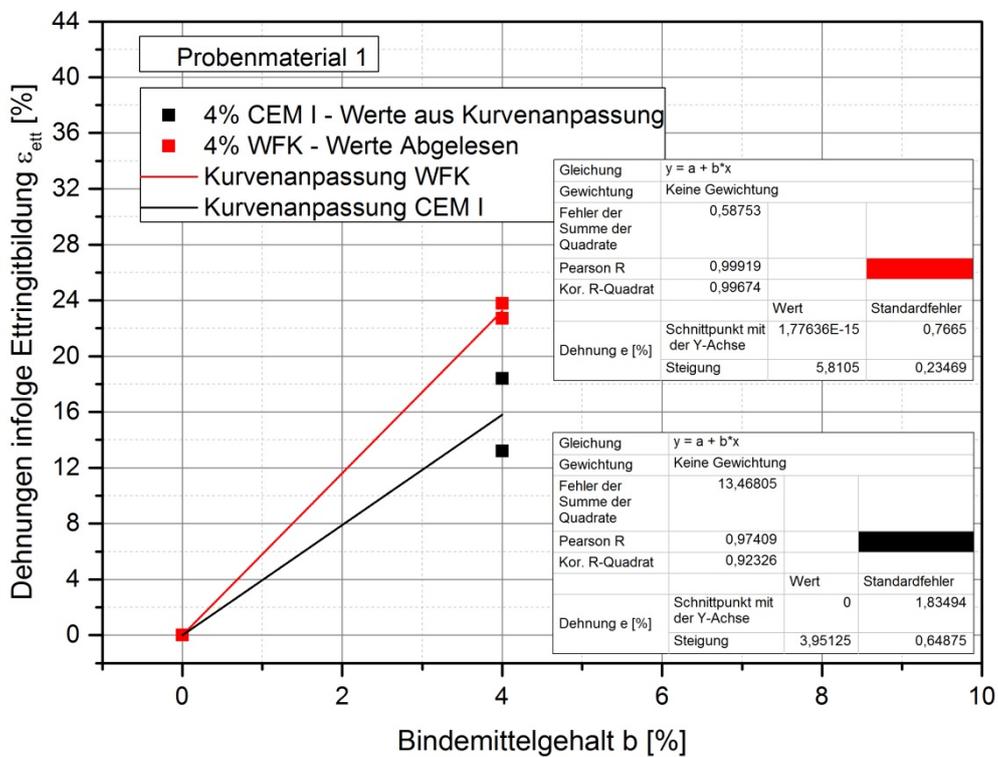
Anlage 6, Bild 20: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.3 (Zeit t in Tagen). Eine Kurvenanpassung an Gleichung 6 war hier nicht möglich.



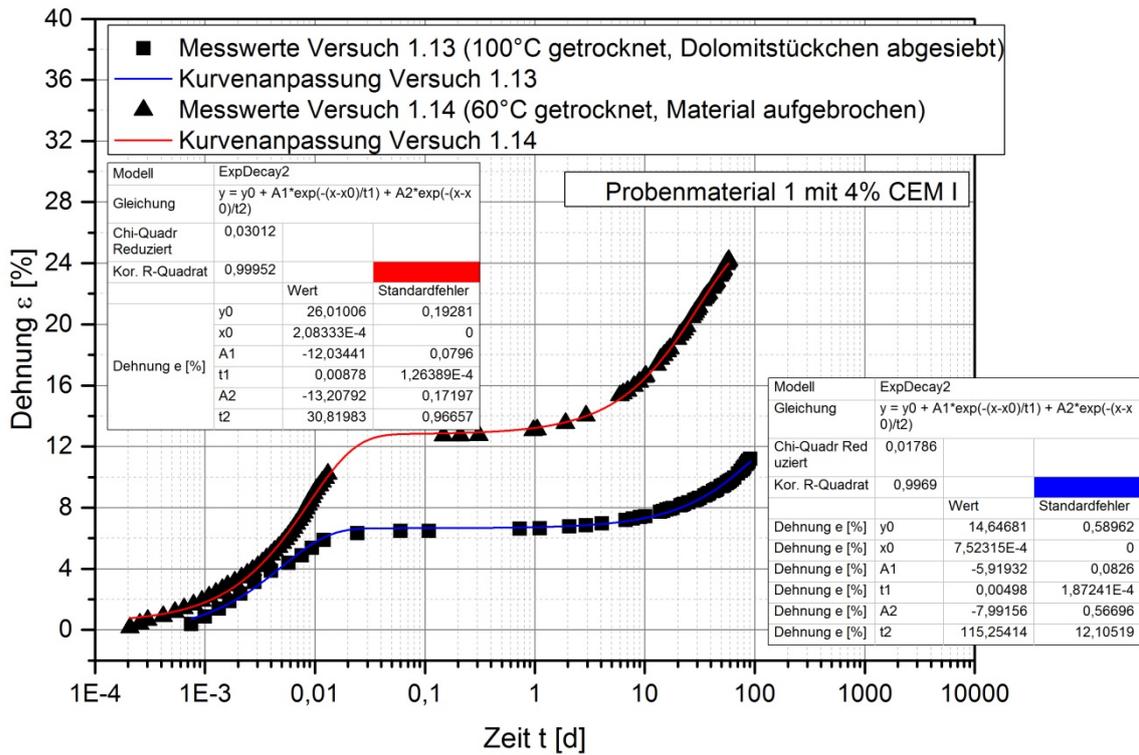
Anlage 6, Bild 21: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.1 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



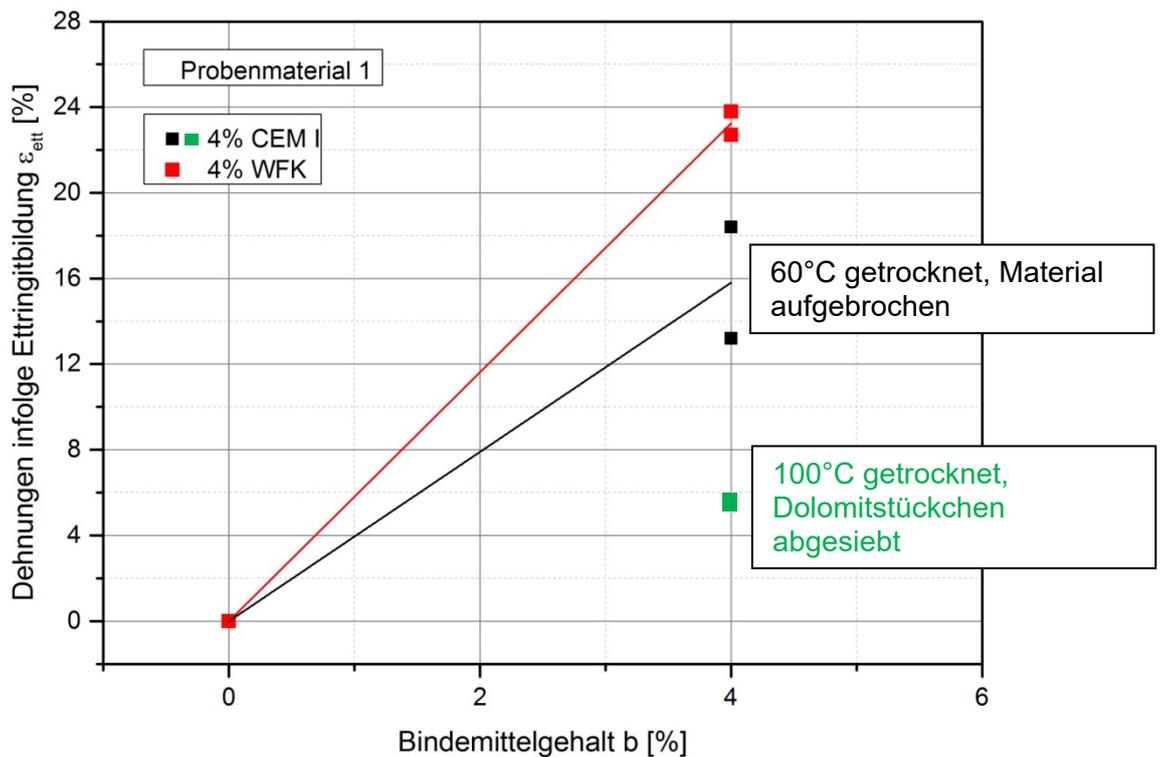
Anlage 6, Bild 22: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.2 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



Anlage 6, Bild 23: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Bindemittelgehalts. Rote Quadrate: Aus den Messwerten abgelesene Dehnungsbeträge für die kalkstabilisierten Versuche. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gl. 6 ermittelte Dehnungsbeträge der zementstabilisierten Versuche. Die Geraden markieren jeweils die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 7.

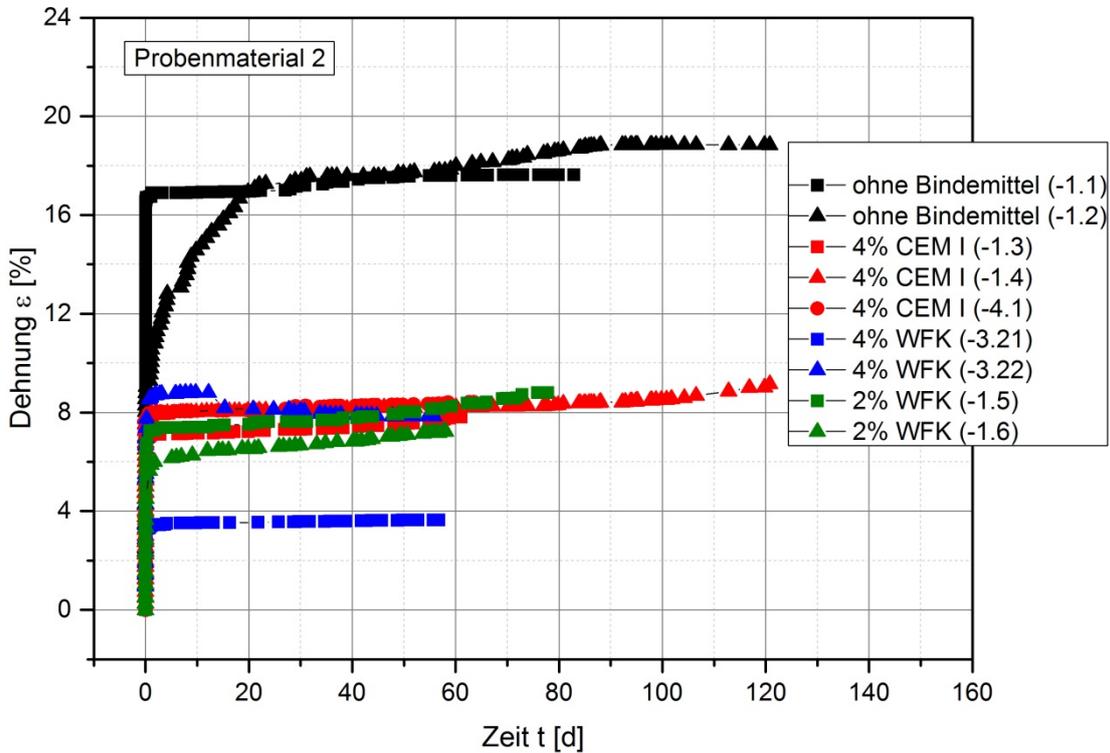


Anlage 6, Bild 24: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.13 und Versuch 1.14 (Zeit t in Tagen). Rot bzw. blau: Kurvenanpassung an Gleichung 6.

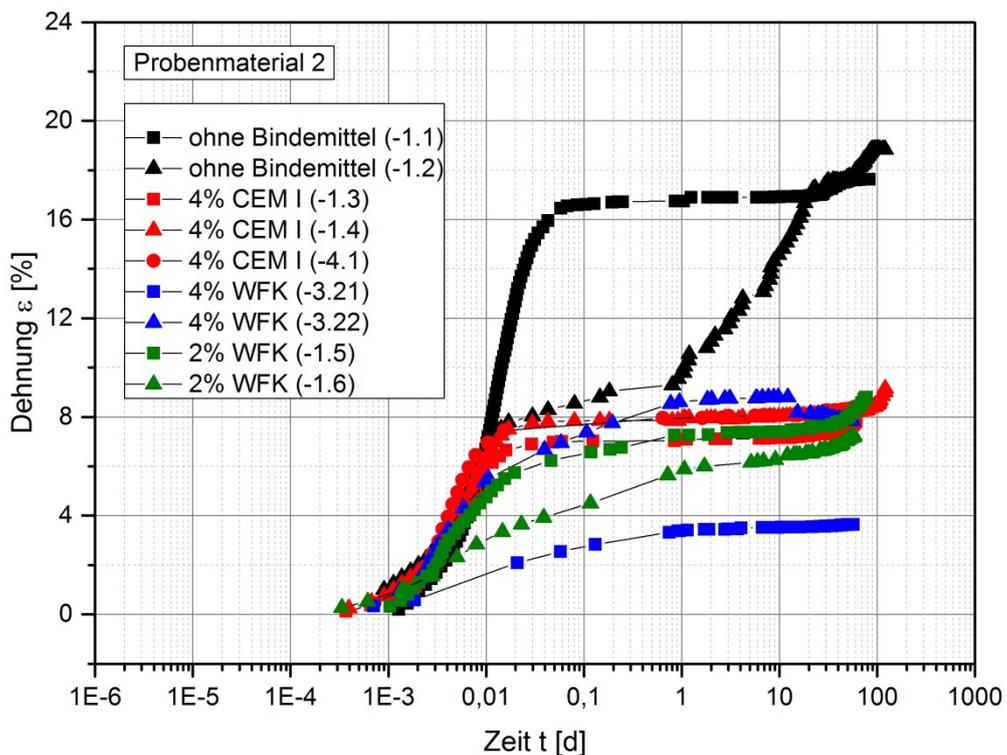


Anlage 6, Bild 25: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Bindemittelgehalts. Grün: bei 100°C getrocknetes Material, Dolomitstückchen abgesiebt

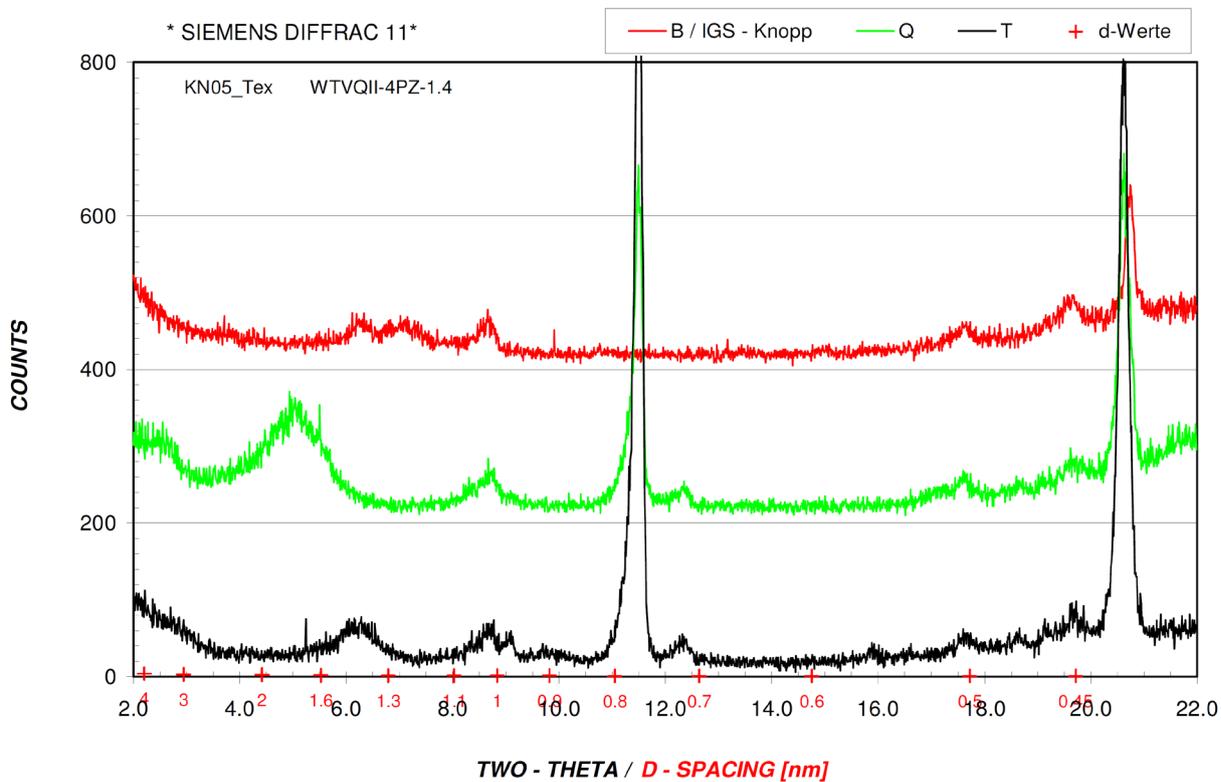
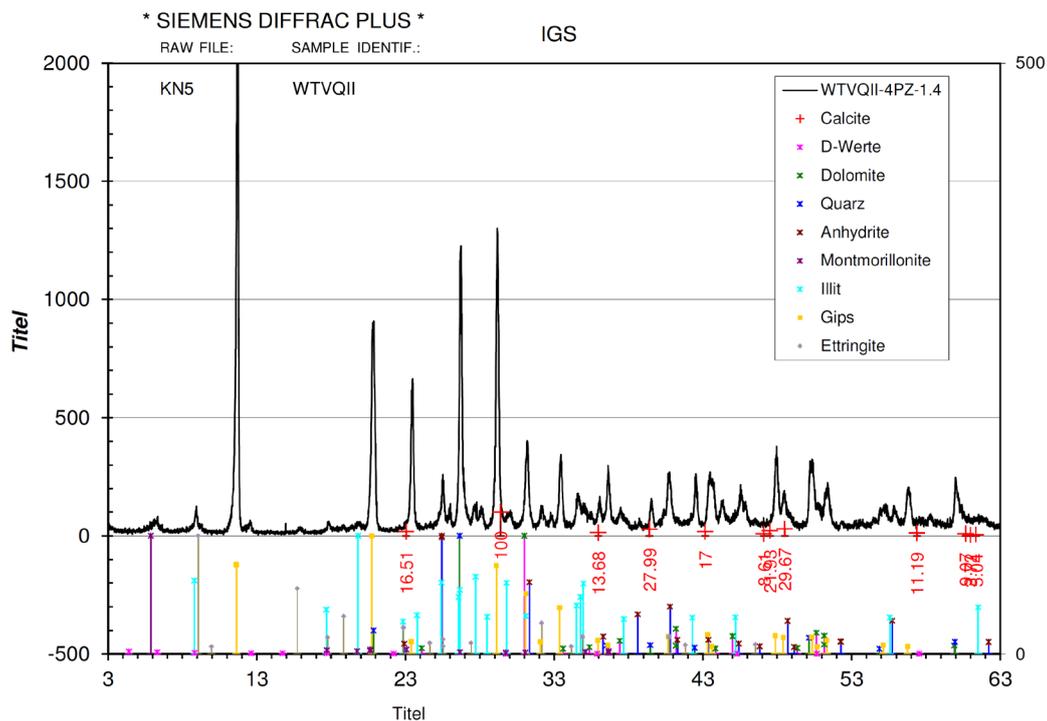
Anlage 7 Versuchsergebnisse Probenmaterial 2 (WTVQII)



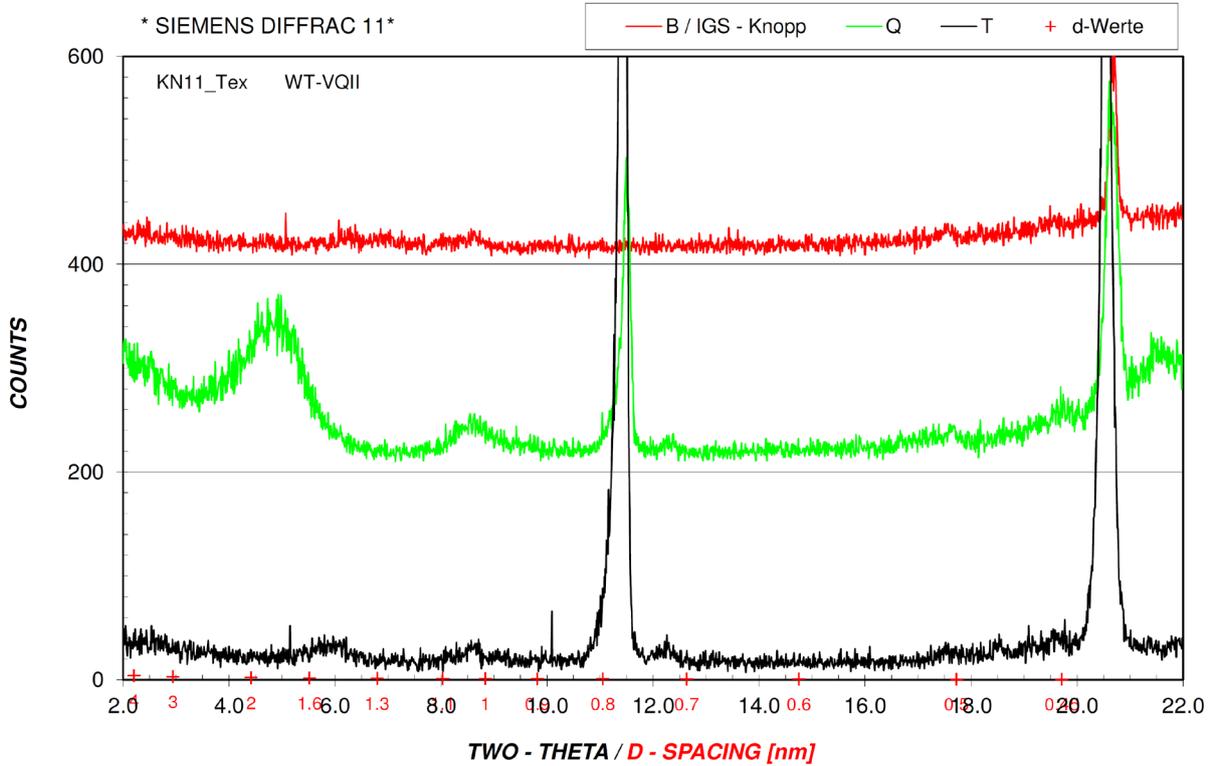
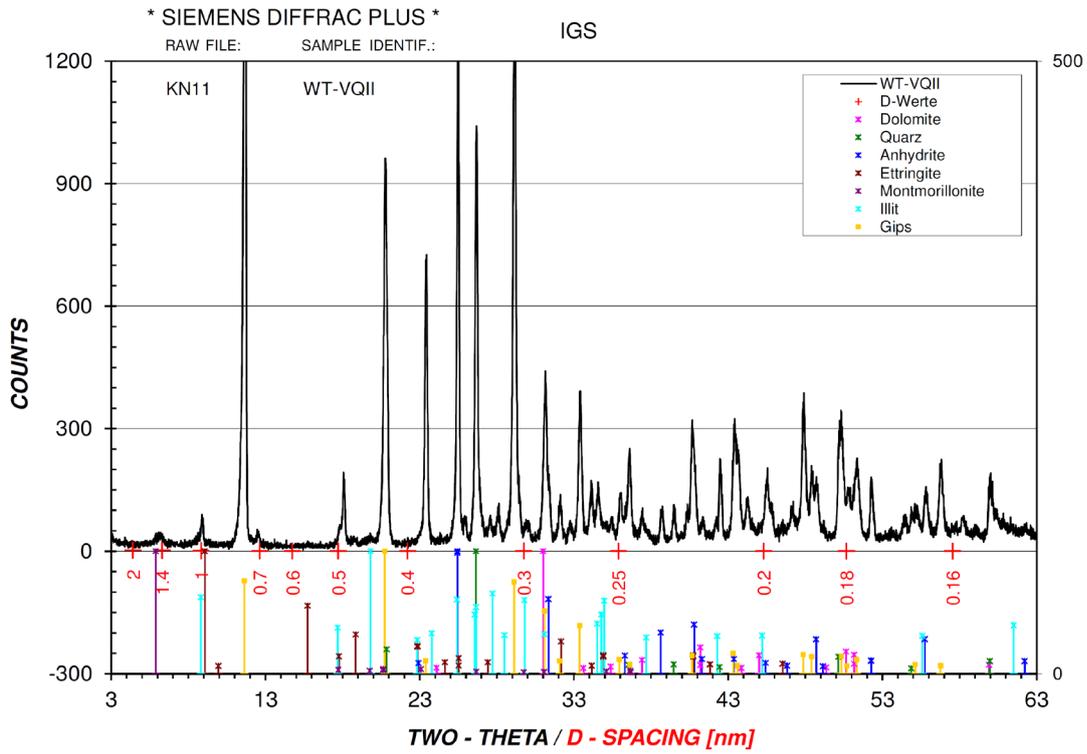
Anlage 7, Bild 1: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen)



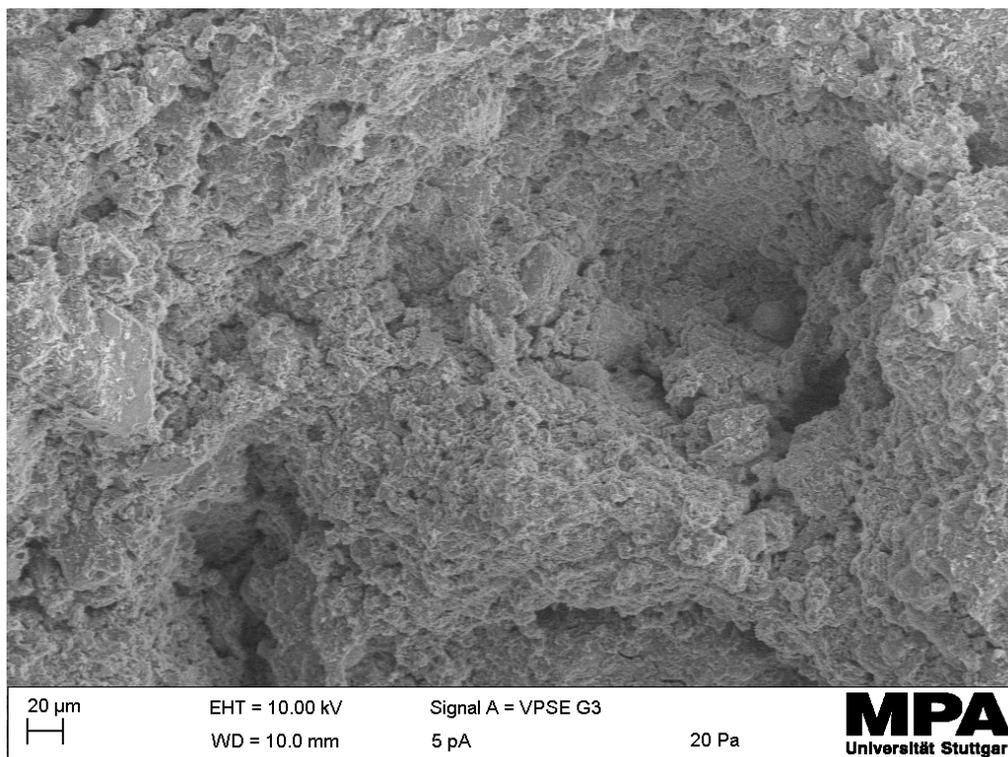
Anlage 7, Bild 2: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs (Zeit t in Tagen)



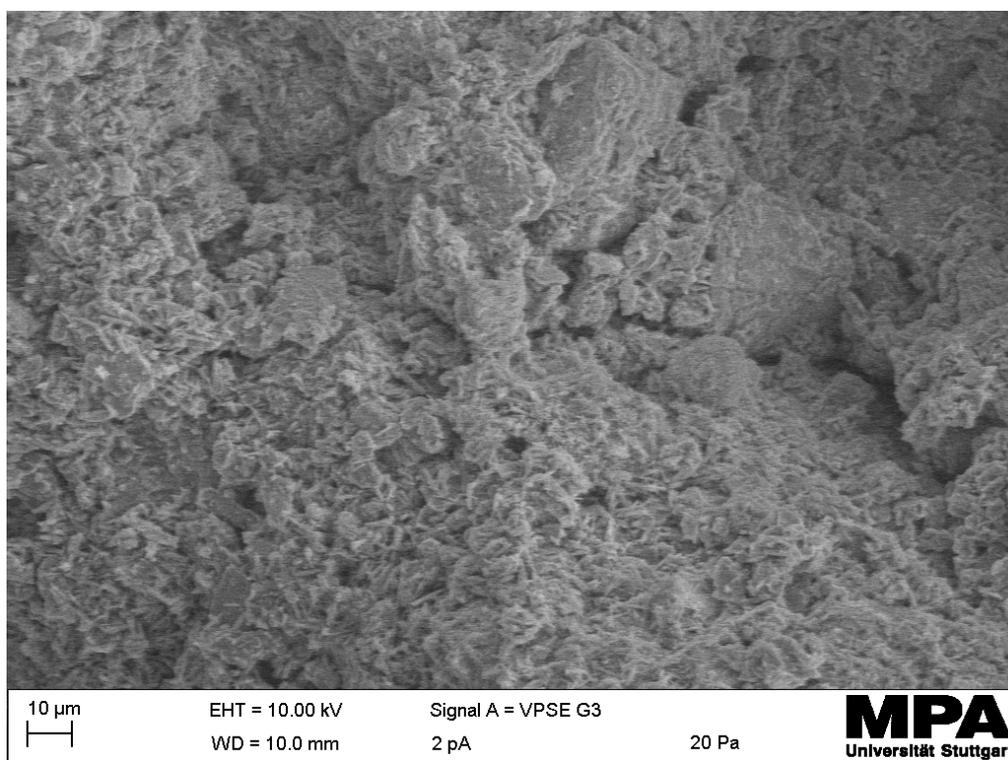
Anlage 7, Bild 3: XRD-Spektrum Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende (Versuch 1.4)



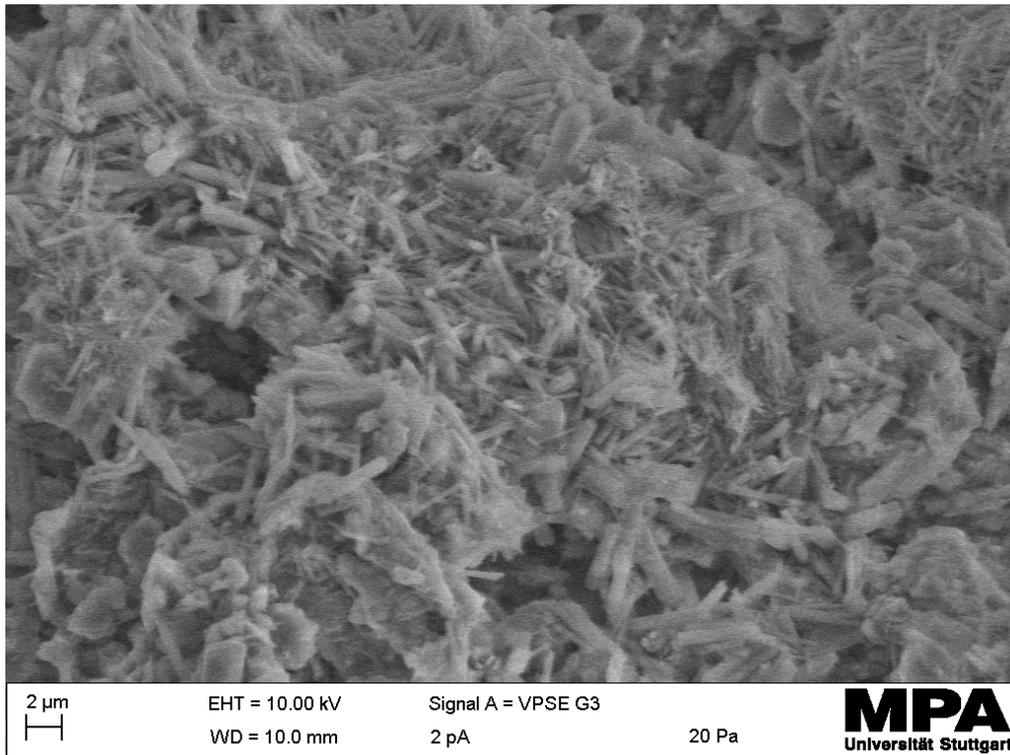
Anlage 7, Bild 4: XRD-Spektrum Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende (Versuch 3.21)



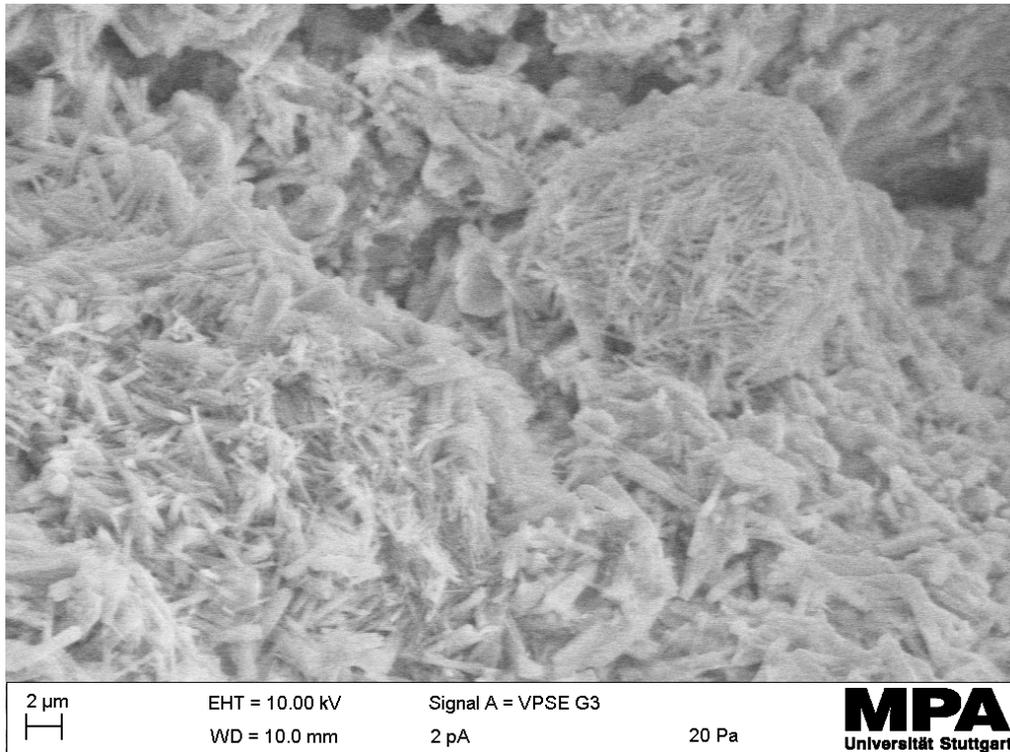
Anlage 7, Bild 5: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende (Versuch 1.4). In dieser Vergrößerung sind noch keine Ettringitkristalle erkennbar.



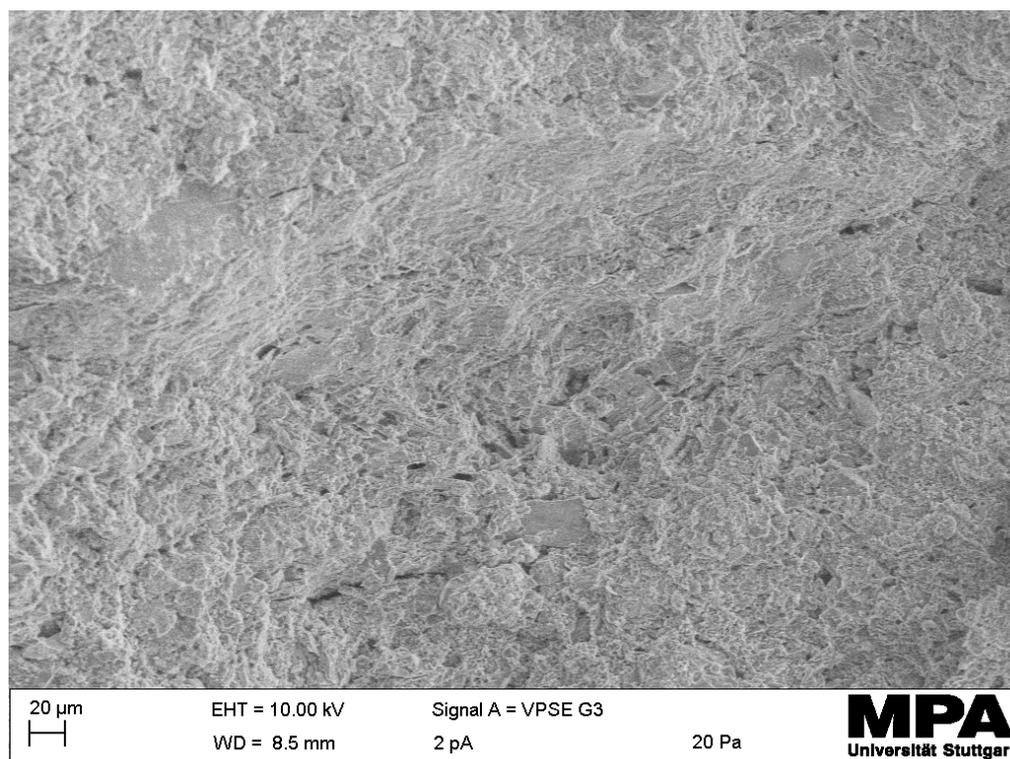
Anlage 7, Bild 6: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende (Versuch 1.4). Nadelförmige Kristalle erkennbar.



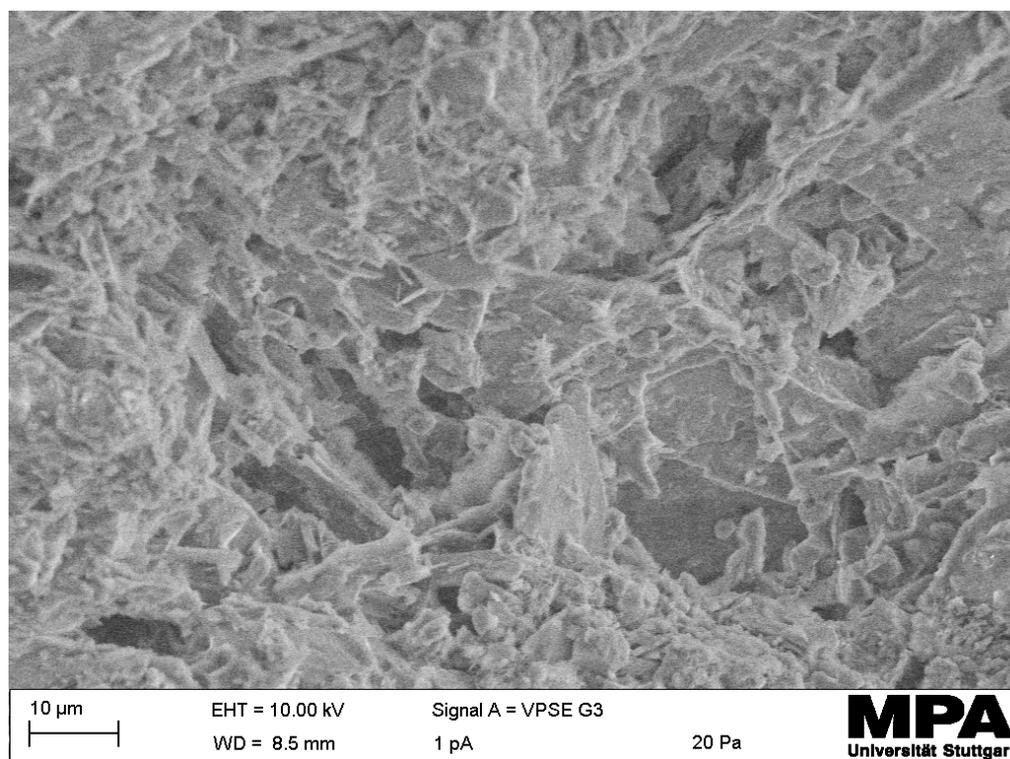
Anlage 7, Bild 7: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende (Versuch 1.4). Ettringitkristalle erkennbar, allerdings Neubildung noch nicht weit fortgeschritten.



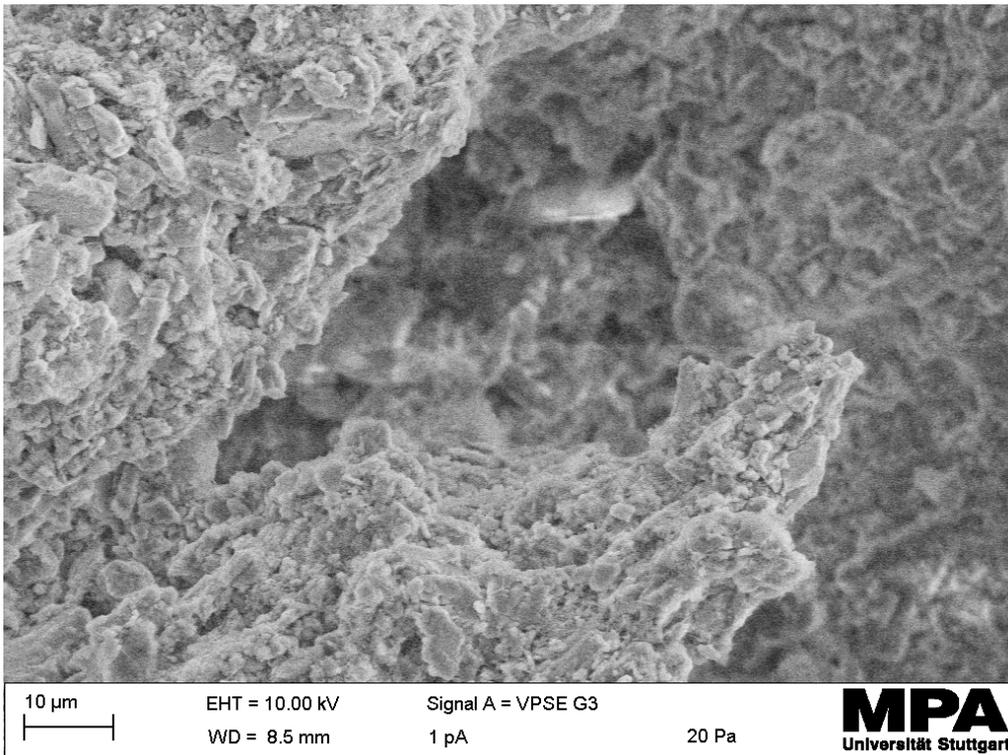
Anlage 7, Bild 8: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Portlandzement nach Versuchsende (Versuch 1.4). Ettringitkristalle erkennbar, allerdings Neubildung noch nicht weit fortgeschritten.



Anlage 7, Bild 9: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende (Versuch 3.21). Keine Ettringitkristalle erkennbar.

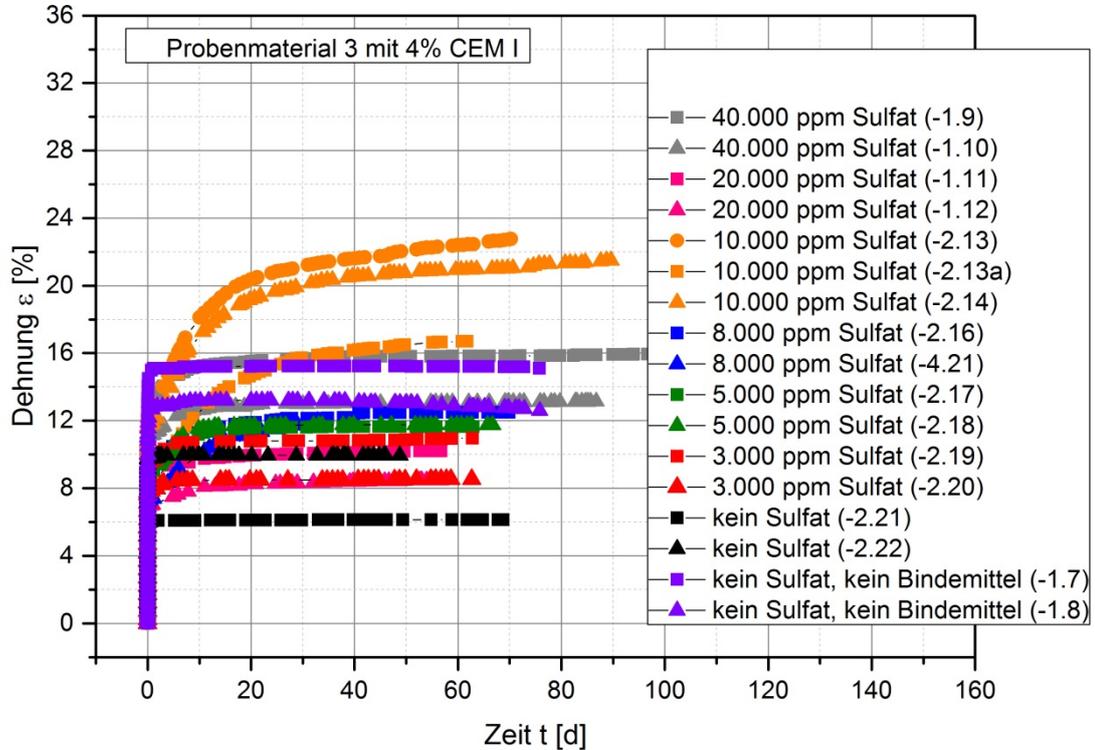


Anlage 7, Bild 10: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende (Versuch 3.21). Keine Ettringitkristalle erkennbar.

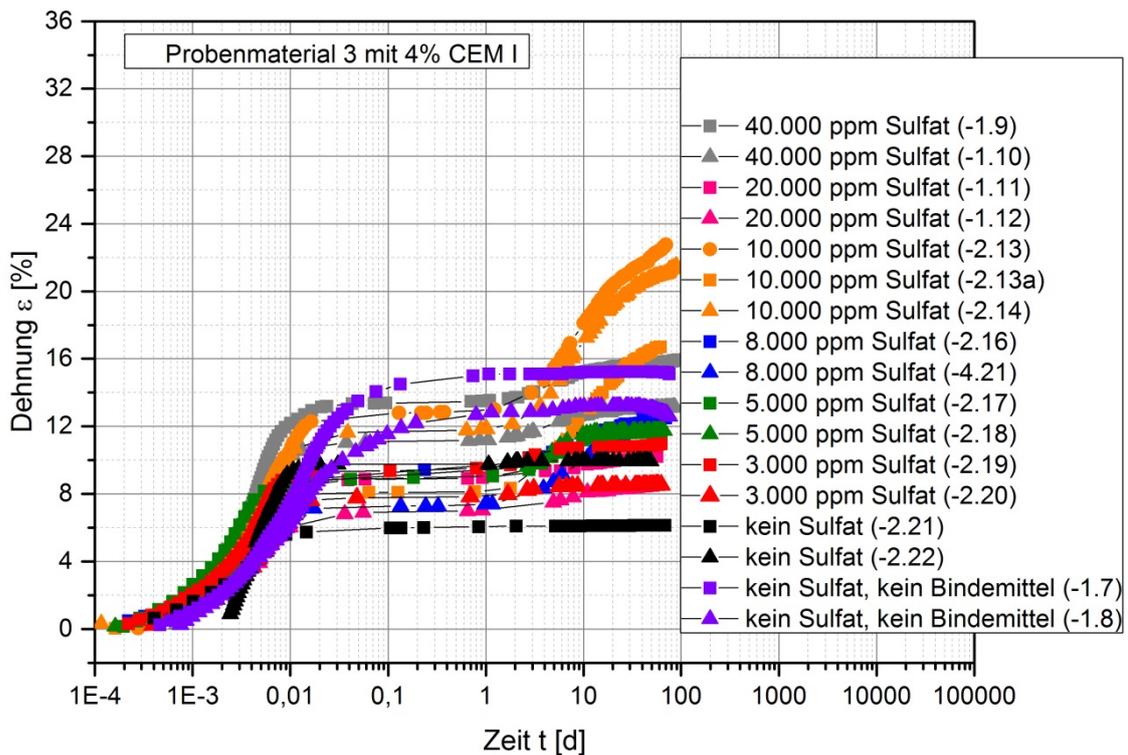


Anlage 7, Bild 11: REM-Aufnahme Probenmaterial 2 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk nach Versuchsende (Versuch 3.21). Keine Ettringitkristalle erkennbar.

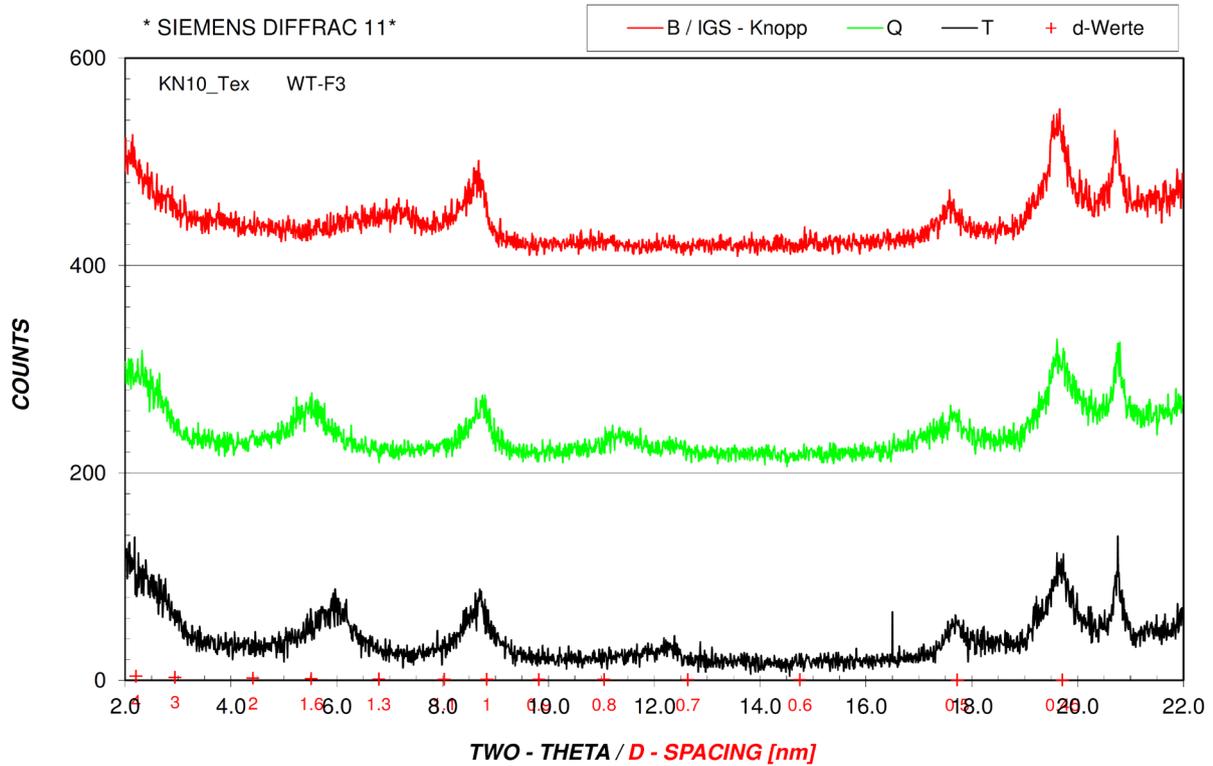
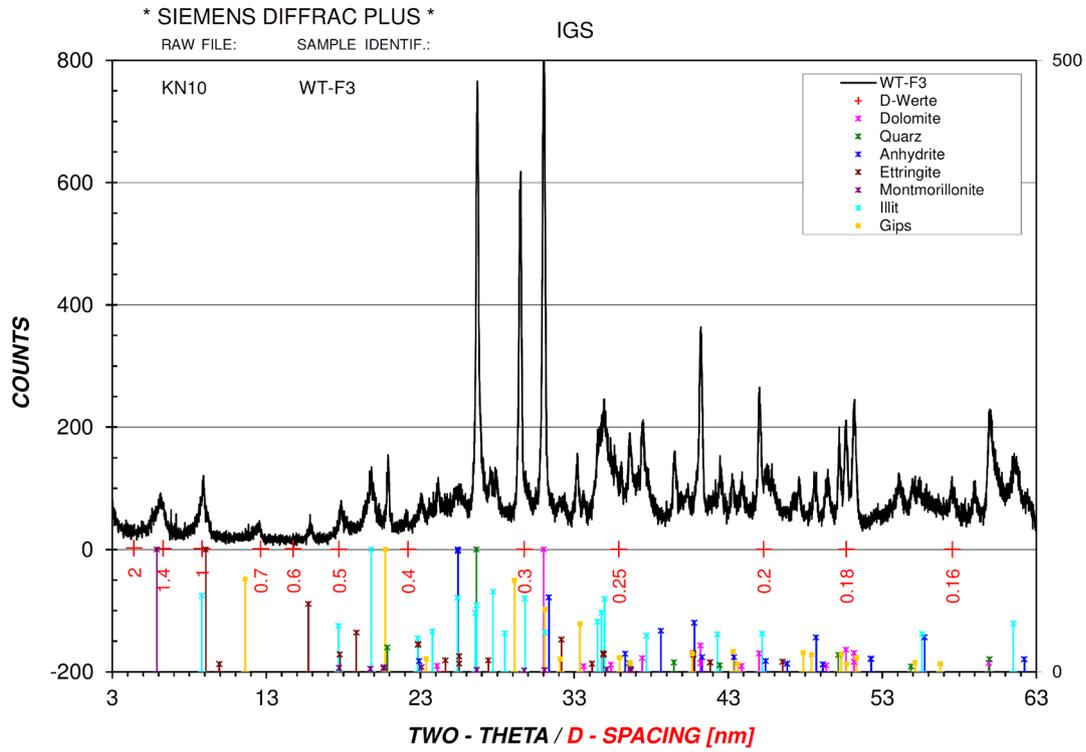
Anlage 8 Versuchsergebnisse Probenmaterial 3 (WTF3)



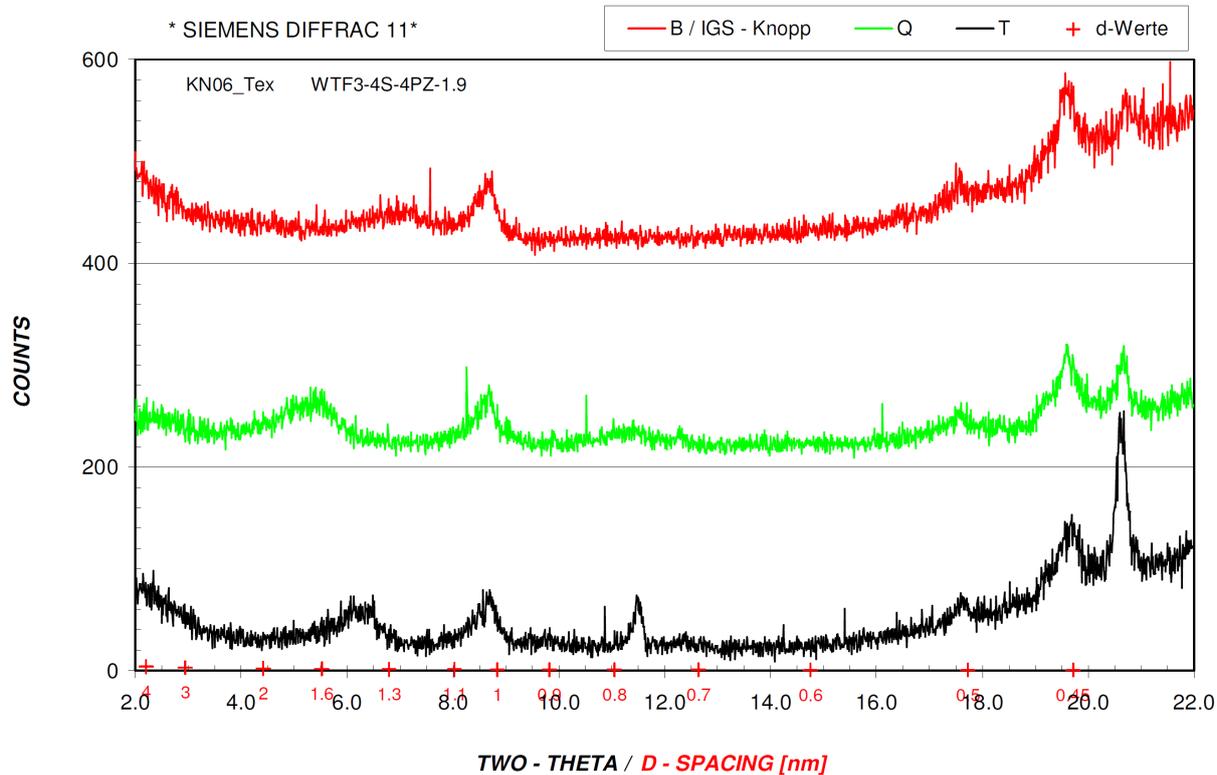
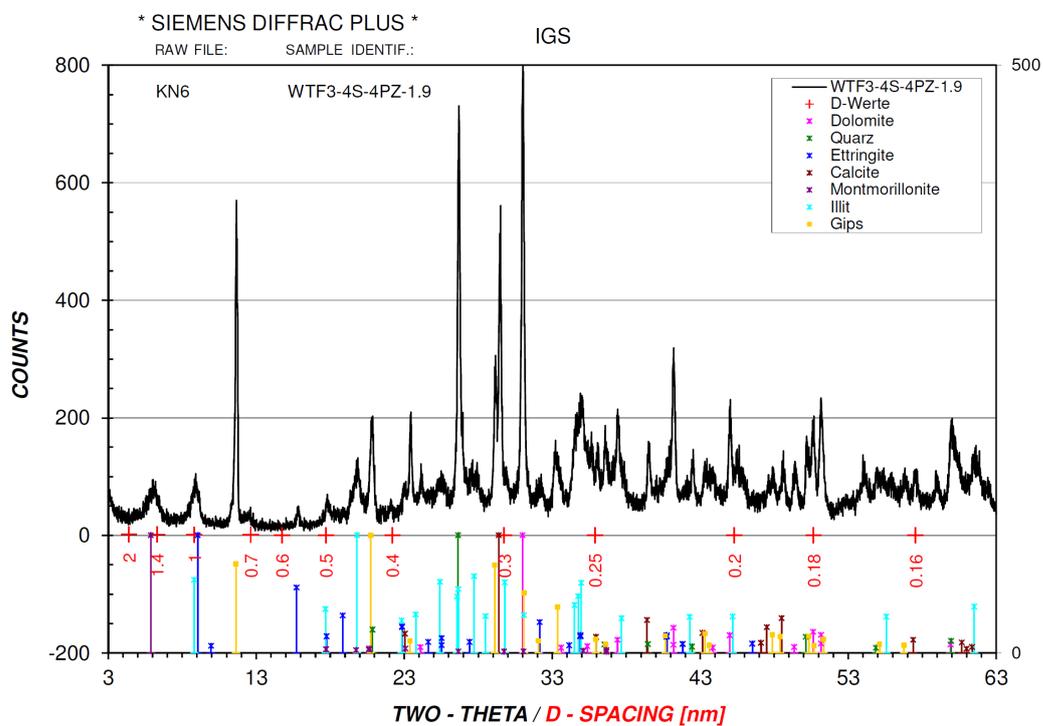
Anlage 8, Bild 1: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen)



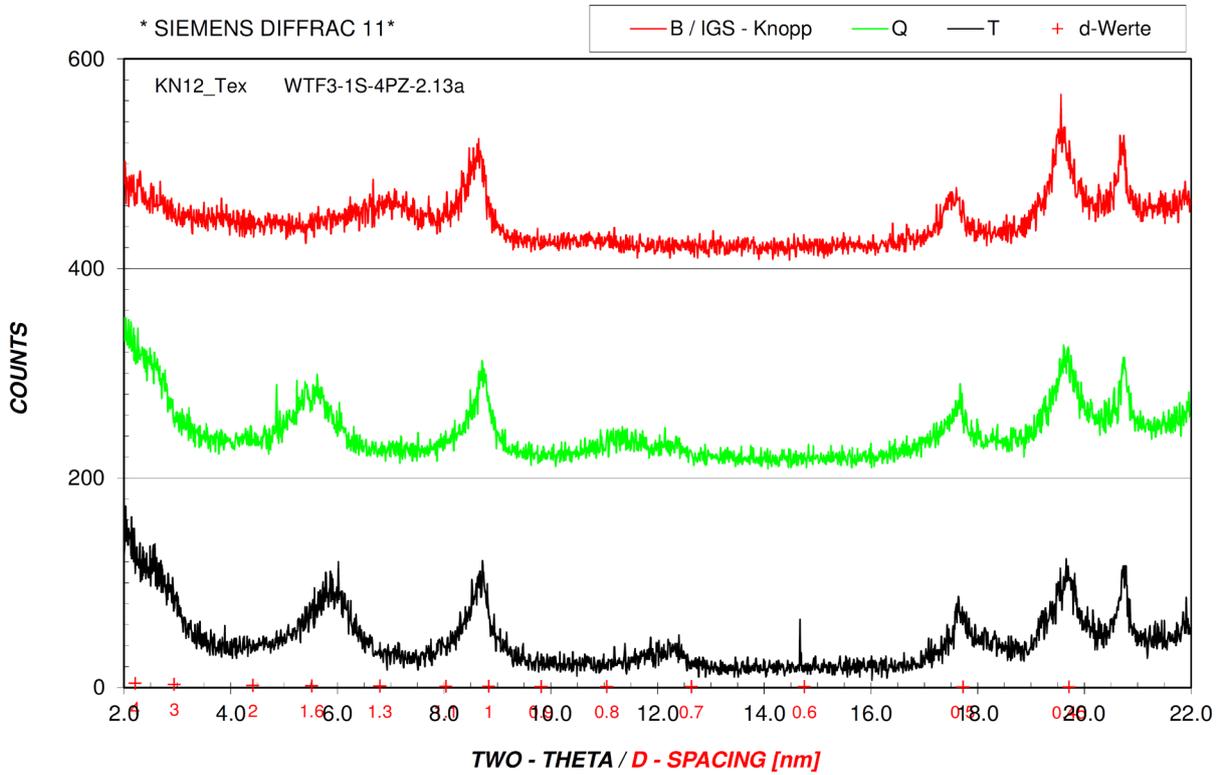
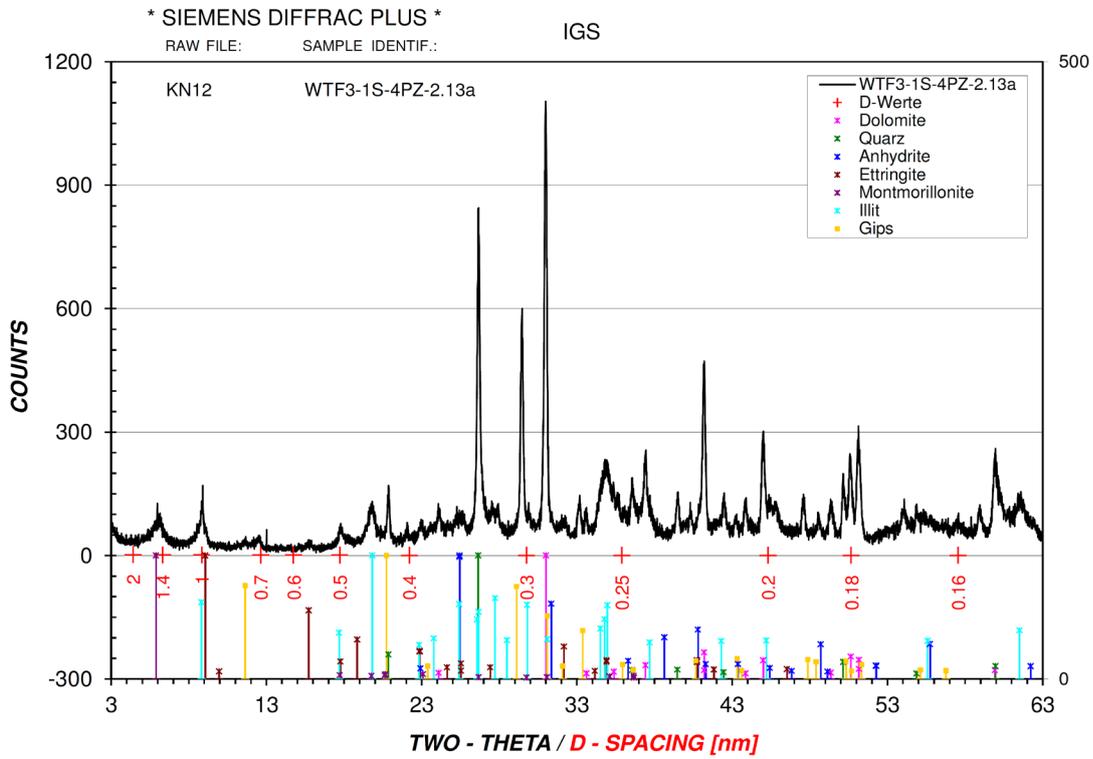
Anlage 8, Bild 2: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs (Zeit t in Tagen)



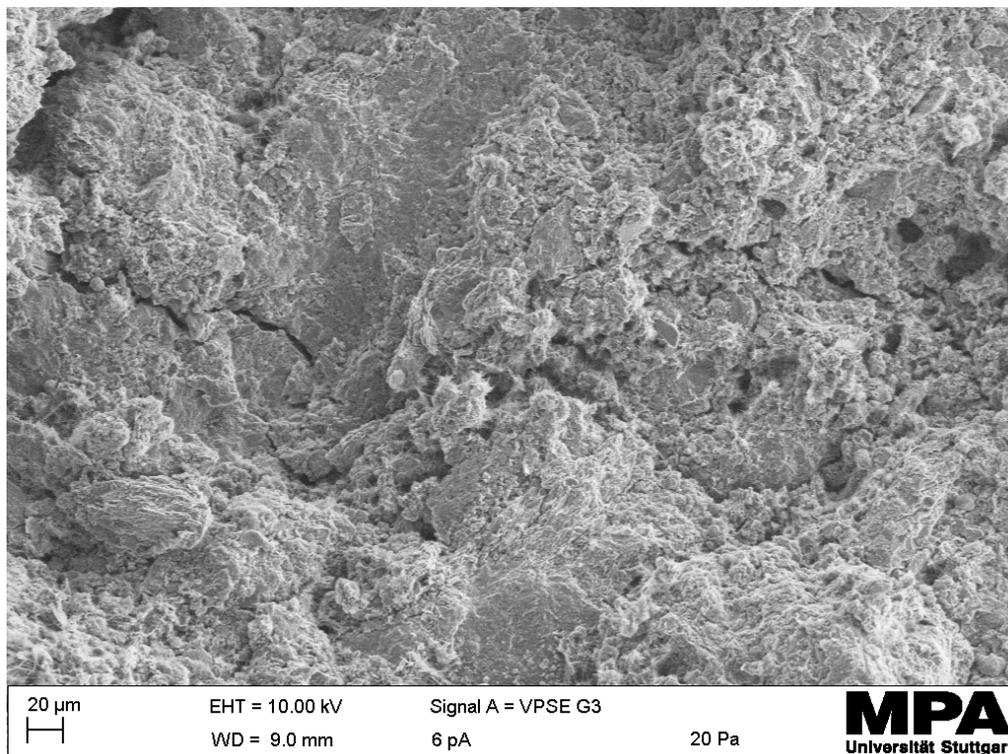
Anlage 8, Bild 3: XRD-Spektrum Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende. (Versuch 3.11)



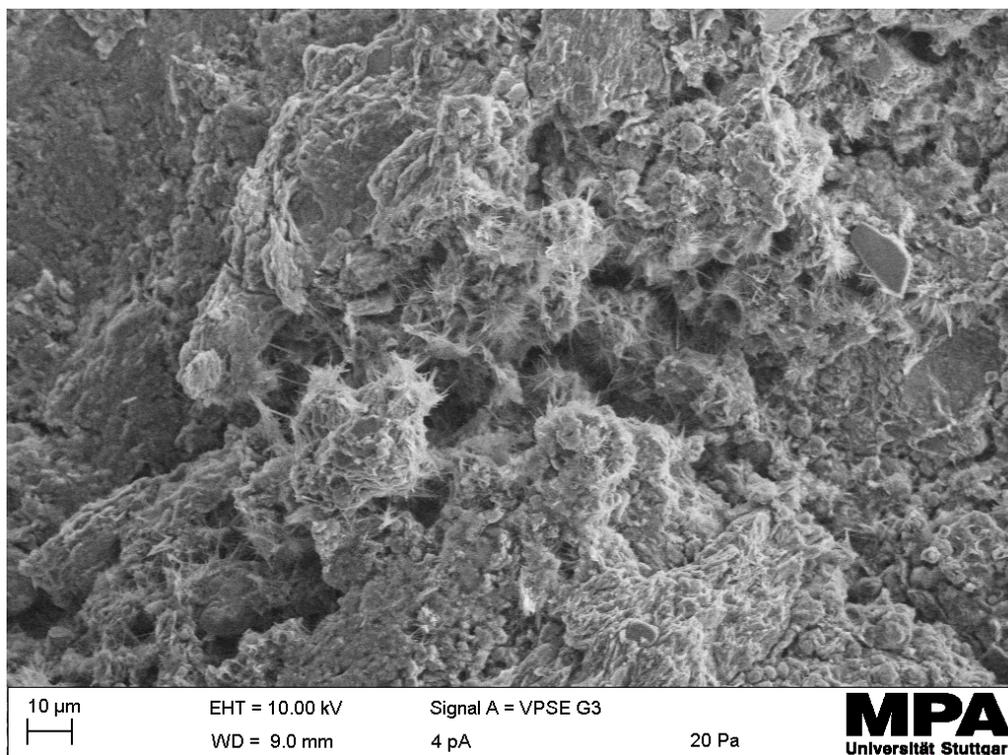
Anlage 8, Bild 4: XRD-Spektrum Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 40.000 ppm Sulfat nach Versuchsende. (Versuch 1.9)



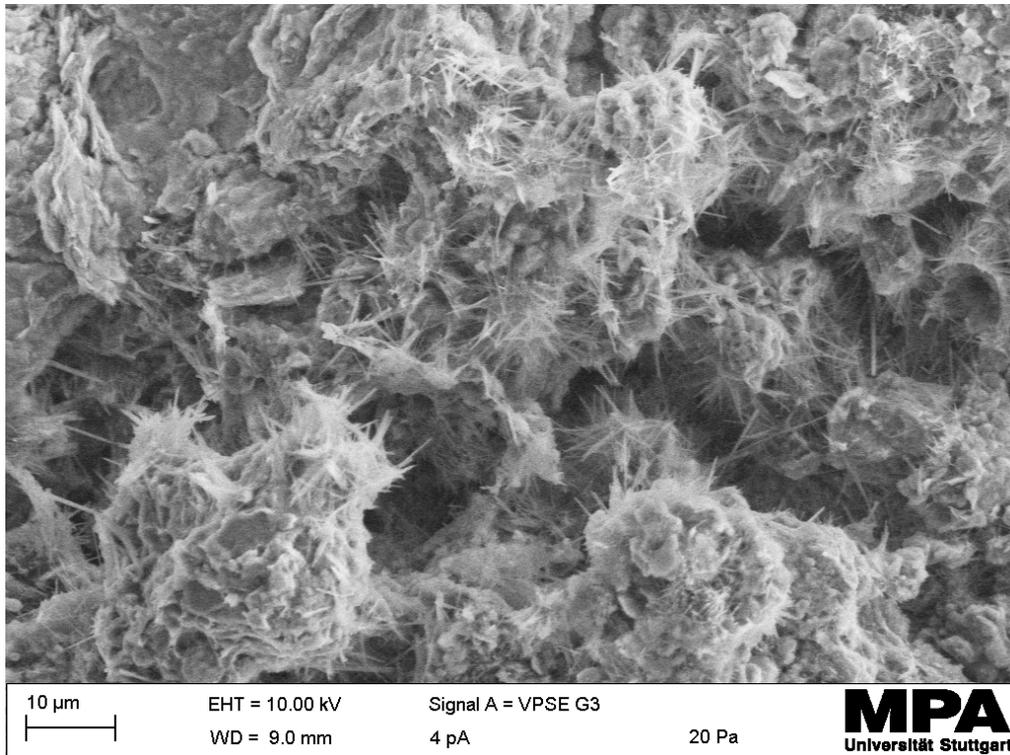
Anlage 8, Bild 5: XRD-Spektrum Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende. (Versuch 2.13a)



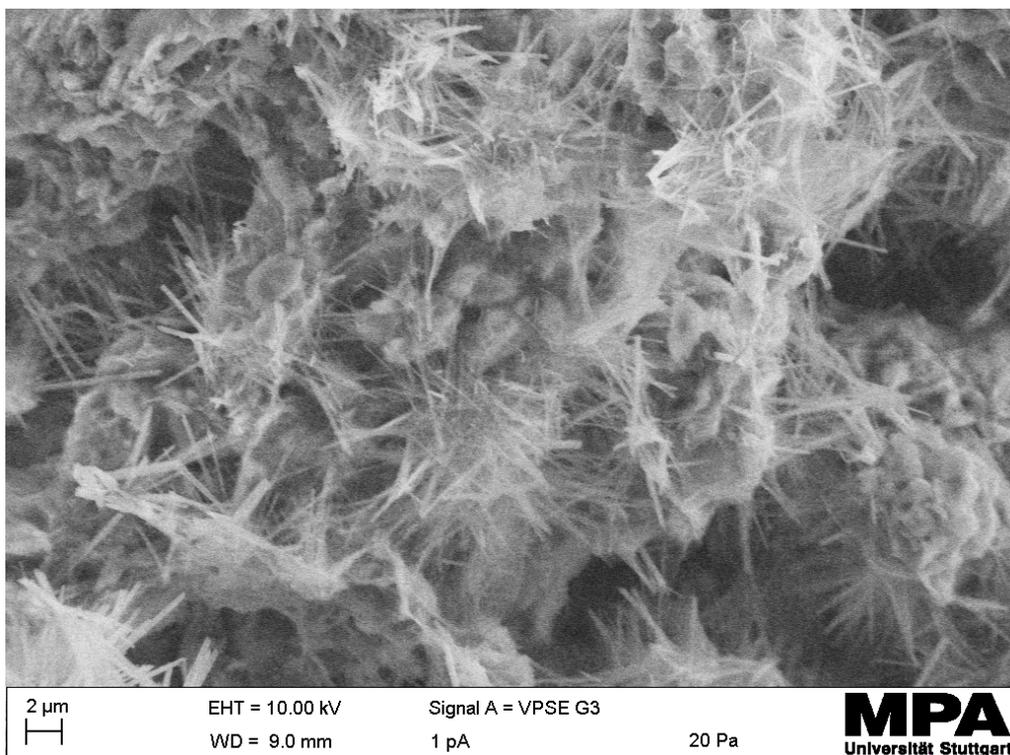
Anlage 8, Bild 6: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 3.11). In dieser Vergrößerung noch keine Ettringitkristalle erkennbar.



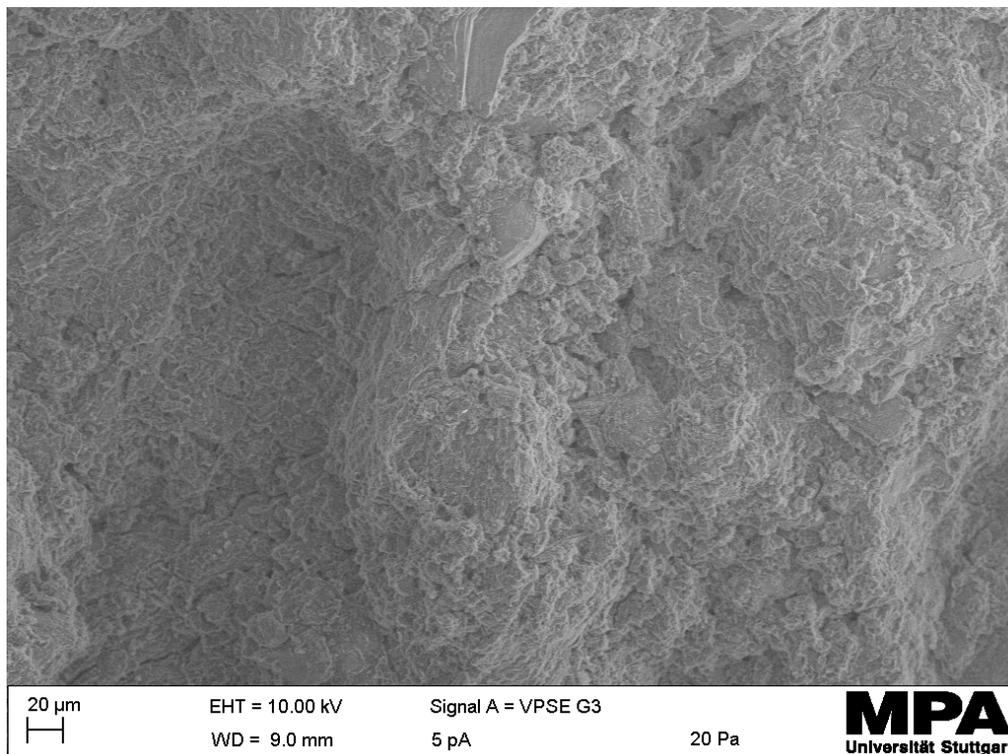
Anlage 8, Bild 7: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 3.11). Deutlich nadelförmige Kristalle erkennbar, vor allem in den Rissbereichen.



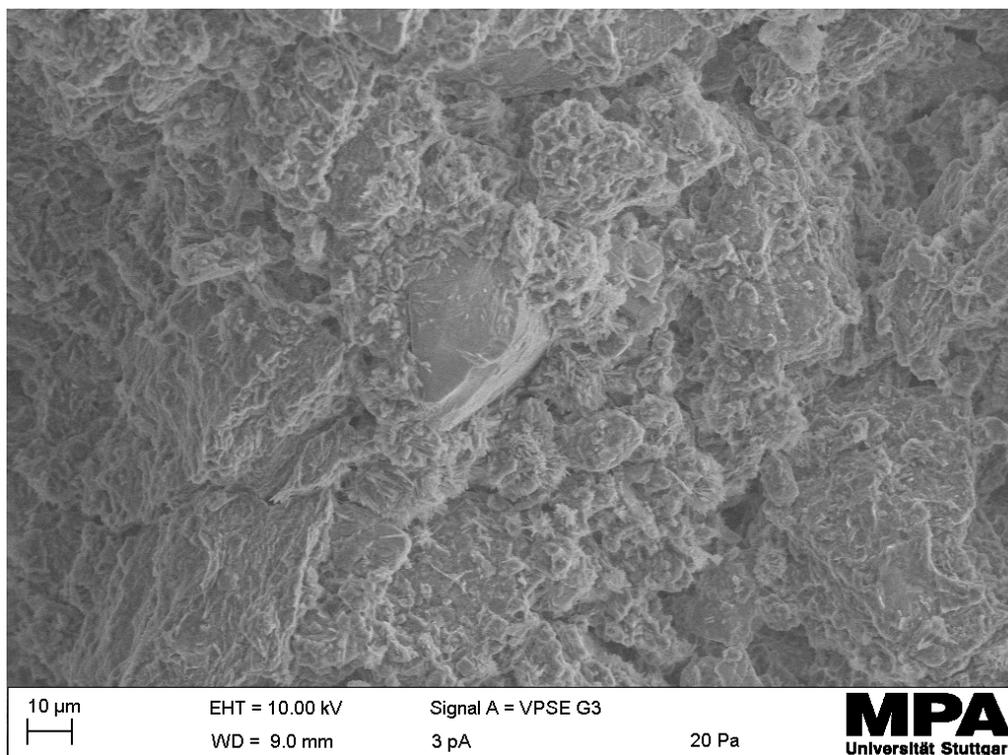
Anlage 8, Bild 8: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 3.11). Langen, dünnen Ettringitnadeln erkennbar.



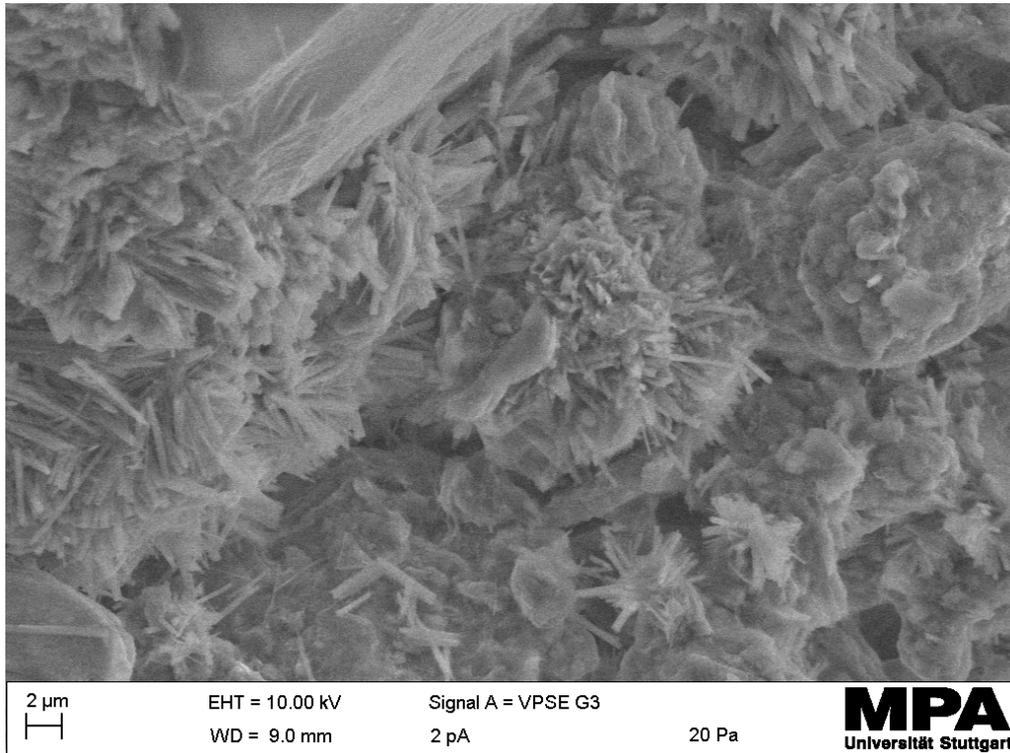
Anlage 8, Bild 9: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 3.11). Aufnahme der langen, dünnen Ettringitnadeln.



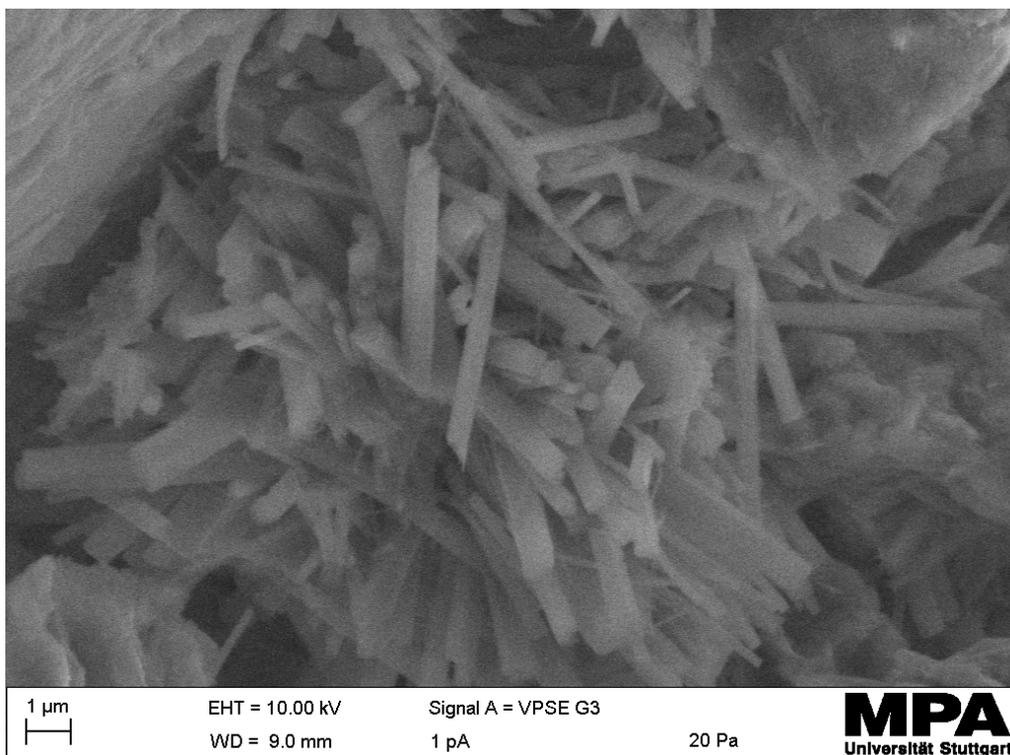
Anlage 8, Bild 10: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 40.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.9). Ettringitkristalle noch keine erkennbar.



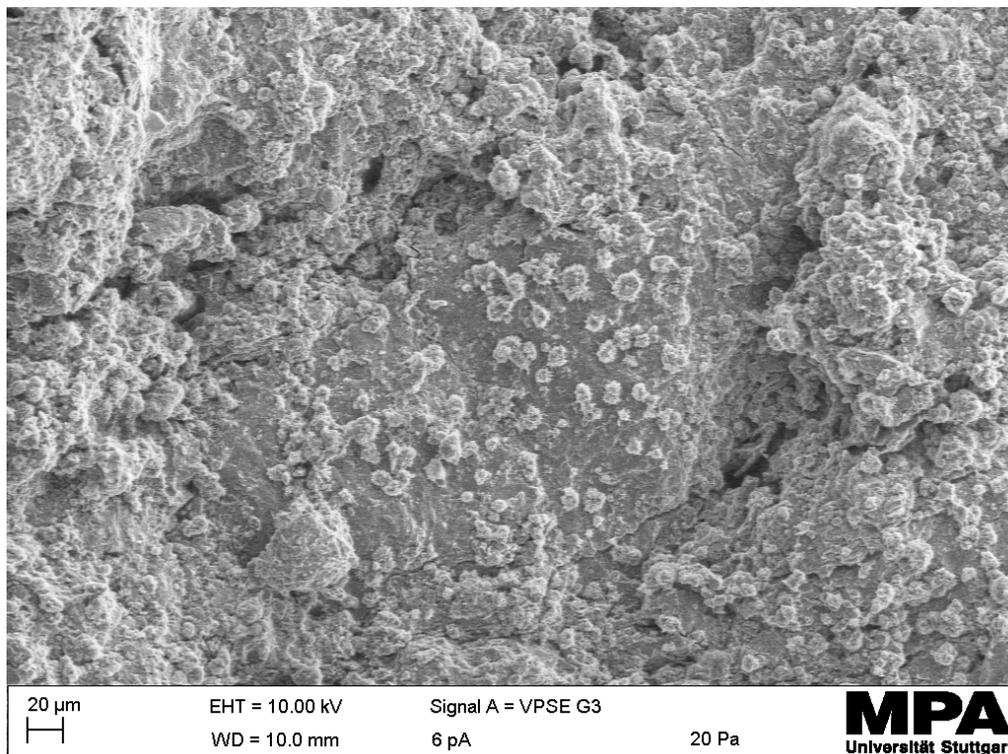
Anlage 8, Bild 11: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 40.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.9). Großflächige, dichte Verteilung von Ettringitkristalle, entlang der anderen Minerale, vorl allem in Rissbereichen,



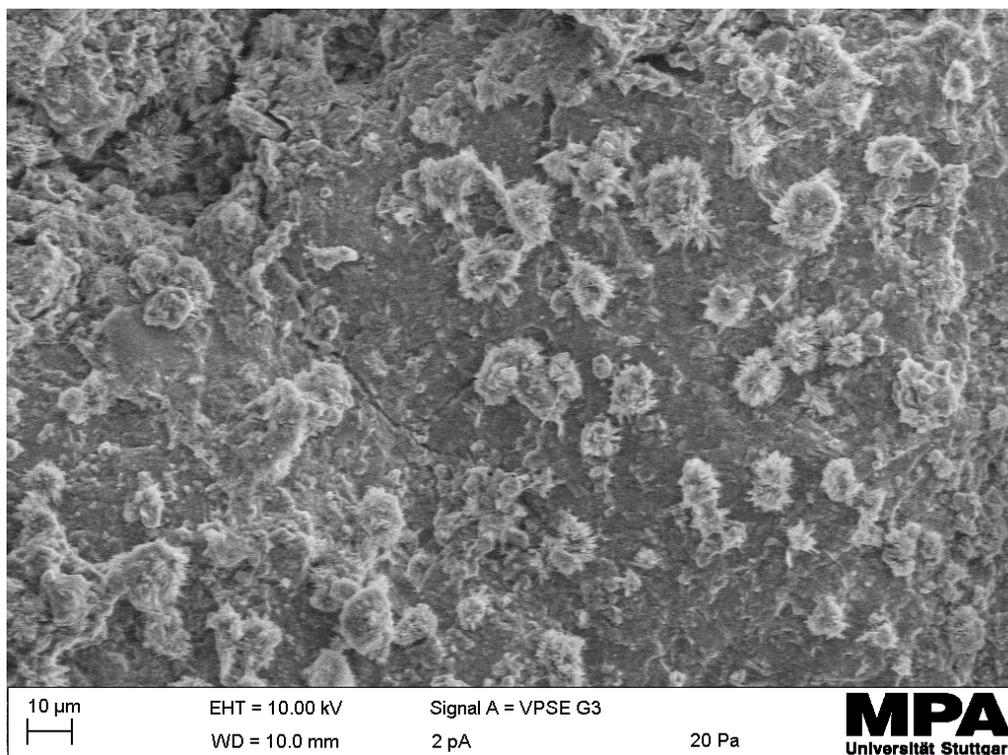
Anlage 8, Bild 12: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 40.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.9). Großflächige, dichte Verteilung von Ettringitkristallen, allerdings mit nur relativ kurzen Nadeln.



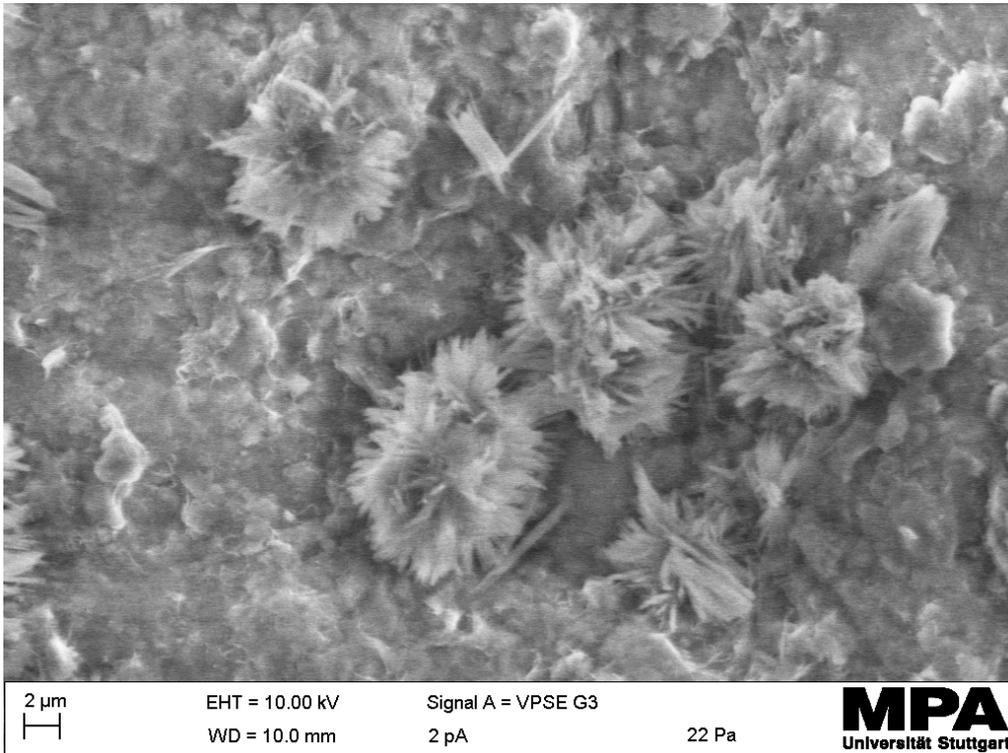
Anlage 8, Bild 13: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 40.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.9). Aufnahme der relativ kurzen Ettringitnadeln.



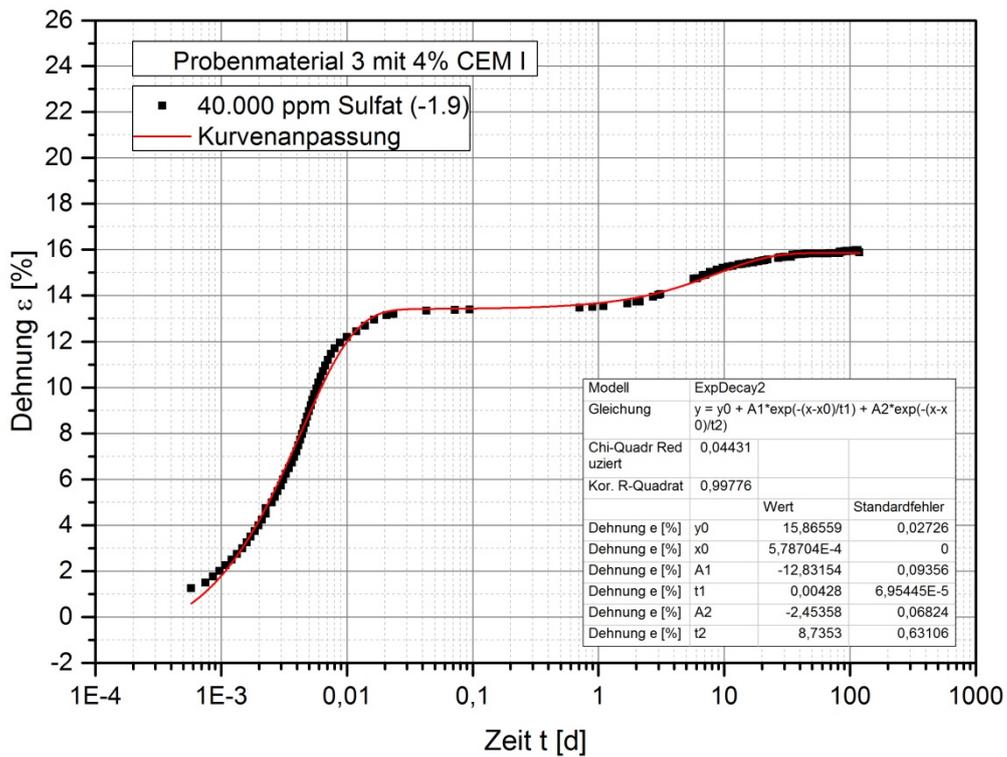
Anlage 8, Bild 14: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 2.13a). Ettringitkristalle bereits in dieser Auflösung erkennbar. Die Neubildungen sind weit verteilt.



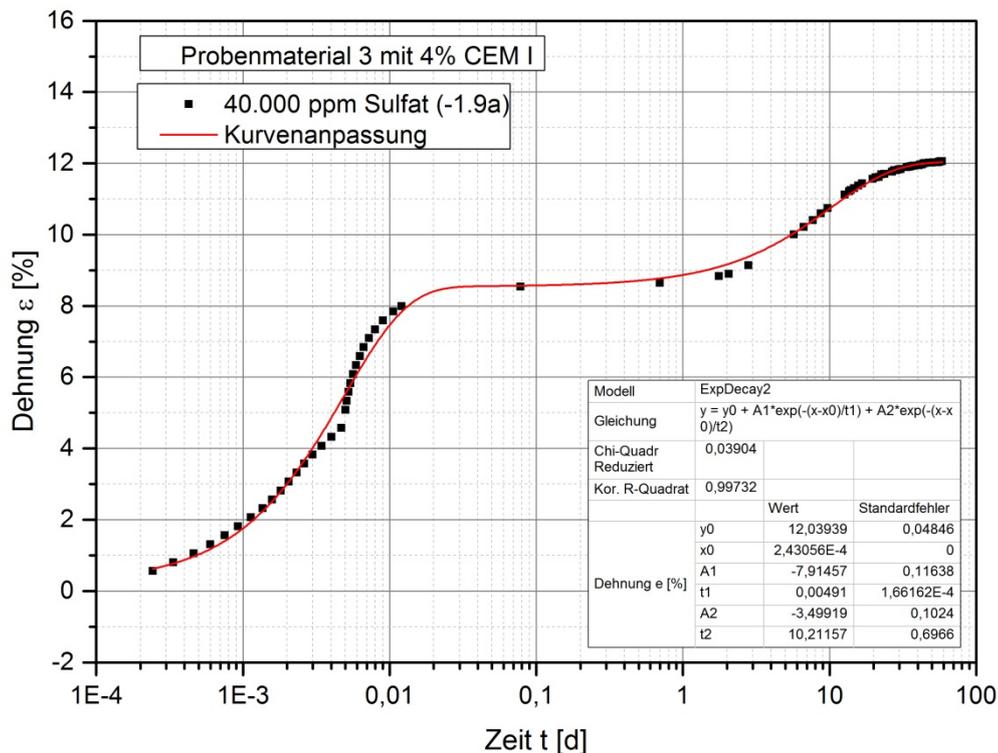
Anlage 8, Bild 15: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 2.13a). Weit auseinanderliegende Bildung von Ettringitkristallen.



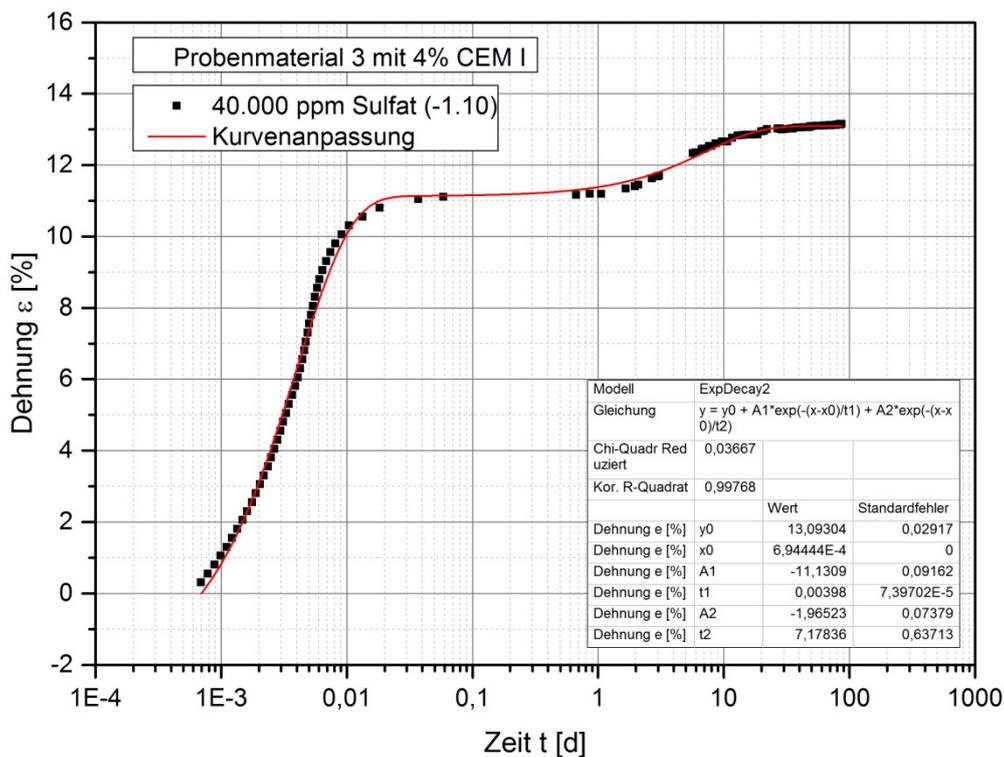
Anlage 8, Bild 16: REM-Aufnahme Probenmaterial 3 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 2.13a). Aufnahme der hier relativ kurzen Ettringitnadeln.



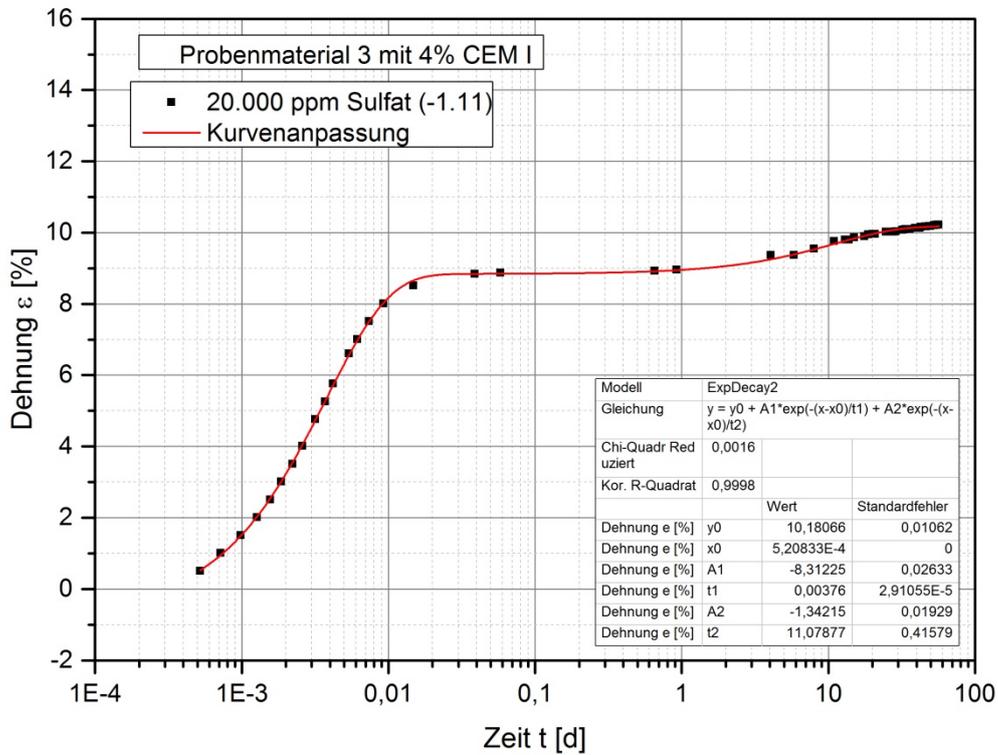
Anlage 8, Bild 17: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.9 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



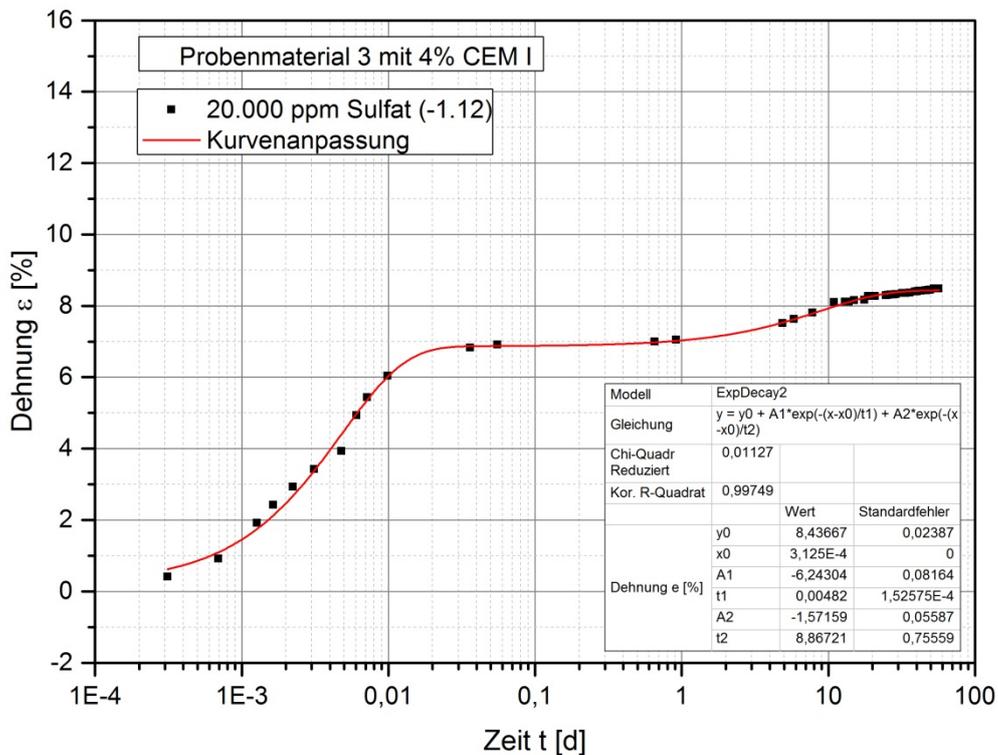
Anlage 8, Bild 18: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.9a (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



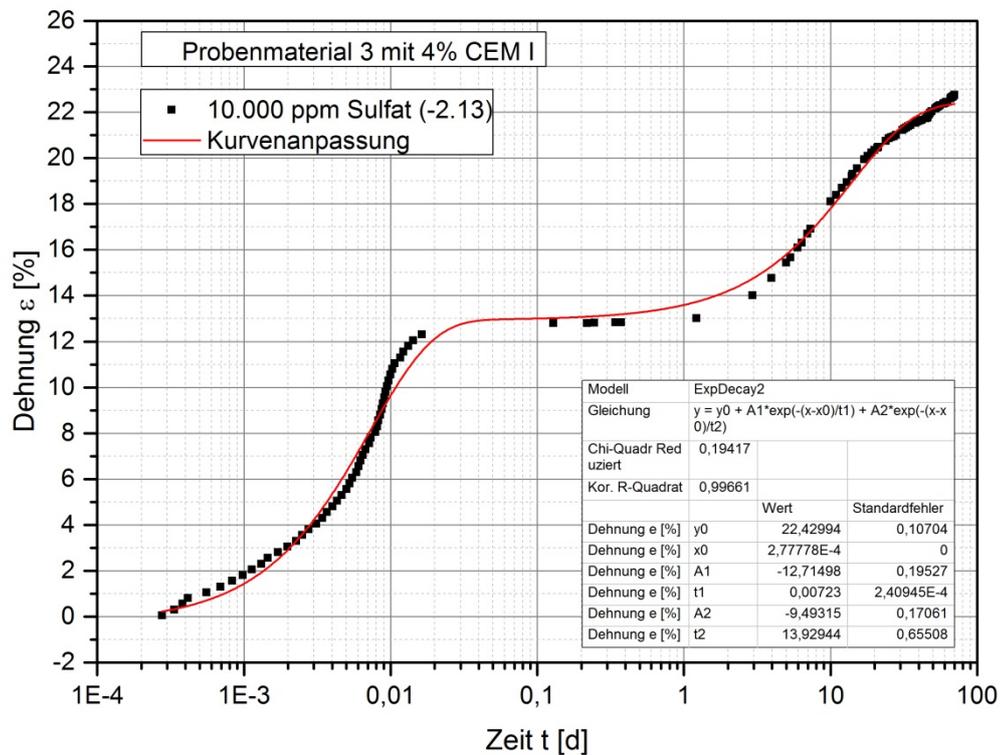
Anlage 8, Bild 19: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.10 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



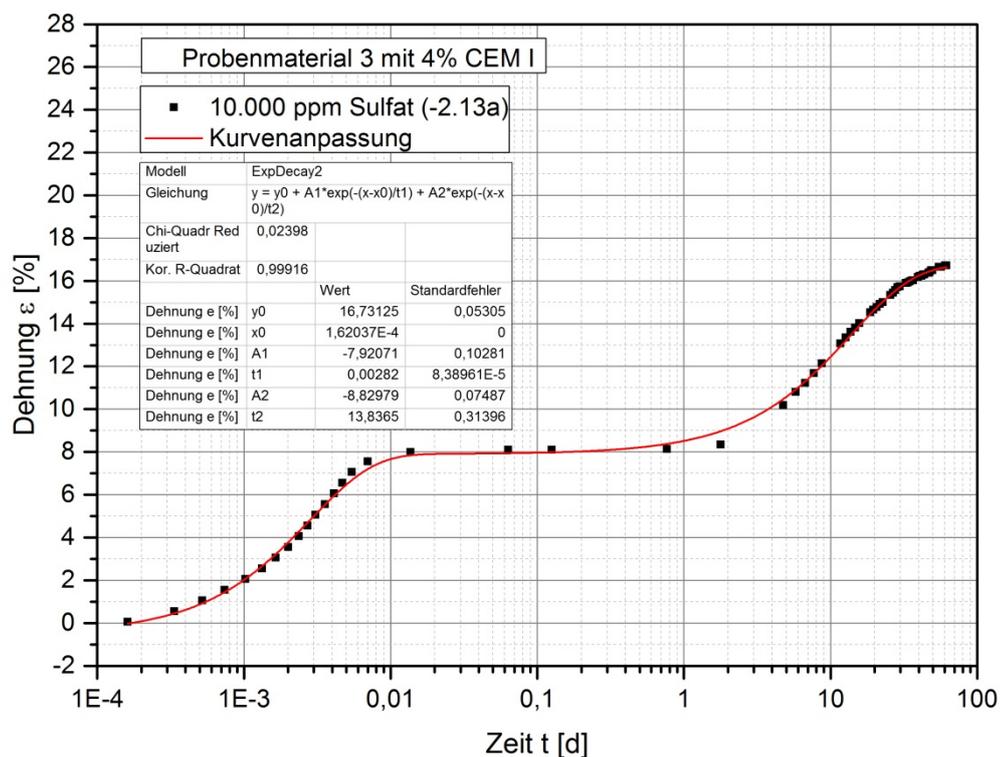
Anlage 8, Bild 20: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.11 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



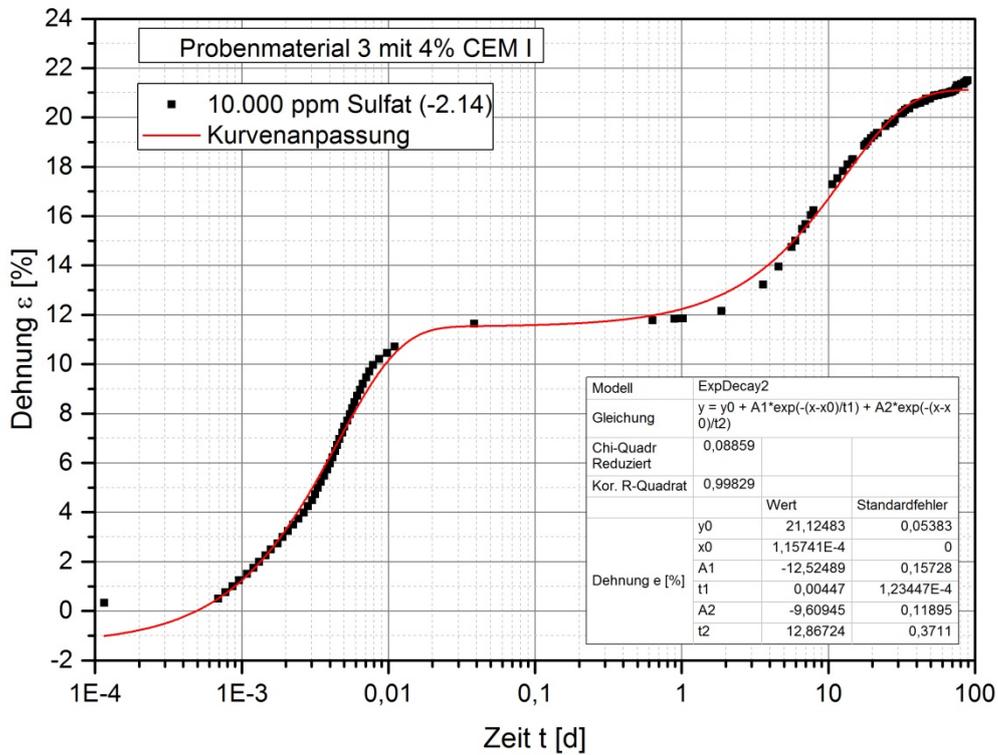
Anlage 8, Bild 21: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.12 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



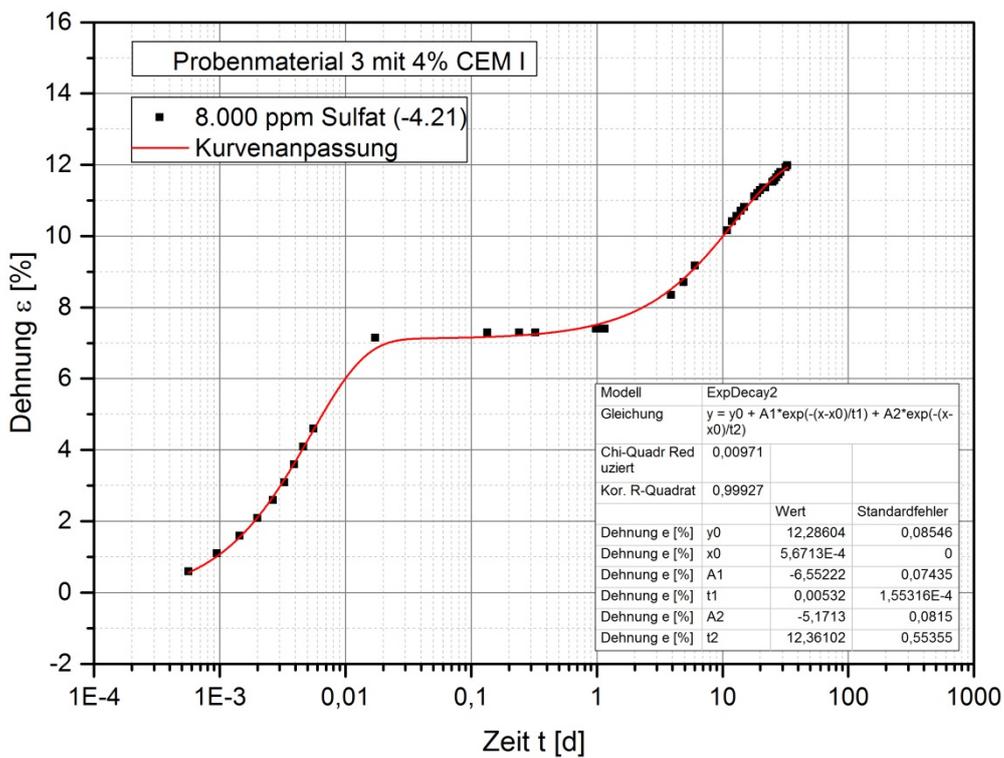
Anlage 8, Bild 22: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.13 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



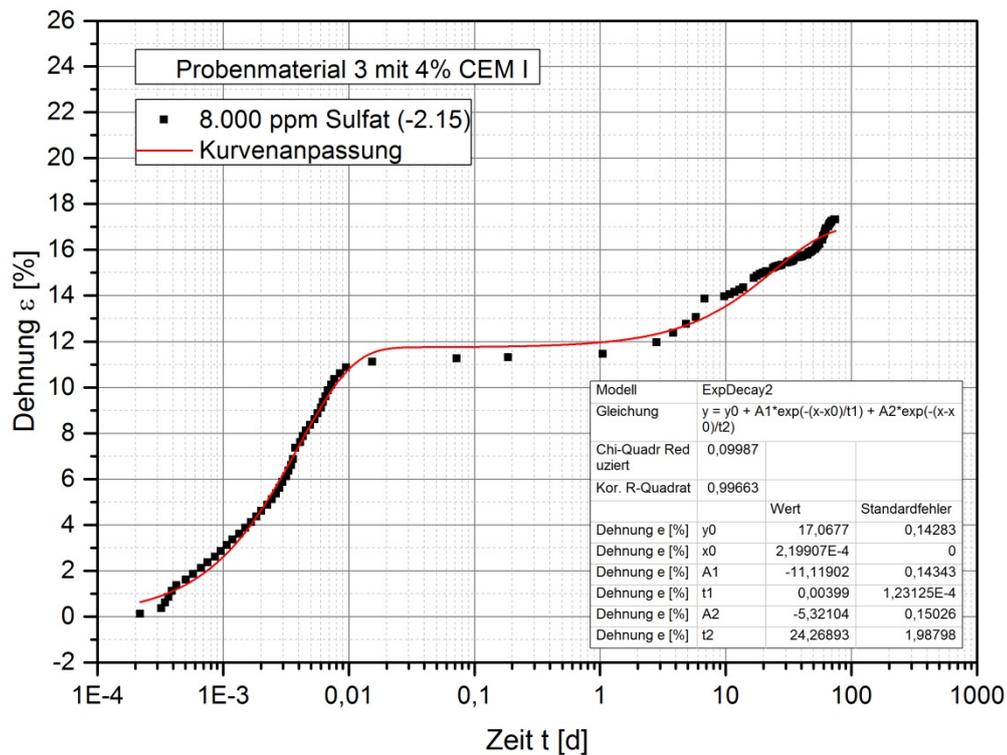
Anlage 8, Bild 23: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.13a (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



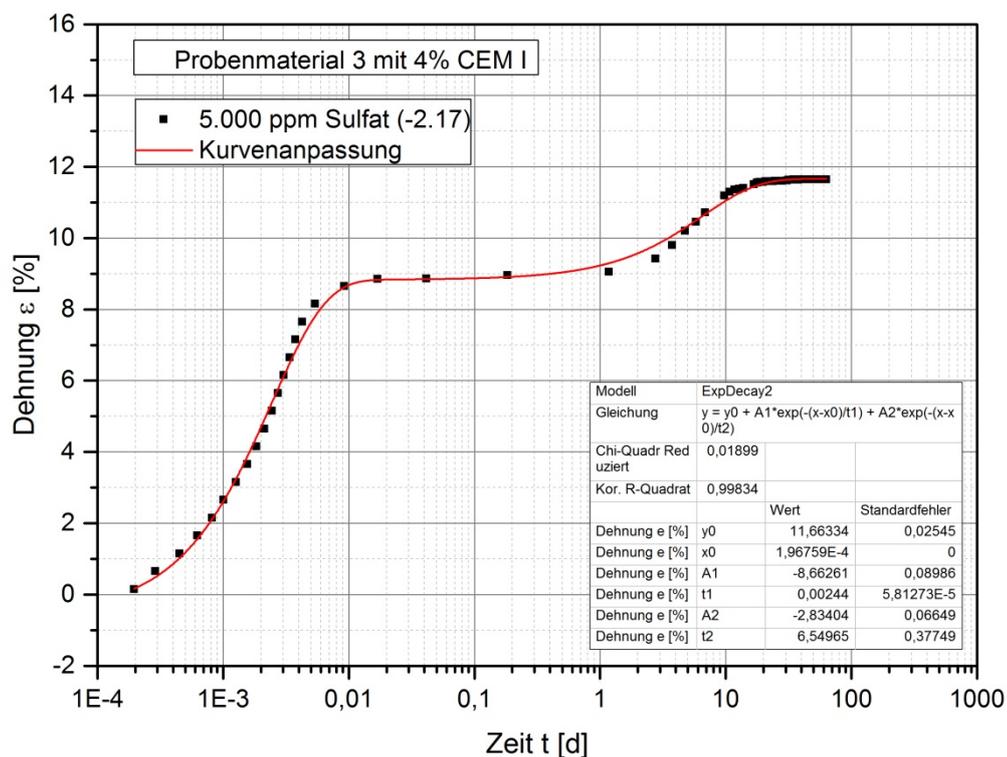
Anlage 8, Bild 24: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.14 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



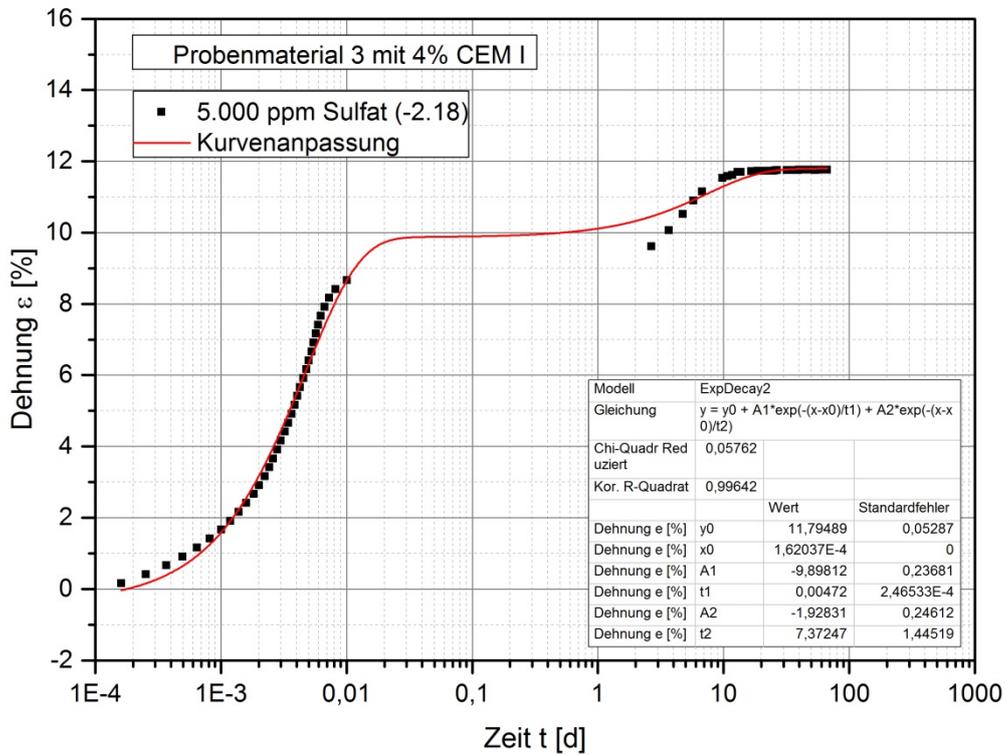
Anlage 8, Bild 25: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.21 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



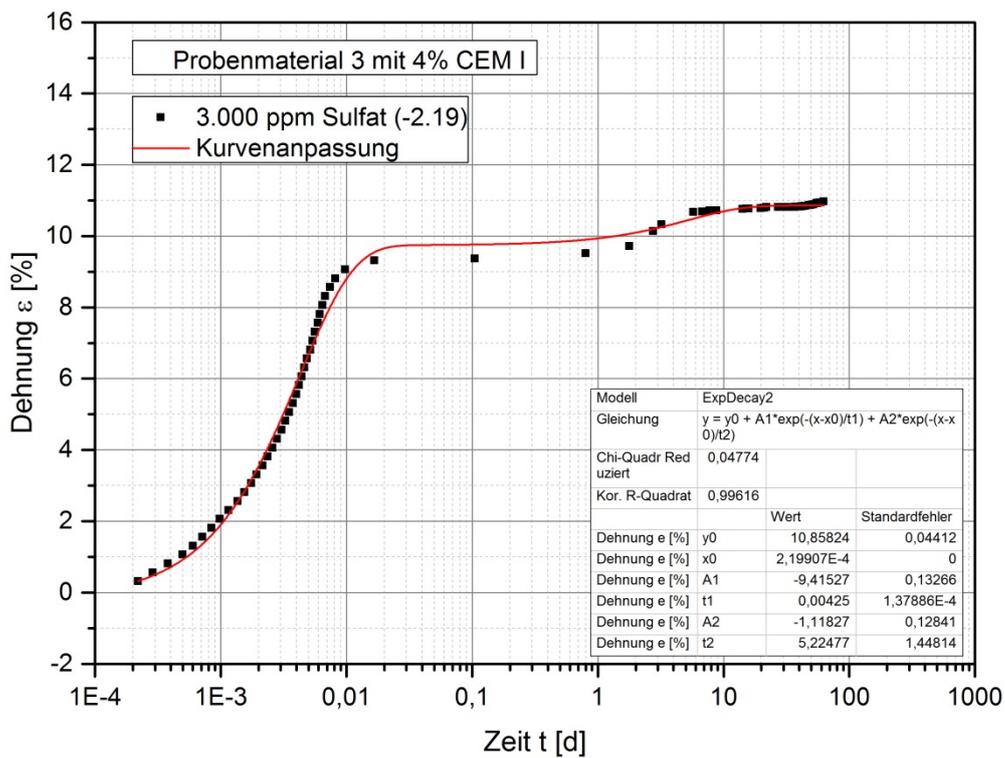
Anlage 8, Bild 26: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.15 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



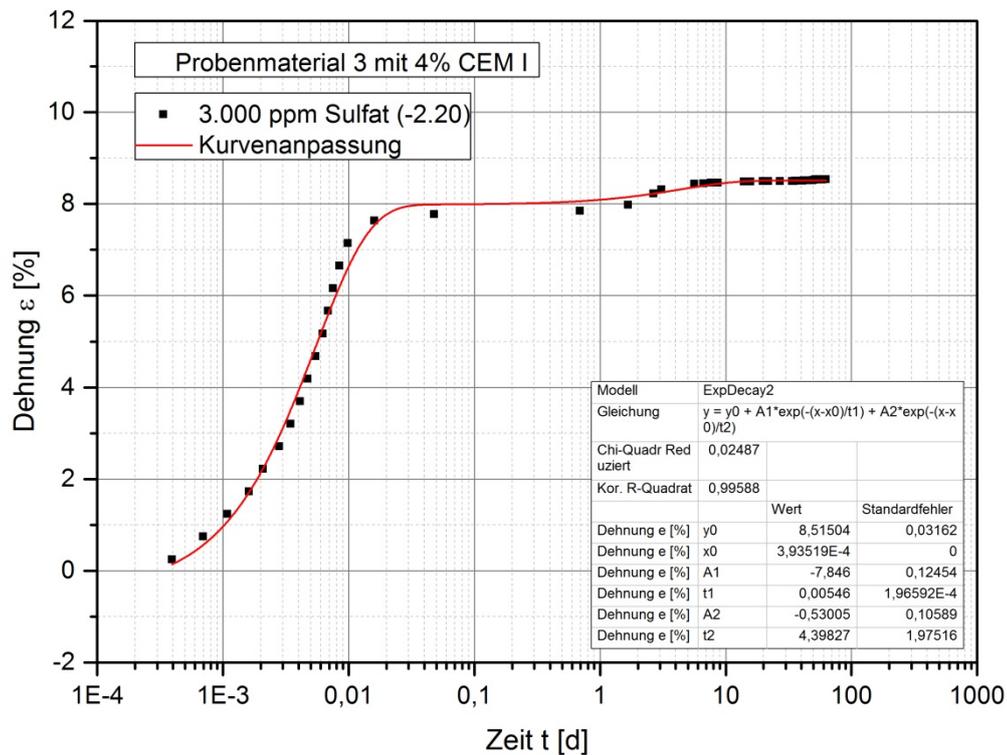
Anlage 8, Bild 27: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.17 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



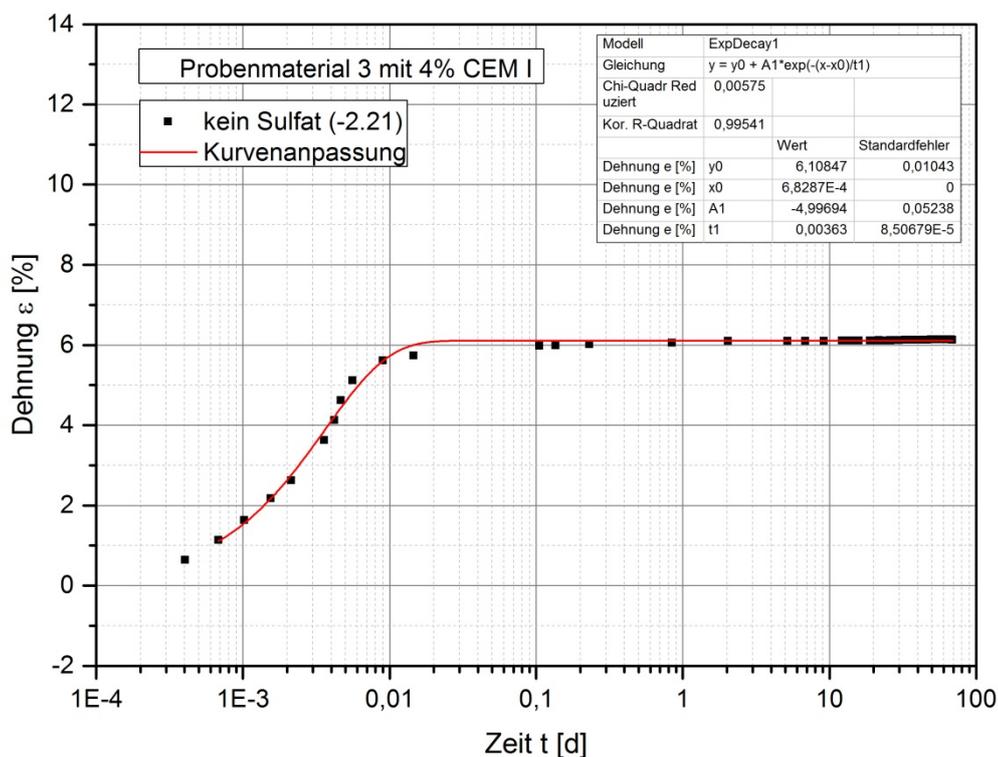
Anlage 8, Bild 28: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.18 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



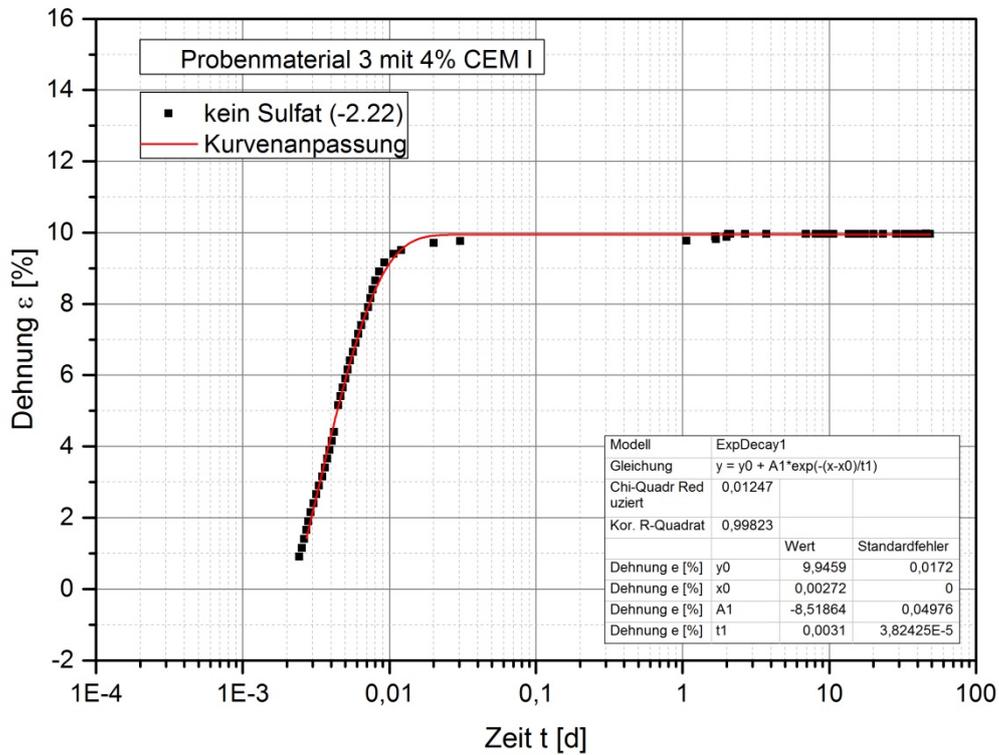
Anlage 8, Bild 29: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.19 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



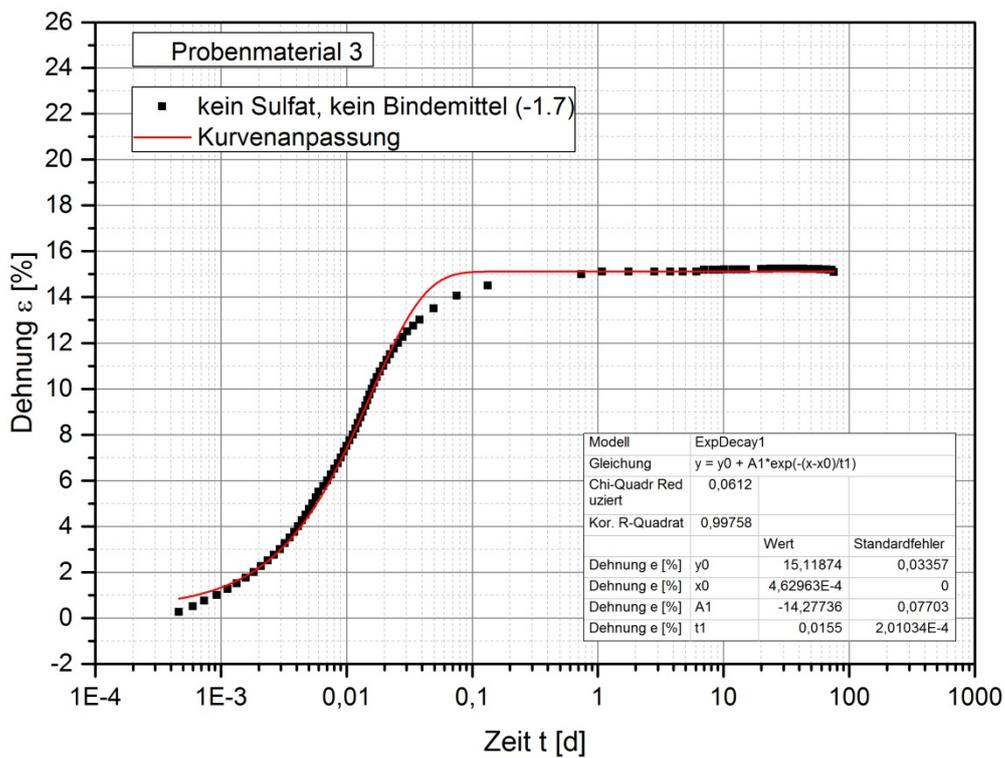
Anlage 8, Bild 30: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.20 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



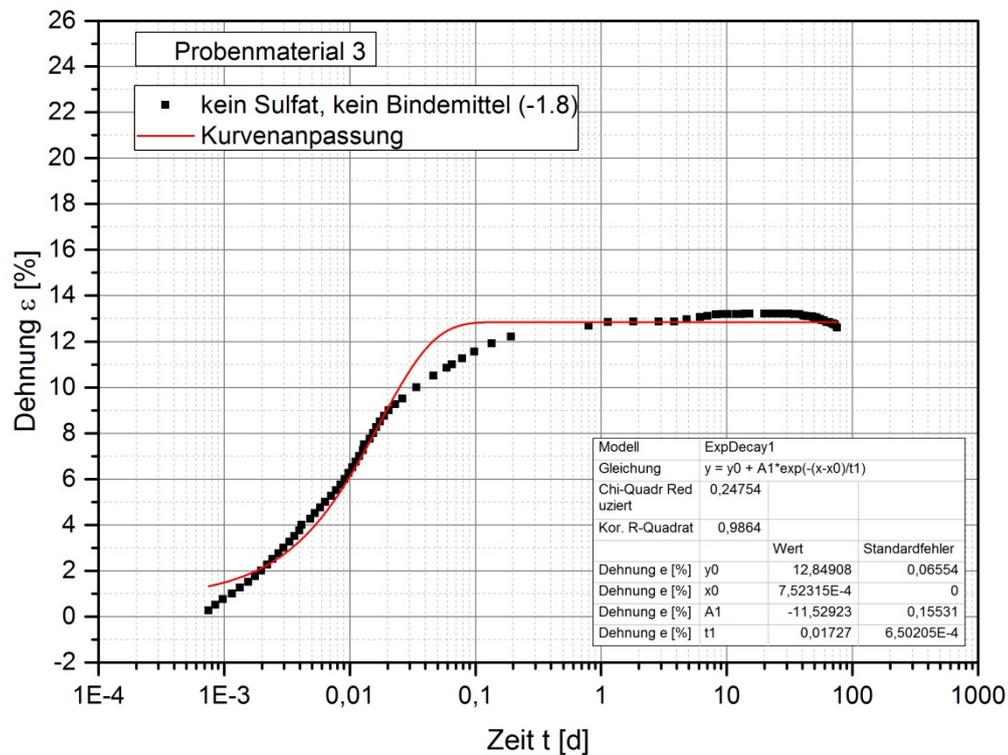
Anlage 8, Bild 31: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.21 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



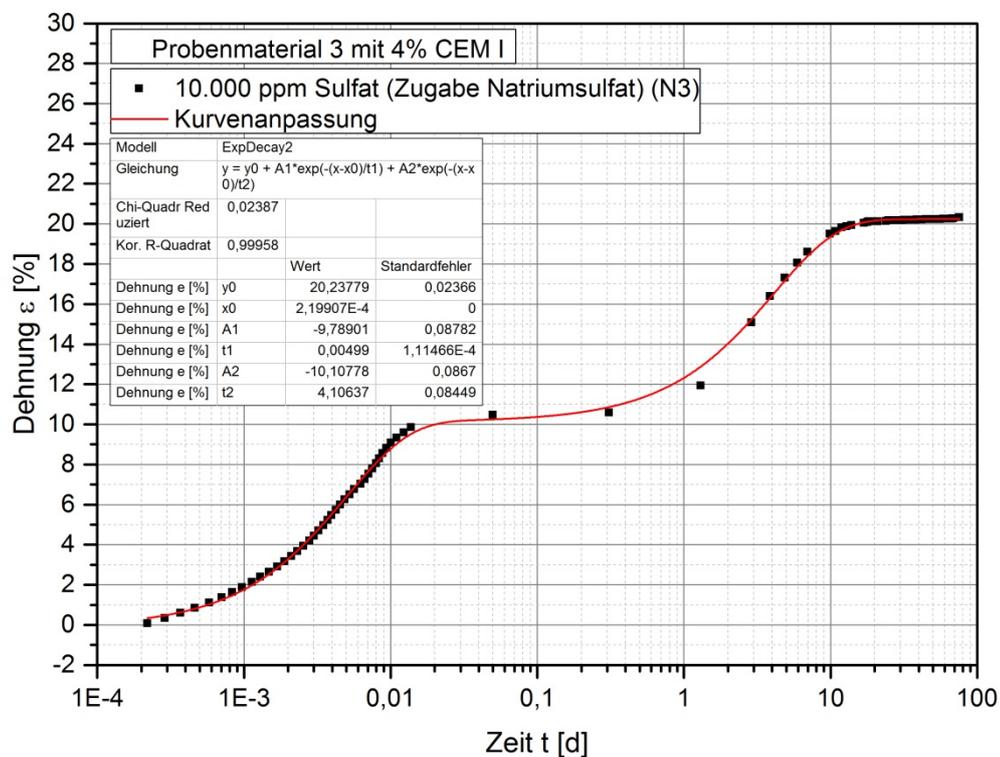
Anlage 8, Bild 32: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.22 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



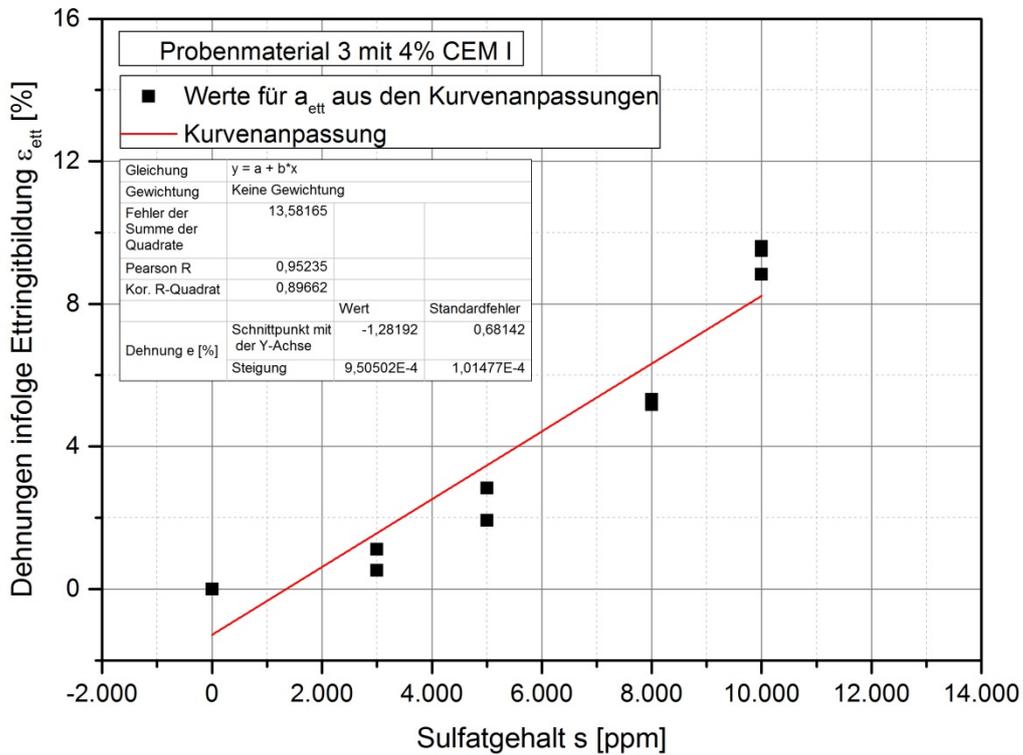
Anlage 8, Bild 33: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.7 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



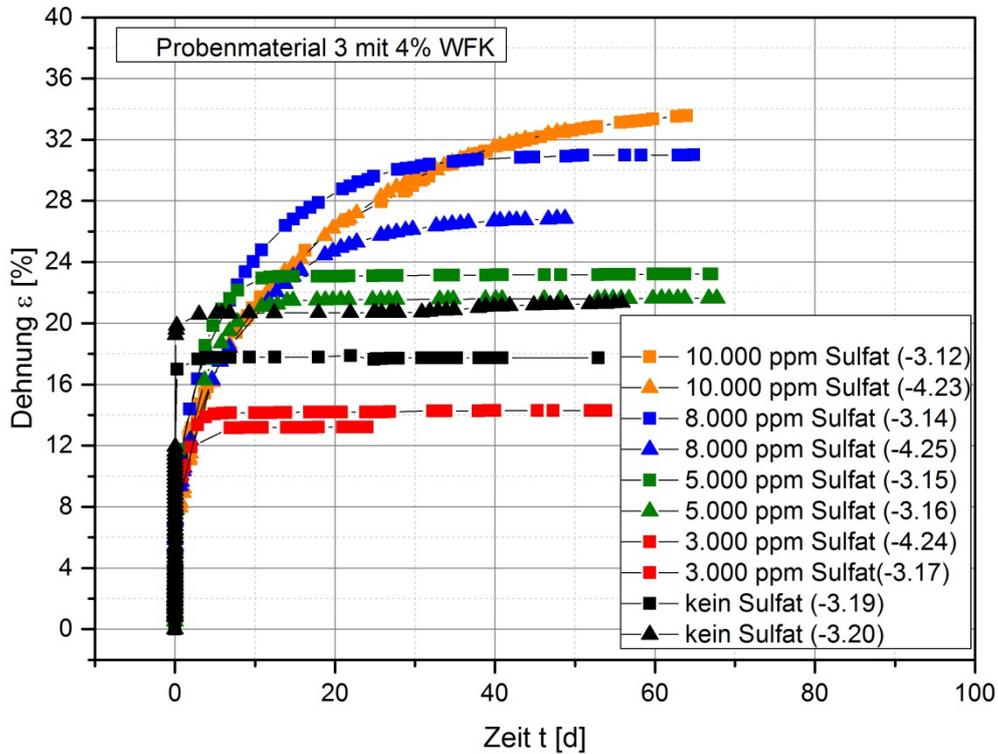
Anlage 8, Bild 34: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.8 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



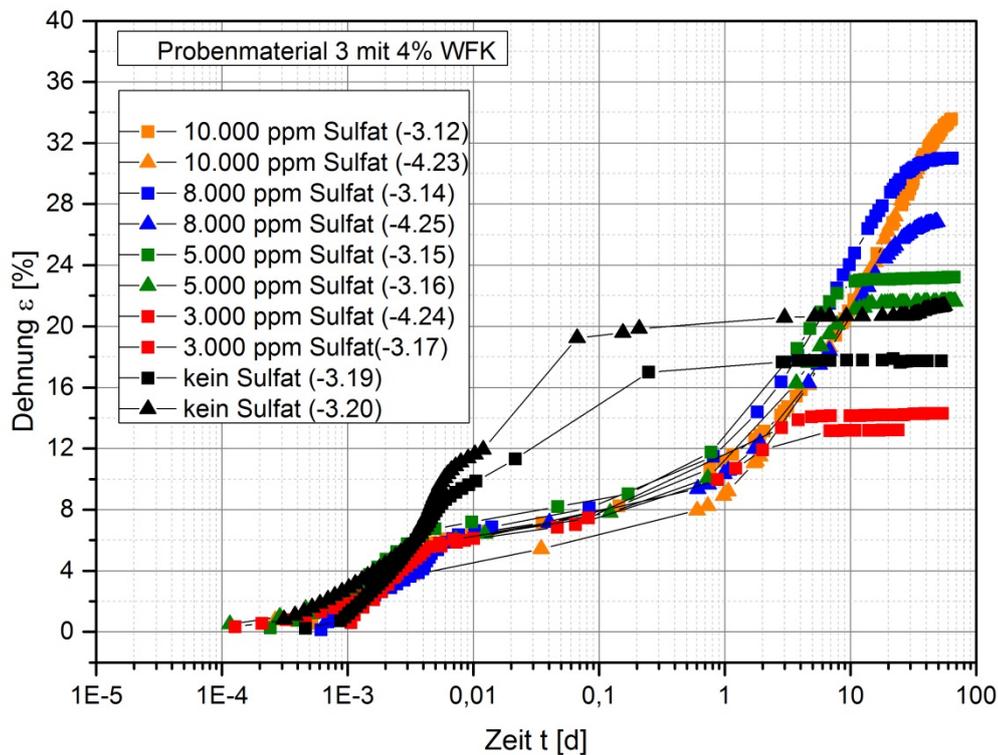
Anlage 8, Bild 35: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch N3 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



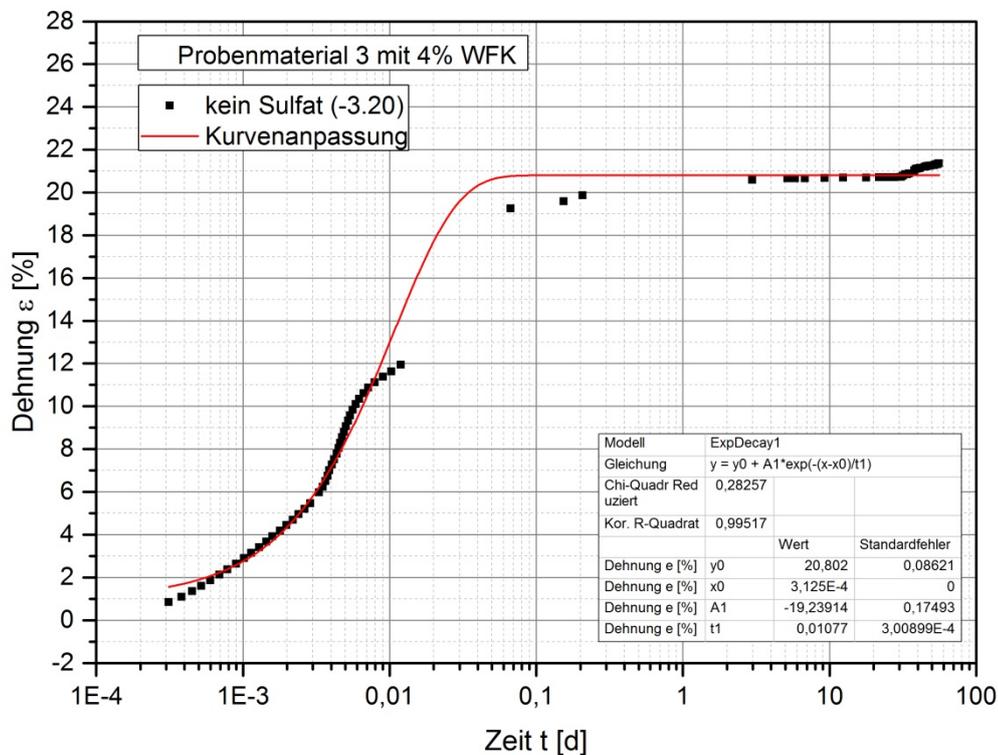
Anlage 8, Bild 36: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ermittelte Dehnungsbeträge. Die Gerade markiert die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 8.



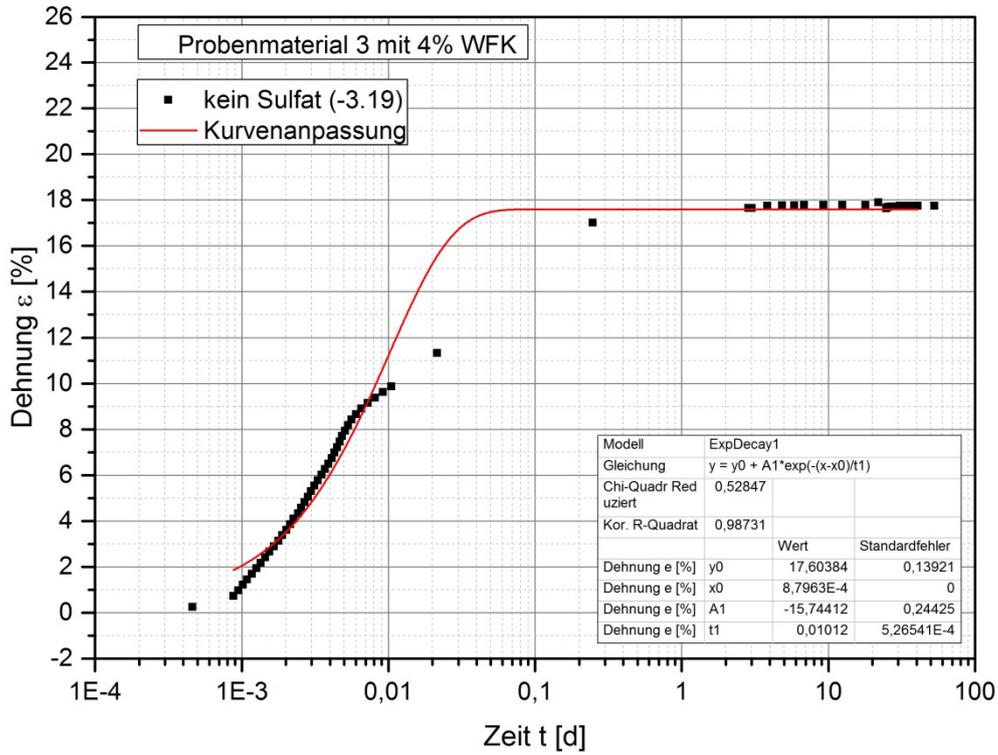
Anlage 8, Bild 37: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen)



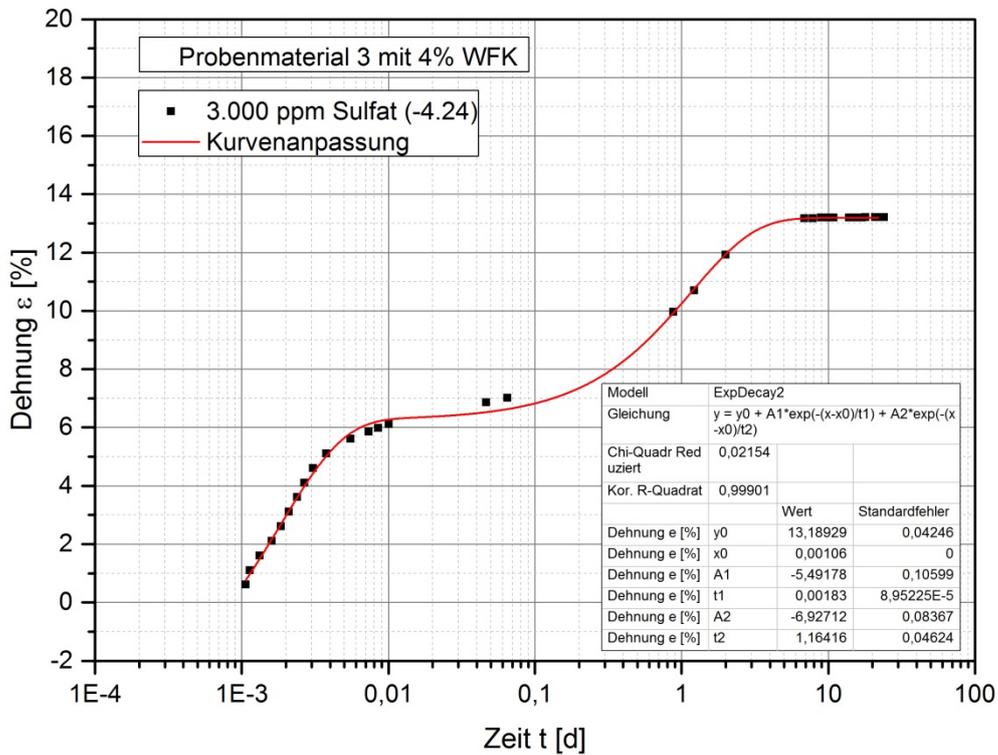
Anlage 8, Bild 38: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs (Zeit t in Tagen)



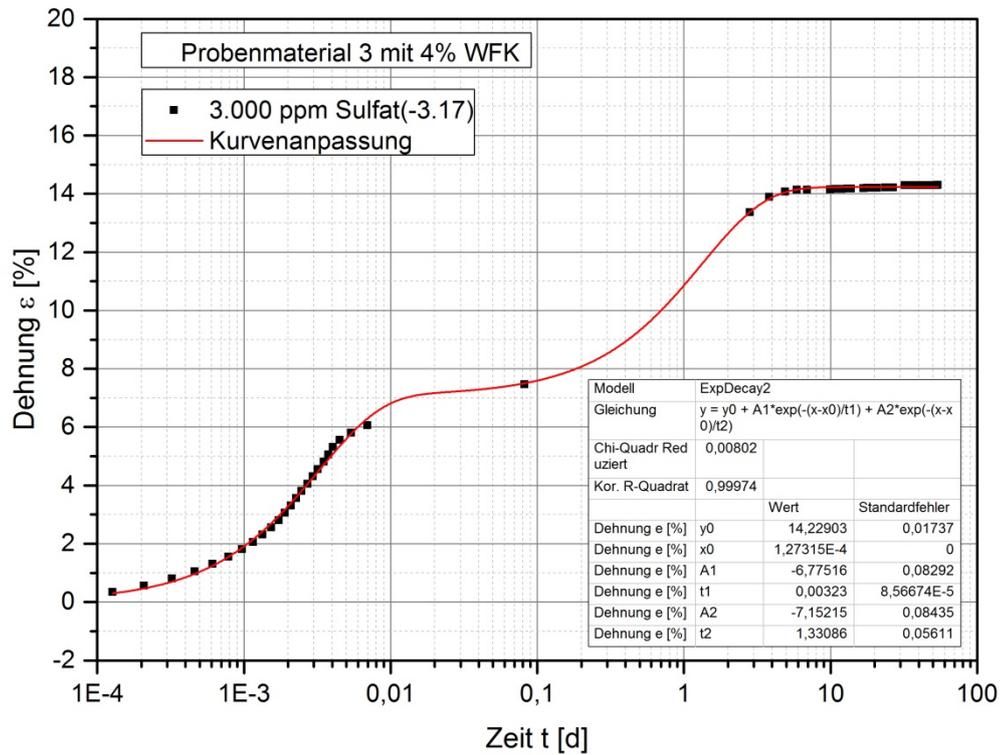
Anlage 8, Bild 39: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.20 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



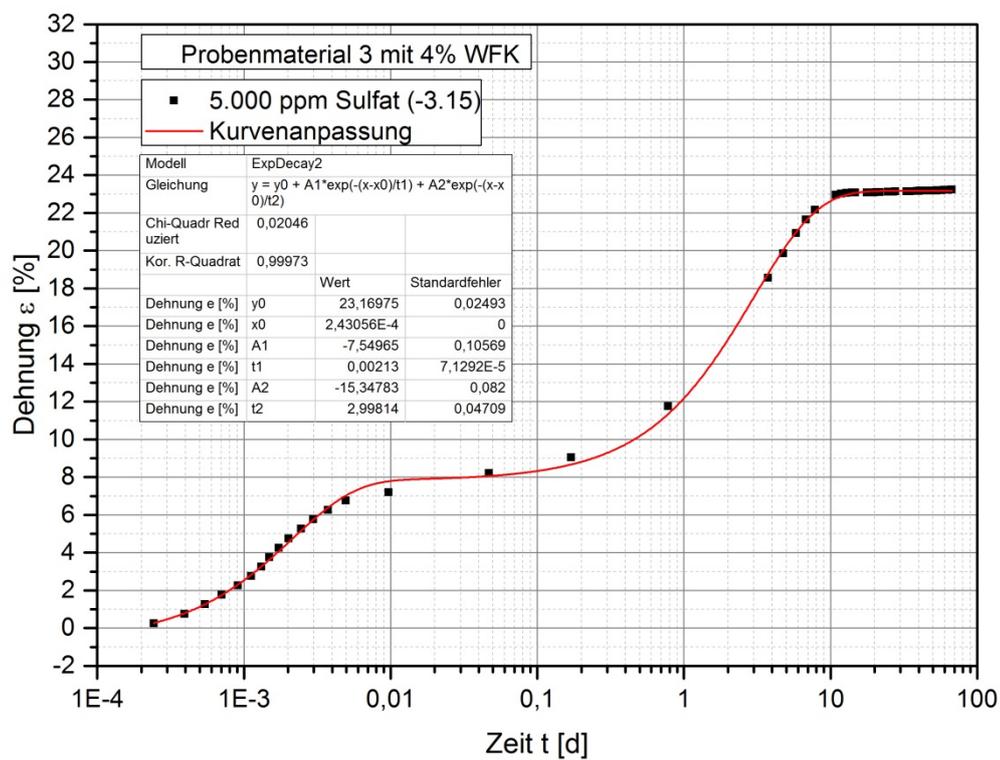
Anlage 8, Bild 40: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.19 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



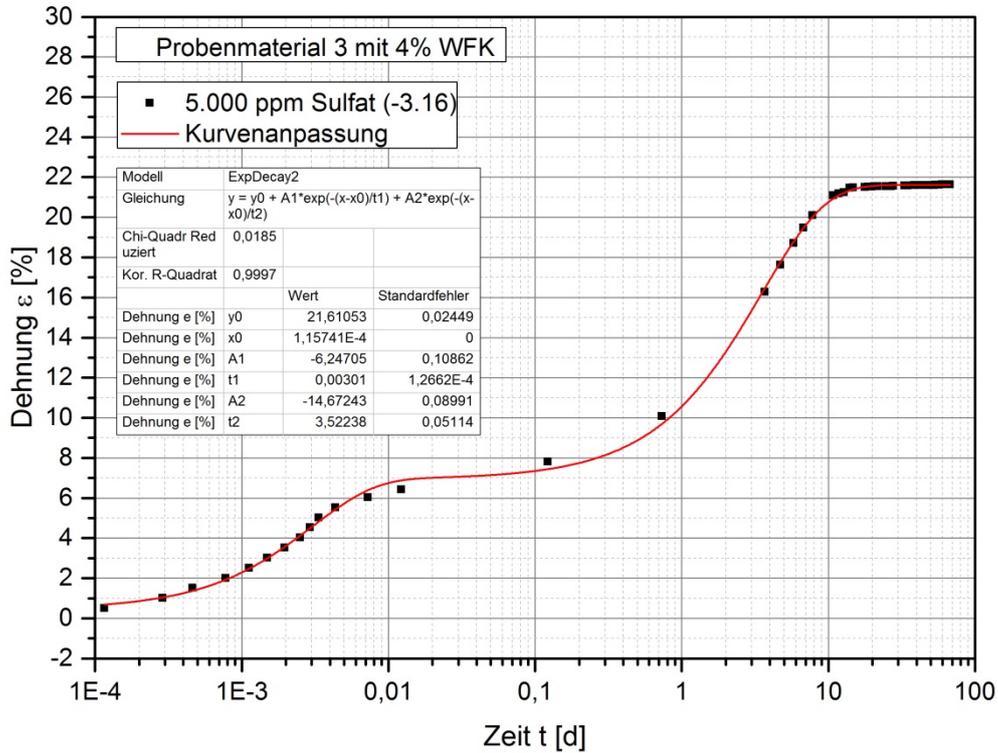
Anlage 8, Bild 41: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.24 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



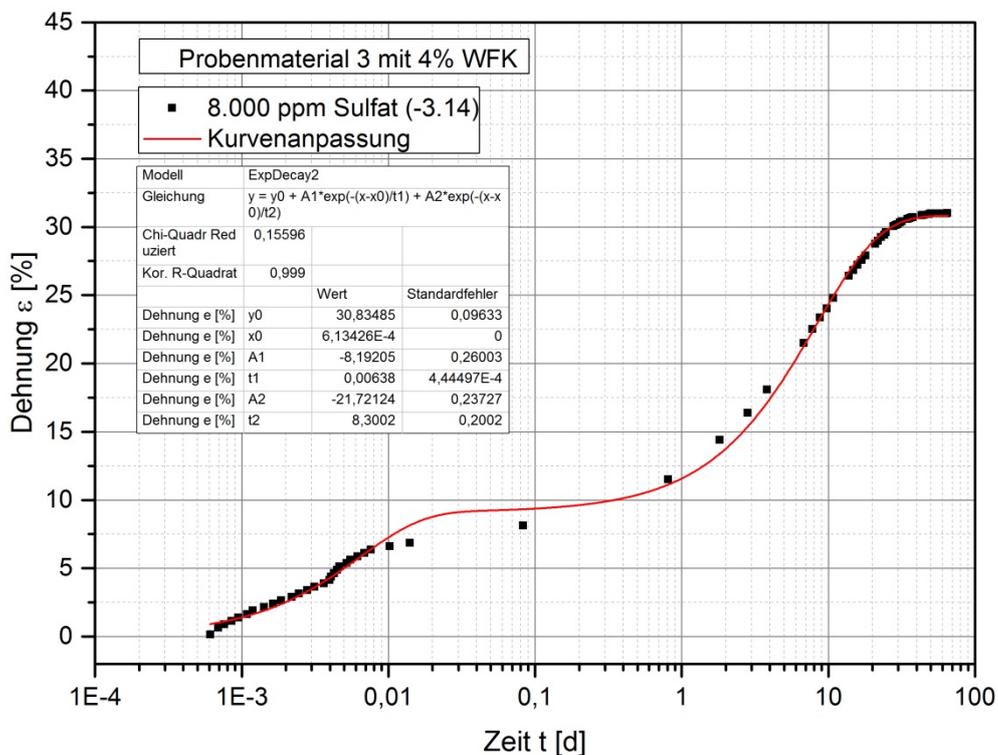
Anlage 8, Bild 42: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.17 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



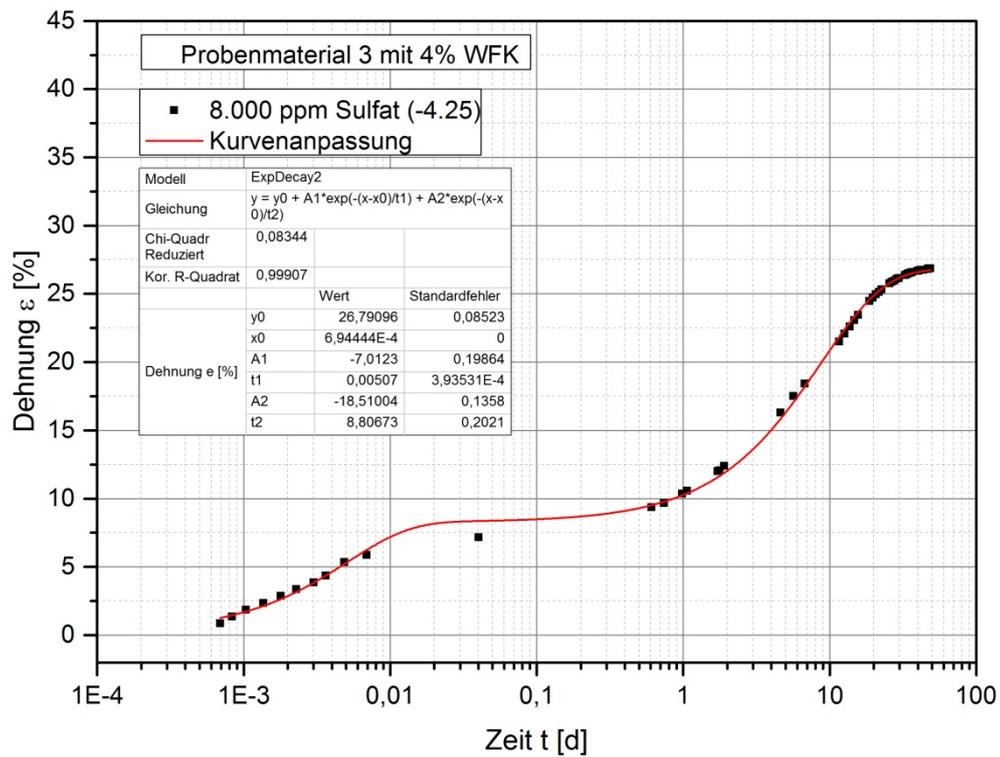
Anlage 8, Bild 43: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.15 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



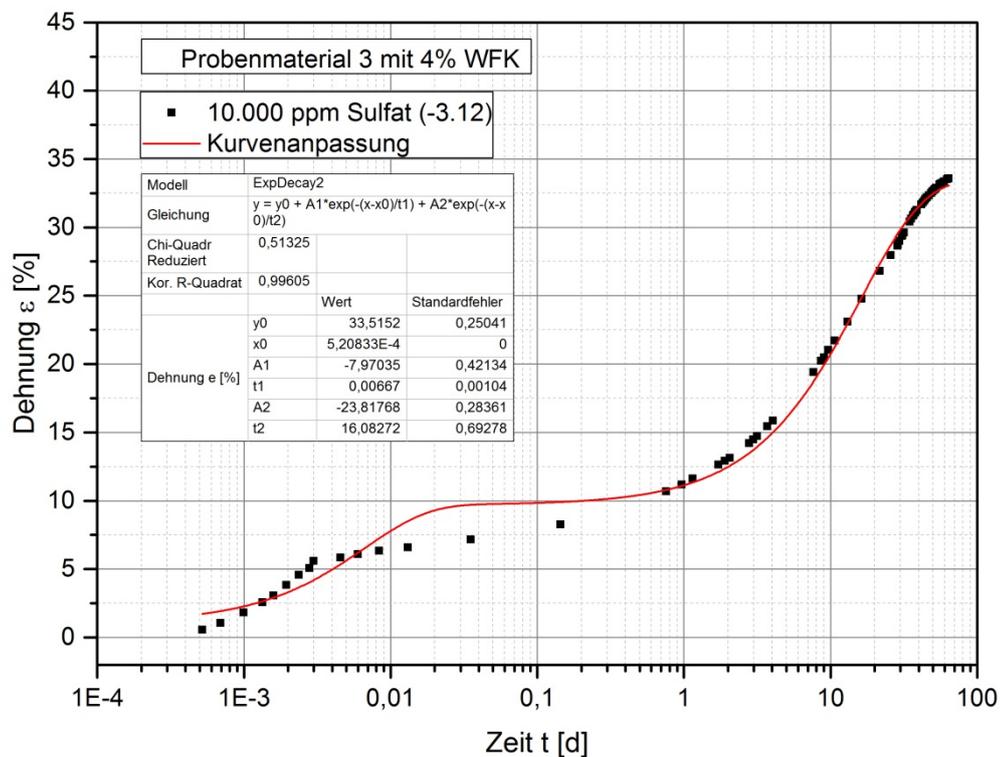
Anlage 8, Bild 44: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.16 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



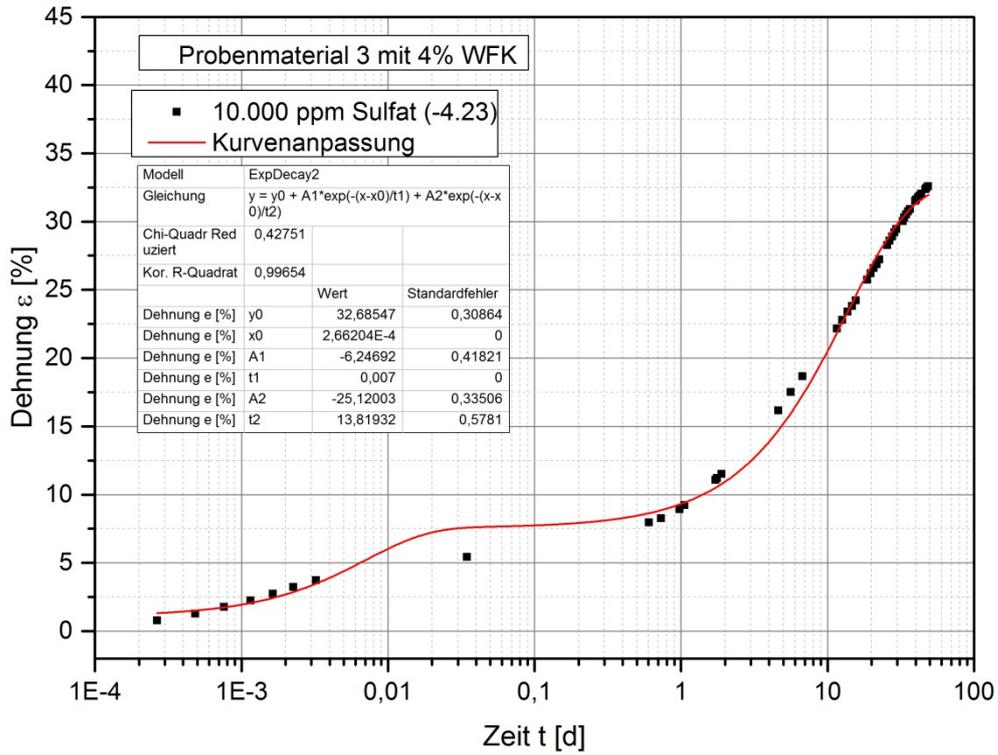
Anlage 8, Bild 45: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.14 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



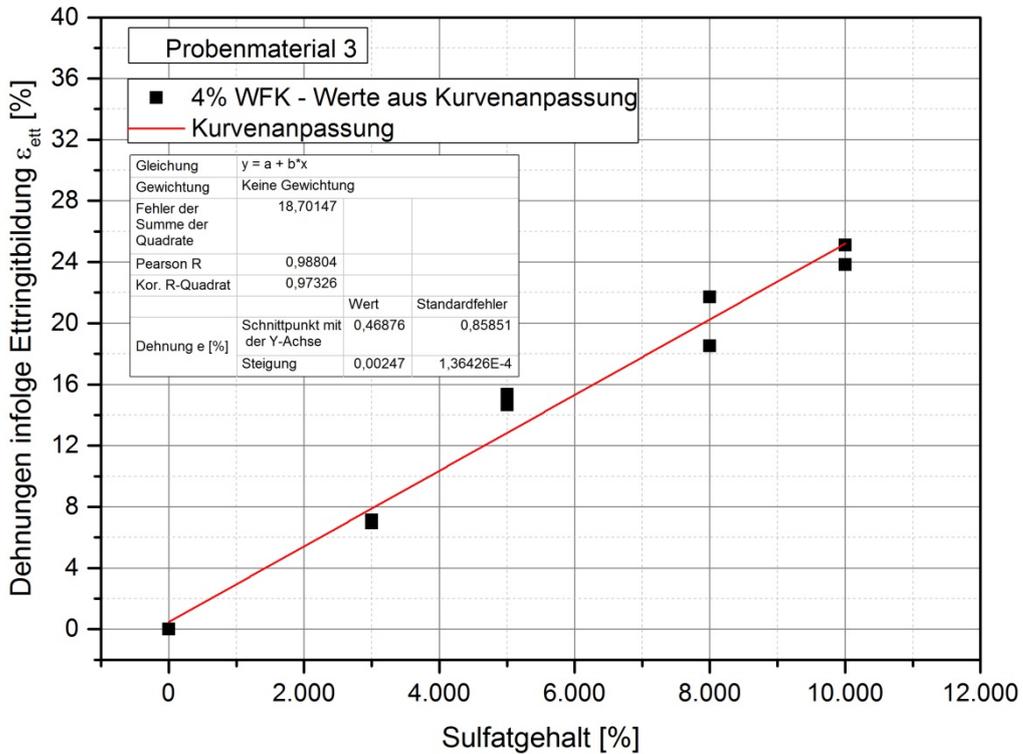
Anlage 8, Bild 46: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.25 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



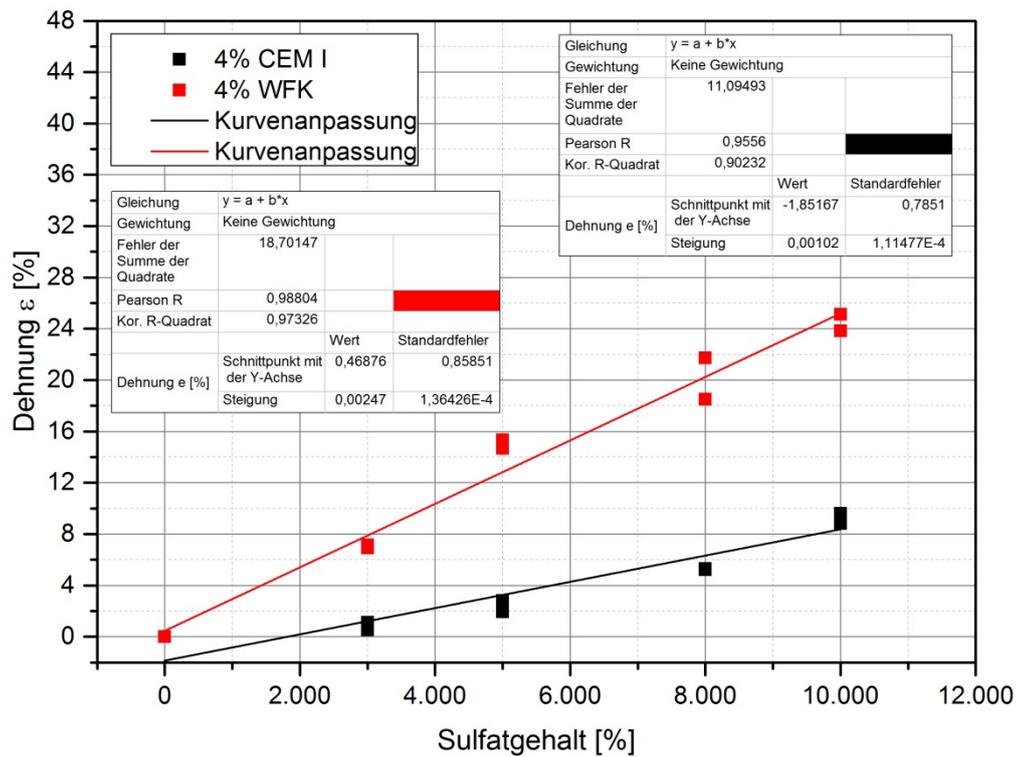
Anlage 8, Bild 47: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.12 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



Anlage 8, Bild 48: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.23 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



Anlage 8, Bild 49: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gl. 6 ermittelte Dehnungsbeträge. Die Gerade markiert die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 8.



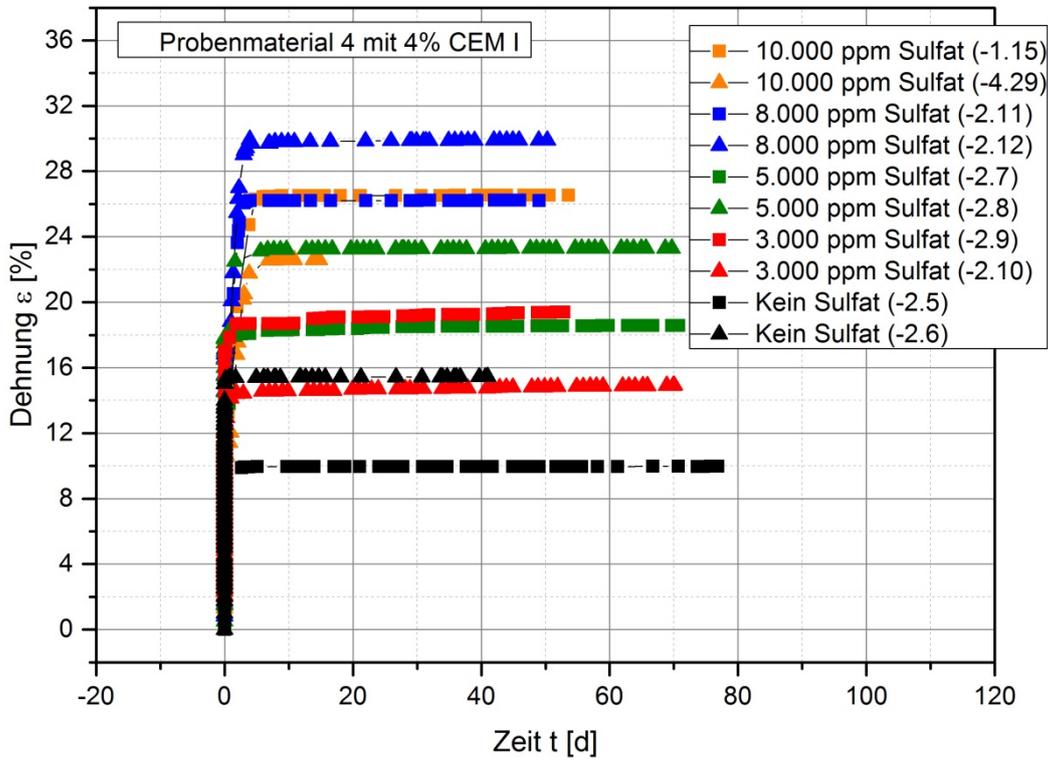
Anlage 8, Bild 50: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts.

Rote Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gl. 6 ermittelte Dehnungsbeträge der kalkstabilisierten Versuche.

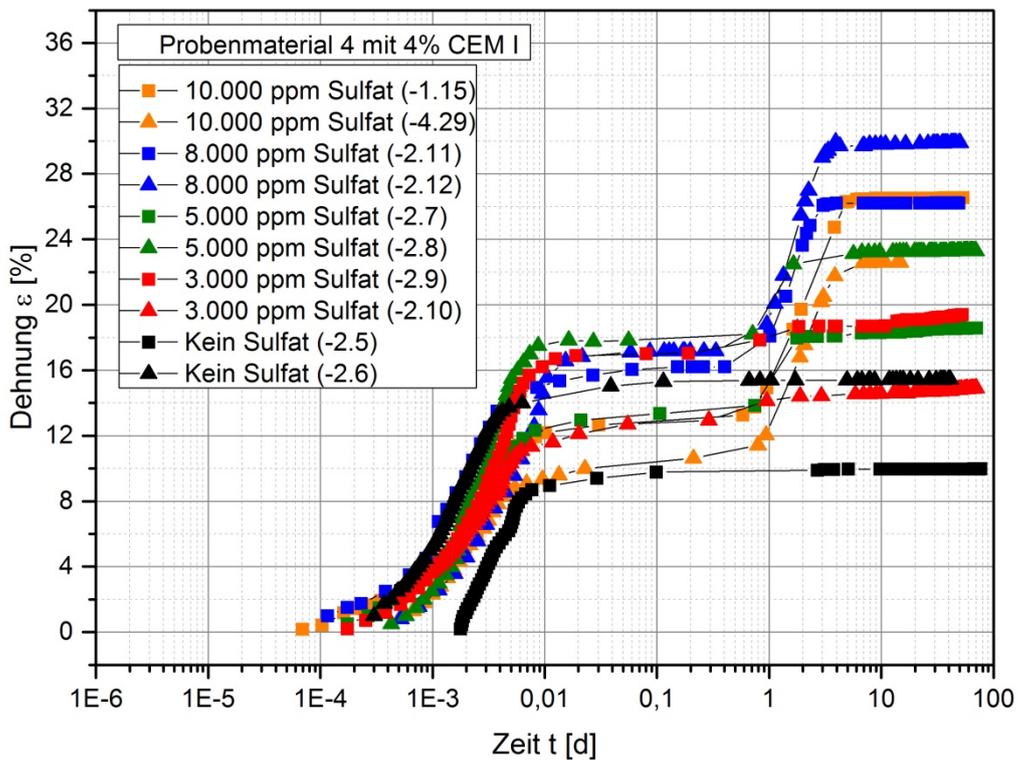
Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gl. 6 ermittelte Dehnungsbeträge der zementstabilisierten Versuche.

Die Geraden markieren jeweils die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 7.

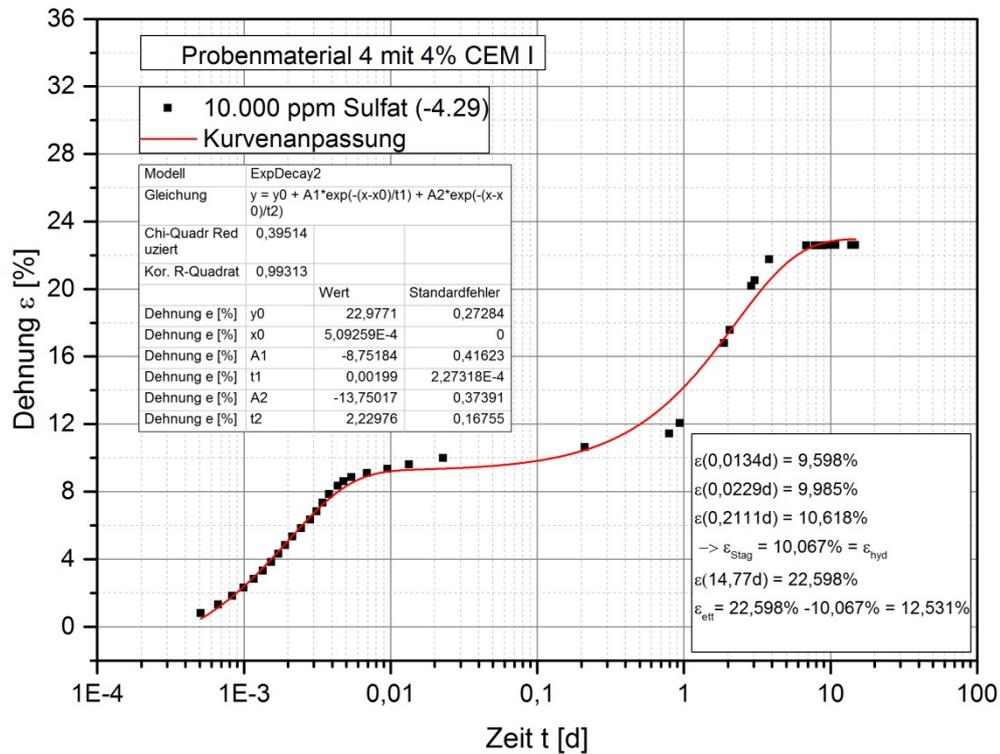
Anlage 9 Versuchsergebnisse Probenmaterial 4 (LLHN)



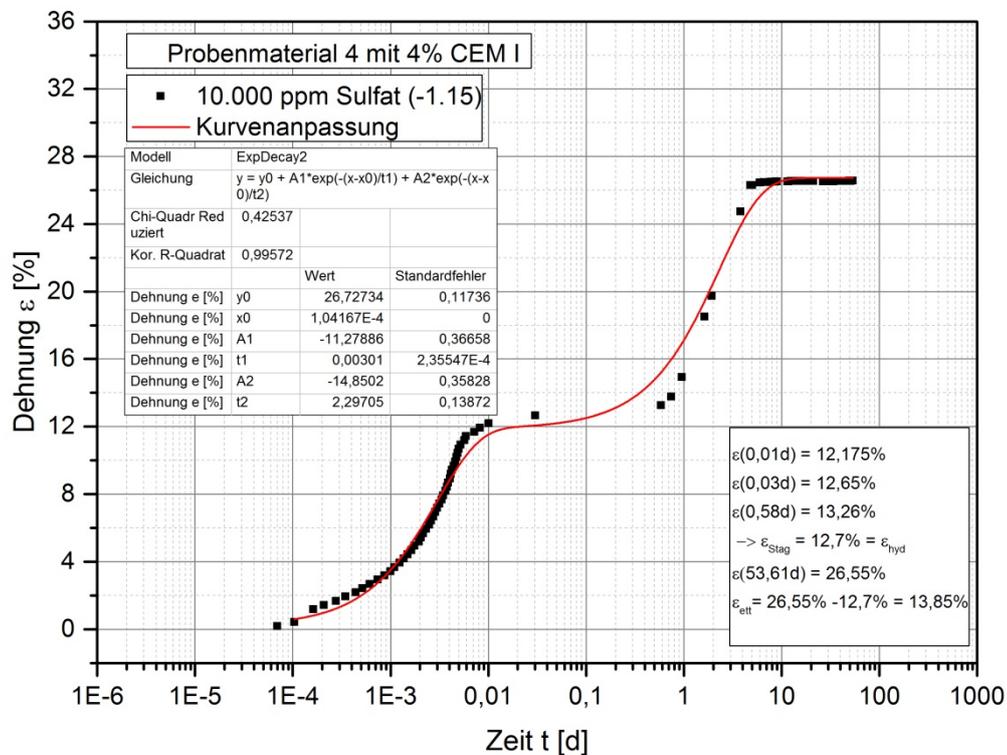
Anlage 9, Bild 1: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen)



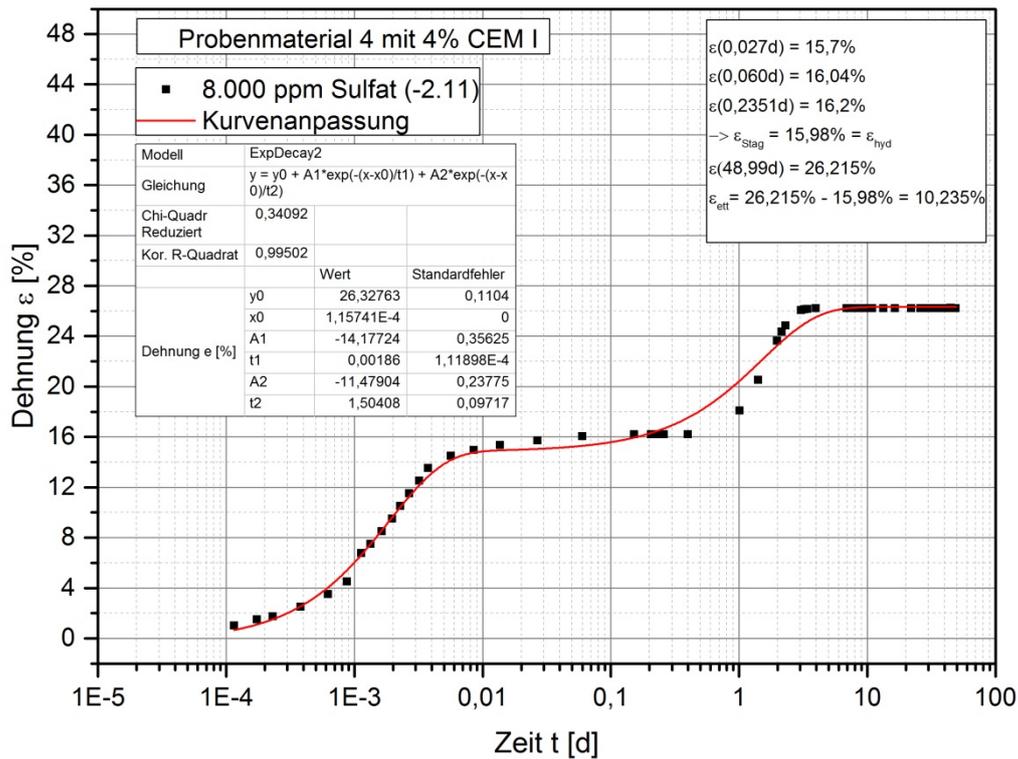
Anlage 9, Bild 2: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs (Zeit t in Tagen)



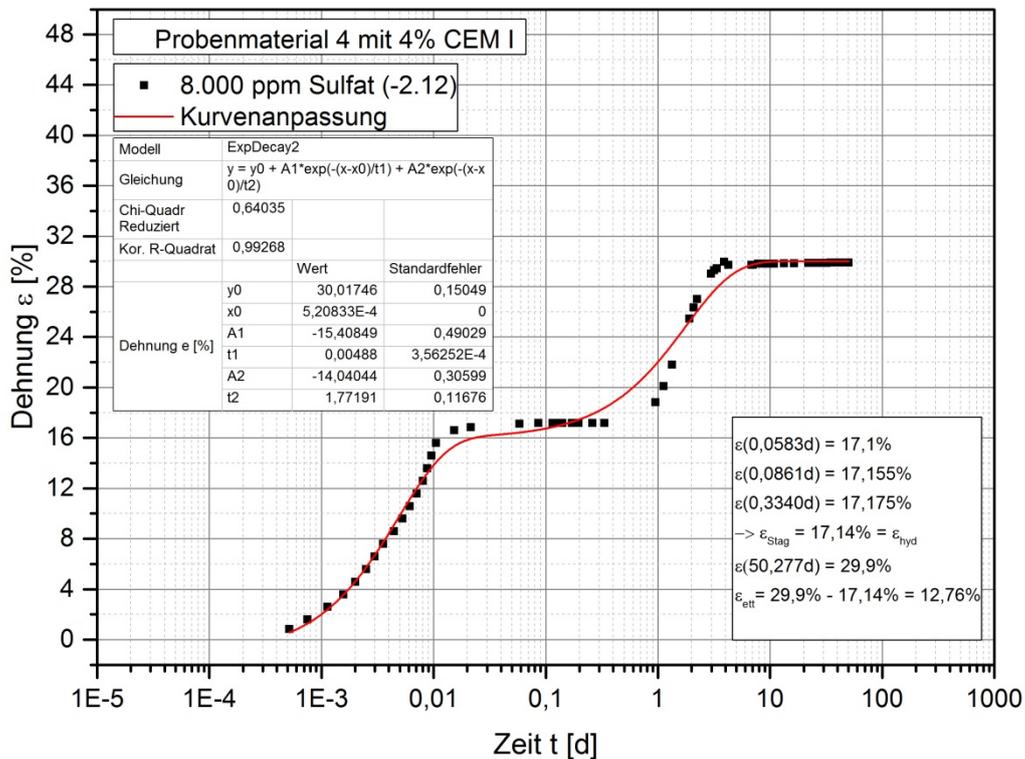
Anlage 9, Bild 3: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.29 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



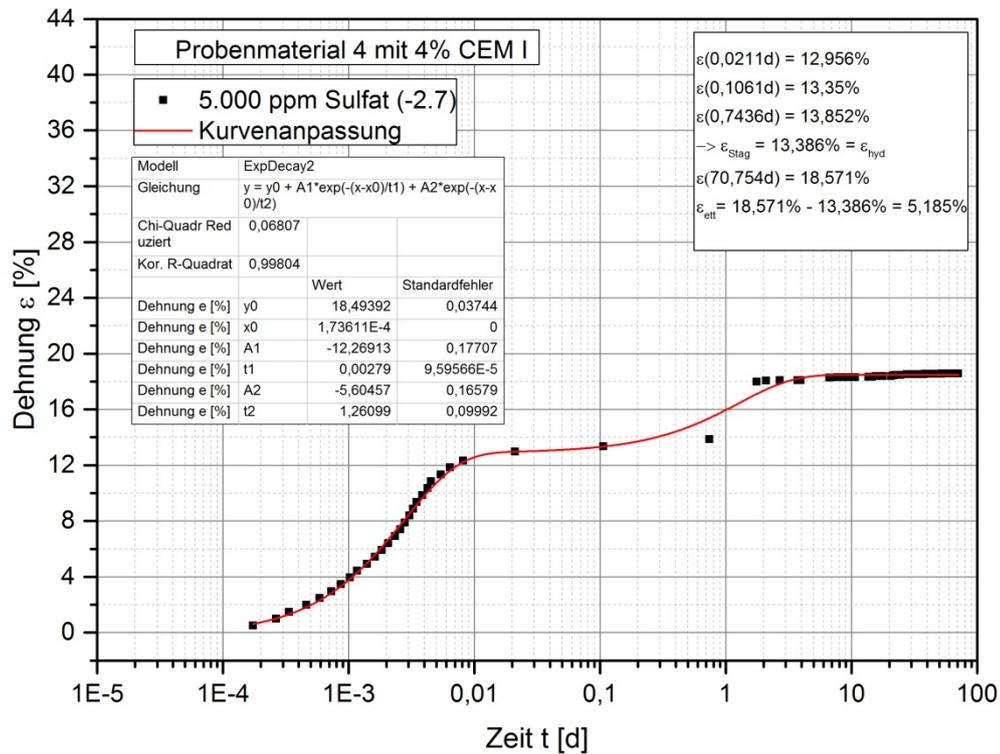
Anlage 9, Bild 4: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 1.15 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



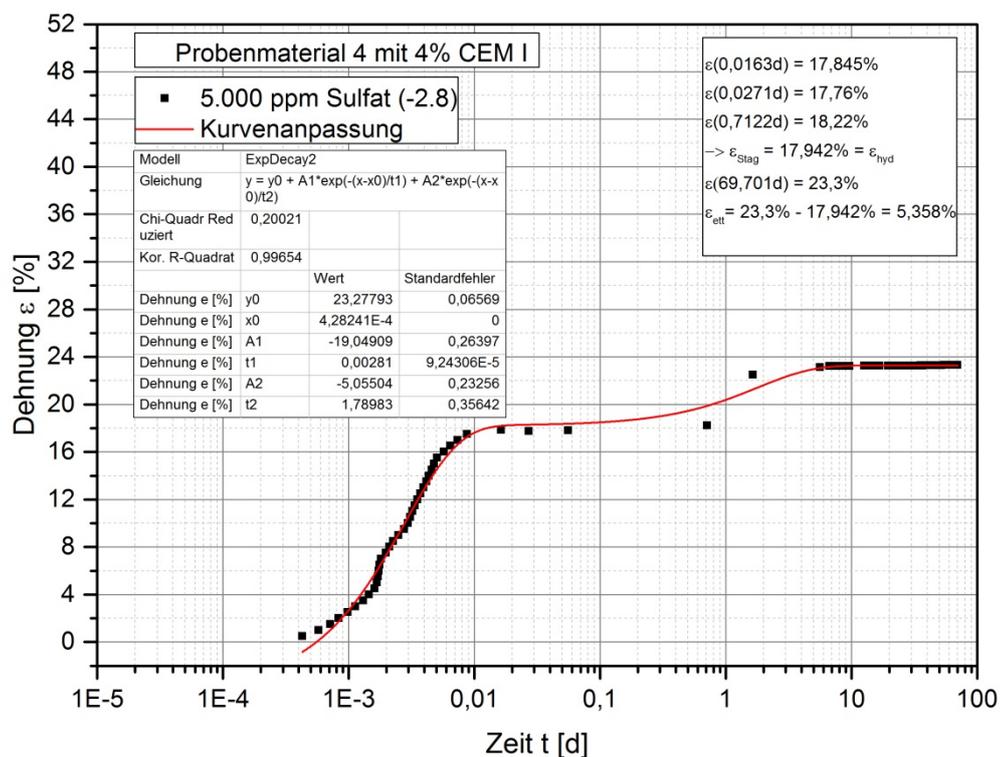
Anlage 9, Bild 5: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.11 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



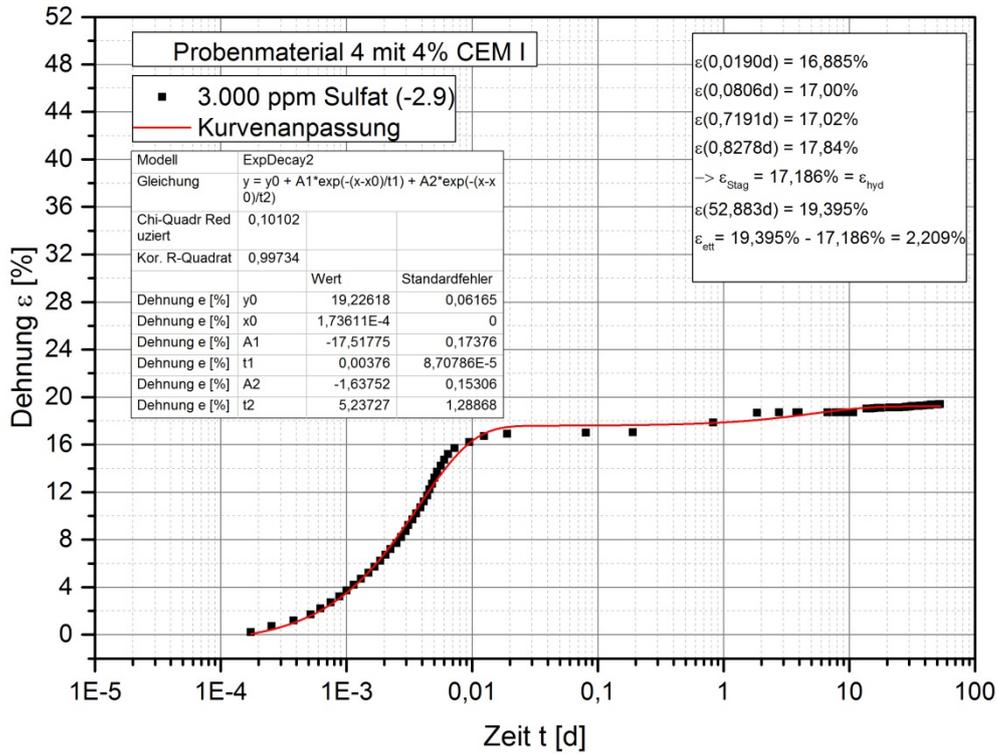
Anlage 9, Bild 6: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.12 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



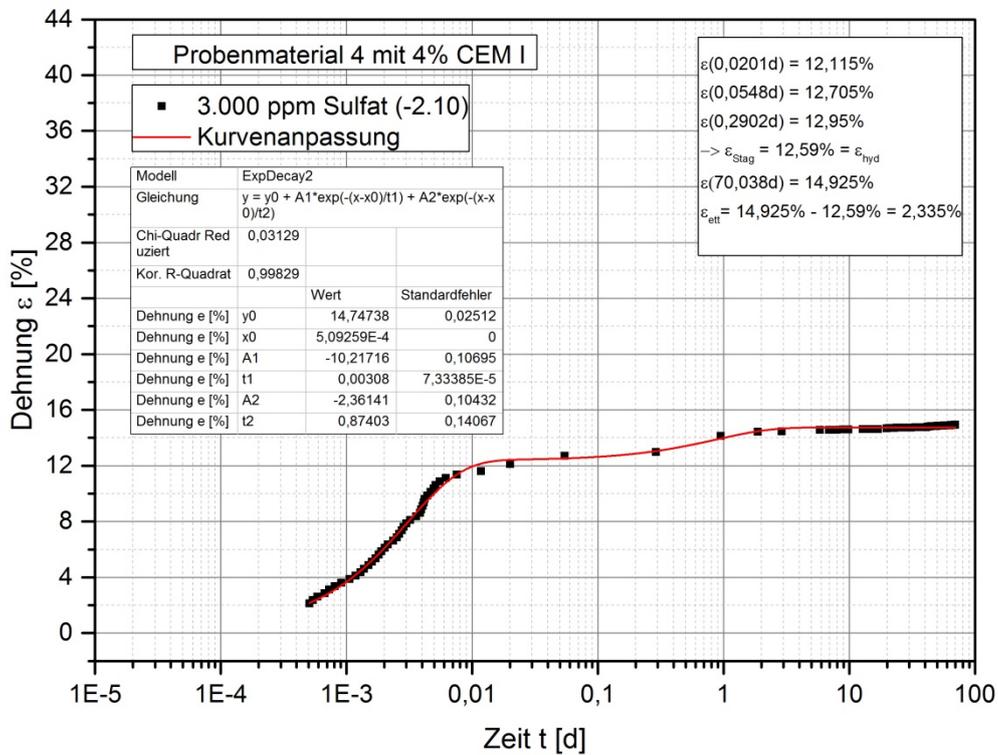
Anlage 9, Bild 7: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.7 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



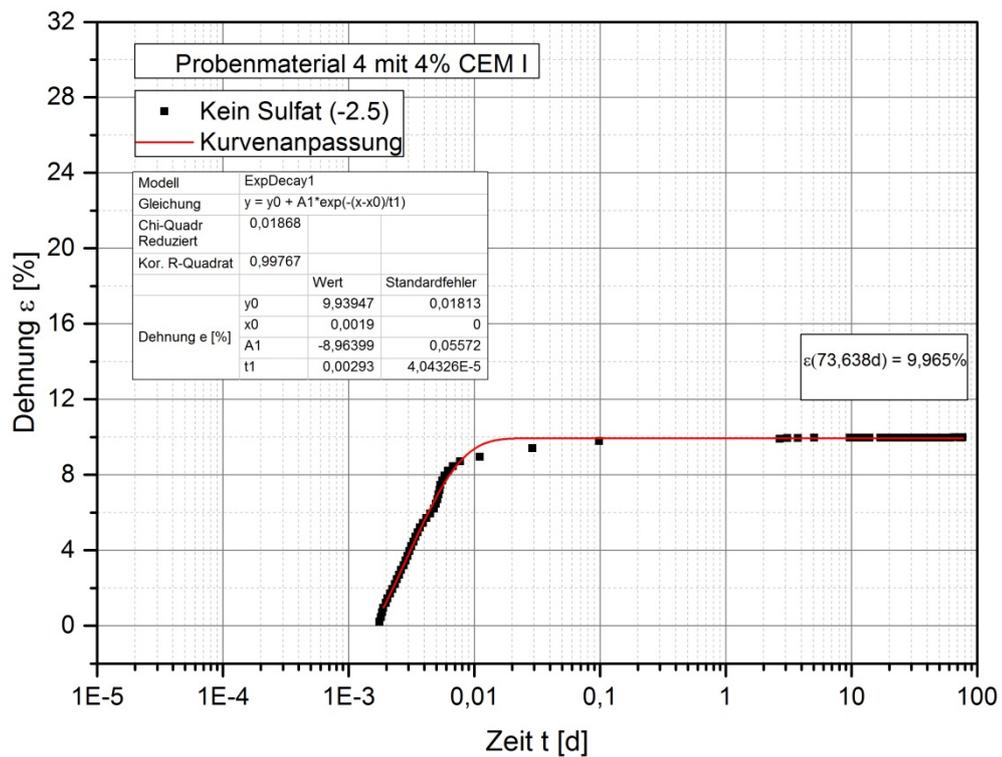
Anlage 9, Bild 8: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.8 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



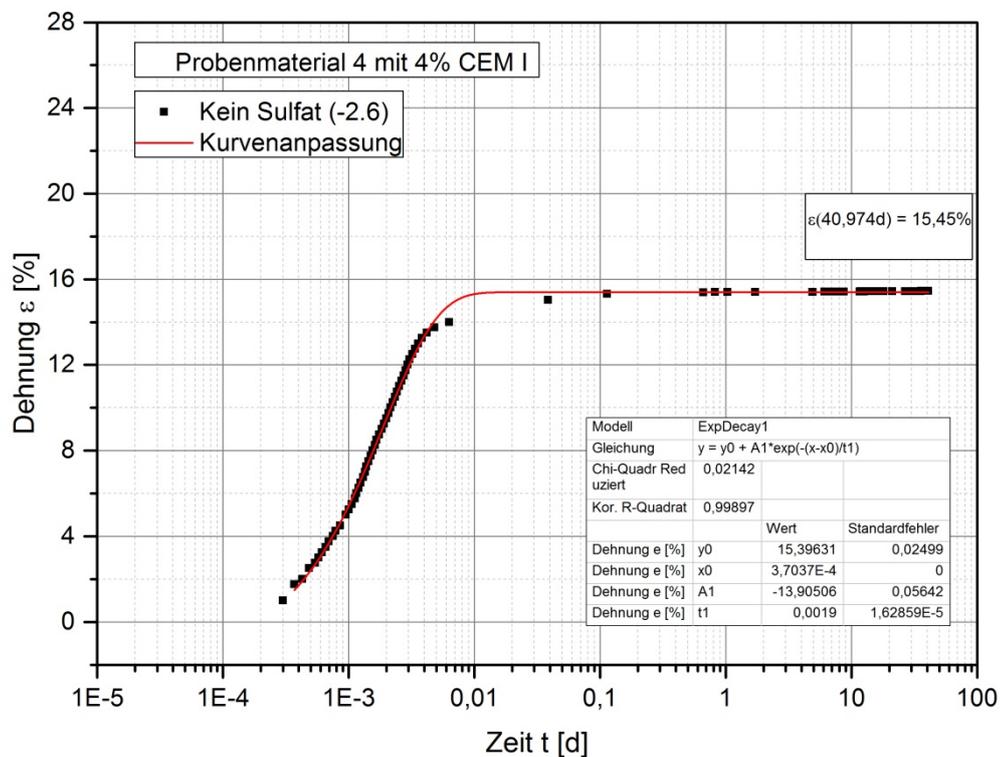
Anlage 9, Bild 9: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.9 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



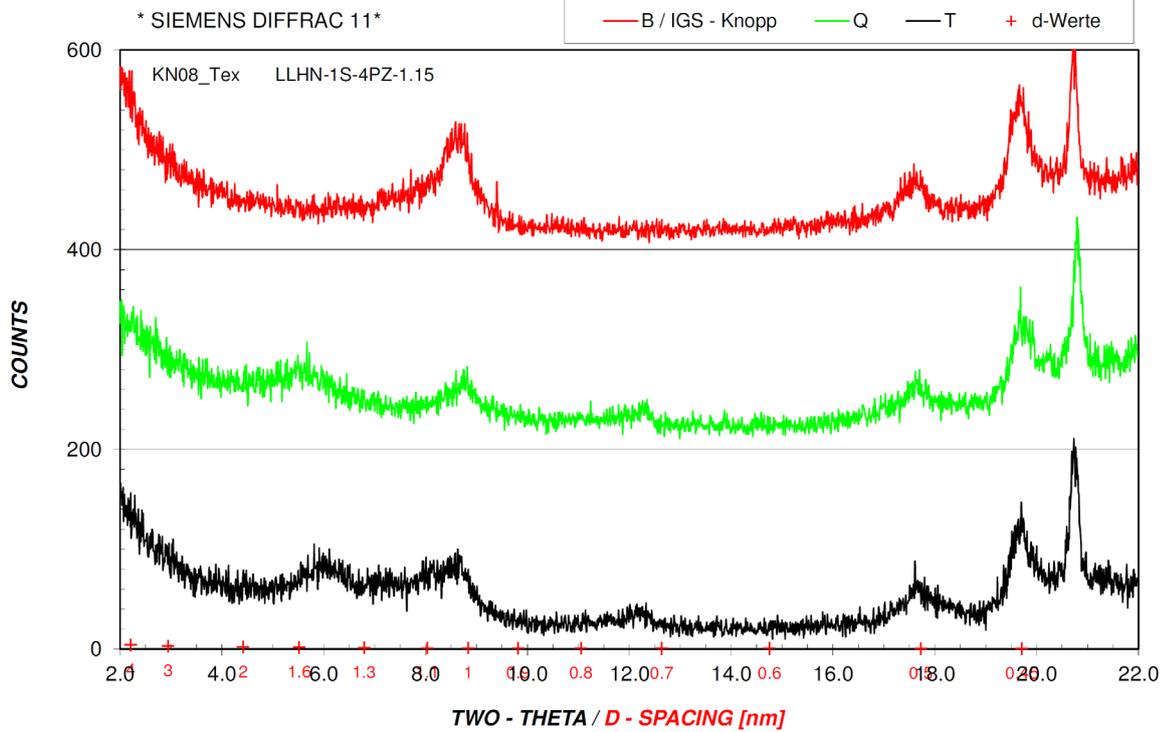
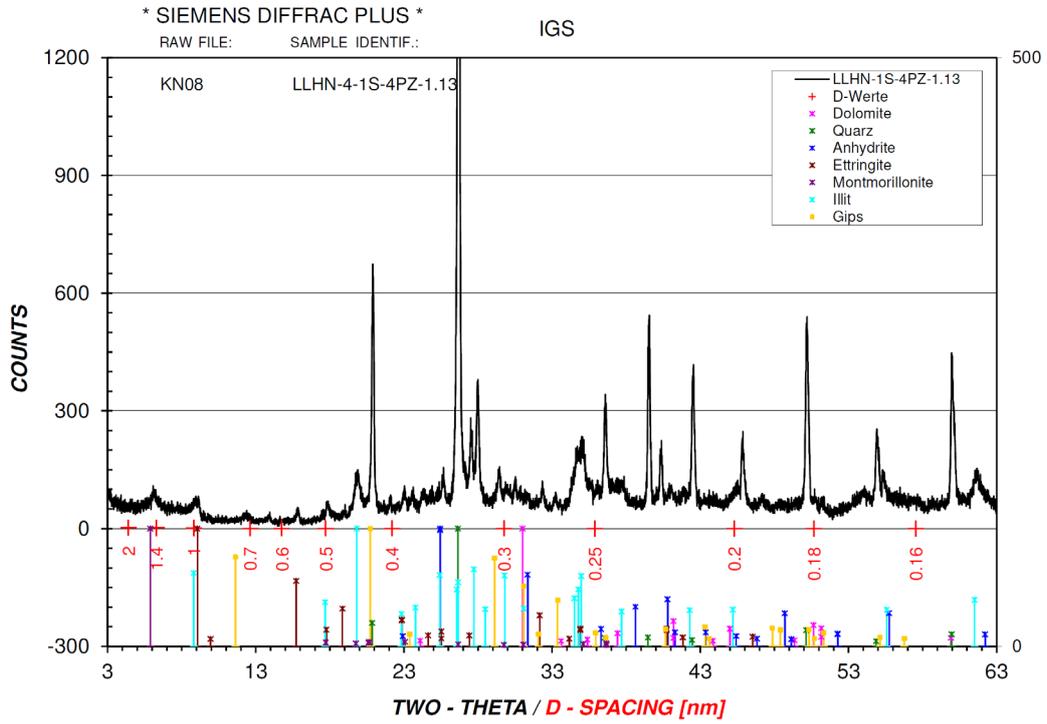
Anlage 9, Bild 10: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.10 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



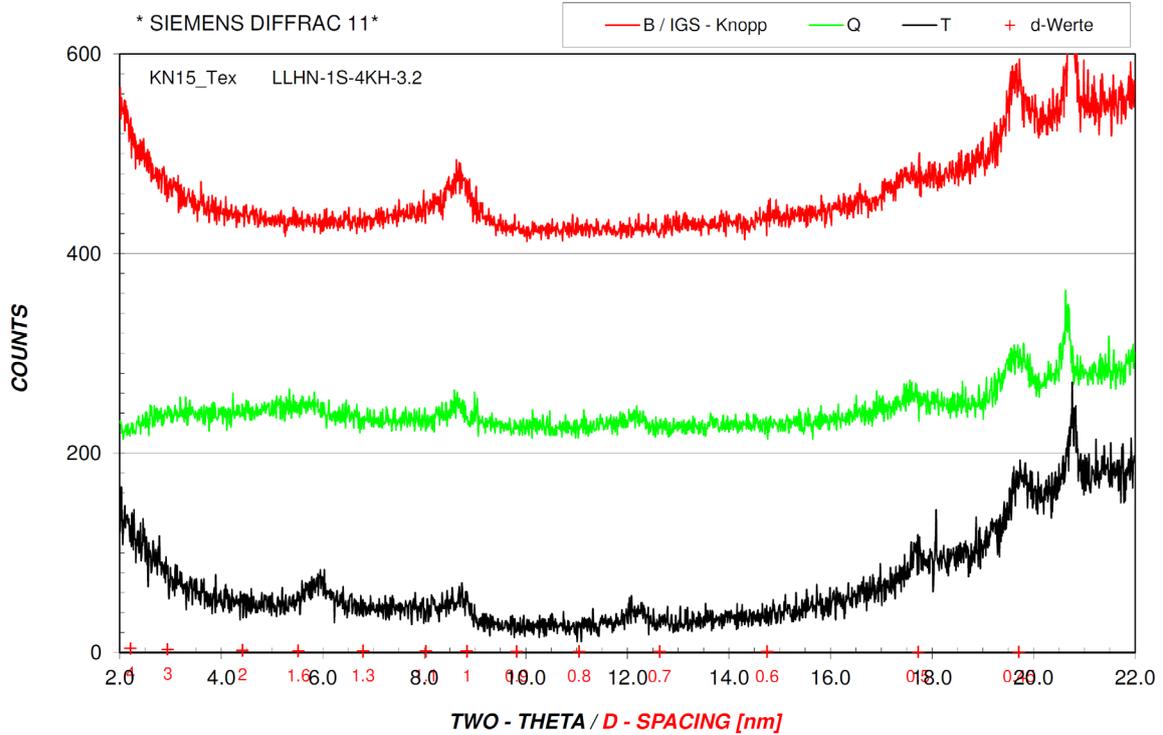
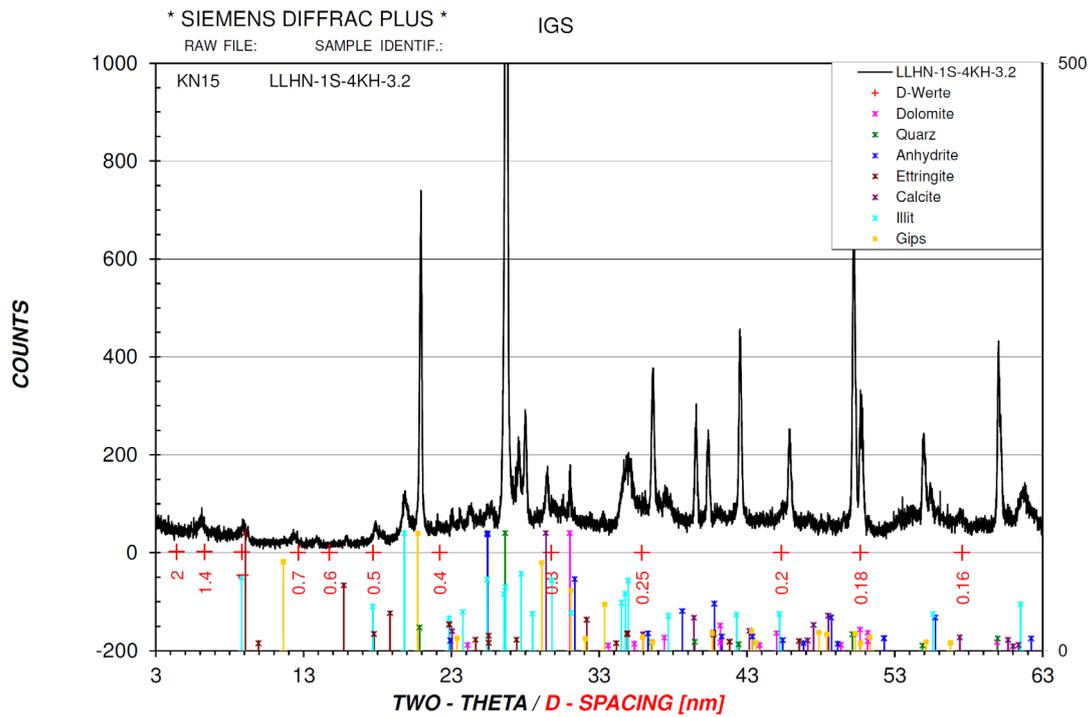
Anlage 9, Bild 11: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.5 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



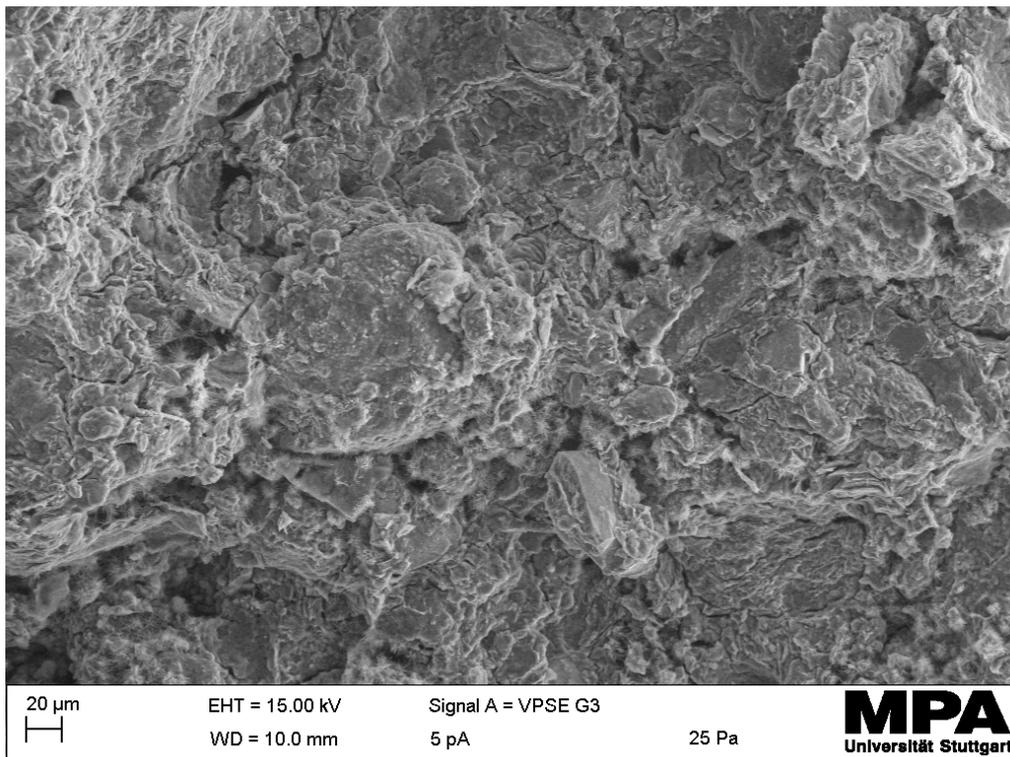
Anlage 9, Bild 12: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 2.6 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



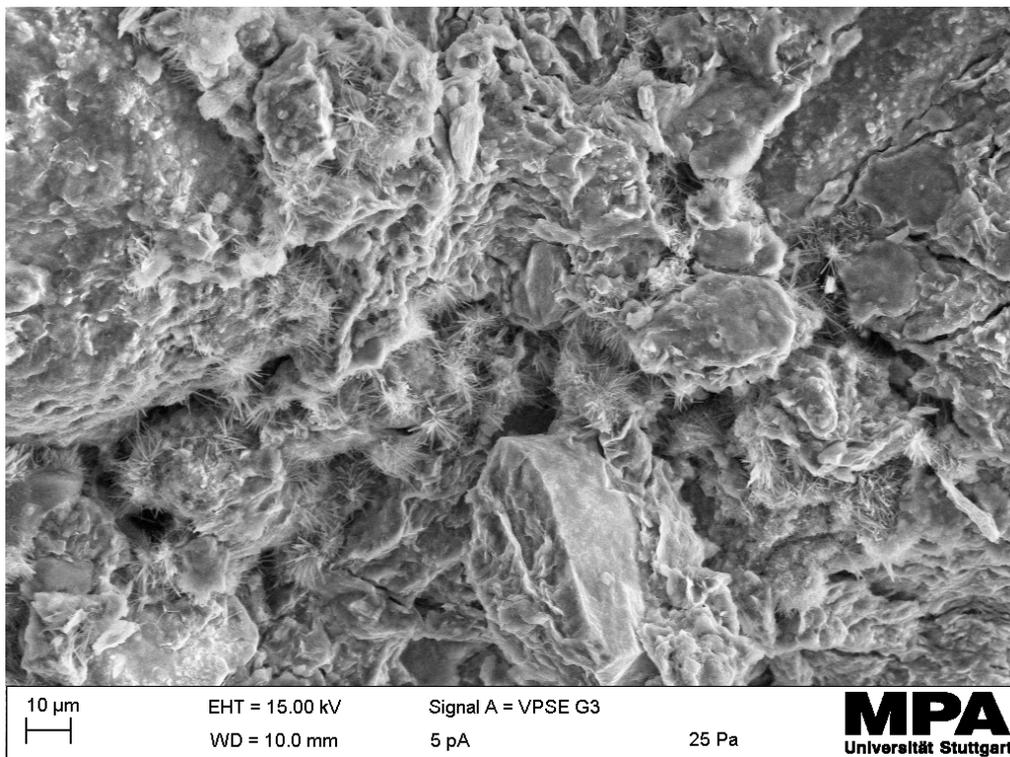
Anlage 9, Bild 13: XRD-Spektrum Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende. (Versuch 1.15)



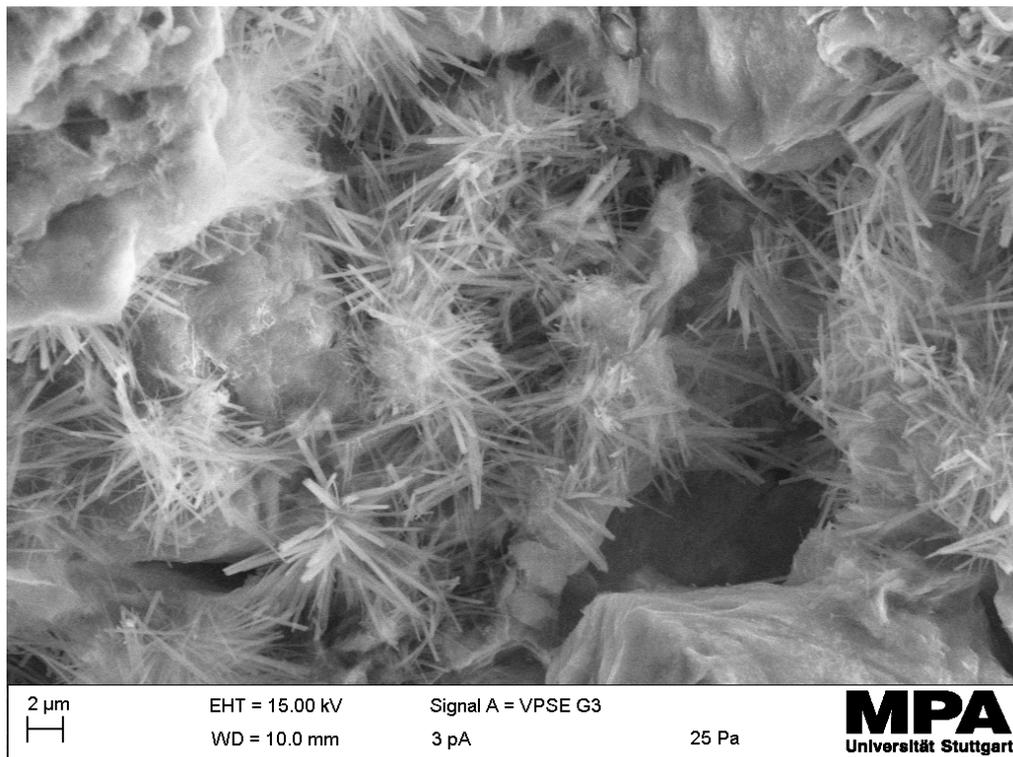
Anlage 9, Bild 14: XRD-Spektrum Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Weißfeinkalk und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende. (Versuch 3.2)



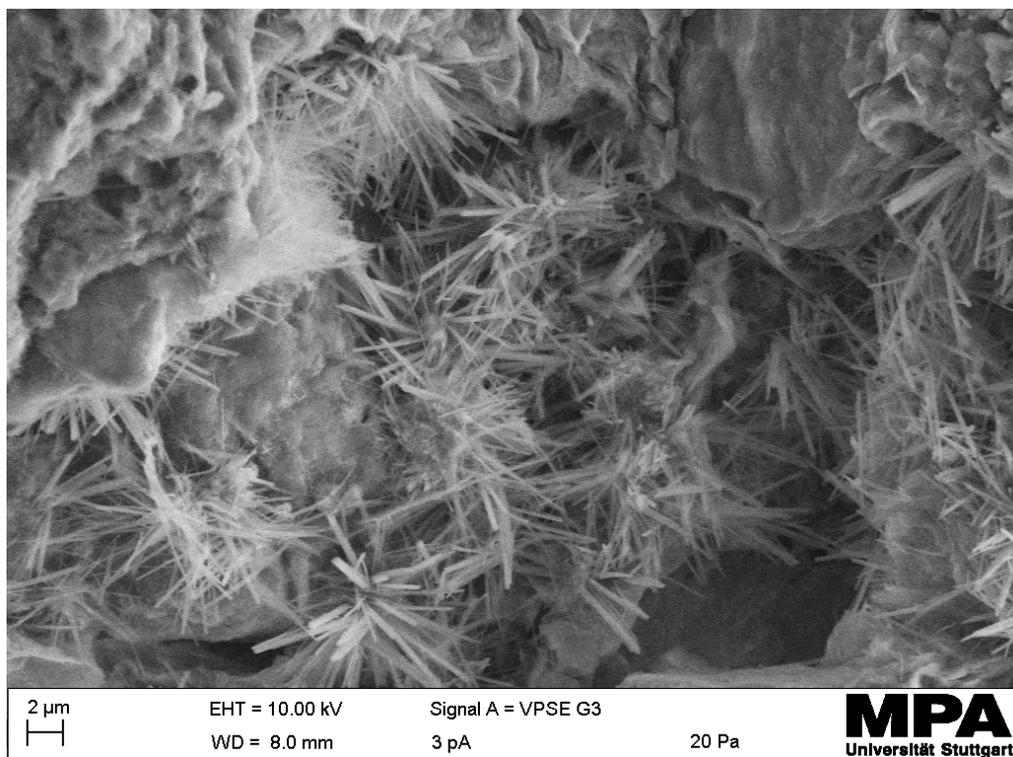
Anlage 9, Bild 15: REM-Aufnahme Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.15). Ettringitkristalle bereits in dieser Auflösung in den Rissbereichen erkennbar.



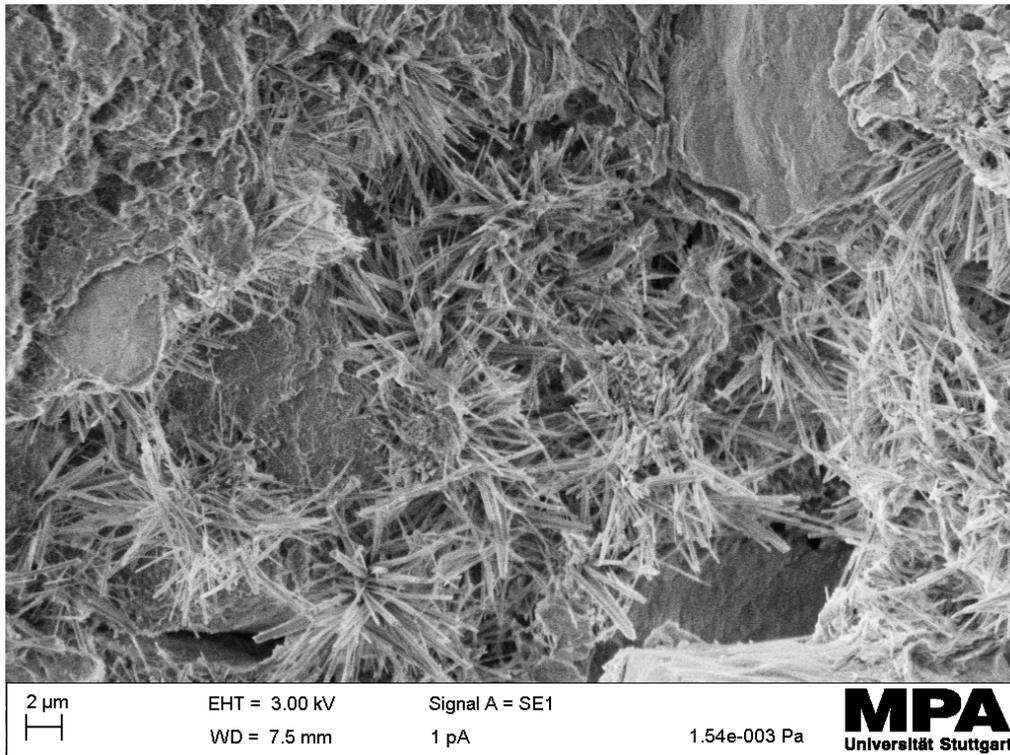
Anlage 9, Bild 16: REM-Aufnahme Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.15). Ettringitkristalle bilden sich vor allem in den Rissbereichen.



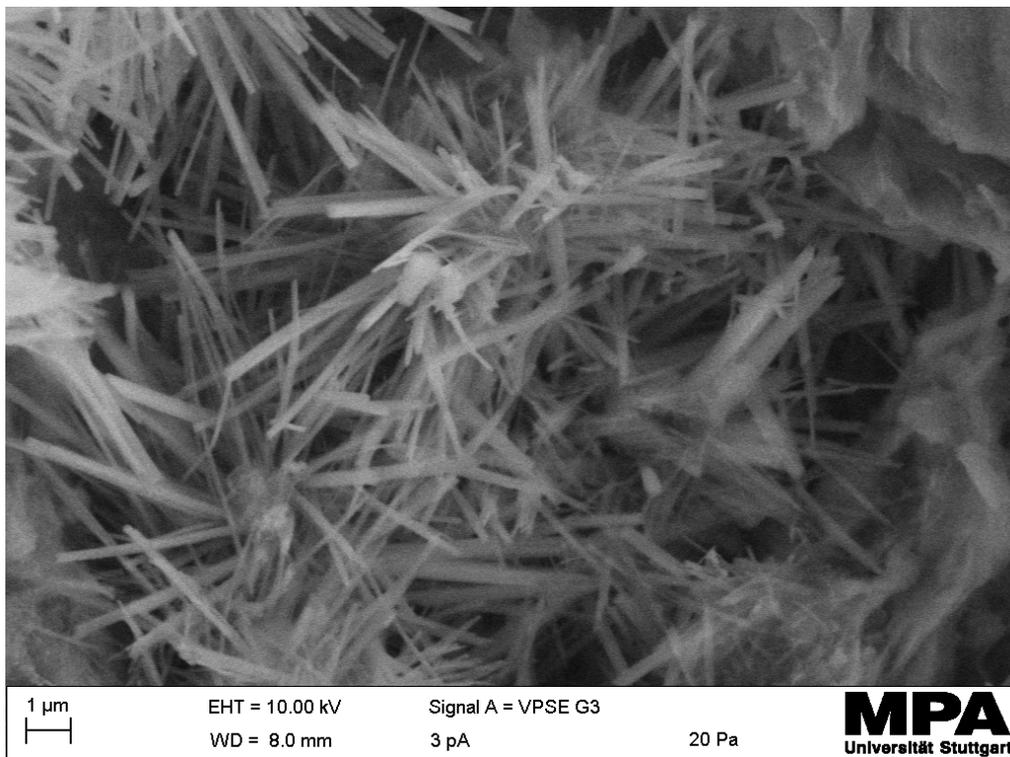
Anlage 9, Bild 17: REM-Aufnahme Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.15). Vergrößerte Aufnahme der Ettringitnadeln.



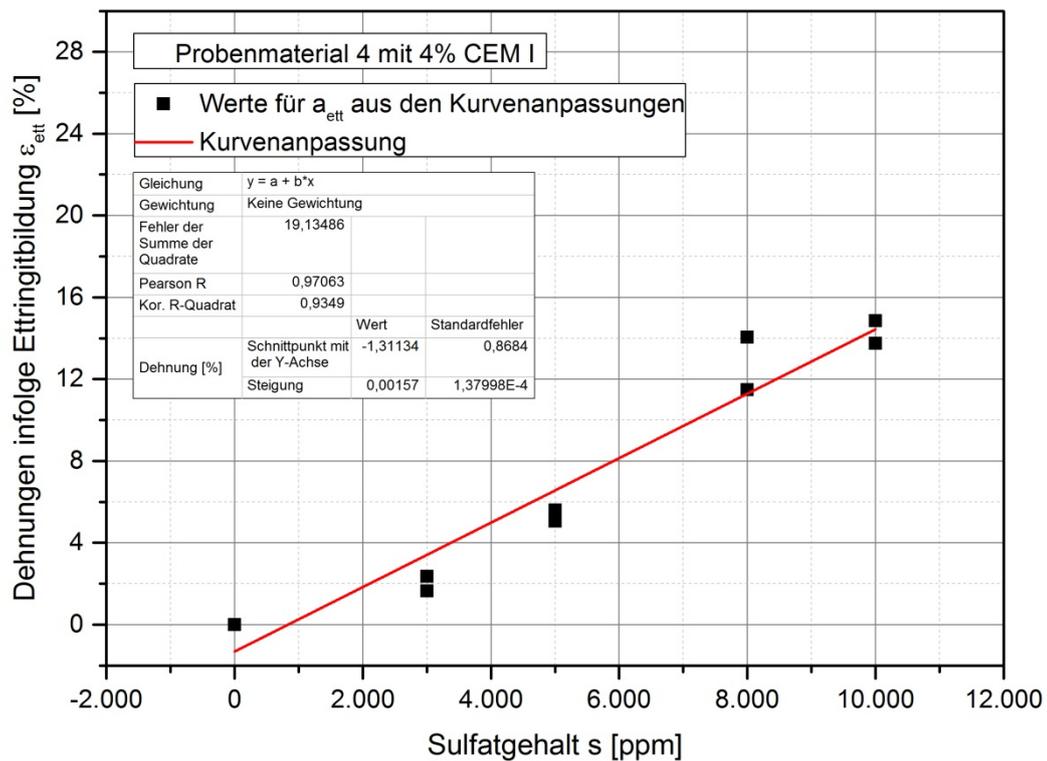
Anlage 9, Bild 18: REM-Aufnahme Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.15). Vergrößerte Aufnahme der Ettringitnadeln.



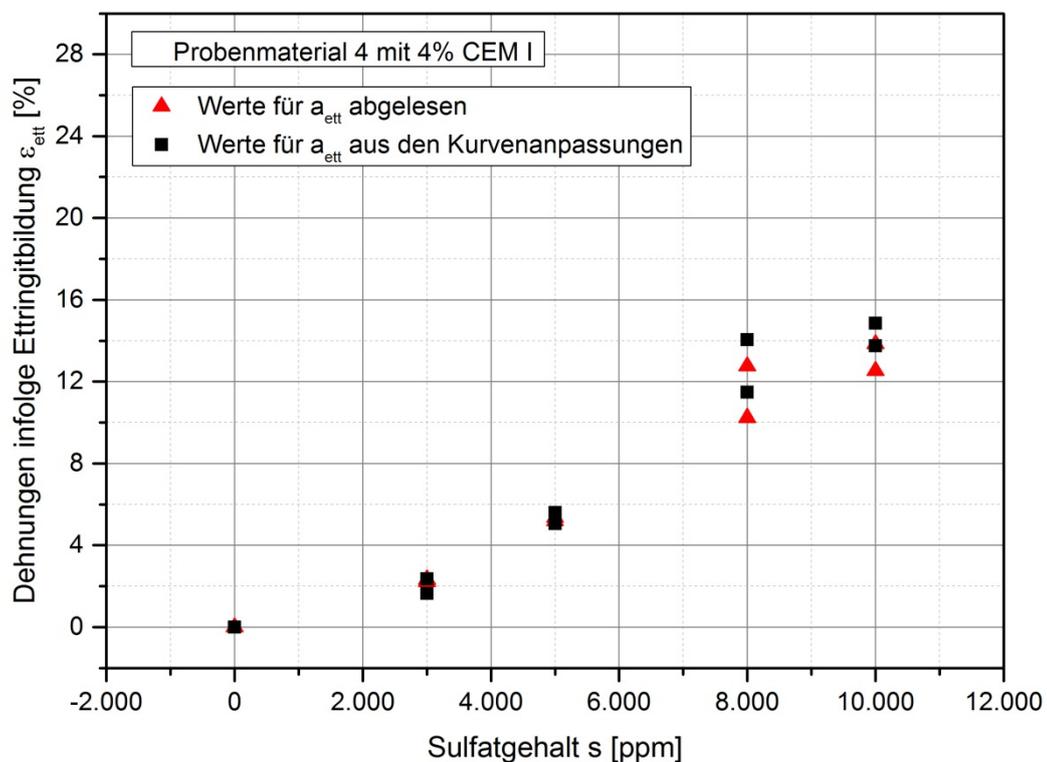
Anlage 9, Bild 19: REM-Aufnahme Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.15). Vergrößerte Aufnahme der Ettringitnadeln.



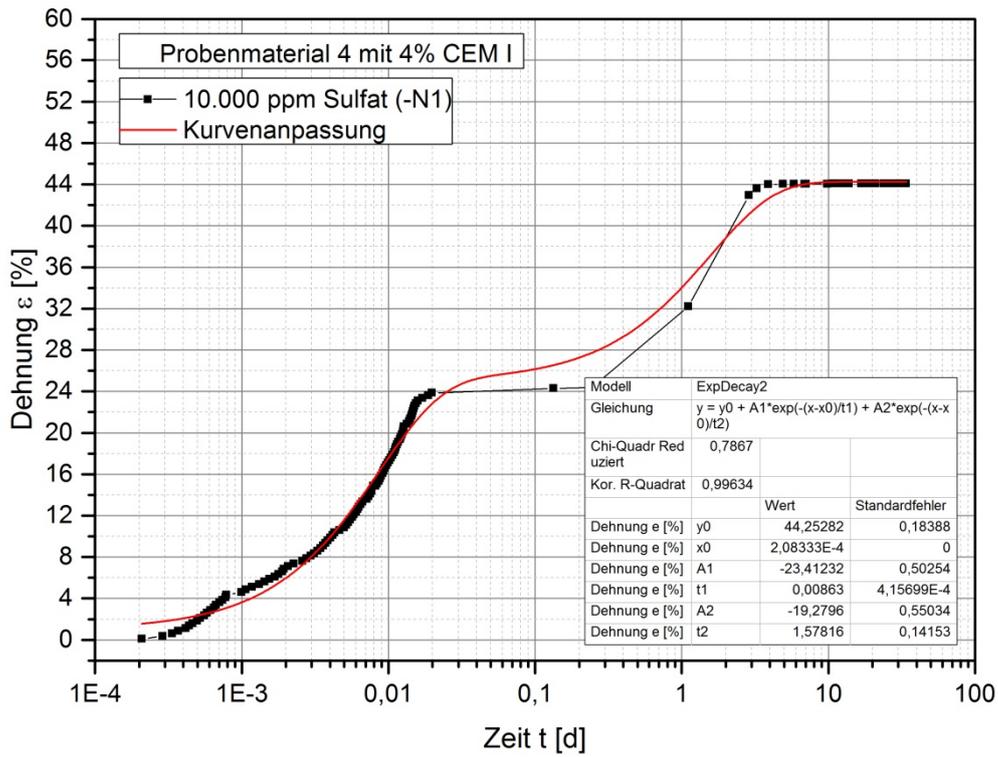
Anlage 9, Bild 20: REM-Aufnahme Probenmaterial 4 mit Zugabe 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat nach Versuchsende (Versuch 1.15). Vergrößerte Aufnahme der Ettringitnadeln.



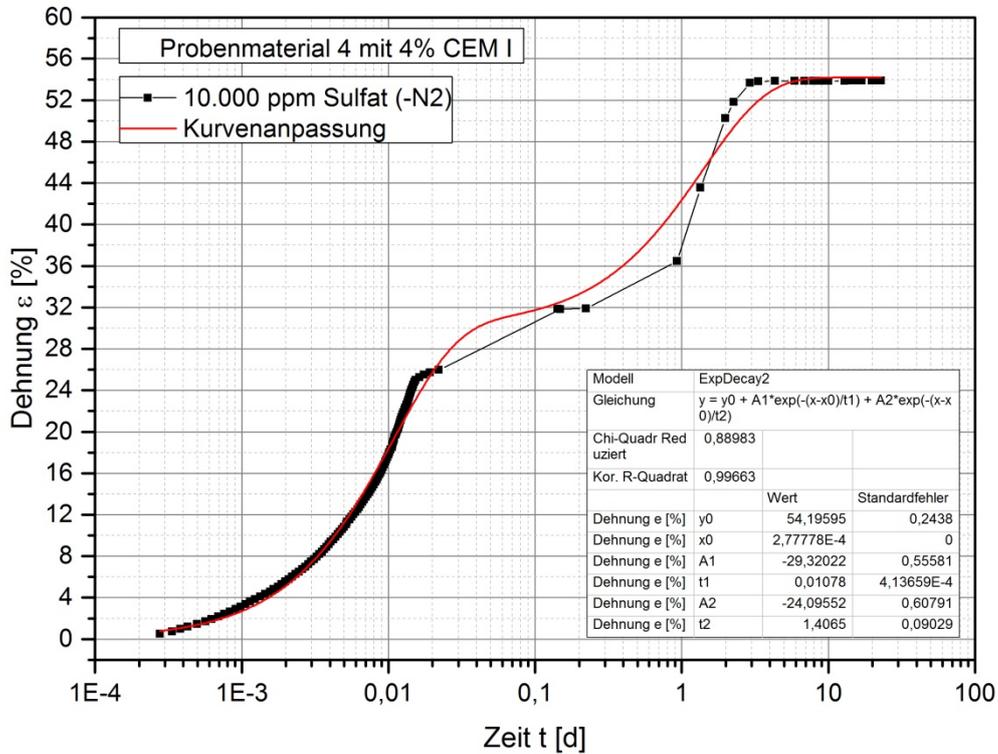
Anlage 9, Bild 21: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ermittelte Dehnungsbeträge. Die Gerade markiert die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 8.



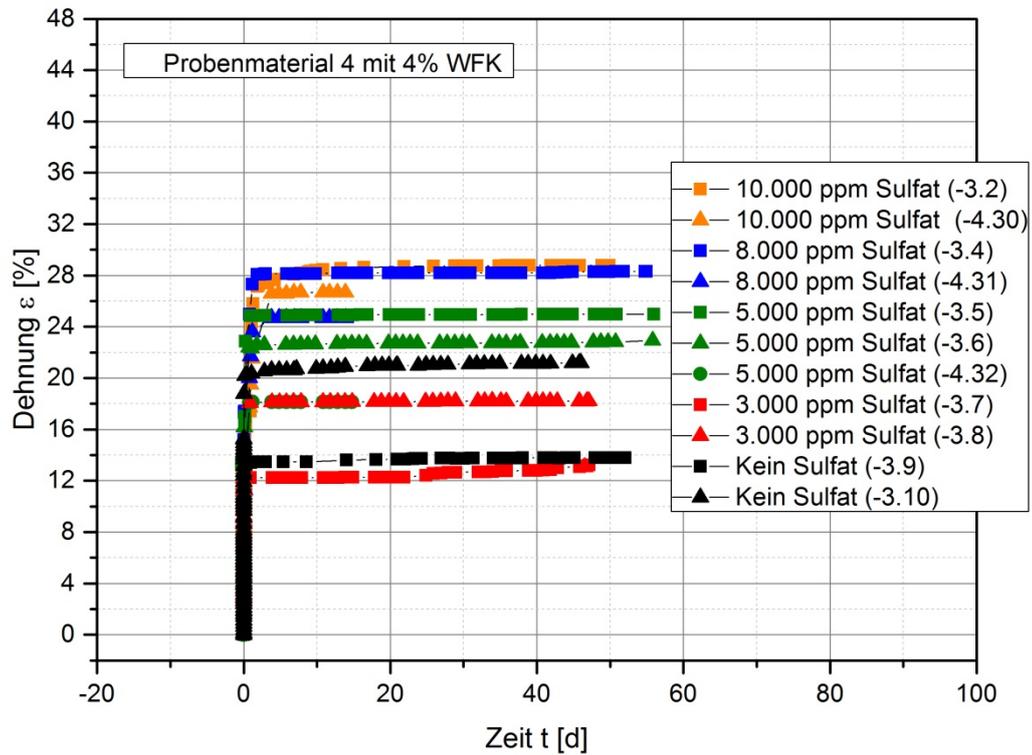
Anlage 9, Bild 22: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ermittelte Dehnungsbeträge. Rote Dreiecke: Dehnungsbeträge wurden aus den Messwerten abgelesen.



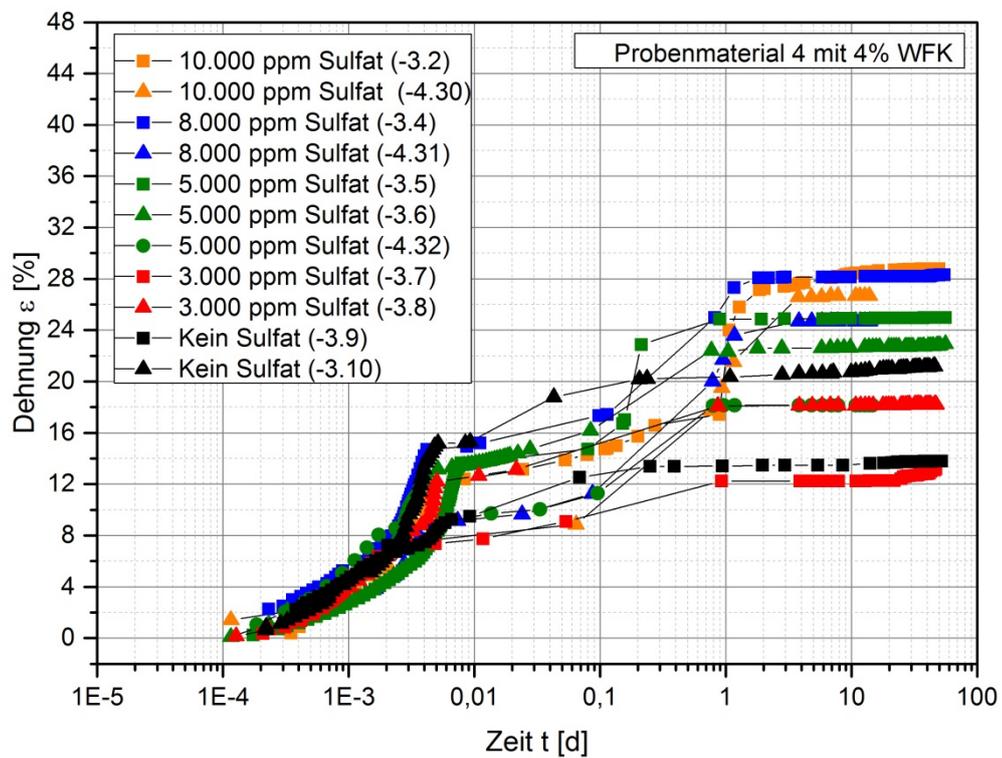
Anlage 9, Bild 23: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch N1 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



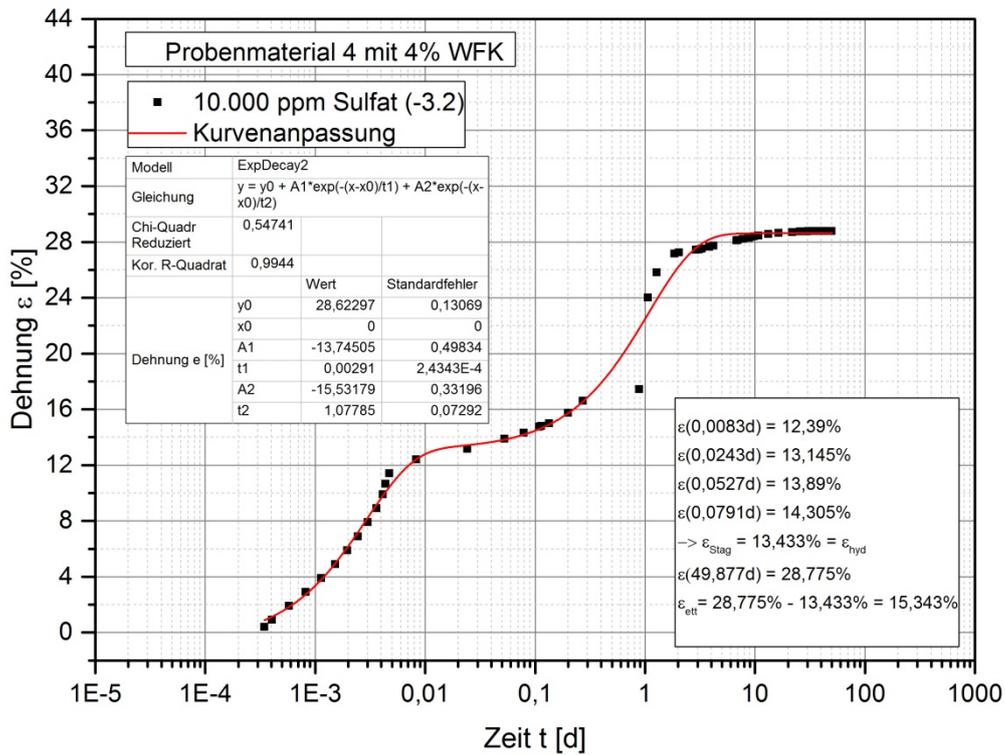
Anlage 9, Bild 24: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch N2 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



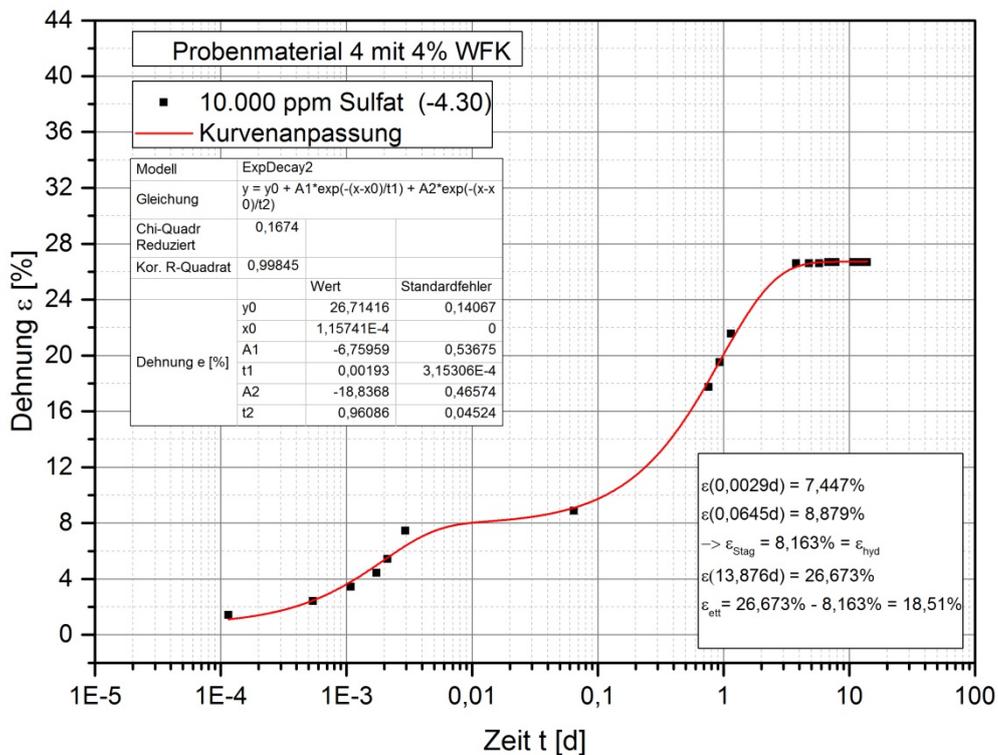
Anlage 9, Bild 25: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen)



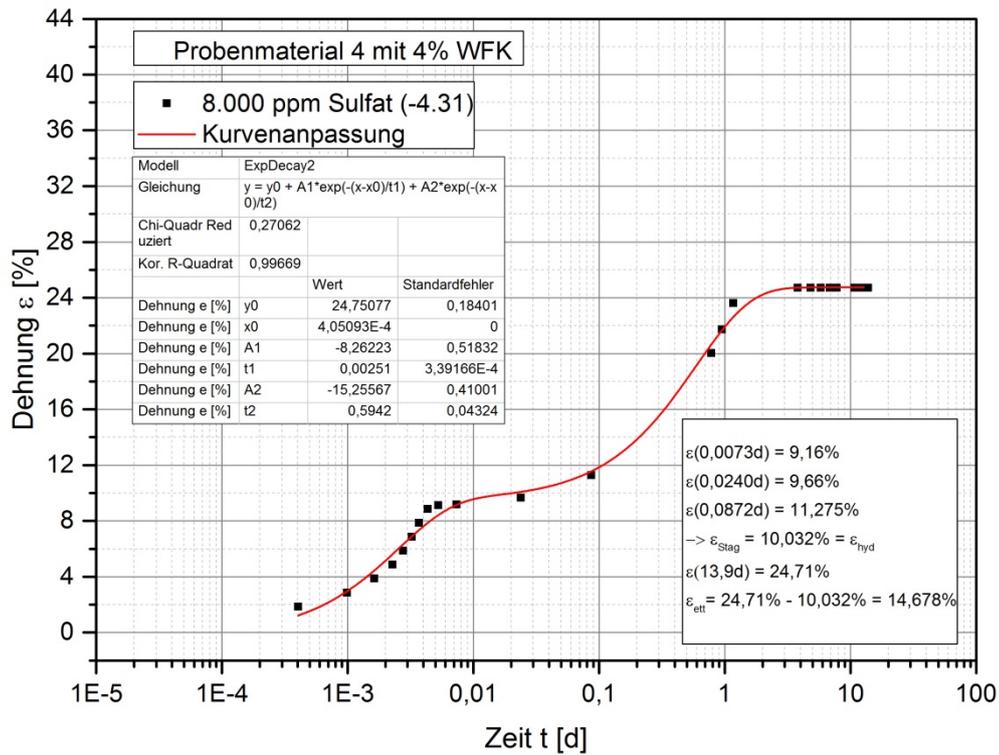
Anlage 9, Bild 26: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs (Zeit t in Tagen)



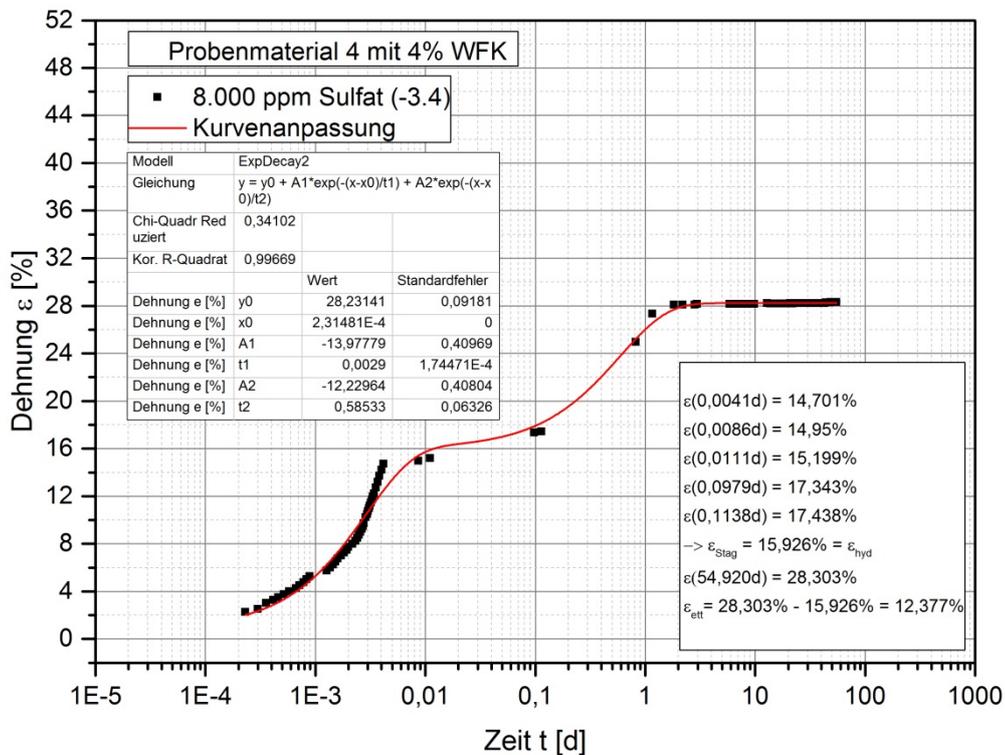
Anlage 9, Bild 27: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.2 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



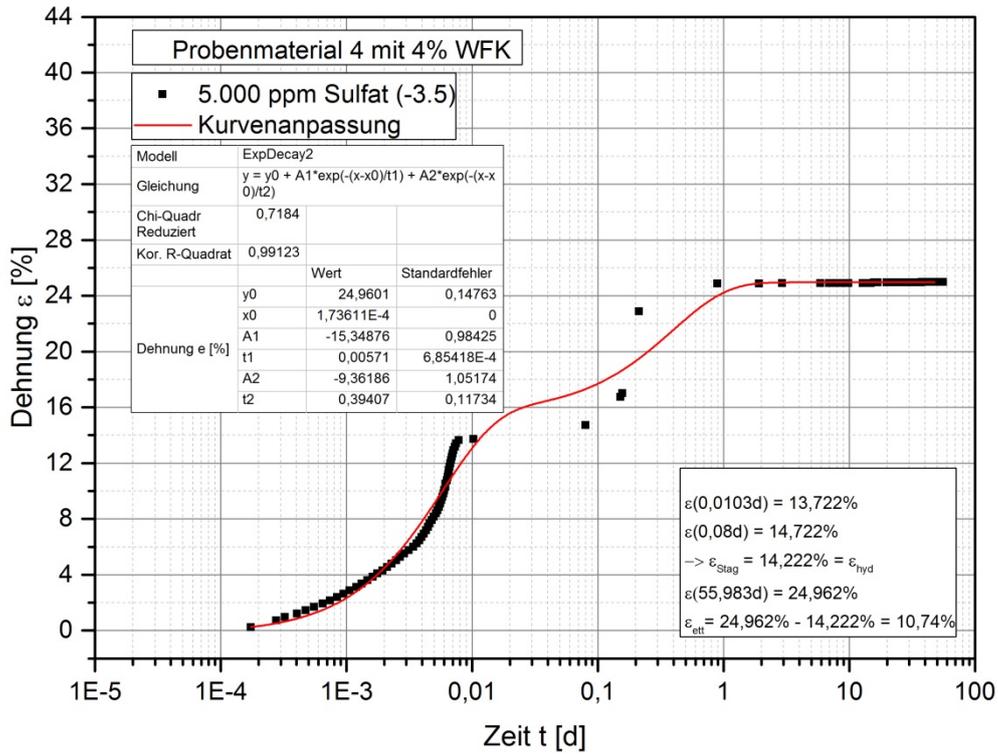
Anlage 9, Bild 28: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.30 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



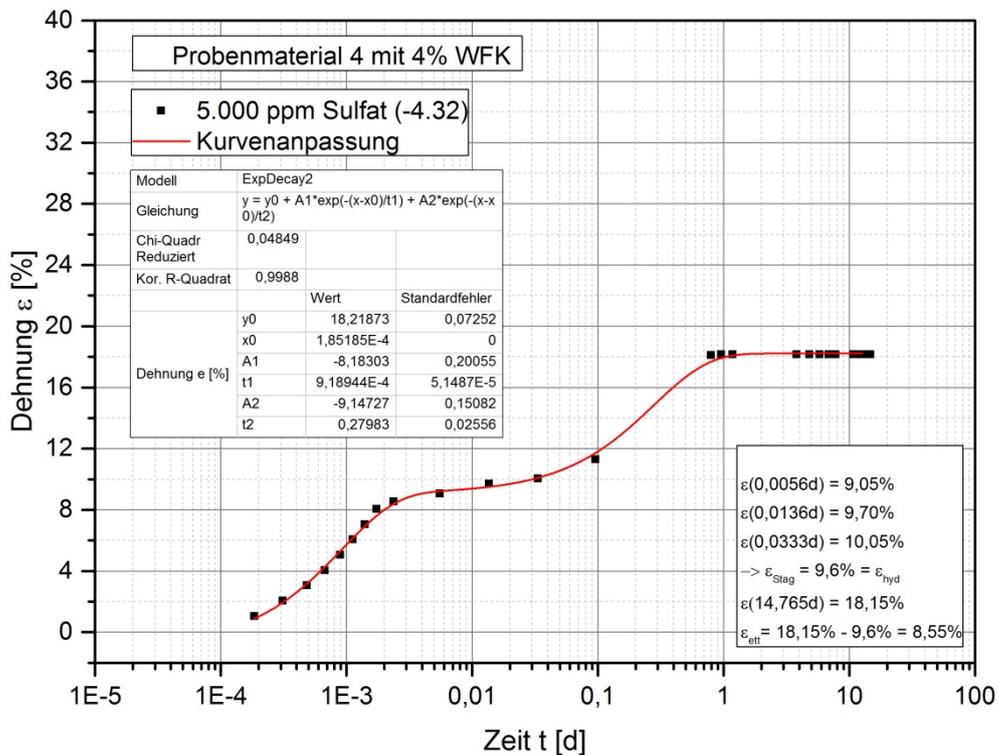
Anlage 9, Bild 29: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.31 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



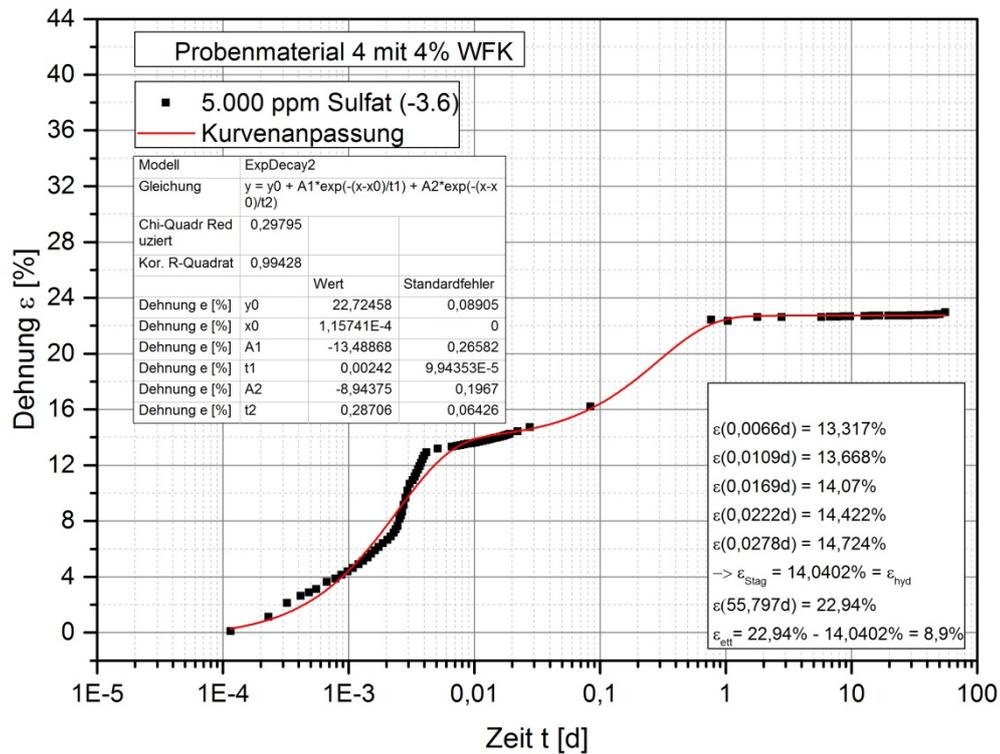
Anlage 9, Bild 30: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.4 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



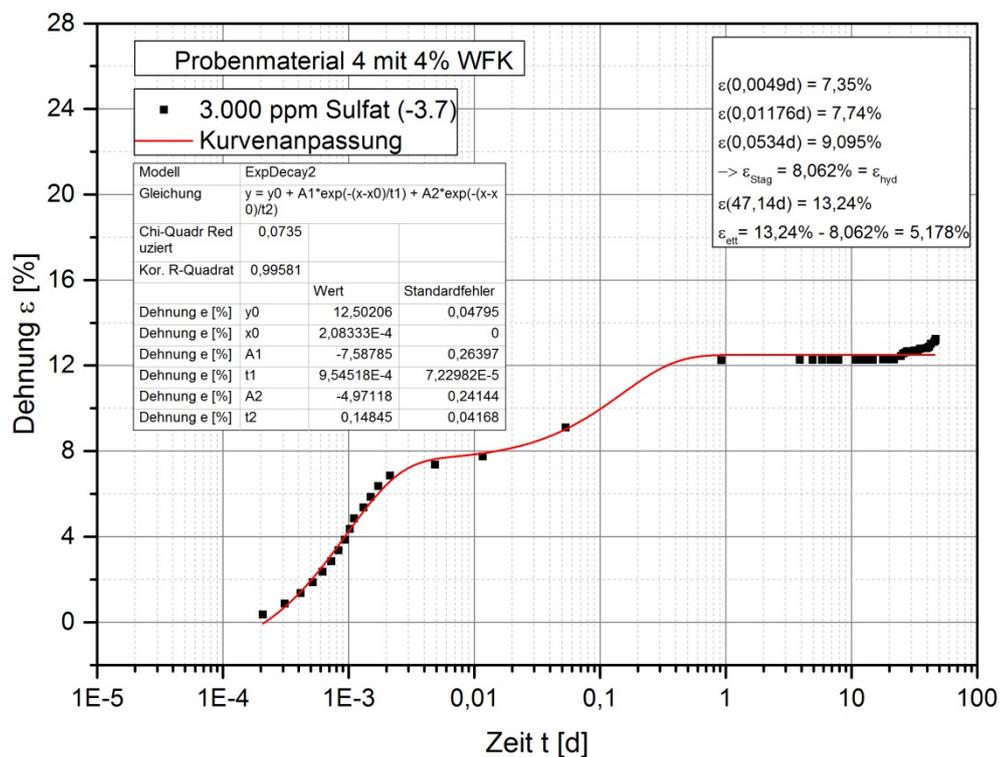
Anlage 9, Bild 31: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.5 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



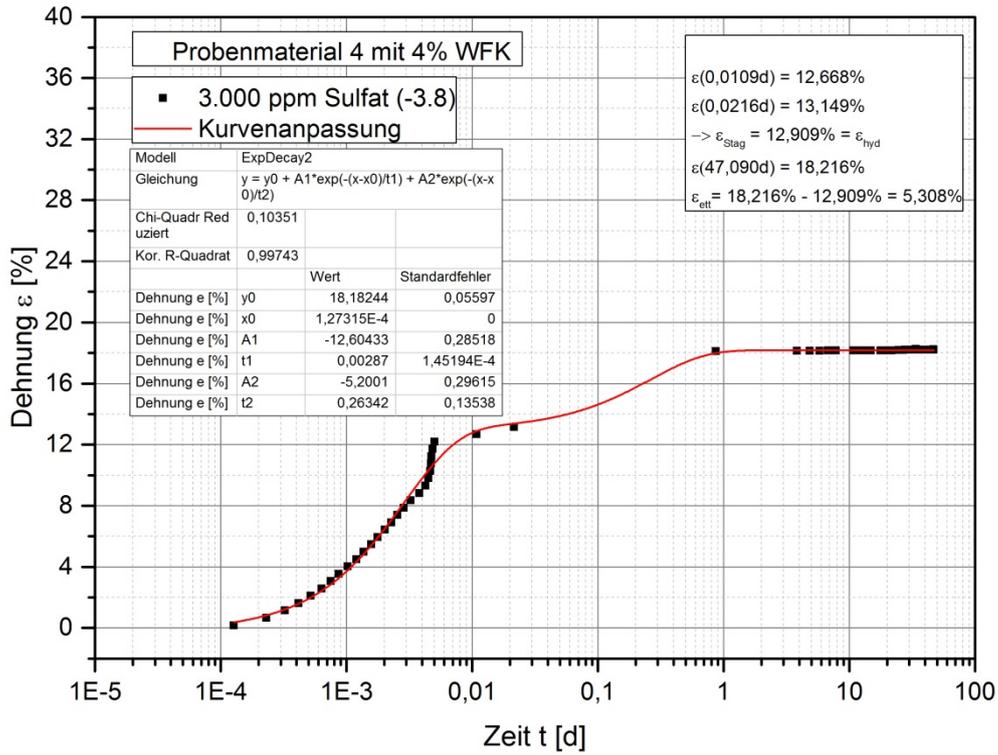
Anlage 9, Bild 32: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 4.32 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



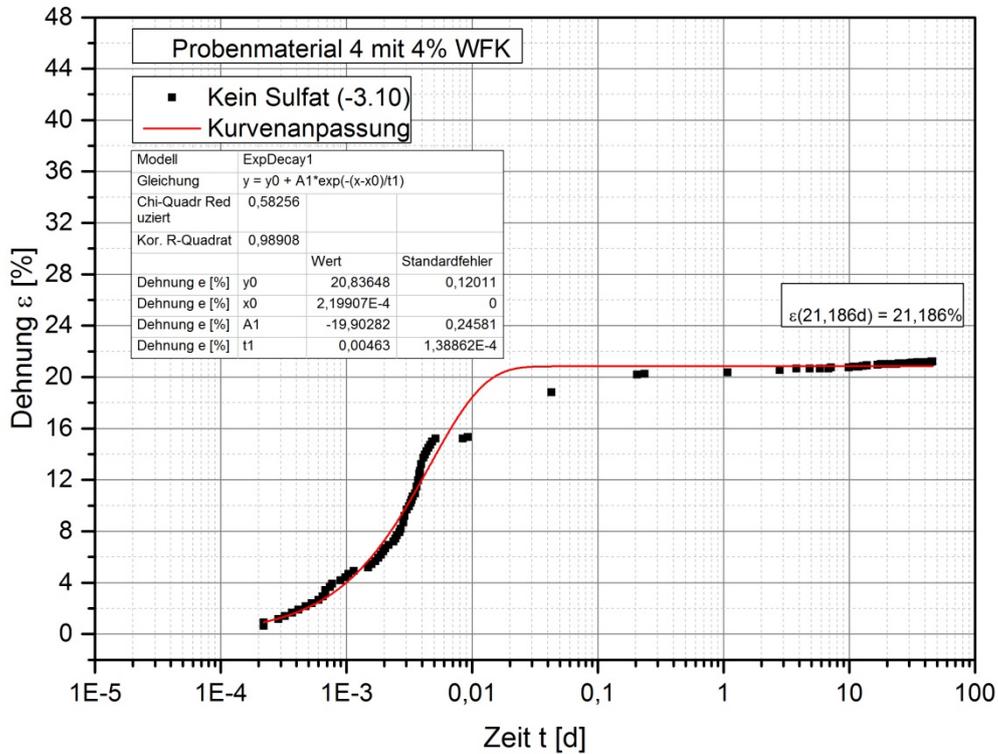
Anlage 9, Bild 33: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.6 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



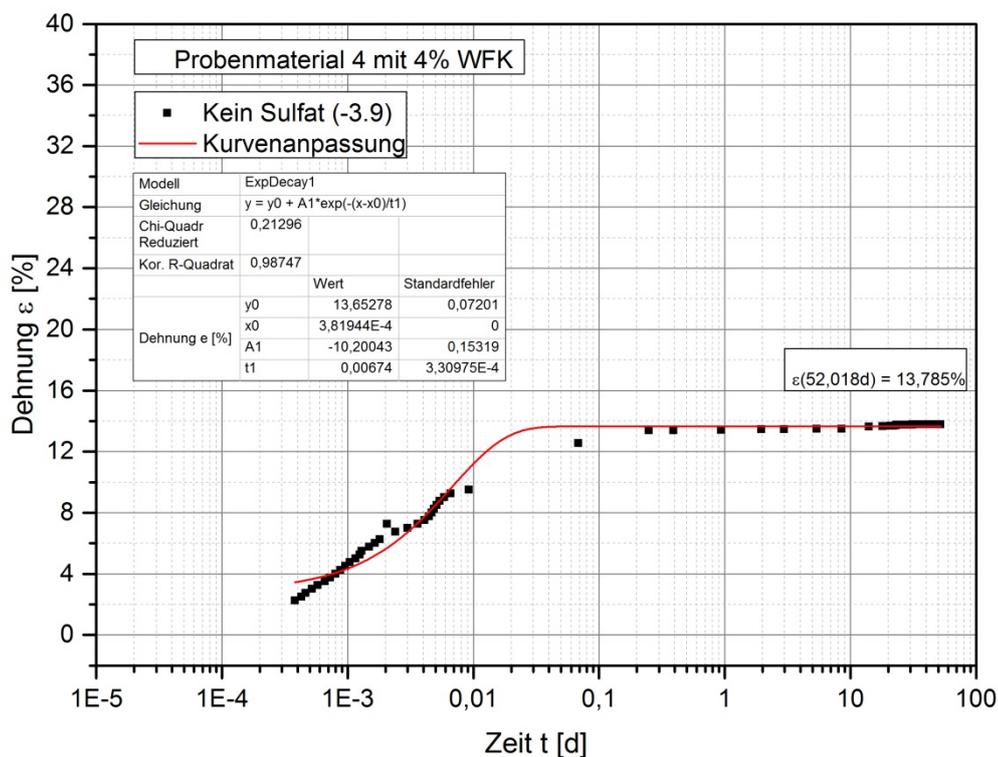
Anlage 9, Bild 34: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.7 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



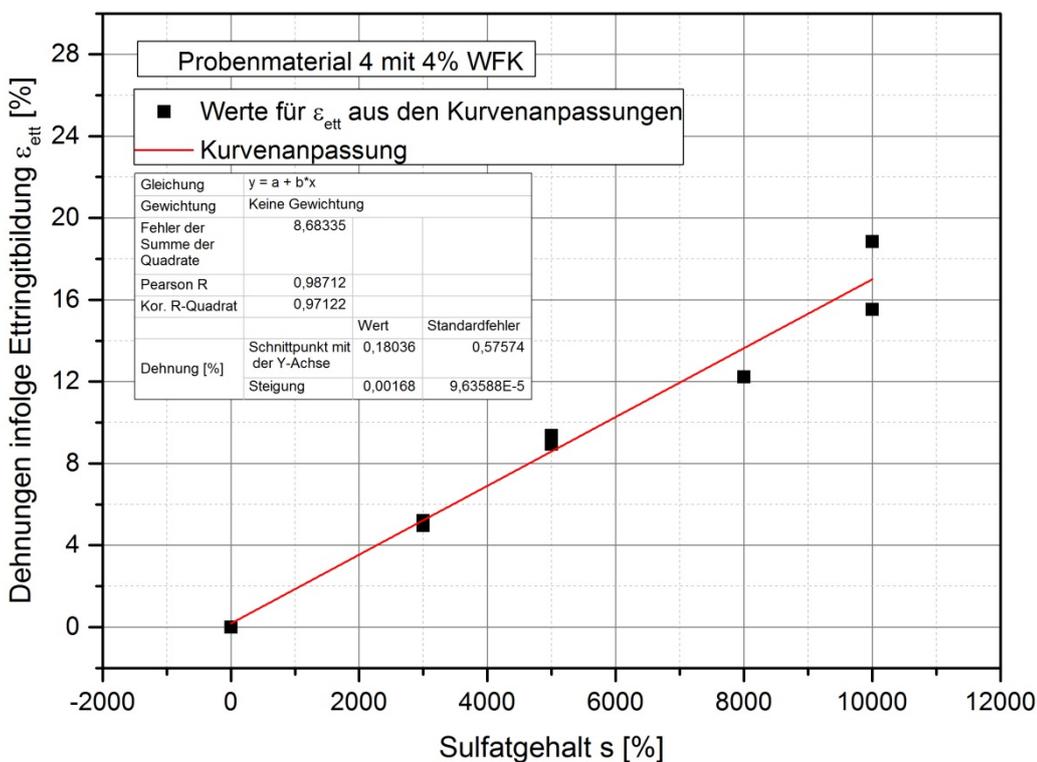
Anlage 9, Bild 35: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.8 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 6.



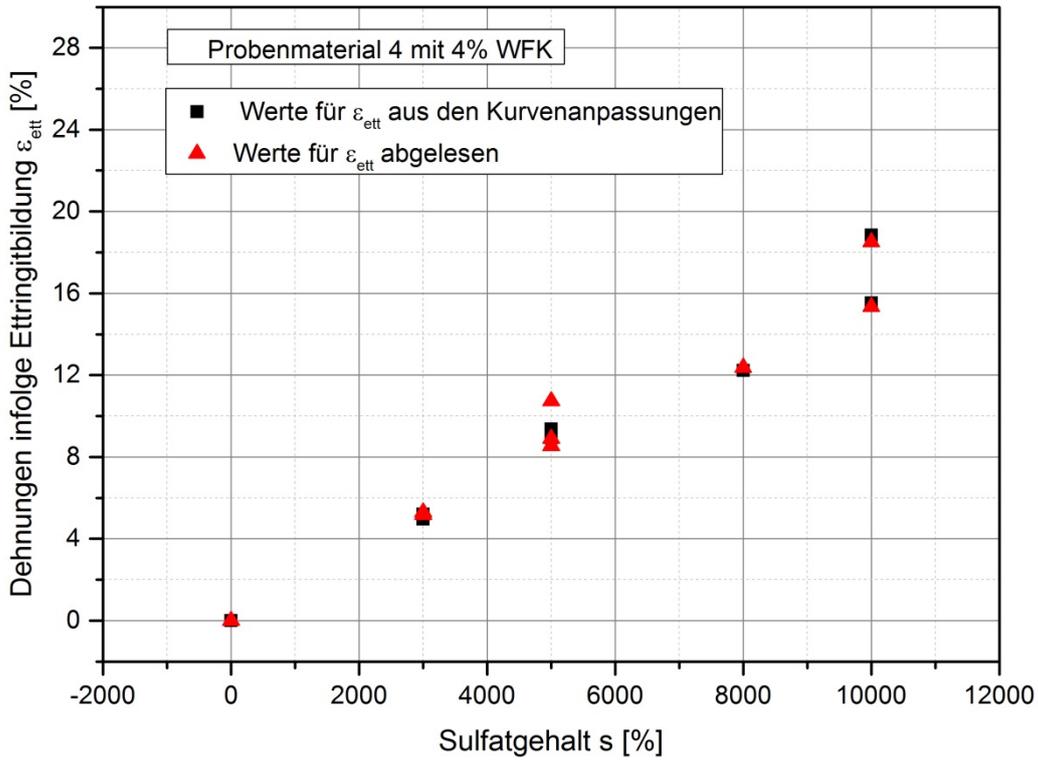
Anlage 9, Bild 36: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.10 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



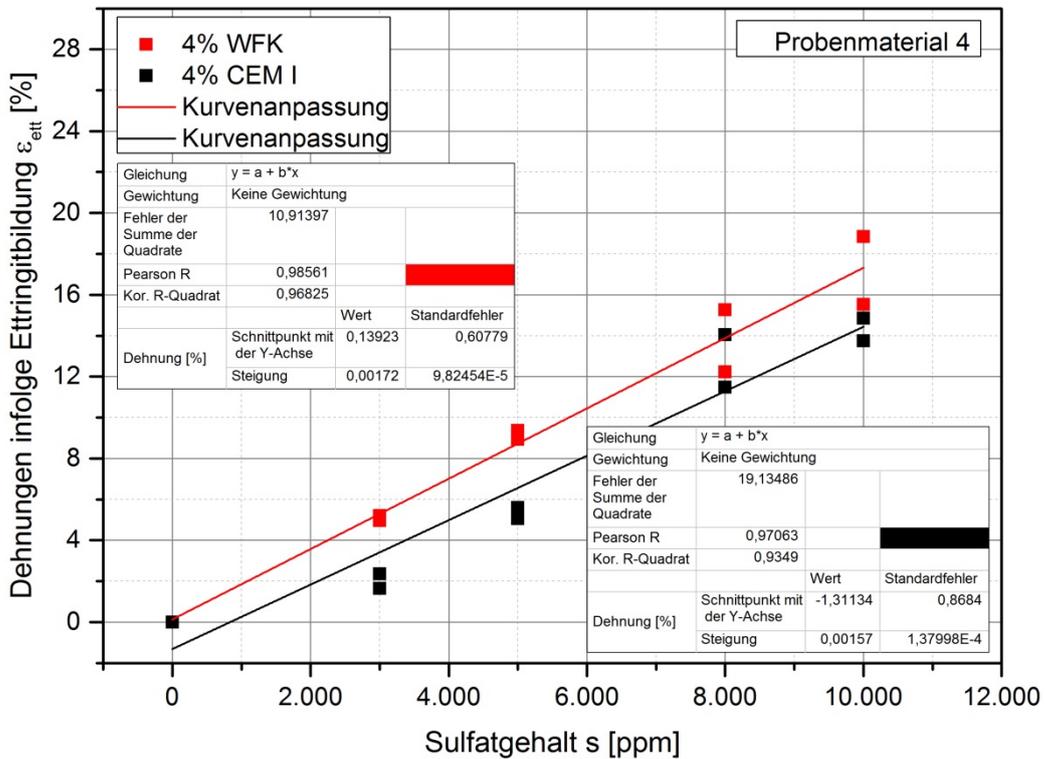
Anlage 9, Bild 37: Semilogarithmische Darstellung des Gesamtverlaufs Versuch 3.9 (Zeit t in Tagen). Rot: Kurvenanpassung an Gleichung 4.



Anlage 9, Bild 38: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ermittelte Dehnungsbeträge. Die Gerade markiert die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 8.

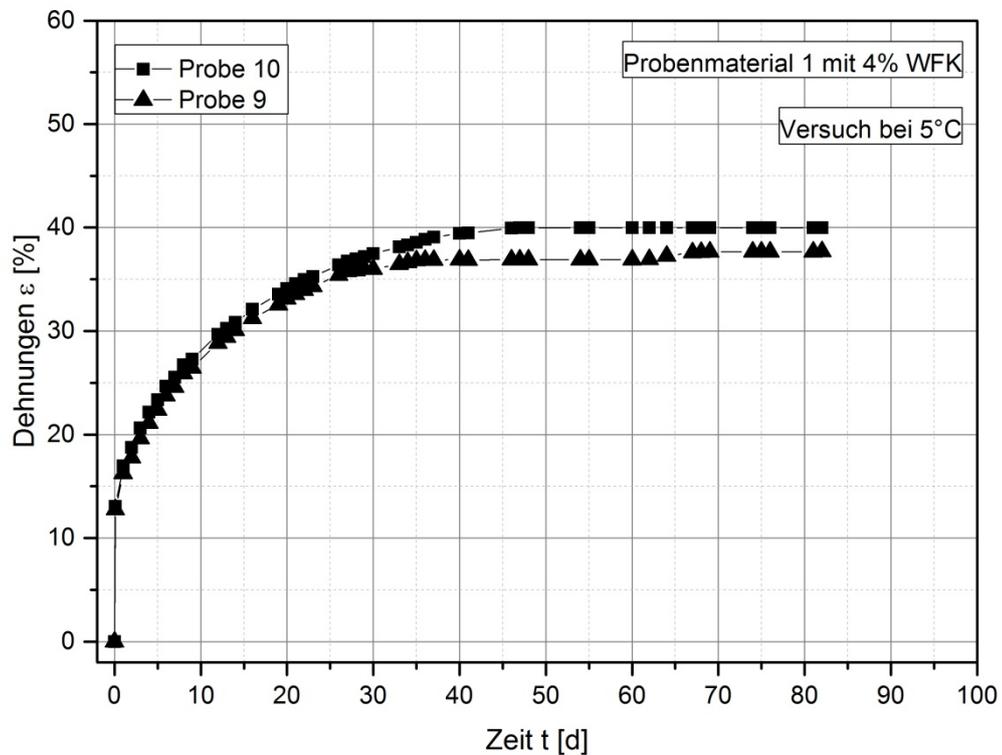


Anlage 9, Bild 39: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gleichung 6 ermittelte Dehnungsbeträge. Rote Dreiecke: Dehnungsbeträge wurden aus den Messwerten abgelesen.

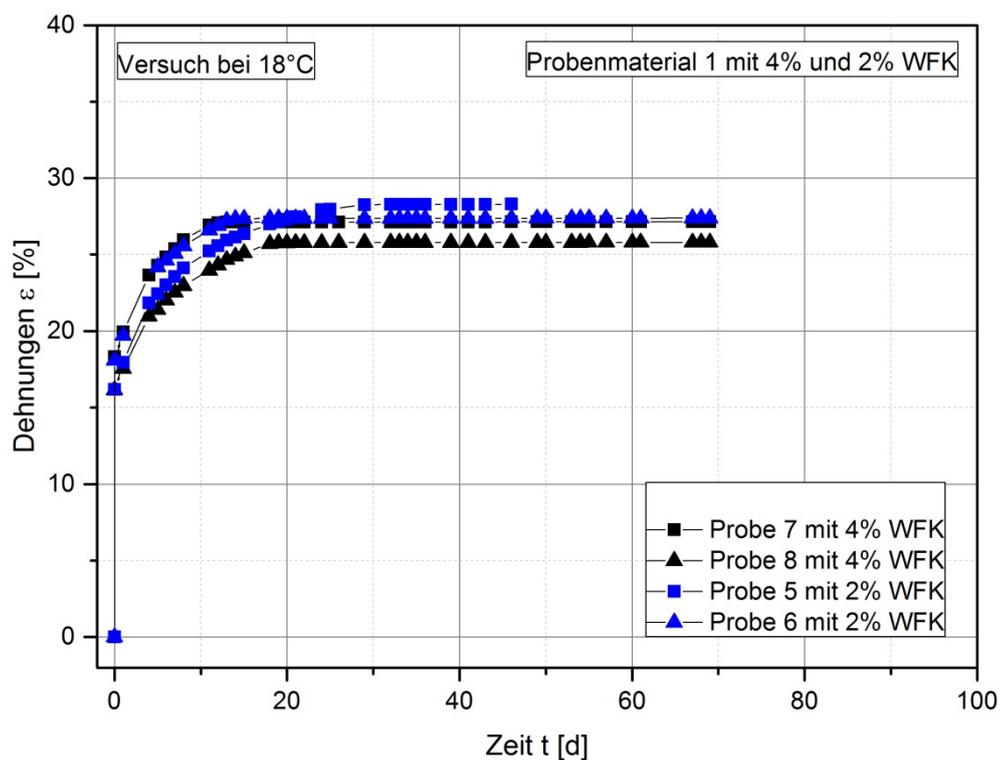


Anlage 9, Bild 40: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. Rote Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gl. 6 ermittelte Dehnungsbeträge der kalkstabilisierten Versuche. Schwarze Quadrate: Über Kurvenanpassung an die Gl. 6 ermittelte Dehnungsbeträge der zementstabilisierten Versuche. Die Geraden markieren jeweils die lineare Kurvenanpassung an Gleichung 7.

Anlage 10 Probenmaterial 1 bei 5°C

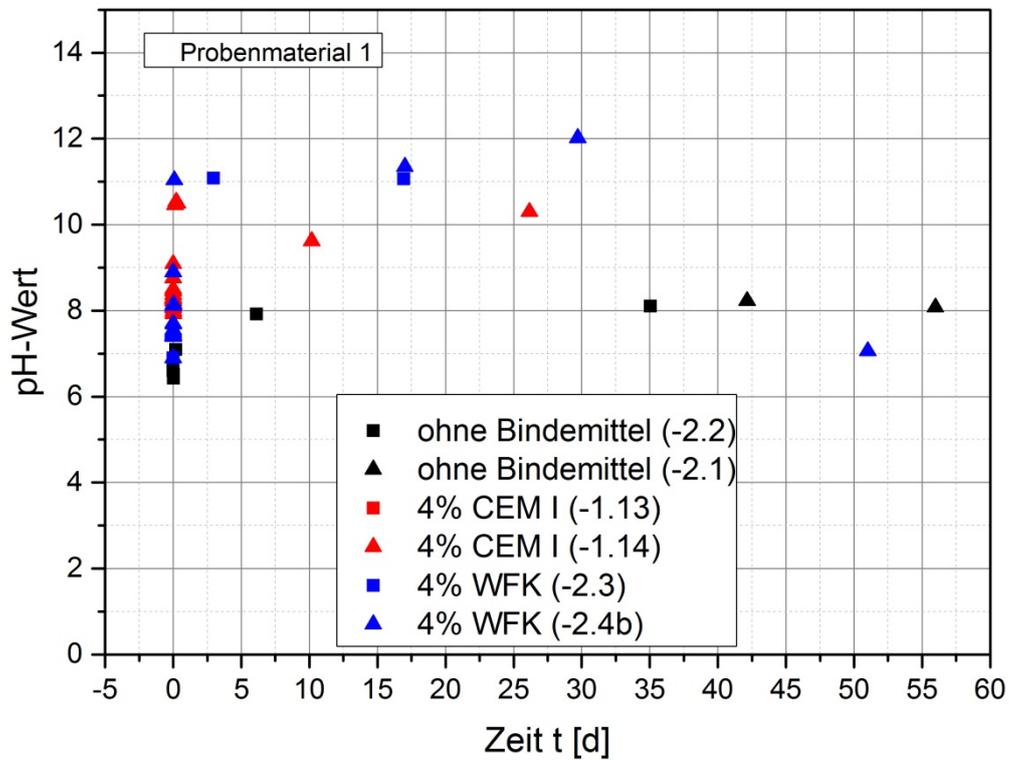


Anlage 10, Bild 1: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen). Versuche wurden mit Probenmaterial 1 und 4% WFK bei einer Umgebungstemperatur von 5°C durchgeführt.

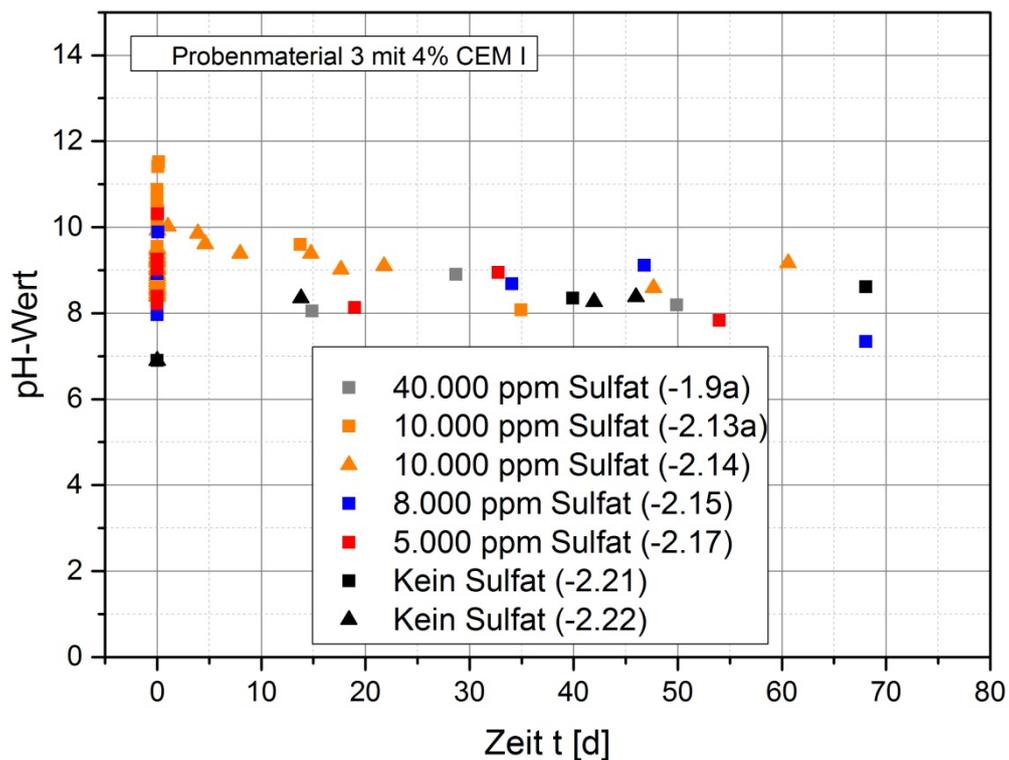


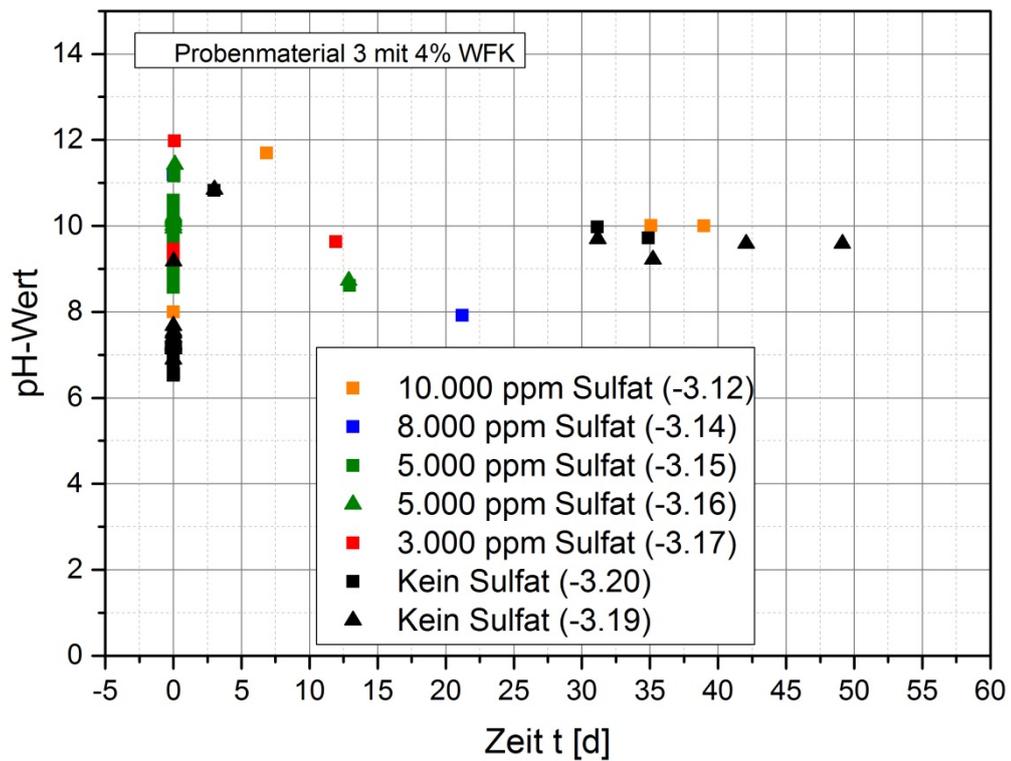
Anlage 10, Bild 2: Gesamtverlauf (Zeit t in Tagen) mit Kurvenanpassungen an Gleichung 8. Versuche wurden mit Probenmaterial 1 und 2% bzw. 4% WFK bei einer Umgebungstemperatur von 18°C durchgeführt.

Anlage 11 pH-Wert Messungen

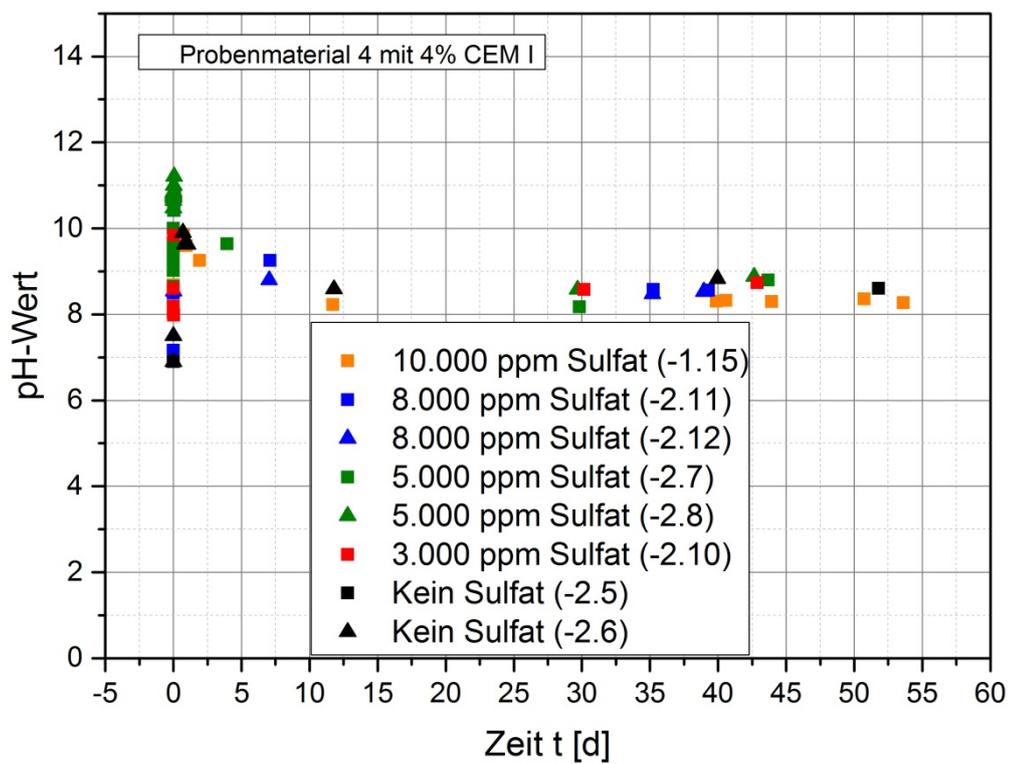


Anlage 11, Bild 1: Ergebnisse der pH-Messung am Probenmaterial 1

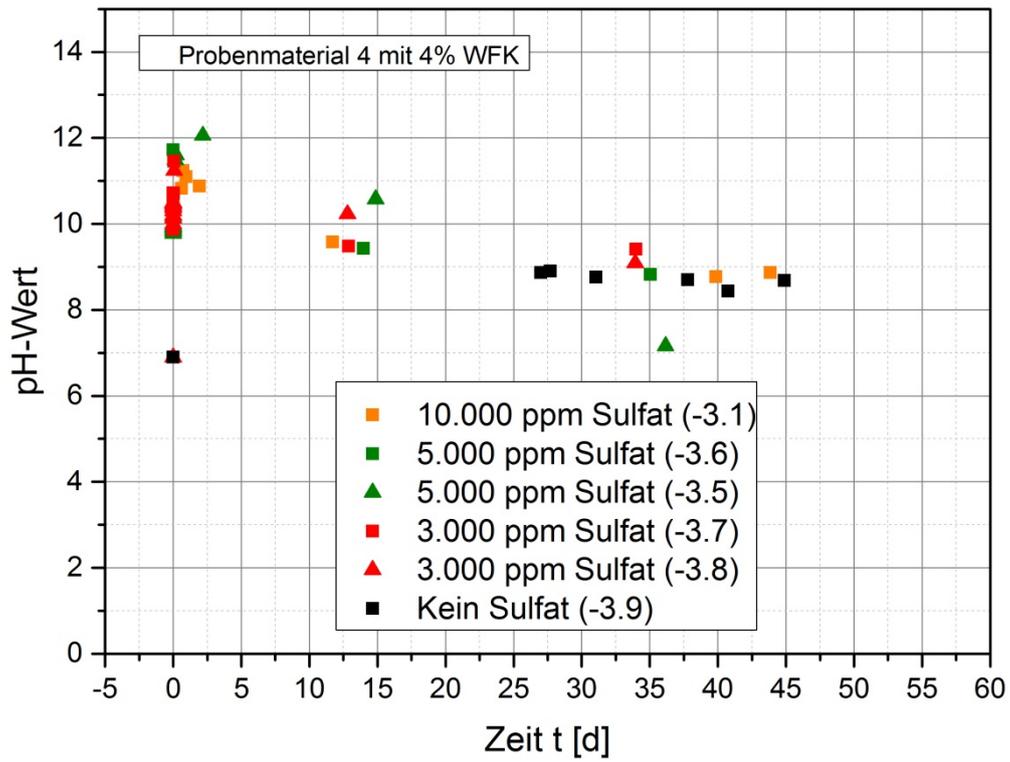




Anlage 11, Bild 3: Ergebnisse der pH-Messung am Probenmaterial 3 mit Zugabe Weißfeinkalk

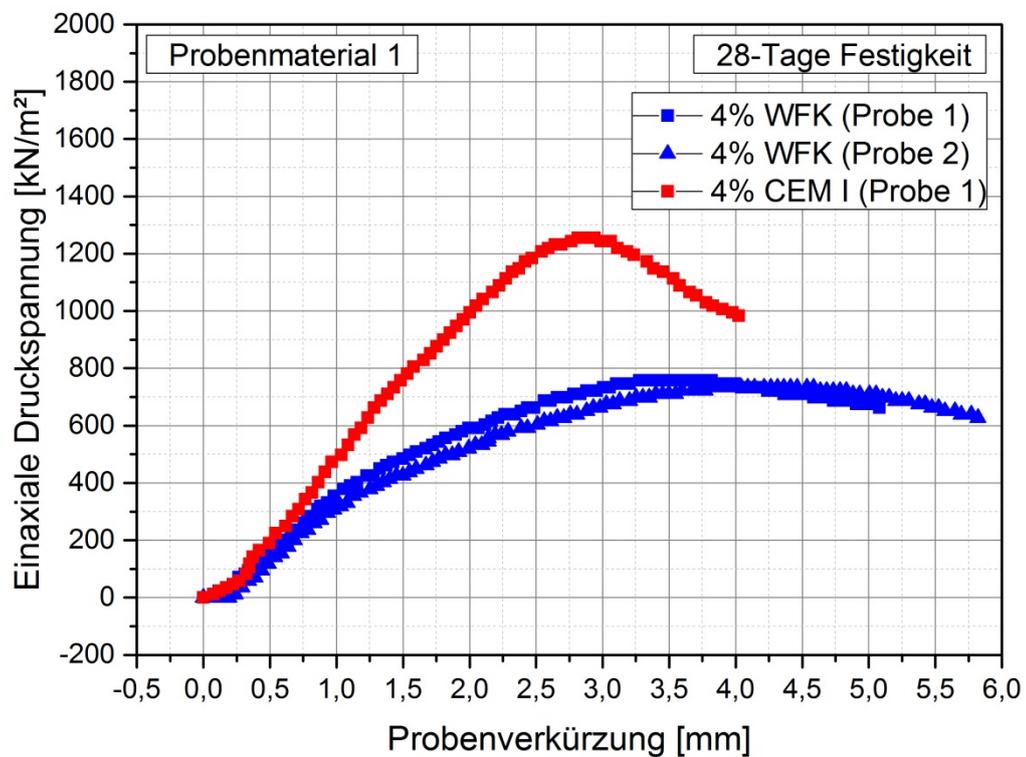


Anlage 11, Bild 4: Ergebnisse der pH-Messung am Probenmaterial 4 mit Zugabe Portlandzement

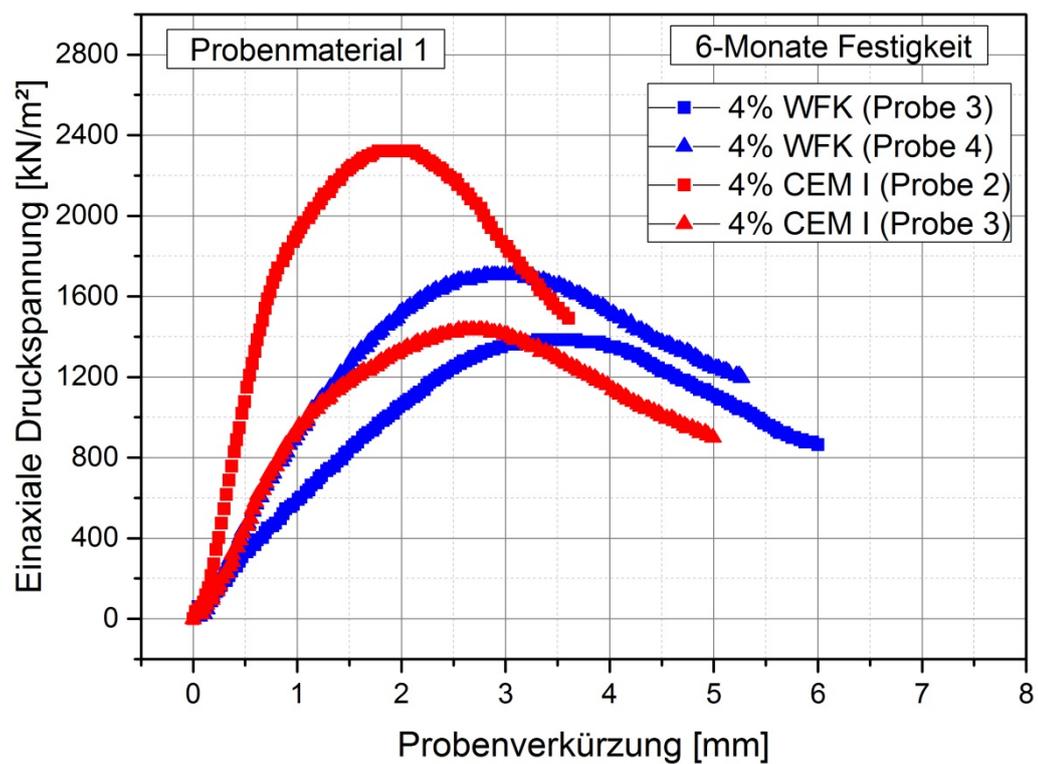


Anlage 11, Bild 5: Ergebnisse der pH-Messung am Probenmaterial 4 mit Zugabe Weißfeinkalk

Anlage 12 Einaxiale Druckversuche am natürlichen Material



Anlage 12, Bild 1: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 1 nach 28 Tagen



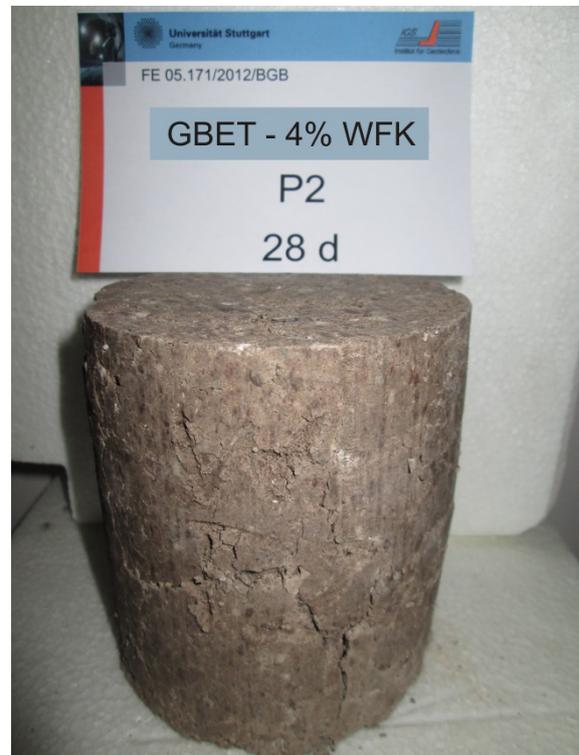
Anlage 12, Bild 2: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 1 nach 6 Monaten



Anlage 12, Bild 3: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% CEM I Probe 1 nach 28 Tagen



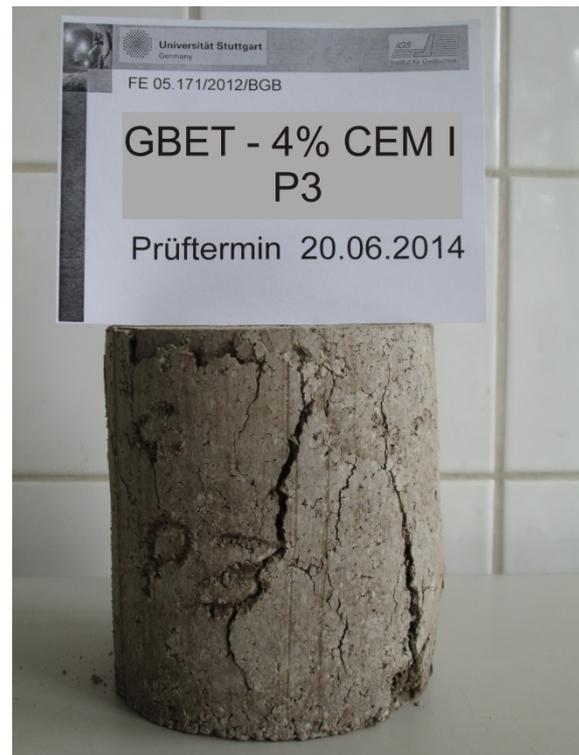
Anlage 12, Bild 4: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% WFK Probe 1 nach 28 Tagen



Anlage 12, Bild 5: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% WFK Probe 2 nach 28 Tagen



Anlage 12, Bild 6: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% CEM I Probe 2 nach 6 Monaten



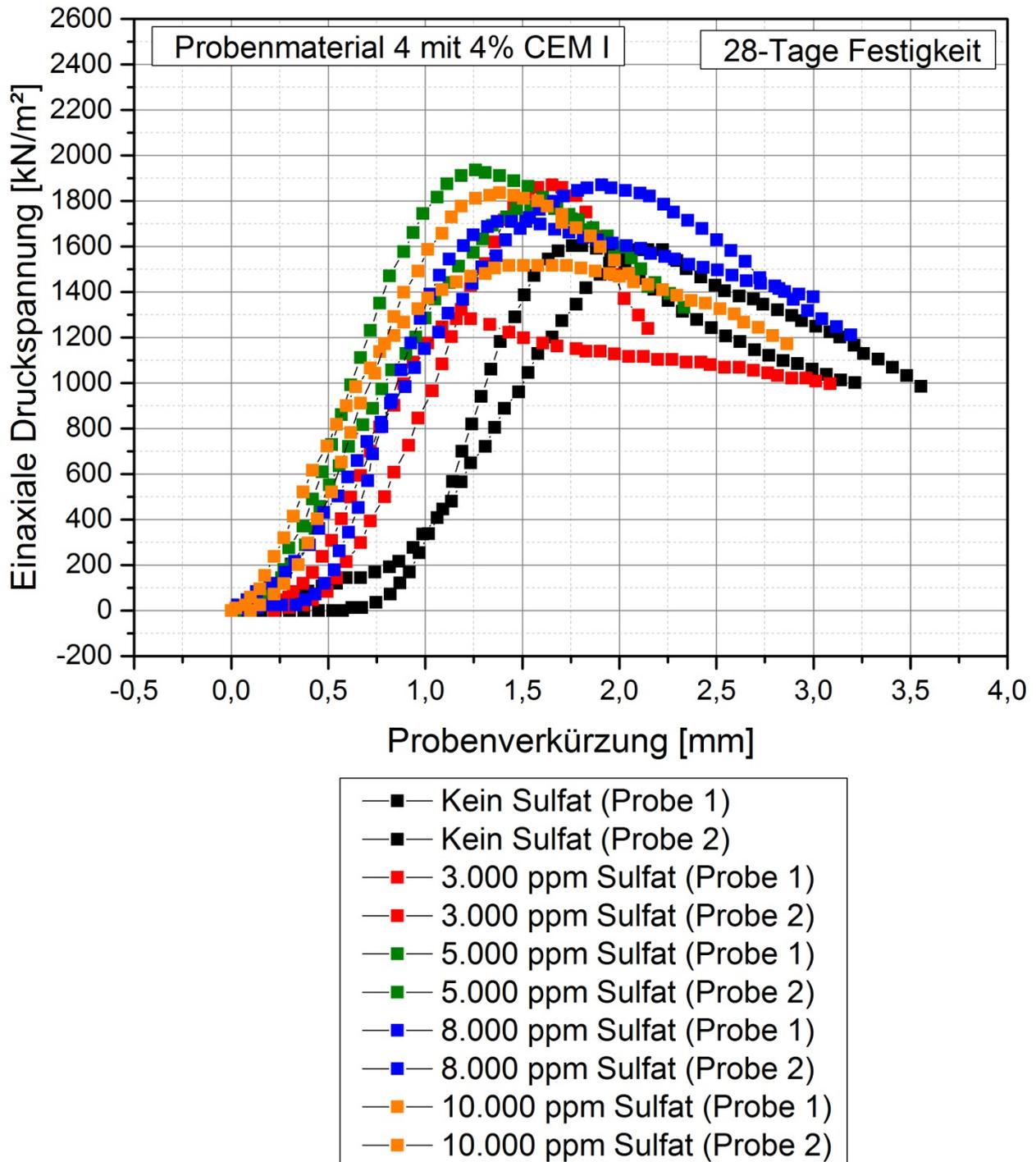
Anlage 12, Bild 7: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% CEM I Probe 3 nach 6 Monaten



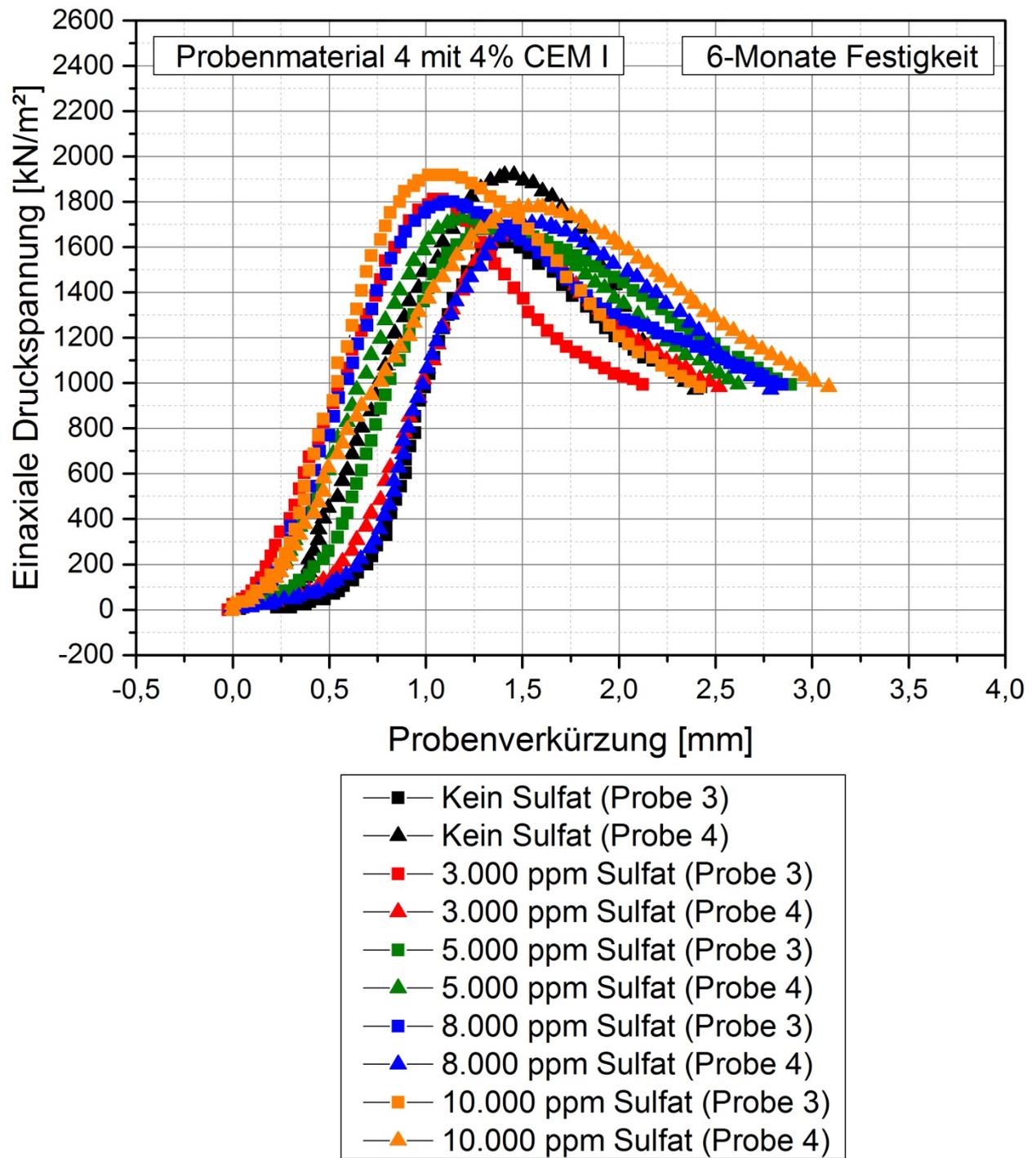
Anlage 12, Bild 8: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% WFK Probe 3 nach 6 Monaten



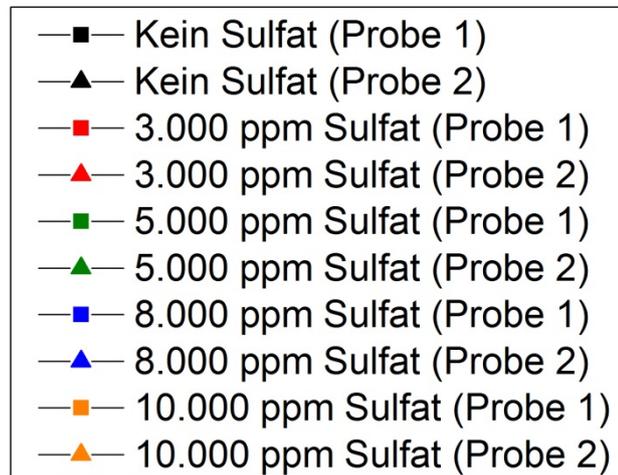
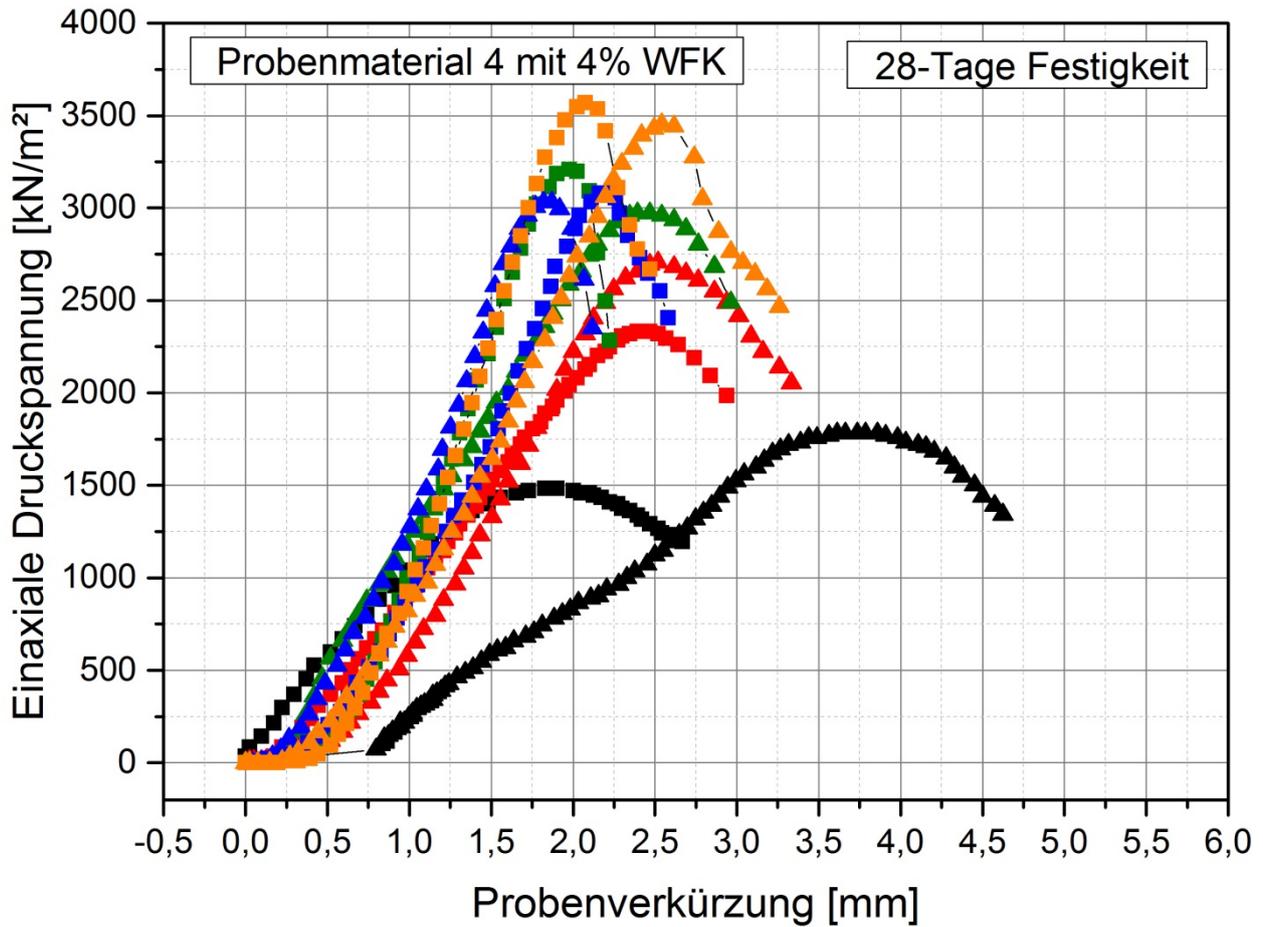
Anlage 12, Bild 9: Bruchbild Probenmaterial 1 mit 4% WFK Probe 4 nach 6 Monaten



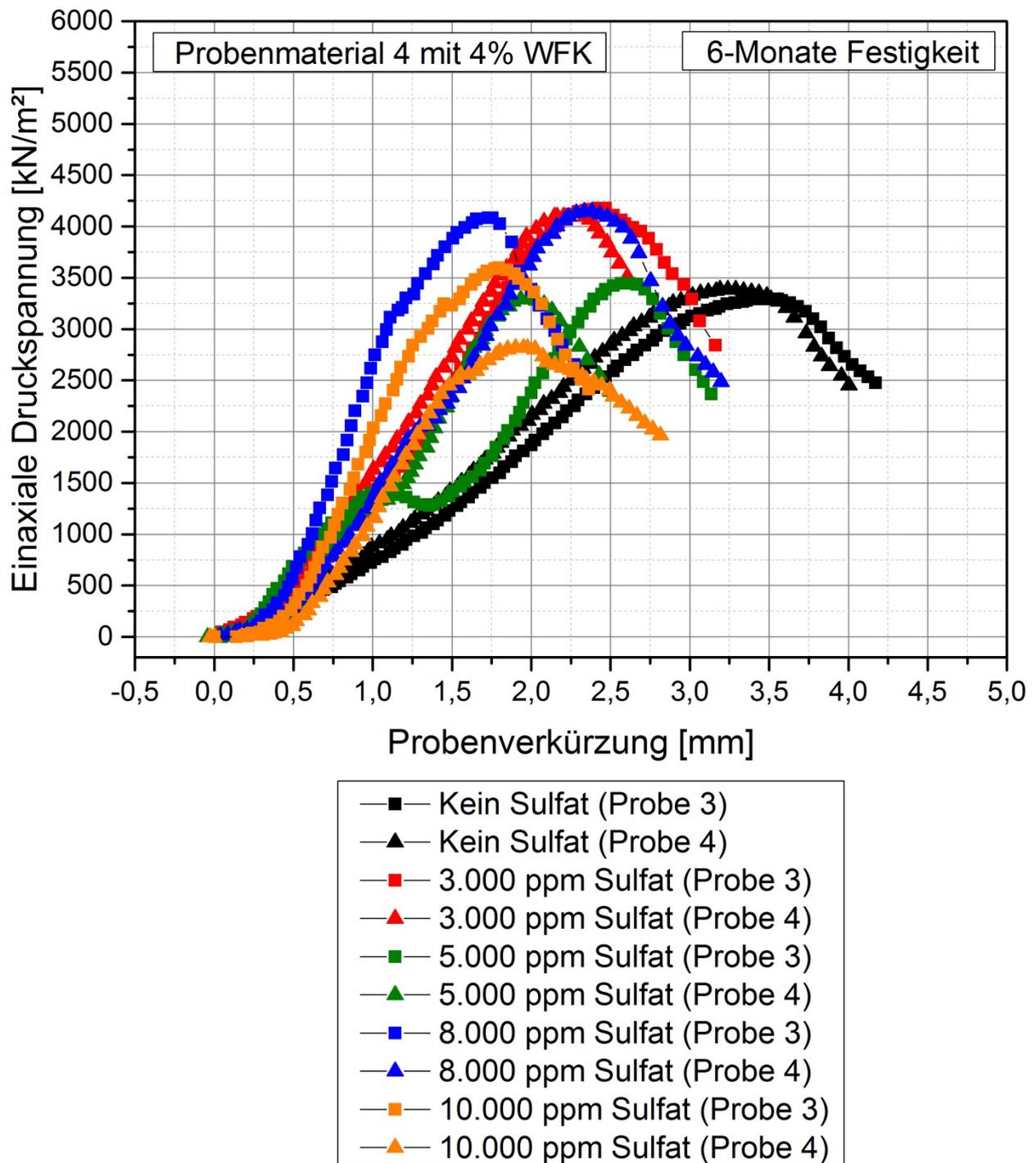
Anlage 12, Bild 10: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 4 und Zugabe Portlandzement als Bindemittel nach 28 Tagen.



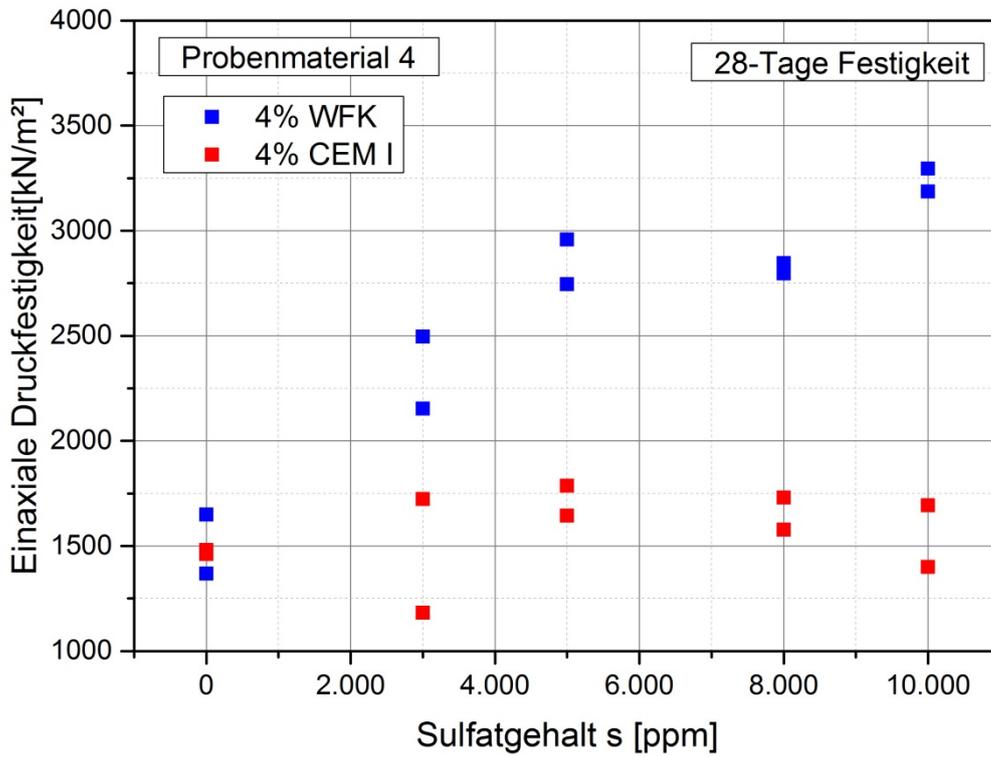
Anlage 12, Bild 11: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 4 und Zugabe Portlandzement als Bindemittel nach 6 Monaten.



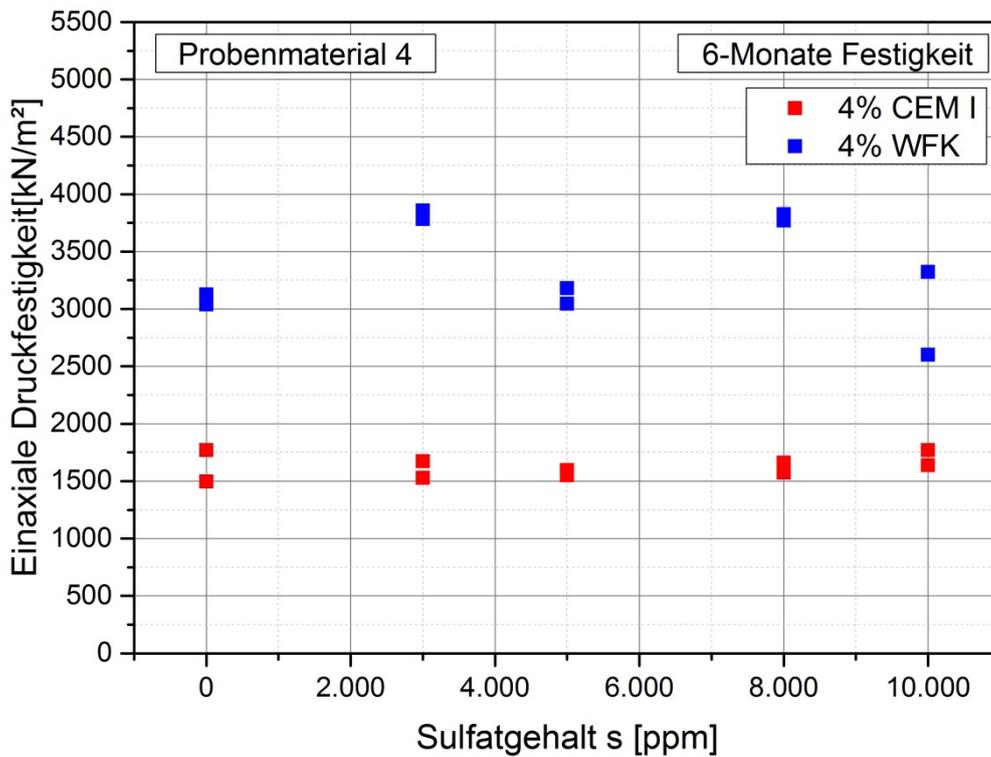
Anlage 12, Bild 12: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 4 und Zugabe Weißfeinkalk als Bindemittel nach 28 Tagen.



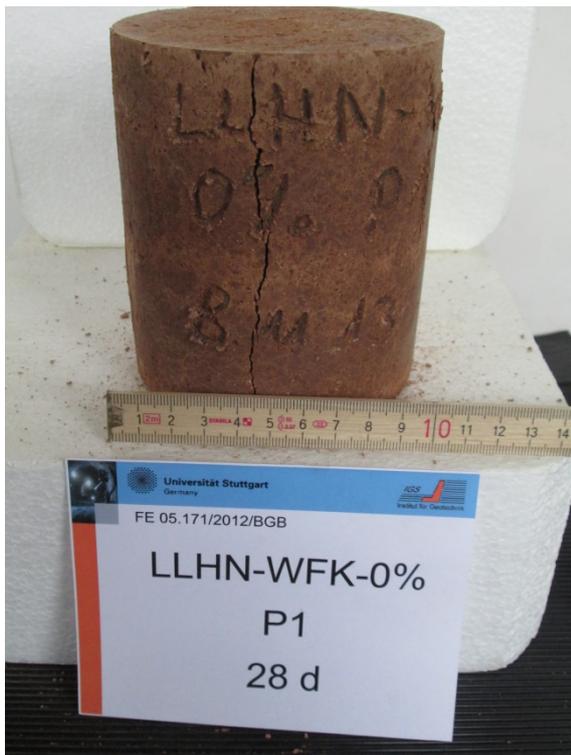
Anlage 12, Bild 13: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche am Probenmaterial 4 und Zugabe Weißfeinkalk als Bindemittel nach 6 Monaten.



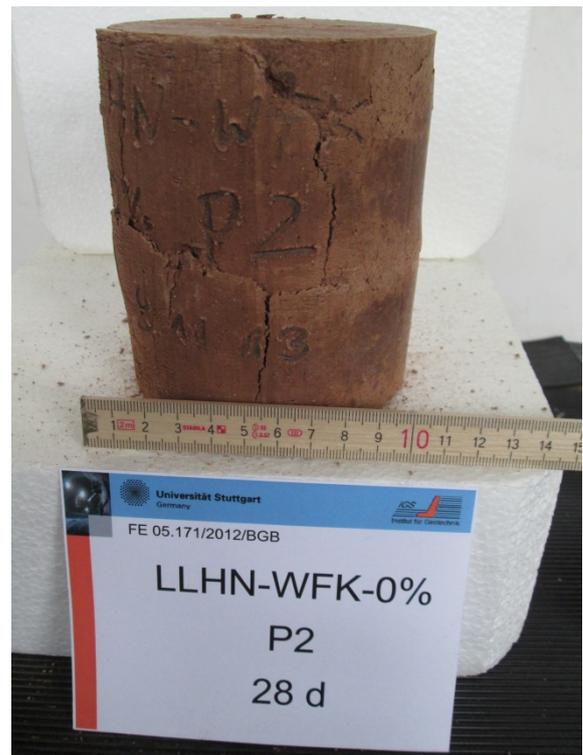
Anlage 12, Bild 14: Einaxiale Druckspannung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts nach 28 Tagen. Blaue Quadrate: Zugabe 4% Weißfeinkalk als Bindemittel. Rote Quadrate: Zugabe 4% Portlandzement als Bindemittel.



Anlage 12, Bild 15: Einaxiale Druckspannung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts nach 6 Monaten. Blaue Quadrate: Zugabe 4% Weißfeinkalk als Bindemittel. Rote Quadrate: Zugabe 4% Portlandzement als Bindemittel.



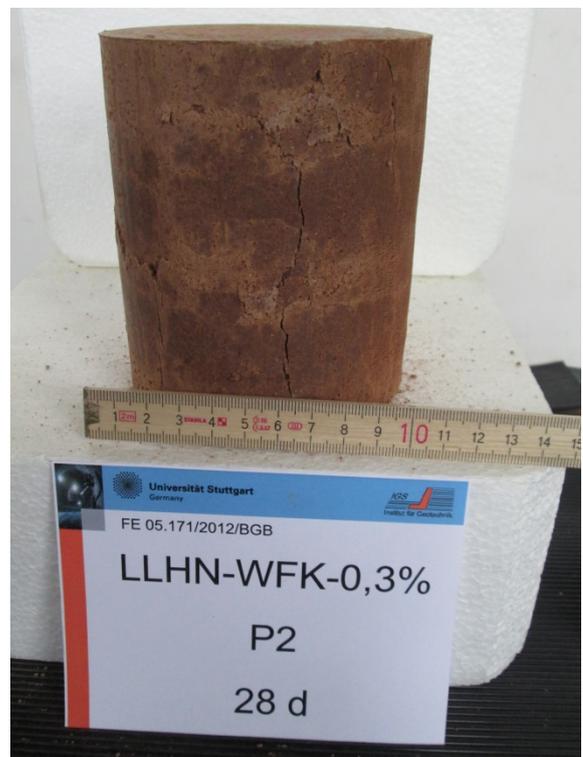
Anlage 12, Bild 16: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 0 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



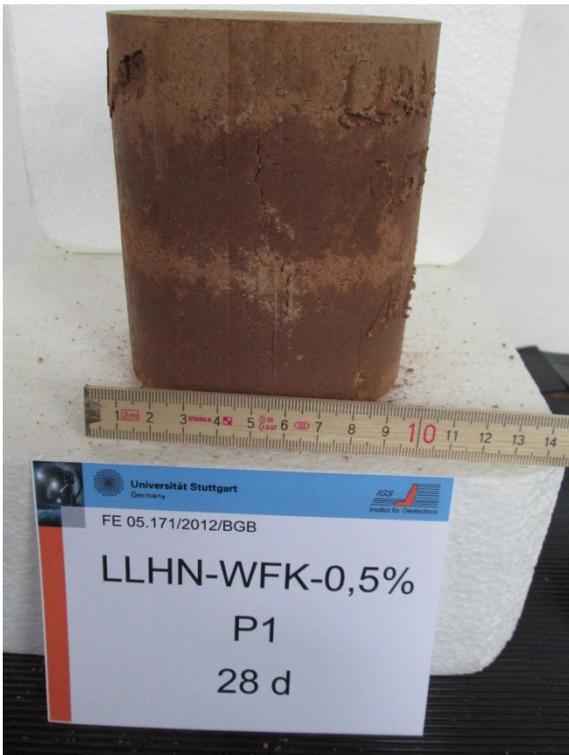
Anlage 12, Bild 17: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 0 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



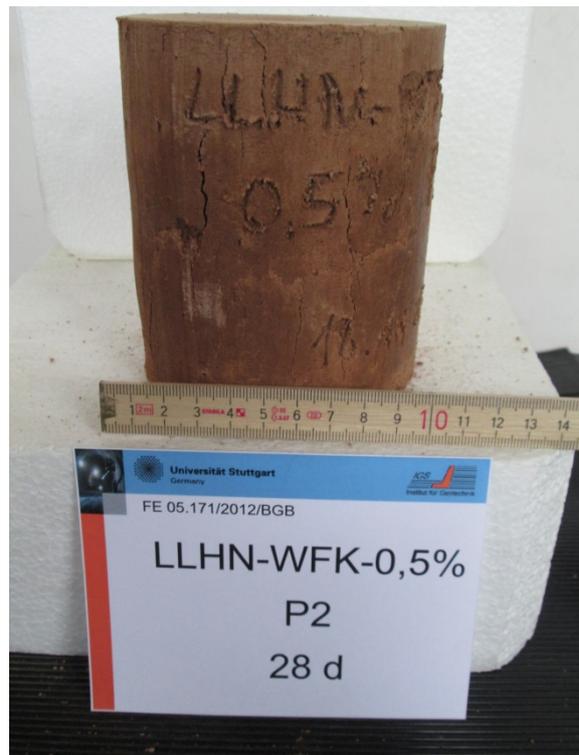
Anlage 12, Bild 18: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 3.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



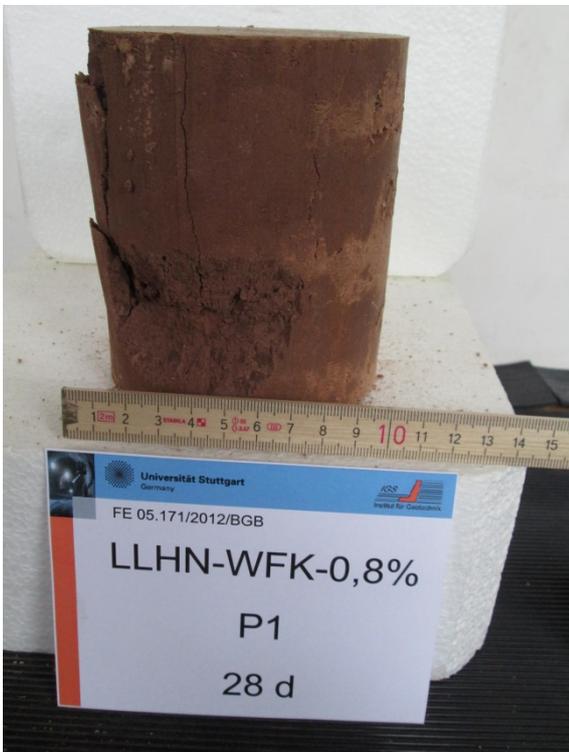
Anlage 12, Bild 19: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 3.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



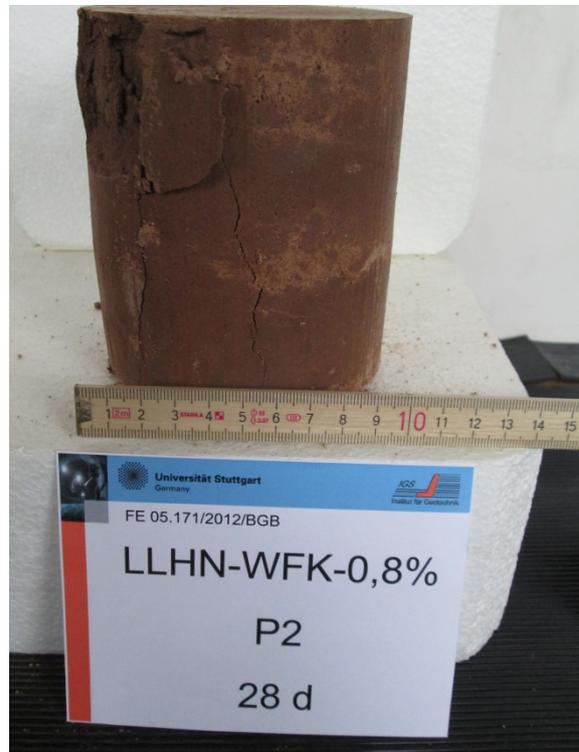
Anlage 12, Bild 20: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 5.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



Anlage 12, Bild 21: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 5.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



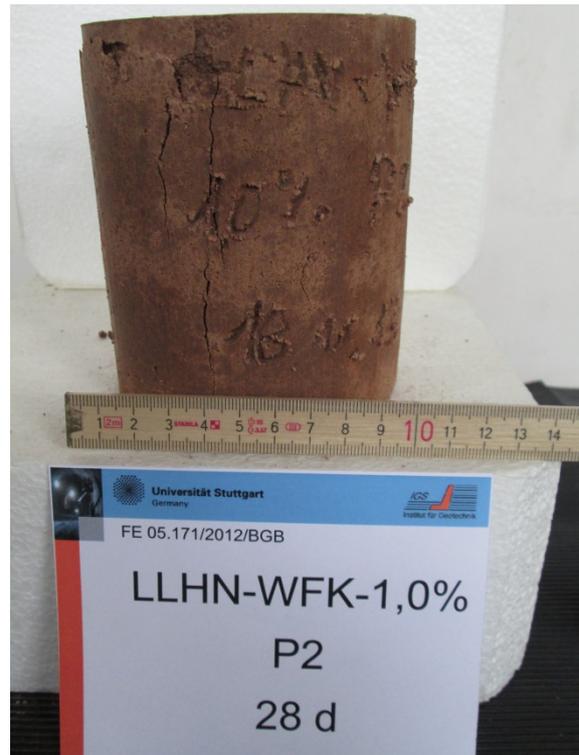
Anlage 12, Bild 22: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 8.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



Anlage 12, Bild 23: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 8.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



Anlage 12, Bild 24: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 10.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



Anlage 12, Bild 25: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 10.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



Anlage 12, Bild 26: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 0 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



Anlage 12, Bild 27: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 0 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



Anlage 12, Bild 28: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 3.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



Anlage 12, Bild 29: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 3.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



Anlage 12, Bild 30: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 5.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



Anlage 12, Bild 31: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 5.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



Anlage 12, Bild 32: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 8.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



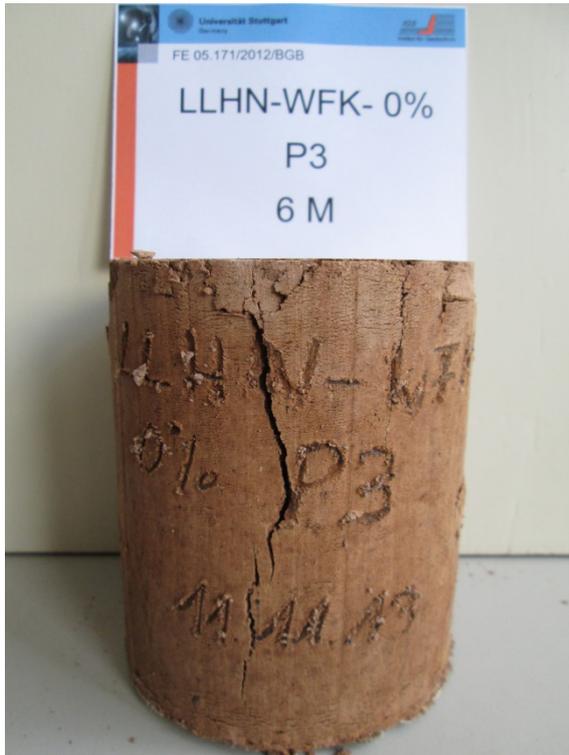
Anlage 12, Bild 33: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 8.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



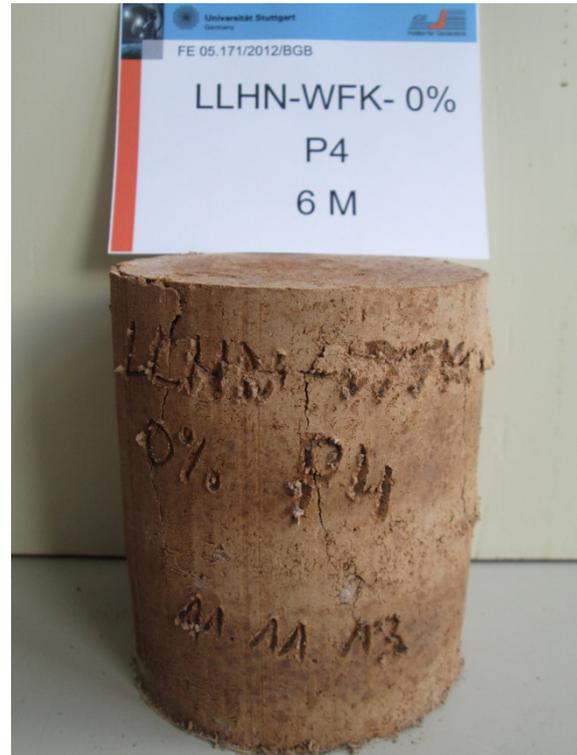
Anlage 12, Bild 34: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 10.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 1)



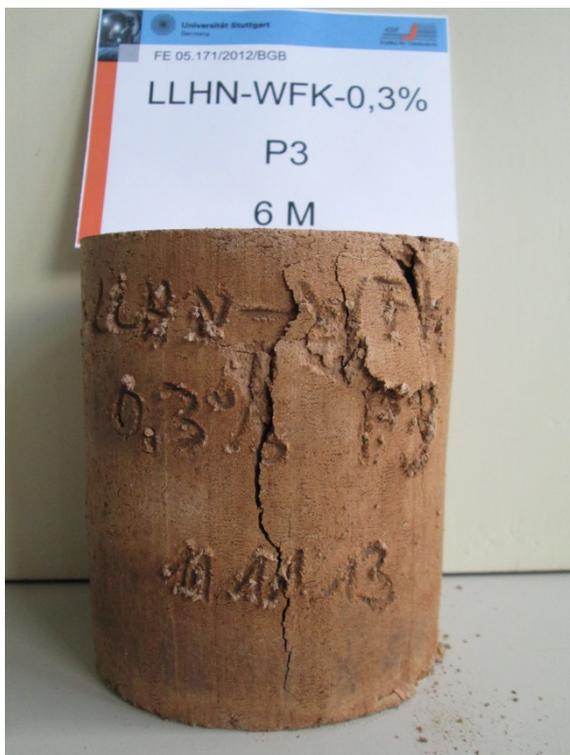
Anlage 12, Bild 35: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 10.000 ppm Sulfat nach 28 Tagen (Probe 2)



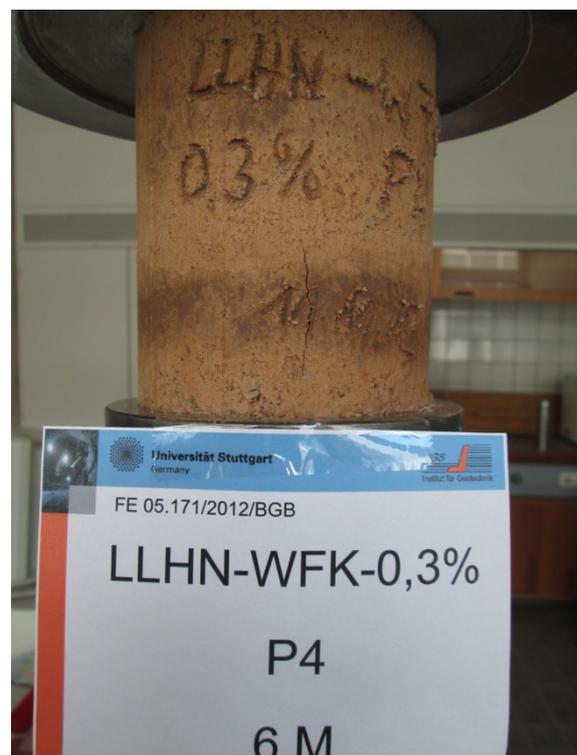
Anlage 12, Bild 36: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 0 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 37: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 0 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 38: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 3.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



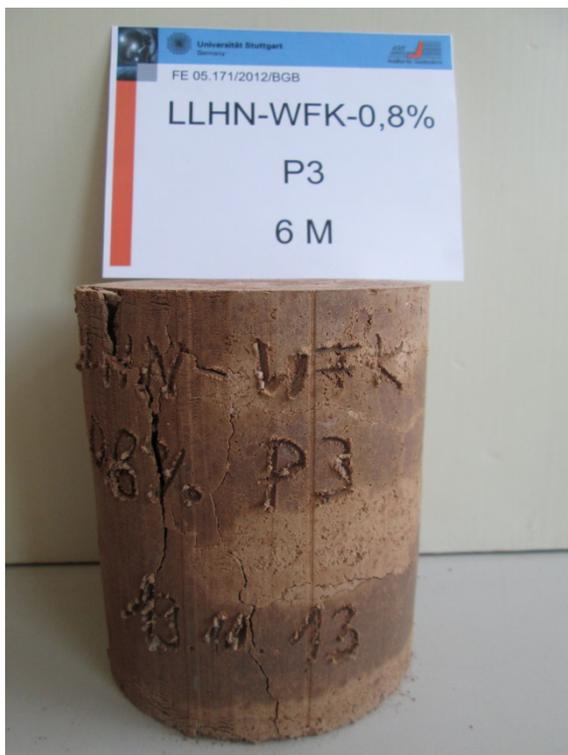
Anlage 12, Bild 39: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 3.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 40: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 5.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 41: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 5.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 42: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 8.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 43: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 8.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 44: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 10.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



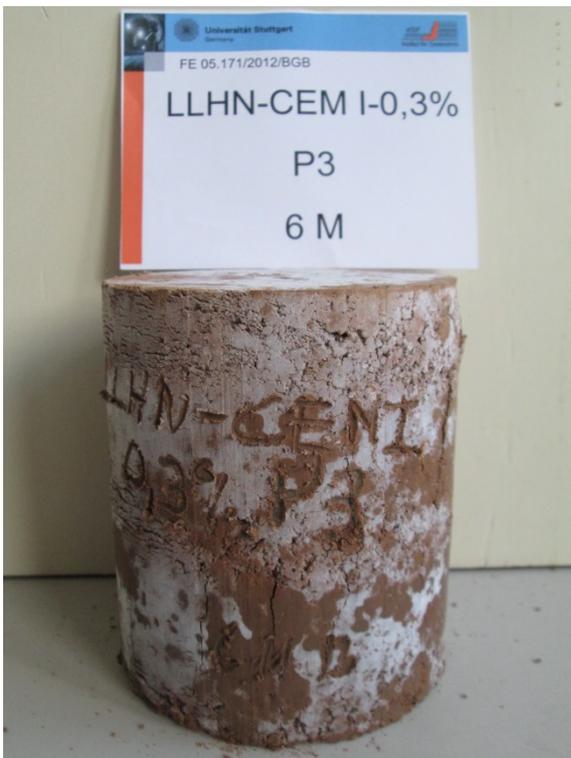
Anlage 12, Bild 45: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% WFK und 10.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



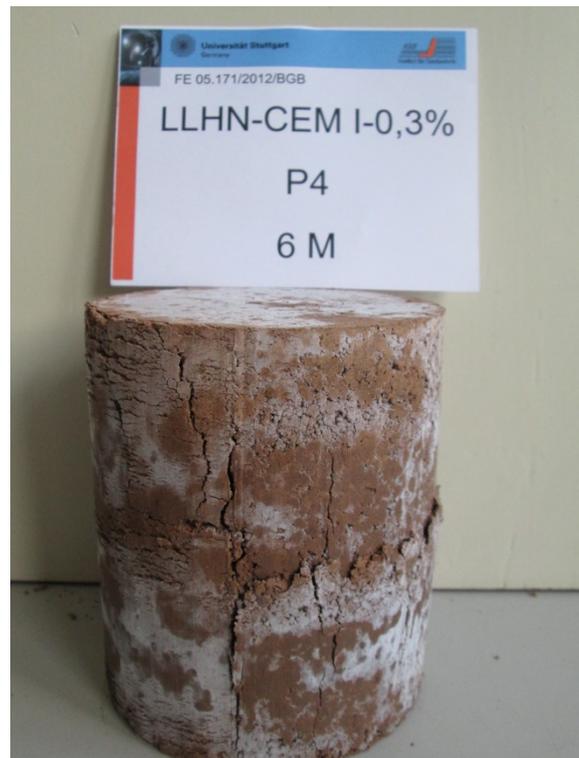
Anlage 12, Bild 46: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 0 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 47: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 0 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 48: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 3.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 49: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 3.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 50: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 5.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 51: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 5.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 52: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 8.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 53: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 8.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)



Anlage 12, Bild 54: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 10.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 3)



Anlage 12, Bild 55: Bruchbild Probenmaterial 4 mit 4% CEM I und 10.000 ppm Sulfat nach 6 Monaten (Probe 4)

Anlage 13 Probenkennwerte

Probenmaterial	Korndichte [g/cm ³]	Bindemittel	Versuch	Feuchtdichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Porenzahl [-]
1: GB ET	2,786	4% CEM I	1.14	1,96	1,96	0,42
			4.3	1,93	1,93	0,44
		4% WFK	2.4b	1,97	1,97	0,41
			2.3	1,94	1,94	0,44
		Kein Bindemittel	2.1	1,81	1,81	0,54
			2.2	1,89	1,89	0,48

Anlage 12, Tab. 1: Probenkennwerte Probenmaterial 1

Probenmaterial	Korndichte [g/cm ³]	Bindemittel	Versuch	Feuchtdichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Porenzahl [-]
2: WTVQII	2,870	4% CEM I	1.3	1,83	1,69	0,65
			1.4	1,84	1,71	0,63
			4.1	1,84	1,71	0,63
		4% WFK	3.21	1,84	1,71	0,63
			3.22	1,82	1,69	0,65
		2% WFK	1.5	1,77	1,64	0,70
			1.6	1,87	1,73	0,61
		Kein Bindemittel	1.1	1,86	1,72	0,62
			1.2	1,87	1,73	0,61

Anlage 13, Tab. 2: Probenkennwerte Probenmaterial 2

Probenmaterial	Korndichte [g/cm ³]	Bindemittel	Sulfat [ppm]	Versuch	Feuchtdichte [g/cm ³]	Trockendichte	Porenzahl [-]	
3: WTF3	2,792	4% CEM I	40.000	1.9	1,95	1,89	0,48	
				1.9a	2,01	1,95	0,43	
				1.10	2,01	1,95	0,43	
			20.000	1.11	2,02	1,96	0,42	
				1.12	1,88	1,82	0,53	
			10.000	2.13	2,02	1,96	0,42	
				2.13a	2,13	2,06	0,34	
				2.14	2,01	1,95	0,43	
			8.000	4.21	2,11	2,05	0,36	
				2.15	2,00	1,94	0,43	
			5.000	2.17	2,06	2,00	0,39	
				2.18	2,1	2,04	0,37	
			3.000	2.19	2,14	2,07	0,34	
				2.20	2,121	2,06	0,35	
			Kein Sulfat	2.21	1,79	1,74	0,60	
				2.22	2,06	2,00	0,39	
			Kein Bindemittel	Kein Sulfat	1.7	1,93	1,86	0,50
					1.8	1,92	1,87	0,49
		4% WFK	10.000	3.12	2,02	1,96	0,42	
				4.23	2,03	1,97	0,42	
				4.22	1,950	1,89	0,47	
			8.000	4.25	1,92	1,87	0,49	
				3.14	2,09	2,03	0,37	
			5.000	3.16	2,12	2,06	0,36	
				3.15	2,10	2,04	0,37	
			3.000	3.17	2,09	2,02	0,38	
			Kein Sulfat	3.19	2,07	2,01	0,39	
				3.20	2,08	2,02	0,38	

Anlage 13, Tab. 3: Probenkennwerte Probenmaterial 3

Probenmaterial	Korndichte [g/cm ³]	Bindemittel	Sulfat [ppm]	Versuch	Feuchtdichte [g/cm ³]	Trockendichte	Porenzahl [-]
4: LLHN	2,713	4% CEM I	10.000	4.29	1,67	1,67	0,67
				1.15	1,82	1,82	0,53
			8.000	2.11	1,77	1,77	0,57
				2.12	1,93	1,93	0,45
			5.000	2.7	1,82	1,82	0,53
				2.8	1,86	1,86	0,50
			3.000	2.9	1,93	1,93	0,45
				2.10	1,69	1,69	0,64
			Kein Sulfat	2.5	1,69	1,69	0,65
				2.6	1,72	1,72	0,62
		4% WFK	10.000	3.2	1,92	1,92	0,45
				4.30	1,71	1,71	0,63
				3.4	1,88	1,88	0,48
			8.000	4.31	1,75	1,75	0,59
				3.5	1,85	1,85	0,50
			5.000	3.6	1,83	1,83	0,53
				4.32	1,75	1,75	0,59
			3.000	3.7	1,81	1,81	0,54
3.8	1,86	1,86		0,50			

Anlage 13, Tab. 4: Probenkennwerte Probenmaterial 4