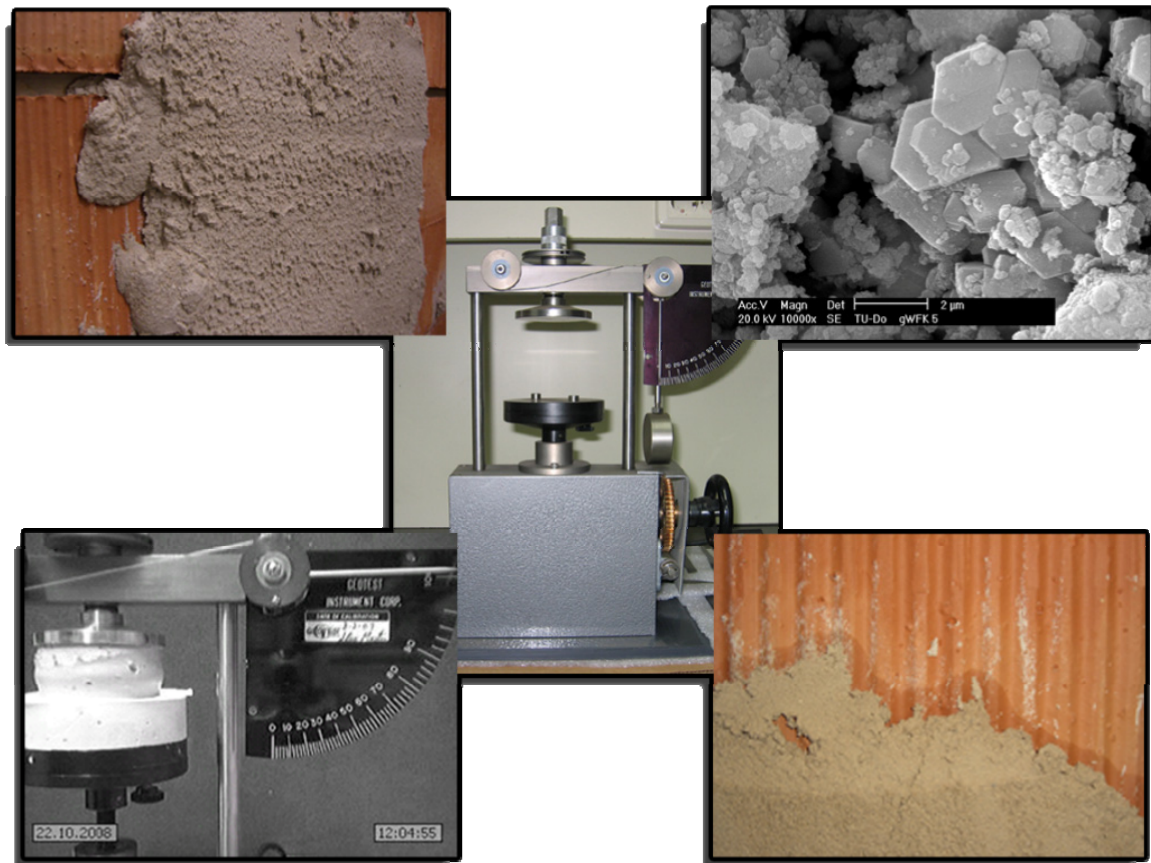


# Einfluss der Morphologie von Kalkhydrat auf die Plastizitätseigenschaften von Mörtelsystemen

D. Klein, S. Hogewoning, B. Middendorf, S.-O. Schmidt



**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 15650 N  
Einfluss der Morphologie von Kalkhydrat auf die Plastizitätseigenschaften  
von Mörtelsystemen**

---

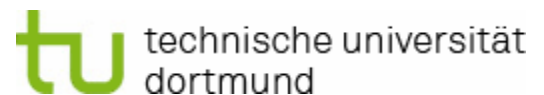
Forschungsstelle 1:

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft  
Kalk und Mörtel e.V.  
Annastr. 67-71  
50968 Köln



Forschungsstelle 2:

TU Dortmund  
Fakultät Bauwesen  
Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens  
August-Schmidt-Str. 8  
44221 Dortmund



Gefördert durch:

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichungen und Vervielfältigungen  
- auch auszugsweise - nur mit Genehmigung der  
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

Diese Forschungsarbeit wurde mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft (BMWi) im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) durchgeführten Forschungsvorhabens gefördert.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
2.1	Literaturübersicht	3
2.2	Neue Literatur aus der Kalkindustrie	6
2.3	Literatur aus dem Normungsbereich	6
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Lösungsweg</b>	<b>7</b>
3.1	Forschungsziel und angestrebte Forschungsergebnisse	7
3.2	Lösungsweg	7
<b>4</b>	<b>Methoden</b>	<b>9</b>
4.1	Probennahme, -vorbereitung und -bezeichnung	9
4.2	Chemische und physikalische Bestimmungsmethoden	9
4.2.1	Übersicht der angewandten Methoden	9
4.2.2	Bestimmung der Emley-Plastizität	11
4.2.3	Bestimmung der Viskosität	12
4.2.4	Röntgenphasenanalyse	12
4.2.5	Kalorimetrische Untersuchungen	13
4.2.6	Lasergranulometrie	13
4.2.7	Kornformanalyse	14
4.2.8	Rasterelektronenmikroskopie	15
4.2.9	Lichtmikroskopie	16
4.2.10	Quecksilberdruckporosimetrie	16
<b>5</b>	<b>Versuchsergebnisse und Diskussion</b>	<b>16</b>
5.1	Probencharakterisierung	16
5.2	Interpretation von Messergebnissen der Laborversuche	17
5.2.1	Verarbeitbarkeit (Emley-Plastizität)	17
5.2.2	Mineralphasenbestand	26
5.2.3	Chemische Zusammensetzung	29
5.2.4	Reaktivität - Kalorimetrie	31
5.2.5	Reaktivität - Nasslöschkurve gem. EN 459-2	32
5.2.6	Partikelgrößenverteilung	33
5.2.7	Kornform	45
5.2.8	Morphologie (REM)	46
5.2.9	Morphologie (Lichtmikroskopie)	51
5.2.10	Porenradienverteilung	54
5.2.11	Rohdichte	59

5.2.12	Spezifische Oberfläche _____	60
5.2.13	Ergiebigkeit _____	62
5.2.14	Schüttdichte _____	62
5.2.15	Wasserrückhaltevermögen _____	63
5.2.16	Konsistenz _____	64
5.3	Technikumsversuche zur Übertragung der plastizitätsrelevanten Parameter in die Praxis _____	65
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit _____</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis _____</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>Anhang _____</b>	<b>73</b>
8.1	Charakterisierung der Proben _____	73
8.1.1	Chemische Zusammensetzung _____	73
8.1.2	Physikalische Parameter _____	74
8.1.3	Emley-Werte _____	75
8.1.4	Partikelgrößenverteilungen _____	76

## 1 Einleitung

Kalkstein und Marmor sind schon in der Antike abgebaut und verarbeitet worden. Seit dieser Zeit wird auch Kalkstein gebrannt und das gelöschte Kalkhydrat ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) in Mörteln, Putzen, Tünchen und Schlämmen eingesetzt. Heutzutage wird Kalkhydrat nicht mehr nur in den traditionellen baustellengemischten Mörteln, sondern überwiegend in Werk trockenmörteln verwendet. Der Bedarf an Calciumhydroxid in der deutschen Werk trockenmörtelindustrie lag bei ca. 230.000 t/a im Jahr 2000 und hat bis zum Jahr 2005 auf 150.000 t/a abgenommen. Dieser Rückgang beruht, neben der rückläufigen Baukonjunktur, im Wesentlichen auf der Substitution von Calciumhydroxid durch Zement mit Zusatzmitteln. Durch eine zielgerichtete Herstellung von Kalkhydrat mit definierten Eigenschaften kann die Verwendung wieder gesteigert werden. Dieses Vorhaben hat zum Ziel, den Wirkmechanismus der Plastizität von Kalkhydrat im Mörtelsystem zu klären und damit dem Anwender die Möglichkeit zu geben, unterschiedliche Kalkhydrate mit definierten Eigenschaften herzustellen und diese zielgerichtet einzusetzen.

Durch den Einsatz von Kalkhydrat in Mörteln werden die Verarbeitungseigenschaften positiv beeinflusst. Bis heute liegen allerdings keine ausreichend gesicherten wissenschaftlichen Untersuchungen vor, die die plastizitätssteuernden Parameter von Kalkhydrat in Mörtelsystemen hinreichend genau beschreiben. Dies hat zur Folge, dass Kalkhydrat immer mehr aus den o. g. Bauprodukten verdrängt wird. Ferner lässt sich aufgrund ökonomischer Zwänge (angespannte Kostensituation, Zwang zur Kostenoptimierung etc.) der Trend erkennen, dass der Einsatz von Kalkhydrat – insbesondere in den Bauprodukten Mauermörtel und Unterputzen - immer mehr abnimmt und dass Kalkhydrat zunehmend durch Portlandzement oder portlandzementhaltige Bindemittel substituiert wird. Die festigkeitssteuernde Bindemittelkomponente besteht heute meistens aus Zement und weitere geforderte Eigenschaften werden weitgehend durch chemische Zusatzmittel eingestellt.

Die EU-Verordnung zur Registrierung, Evaluierung und Autorisierung von Chemikalien (REACH) sieht vor, Mensch und Umwelt besser als bisher vor möglichen Risiken im Umgang mit Chemikalien zu schützen. Daraus resultiert der Zwang zu umfangreichen Untersuchungen zur Einordnung der Chemikalien, was eine Verteuerung der chemischen Zusatzmittel nach sich ziehen wird. Hinzu kommt die Forderung der europäischen Bauproduktenrichtlinie, die Aussagen zum Umweltverhalten von Baustoffen verlangt. Um weiterhin mineralische Mörtelsysteme mit positiven Umwelt- und auch Verarbeitungseigenschaften zu wettbewerbsfähigen Preisen einsetzen zu können, bietet sich ein gesteigerter Einsatz von Kalkhydrat insbesondere in Trockenmörtelsystemen (Mauermörtel, Putze etc.) an. Damit diese Chance für die Kalkindustrie auch wahrgenommen werden kann, müssen zunächst die wissenschaftlichen Grundlagen der Verarbeitbarkeit ermittelt werden, um dann Kalkhydrat zielgerichtet im Hinblick auf die Anforderungen der Mörtelindustrie herzustellen

Das wesentliche Anforderungsprofil eines modernen Mörtel-/Putzsystems ist nachfolgend aufgelistet:

- Steuerbare Verarbeitbarkeit und Maschinengängigkeit
- Ökologisch unbedenklich
- Gute Haftung
- Steuerbare Festigkeiten und Elastizität (E-Modul)
- Steuerbare thermische und hygri-sche Eigenschaften
- Dauerhaftigkeit
- Gutes Preis/Leistungs-Verhältnis

Kalkhydrat stellt in modernen Mörtelsystemen vor allem die Verarbeitbarkeit sicher. Unter diesem Parameter werden Geschmeidigkeit, Ergiebigkeit, Maschinengängigkeit und das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels subsumiert. Die Plastizität von Kalkhydraten tritt nur beim Anteigen mit Wasser auf. Die Erfahrung und der Vergleich der rheologischen Eigenschaften anderer mineralischer Systeme zeigen, dass die Korngrößenverteilung und die Kornform, sowie die Oberflächenausbildung von elementarer Bedeutung sind. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus, dass beim Einsatz von Kalkhydrat plastizitätsändernde Phasenübergänge während des Abbindeprozesses (Karbonatisierung) ablaufen.

Die für die Entwicklung der Plastizität verantwortlichen Faktoren müssen detailliert bekannt sein, um deren Steuerung zu beherrschen. Dazu ist es notwendig, die physikalisch-chemischen und mineralogischen Grundlagen der Plastizität unter verschiedenen Gesichtspunkten zu ermitteln.

Eine erste Bearbeitung des Themas im Hinblick auf die Wechselwirkung von Wasser mit Kalkhydraten erfolgte durch SCHWARZ (1957), welcher Hinweise auf bestehende Zusammenhänge der Plastizität mit:

- Ionenradius
- Koordinationsbestreben
- Feldstärke des  $\text{Ca}^{2+}$ -Ions
- $\text{OH}^-$  - Haushalt des Kalkteiges
- Entstehung von Wasserhüllen um die Kalkhydratteilchen

vorstellte.

Inzwischen ist bekannt, dass die Plastizität von Kalkhydrat-Wasser-Suspensionen (Kalkteige) von der Menge und der Form der vorhandenen Hydratfeinstanteile beeinflusst wird. Die Plastizität resultiert auch aus der Wechselwirkung der flüssigen Phase mit den Hydratteilchen und hängt deshalb von der spezifischen Oberfläche ab. Neueste Forschungsergebnisse (HOGEW-

NING & WOLTER 2008) haben gezeigt, dass die Morphologie und Fazies des ursprünglichen Kalksteins die Ausprägung des Branntkalkes beeinflusst. Es ist davon auszugehen, dass dies auch Auswirkungen auf die Kalkhydratbildung und damit auf die Plastizitätseigenschaften bei Mörtelsystemen hat.

Die für die Plastizität entscheidende Menge der Hydratfeinstanteile bildet sich zeitabhängig aus größeren Hydratteilchen (Korngröße  $>1 \mu\text{m}$ ), die aus Agglomeraten bestehen. Die Fähigkeit der ‚Verfeinerung‘ ist unterschiedlich und dementsprechend auch die Entwicklung der Plastizität. Die Ursache hierfür liegt in Kristallhabitus und -tracht (Morphologie) der Hydratteilchen begründet.

Die Morphologie der Kalkhydrate bedingt auch das ungewöhnliche Verhalten in gesättigter Lösung (flüssige Phase der Kalkteige): statt einer Kornvergrößerung tritt eine Kornverfeinerung auf, die über lange Zeit stabil bleibt. Ferner hängt die Morphologie der Kalkhydrate sowohl von chemischen (Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und Löschwassers), als auch von physikalischen Faktoren (Löschtemperatur, Brenngrad des Kalkes, Zustand des Löschwassers) ab und kann demzufolge durch Zugabe von Zusatzmittel beim Löschen oder durch die Brenn- und Löschbedingungen beeinflusst und gesteuert werden.

Die im realen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Kristall auftretenden Fremdionen und Baufehler werden unterteilt in solche, die im Sinne von "Kerben" zu einer Zerteilung, d. h. Verfeinerung und damit Erhöhung der Plastizität führen und andere, die als "Haftpunkte" eine solche Zerteilung verhindern oder sogar zu einer Vergrößerung führen können (NEY 1958). Zwischen den Partikeln von eingesumpften Trocken-Kalkhydraten und den Partikeln nassgelöschter Kalkteige besteht morphologisch kein wesentlicher Unterschied (NEY 1964).

Betrachtet man, ausgehend vom ursprünglichen Kalkstein, den Herstellungsprozess eines Kalkteiges oder eines Kalkmörtels, lässt sich die Komplexität und die vielfältigen Möglichkeiten, welche die Eigenschaften des Endproduktes Mörtelsystem beeinflussen können, ableiten. Da sowohl das Kalksteinvorkommen wie auch die Brennbedingungen und der folgende Löschprozess Einfluss auf die Eigenschaften der entstehenden Hydrate haben werden, eine Berücksichtigung dieser Parameter aber den Umfang des Vorhabens überschreiten würden, konzentrieren sich die Untersuchungen auf die Charakterisierung von industriell hergestellten Hydraten und Feinkalken verschiedener Provenienzen und Reinheitsgrade.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

### 2.1 Literaturübersicht

Das Brennen von Kalk und das darauf folgende Löschen ist ein seit Jahrhunderten bekannter und praktizierter Prozess, insbesondere im Zusammenhang mit der Herstellung von Mörteln und Putzen. Erste veröffentlichte wissenschaftliche Aussagen findet man 1926 von BOWLES, der sich mit dem Zusammenhang von Kalkrohstein, Brennprozess und Löschen beschäftigte.

Wie man Plastizität messen kann wird dann in den 30er Jahren von mehreren Autoren wie z.B. MATHERS & GOSNELL (1930) und ILIIN et al. (1933) beschrieben. Mit Hilfe verschiedener Apparaturen führten sie Messungen der Reibung hydrophiler und hydrophober Systeme verschiedener Plastizität in Abhängigkeit von der Verdünnung durch.

Die Isotherme des Systems CaO - H<sub>2</sub>O wurde von RODT (1936) untersucht. In dieser grundlegenden Arbeit wurden erstmals die Lösungsvorgänge von Hydratphasen bei unterschiedlichen Temperaturen beschrieben. Bedingt durch die Einflüsse des 2. Weltkriegs sind über den Zeitraum von 20 Jahren sehr wenige Forschungsergebnisse zu diesem Thema veröffentlicht worden. Erst 1958 wird von NEY der Begriff der Plastizität (Bildsamkeit) unter Einbeziehung der aktiven Oberfläche näher beschrieben. In dieser Arbeit wurde versucht, ein Verfahren zur bildlichen Darstellung von frischen Kalkhydrateteigen zu etablieren. Dabei wurde das damals noch neue Verfahren der Rasterelektronenmikroskopie eingehend behandelt. Es wurden ferner sehr komplexe Präparationsverfahren zur Vorbereitung der Untersuchungen beschrieben. Grundlegende Aussagen scheiterten aber an der damaligen Gerätetechnik. Ebenfalls 1958 beschrieb ZANDER die Kornform und -größe trocken- und nassgelöschter Hydrate, ohne auf den Einfluss der Plastizität näher einzugehen. 1959 wurde von WUHRER et al. ein sehr umfassender Bericht zum „Hydratationsmechanismus des Calciumoxids und plastischen Eigenschaften der Kalkhydratbreie“ veröffentlicht, in dem erstmals der Zusammenhang der verschiedenen Sintergrade der Kalke und ihr Einfluss auf die entstehenden Hydrate untersucht wurde. Der bereits von HEDIN & THOREN (1949) als Ionenreaktion gedeutete Lösprozess konnte bestätigt werden. In dieser Arbeit wurde das - in der Folgezeit für Kalkteige gebräuchliche - Emley-Plastizimeter zur Bestimmung der viskosen Eigenschaften verwendet. KREUTZ & SCHIMMEL (1959) publizierten im gleichen Jahr umfangreiche Untersuchungen, in denen Branntkalk mit Wasserdampf gelöscht wurde. Die entstehenden Hydrate wurden eingesumpft und deren Plastizität nach Emley gemessen. Auch hier wurden, wie in der Arbeit von WUHRER & RADEMACHER (1959), die Versuchsergebnisse beschreibend dargestellt, ohne ein Modell zu entwickeln, welches das Verhalten ansatzweise erklärt. Über die Untersuchungen zur Plastizität in der deutschen Kalkindustrie berichtete ZANDER et al. (1960) während der Tagung des Technischen Ausschusses des Bundesverbandes der Deutschen Kalkindustrie. Auf dieser Tagung konnte die grundsätzliche Eignung des Emley-Plastizimeters zur Bestimmung der plastischen Eigenschaften und zur Unterscheidbarkeit einzelner Hydrate bestätigt werden. Das Emley-Gerät liefert demnach Anhaltswerte über den Kornaufbau eines Hydrates. Ein Kalkhydrat soll dann einen hohen Emley-Wert aufweisen, wenn es entweder aus gleichförmigen, aber sehr kleinen Einzelkristallen besteht oder wenn sein Kornaufbau weitgehend dem einer Fullerkurve entspricht. In beiden Fällen ist die Packung aus großen, mittleren und kleinen Kristalliten sehr dicht und damit die einzelnen Zwischenräume klein. Der Emley-Test liefert reproduzierbare Kennzahlen für die in der Praxis seit langem bekannten, großen Unterschiede zwischen nassgelöschtem Kalkteig mit 400 - 700 Emley-Einheiten und trocken gelöschtem Hydrat mit 100 - 170 Emley-Einheiten.

In der Folgezeit wurde vor allen Dingen das Löschverhalten von Kalken untersucht, insbesondere die Einflüsse der Ionenkonzentration im Löschwasser, die Temperatur des Prozesses und die Korngrößen der Hydrate (RAMACHANDRAN et al. 1964, WITTNEBEN 1978, BAI et al. 1994, POTGIETER 1996, JOHANNES & RADEMACHER 1999, SPEISER et al. 2000). Die Plastizität von Kalkteigen rückte dabei aus dem Fokus des wissenschaftlichen Interesses.

Erst 2001 wurde von KRUMNACHER wieder das Verhalten von Kalkteigen und ihre rheologischen Eigenschaften in einer Literaturstudie erwähnt. Dieser lange, publikationsfreie Zeitraum (1960 – 2000) ist mit der zunehmenden Substitution von Kalkhydrat durch Zement und chemische Zusatzmittel begründet, was die Trockenmörtelindustrie in diesem Zeitraum auch förderte. Weiterhin wurden in diesen Jahren die Verfahren zur Entschwefelung von Rauchgasen und die Aufbereitung von Trink- und Brauchwasser in der Industrie etabliert. Aus diesem Grund erfolgten sehr umfangreiche Untersuchungen zur Auflösungsgeschwindigkeit und zum Adsorptionsvermögen von Kalkhydraten und Branntkalken. Da das Einsumpfen von Kalk und das Herstellen von Mörteln auf der Baustelle - mit Ausnahme im Bereich der Denkmalpflege - nicht mehr „Stand der Technik“ war, hat sich auch die Forschung nicht mehr mit dieser Thematik beschäftigt.

Wie oben beschrieben wird das Thema „Kalkteige und Rheologie“ erst in jüngerer Zeit wieder bearbeitet. Dabei steht jedoch die Instandsetzung und ‚denkmalschützende Sicht‘ im Zusammenhang mit diesem Werkstoff im Vordergrund. So konnten ELERT et al. (2002) und MIRA ET AL. (2002) nachweisen, das Kalkmörtelsysteme ein hohes Wasserrückhaltevermögen besitzen und durch Lösungs- und Rekristallisationsvorgänge eine rissheilende Funktion besitzen. 2003 wurde vom US-amerikanischen GETTY CONSERVATION INSTITUTE (2003) eine umfangreiche Literaturzusammenfassung zahlreicher Veröffentlichungen, welche sich mit historischen Mörtelsystemen beschäftigen, zusammengestellt und herausgegeben. Auch in dieser Literatursammlung liegt der Schwerpunkt auf der Instandsetzung historischer Gebäude.

THOMSON beschreibt 2005 die Vorteile von Kalkmörteln und weist dabei explizit auf die hohe Plastizität, das hohe Wasserrückhaltevermögen, die offene Porosität und die gute Wasserdampfdiffusion hin. PAVIA & TREACY (2006) gehen ebenfalls auf das Verhalten von Kalkmörteln in ‚nachgestellten‘ historischen Mörtelsystemen ein, wobei sie auch natürliche hydraulische Kalke (EN 459) mit einbeziehen.

Zusammenfassend lassen sich aus der Literaturübersicht folgende Aussagen treffen:

- Die grundlegenden Arbeiten zur Plastizität von Kalkteigen wurden bis ca. 1960 durchgeführt. Alle diese Arbeiten beschreiben jedoch nur einzelne Aspekte, wie z.B. die Korngröße oder die Oberfläche und ihren Einfluss auf die Plastizität. Weiterhin wurden immer nur einzelne Kalkvorkommen untersucht, eine lagerstättenübergreifende Arbeit fehlt.
- Ab 1960 standen Auflösengeschwindigkeit, Absorptionsvermögen etc. von Kalkhydraten im Wesentlichen im Fokus der Wissenschaft und Forschung; Verarbeitbarkeit und insbesondere Plastizität standen nicht im Vordergrund.
- Ab Mitte der 80iger Jahre werden wieder Arbeiten zu Kalkmörteln veröffentlicht. Diese stammen zum überwiegenden Teil aus dem Bereich der Denkmalpflege.
- Literatur zu Kalkhydrat in Trockenmörtelsystemen ist nicht veröffentlicht.
- Der morphologische Aspekt der Branntkalke und die Auswirkung auf die Kalkhydrate bzw. Kalkteige ist nicht untersucht worden.

## 2.2 Neue Literatur aus der Kalkindustrie

Untersuchungen zur Visualisierung des Löschprozesses mit Bildung von Hydratationsmodellen wurden von Wolter et al. (2003) bzw. Wolter et al. (2004) veröffentlicht. Sie beschreiben die Hydratation als mehrphasigen Prozess, der durch Bildung von Calciumhydroxid-Belegungen auf den Branntkalkkristalliten zeitweilig verzögert wird. Demnach „bilden sich auf der anhydri-schen Oberfläche zunächst Schichten aus Hydraten, die über einige Zeit eine Diffusions-sperre bilden, dann aber durch die auftretenden Wachstumsspannungen einreißen. Durch die Risse kann flüssiges Wasser unter Umgehung der Diffusionshemmungen direkt zum anhydri-schen Kalk vorstoßen.“ (WOLTER et al. 2003)

In dem von der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel durchgeführten Vorhaben „Vorher-sage und Beeinflussung der Reaktivität von Branntkalk“ , (HOGEWONING & Wolter, 2008) wur-de umfangreich die Abhängigkeit des Sinterverhaltens von verschiedenen Kalksteinproben von der chemischen Zusammensetzung sowie von der Faziesausbildung und der Morphologie un-tersucht. Es zeigte sich, dass entgegen dem bisherigen Wissensstand die Faziesausbildung bzw. Vorprägung des Kalksteins maßgebliche Parameter darstellen. Diese Vorprägung führt bei glei-chen Brennbedingung zu ganz unterschiedliche Branntkalke und es ist davon auszugehen, dass dies auch Auswirkung auf die Kalkhydratbildung hat und damit auf die plastischen Eigenschaf-ten von Kalkmörtelsystemen.

## 2.3 Literatur aus dem Normungsbereich

Anforderungen an Kalke und ihre Eigenschaften werden in der EN 459 Teil1 (2002) beschrie-ben. Die Prüfungen zu diesen Anforderungen finden sich im Teil 2 der Norm (2002). Die Norm

wird momentan überarbeitet und ergänzt. Sie regelt Produkte zum Einsatz im Hoch- und Straßenbau. Zurzeit werden keine Angaben zur Plastizität gefordert, lediglich die Parameter Verarbeitbarkeit und Ergiebigkeit sind normiert, aber nicht mit Anforderungen an das Produkt verknüpft. Die Verarbeitbarkeit beschreibt dabei nur das Ansteifverhalten von Kalkmörteln und bietet keinerlei Aussagen zur Rheologie.

Da die Norm im Rahmen der europäischen Bauproduktenrichtlinie für den Hochbau konzipiert ist und den Einsatz von Kalken in den Produkten Kalksandstein, Porenbeton und Mörtel regeln soll, fehlt für den Mörtel die wichtige Beschreibung der Plastizität.

In den Diskussionen zur Neufassung der EN 459 wurde deutlich, dass dieser Parameter bei der nächsten Überarbeitung der Norm mit aufgenommen werden soll. Als einzige Methode zur Beschreibung ist bisher nur das Emley–Gerät nach ASTM C 110 (2006) verfügbar. Zum jetzigen Zeitpunkt fehlen jedoch noch die notwendigen Basisinformationen zu den rheologischen Eigenschaften von Kalkteigen.

### **3 Zielsetzung und Lösungsweg**

#### **3.1 Forschungsziel und angestrebte Forschungsergebnisse**

Das Forschungsziel dieses Vorhabens ist es, die Parameter von Kalkhydrat zu ermitteln, welche das rheologische Verhalten von Kalkteigen, ausgedrückt als Plastizität, bestimmen. Sind diese Parameter bekannt und mit den Eigenschaften eines Kalkteiges korrelierbar, ist es möglich die Kalkhydrate gezielt für den Einsatz in der Mörtelindustrie herzustellen. Die gewonnenen Ergebnisse werden in Probemischungen mit der Kalk- und Mörtelindustrie an Probeflächen verifiziert.

Aus dem aktuellen Kenntnisstand ergeben sich offene wissenschaftliche Fragen zum plastischen Verhalten der Kalkteige. Eine Frage ist, wie sich das rheologische Verhalten gezielt steuern lässt. Ferner soll eine mögliche Korrelation zwischen den Mörtel-Parametern Plastizität und Wasserrückhaltevermögen vom Aufbau der Kalkhydratteilchen ermittelt werden. Des Weiteren ist zu klären, ob sich die Ergebnisse und Korrelationen, ermittelt an den reinen Kalkteigen, auch auf die Verarbeitung mit modernen Mörtelmischmaschinen übertragen lassen.

Gelingt es, die plastischen Eigenschaften von Kalkhydrat in Mörtel gezielt zu beeinflussen, kann die deutsche Kalkindustrie speziell für die Mörtel-/Putzindustrie hergestellte Kalkhydrate zur Verfügung stellen. Durch diese Produkte wäre es möglich Marktanteile, die an die chemische Industrie verloren gegangen sind, zurück zu gewinnen.

#### **3.2 Lösungsweg**

Die Analyse der möglichen plastizitätsrelevanten Kalkparameter wird durch chemische, mineralogisch und physikalische Untersuchung von 10 Branntkalken und ihren korrespondieren-

den, im technischen Prozess daraus hergestellten Kalkhydraten durchgeführt. Die Branntkalkproben werden nassgelöscht und - ebenso wie die eingesumpften Kalkhydrate - nach definierten Zeiten von 24 Stunden bis zu einem Jahr analysiert. Durch Korrelationsbildung der spezifischen Probenparameter mit deren Verarbeitungseigenschaften sollen die plastizitätsrelevanten Kalkparameter identifiziert werden. Die labortechnisch bestimmten Verarbeitungseigenschaften werden in Technikumversuchen mit aus den Kalken hergestellten Kalkmörteln durch Anwendungstechniker verifiziert (Abb. 3.1).

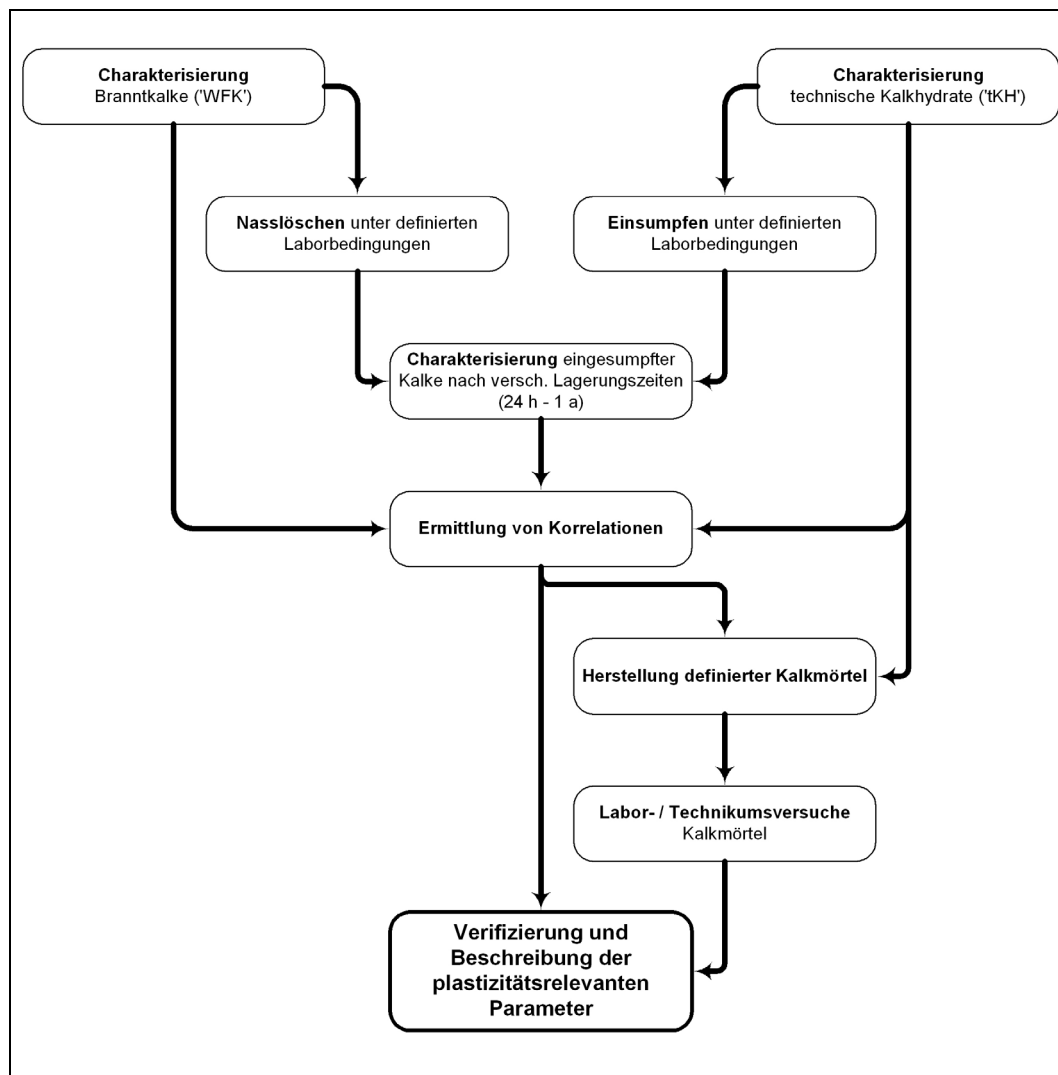


Abb. 3.1: Lösungsweg

## 4 Methoden

### 4.1 Probennahme, -vorbereitung und -bezeichnung

Die Probennahme der technisch hergestellten Branntkalke und Kalkhydrate erfolgte gemäß DIN EN 196-7 in den Werken am fertigen Produkt direkt aus dem Silo bzw. durch Entnahme von Sackware.

Die Untersuchungen an den technischen Branntkalken und den trockenen Kalkhydraten erfolgten ohne eine generelle Probenvorbereitung, eventuelle methodenspezifische Probenvorbereitungen sind den Methodenbeschreibungen (Kap. 4.2) zu entnehmen. Die eingesumpften Kalke wurden im Wasserüberschuss hergestellt, in dem der Branntkalk bzw. das Kalkhydrat in das vorgelegte Wasser eingerührt wurde.

Die Proben entstammen 10 verschiedenen Kalkwerken und wurden unter der Vorgabe ausgewählt, ein möglichst breites Spektrum an physikalischen und chemischen Parametern abzudecken. Der Werksziffer sind jeweils noch Kennungen vorangestellt, die die jeweilige Probenart bzw. das Ursprungsprodukt kennzeichnet:

- WFK - Branntkalk
- tKH - technisches Kalkhydrat
- gWFK gesumpfter Kalk, hergestellt aus Branntkalk
- gWKH gesumpfter Kalk, hergestellt aus technischem Kalkhydrat

Die Sumpfungsdauer ist ggf. den Probenbezeichnungen hinten angestellt.

### 4.2 Chemische und physikalische Bestimmungsmethoden

#### 4.2.1 Übersicht der angewandten Methoden

Die angewandten Messmethoden sind in Tab. 4.1 aufgeführt. Für genormte Verfahren bzw. bei validierten Prüfvorschriften sind die jeweiligen Verweise angegeben. Methoden ohne allgemeingültige Prüfvorschriften werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

Parameter	Methode	Prüfvorschrift / Beschreibung	untersuchte Proben			Hinweise		
			WFK	tKH	gKH/gWFK			
Verarbeitbarkeit	Emley-Plastizität	ASTM C110 / Kapitel 4.2.2			X			
	Viskosimetrie	Kapitel 4.2.3			X			
Mineralphasenbestand	Röntgenphasenanalyse	Kapitel 4.2.4	X	X		qualitativ		
Reaktivität	Kalorimetrie	Kapitel 4.2.5	X					
Reaktivität	Nasslöschkurve	EN 459-2	X					
Partikelgrößenverteilung	Lasergranulometrie	Kapitel 4.2.6	X	X	X			
Kornform	Kornformanalysator	Kapitel 4.2.7	X	X				
Morphologie	Rasterelektronenmikroskopie	Kapitel 4.2.8	X	X	X	qualitativ		
	Lichtmikroskopie	Kapitel 4.2.9	X	X	X			
Porenradialverteilung	Quecksilber-Druckporosimetrie	Kapitel 4.2.10	X					
Rohdichte	Pyknometer	DIN EN 1097 – 7	X	X				
	LP-Topf	EN 1015-6			X			
spezifische Oberfläche	Gasadsorption nach BET	DIN ISO 9227		X				
Ergiebigkeit	Löschversuch	EN 459-2	X					
Schüttdichte	Böhme	EN 459-2		X				
Wasserrückhaltevermögen	Filterplattenverfahren	DIN 18555-7			X			
Konsistenz	Ausbreitmaß Eindringmaß	EN 1015-3			X			
CaO	Titration	EN 12485 bzw. BVK-Prüfverfahrensammlung Teil 2	X	X		Bestimmung aus dem Schmelzaufschluss		
MgO								
SiO <sub>2</sub>								
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			ICP-OES	BVK-Prüfverfahrensammlung Teil 3	X		X	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								
SO <sub>3</sub>								
CO <sub>2</sub>	Infrarotabsorption	BVK-Prüfverfahrensammlung Teil 2	X	X				
Glühverlust	gravimetrisch	EN 12485 bzw. BVK-Prüfverfahrensammlung Teil 2	X	X				

Tab. 4.1: Bestimmungparameter und Prüfvorschriften

#### 4.2.2 Bestimmung der Emley-Plastizität

Die Bestimmung der Plastizität erfolgte nach ASTM C110-02a, basierend auf einem Verfahren nach W. E. EMLEY (1920). Bei diesem Verfahren wird unter Berücksichtigung der aufzuwendenden Kraft, des saugenden Untergrundes sowie der zeitlichen Komponente ein objektiver Wert für die Plastizität ermittelt.

Für den Emley-Test wird ein Kalkteig von einheitlicher Konsistenz auf eine Grundplatte aus Gips gesetzt. Der Kalkteig wird nach oben hin in Kontakt mit der oberen Metallplatte gebracht. Mit dem Start der Messung dreht ein Motor die Grundplatte mit einer Geschwindigkeit von 1 Umdrehung in 6 min 40 s nach oben. Die zunehmenden Kräfte von Druck und Torsion werden durch den Kalkteig an die Metallplatte weitergegeben. Diese ist über einen Draht mit einem Gewicht verbunden. Durch die Drehung wickelt sich der Draht auf und bewegt somit das Gewicht mit dem Schleppzeiger nach oben. Die Kraft, die auf den Kalkteig einwirkt nimmt proportional zum Sinus des Winkels zu. Die Skala wird im Ein-Minuten-Takt abgelesen. Die Messung ist beendet, wenn entweder die Skala 100 erreicht, wenn die Probe bricht und der Wert niedriger ist als der zuvor oder wenn die Ablesung der Skala länger als 3 Minuten unverändert bleibt. Um nicht während der gesamten Messung anwesend sein zu müssen und das Verhalten der Probe auch nachträglich genauer analysieren zu können, wurde eine Webcam mit einem Bildaufnahmeintervall von 10 s aufgestellt. Das Versuchsgerät ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Gemäß ASTM C110-02a lässt sich anhand folgender Formel der Plastizitätswert errechnen. Er berücksichtigt die Kraft (als Skalenwert) und die Zeit.

$$P = \sqrt{F^2 + (10T)^2} \quad (1)$$

mit

P	Plastizitätswert
F	Skalenwert bei Testende
T	Zeit in Minuten, vom Zentrieren des Kalkteiges auf der absorbierenden Grundplatte bis zum Ende der Messung

Ausgangsmaterial für alle Messungen sind Kalkteige gleicher Konsistenz, die aus technisch gelöschten Kalkhydraten (tKH) oder Weißfeinkalken (WFK) hergestellt wurden. Die Proben für die Messungen nach 24 Stunden wurden gemäß ASTM C110-02a mit experimentell ermitteltem Wasseranteil hergestellt. Um die im Wasserüberschuss eingesumpften Proben auf die einheitliche Konsistenz zu bringen, wurden die Proben bei 40 °C im Trockenschrank getrocknet, bis sie nach dem genormten Mischprozess die geforderte Konsistenz erreichten.

Die Plastizität wurde für jede Probe mindestens doppelt bestimmt. Bei Abweichungen der Werte wurden weitere Wiederholungsmessungen durchgeführt.

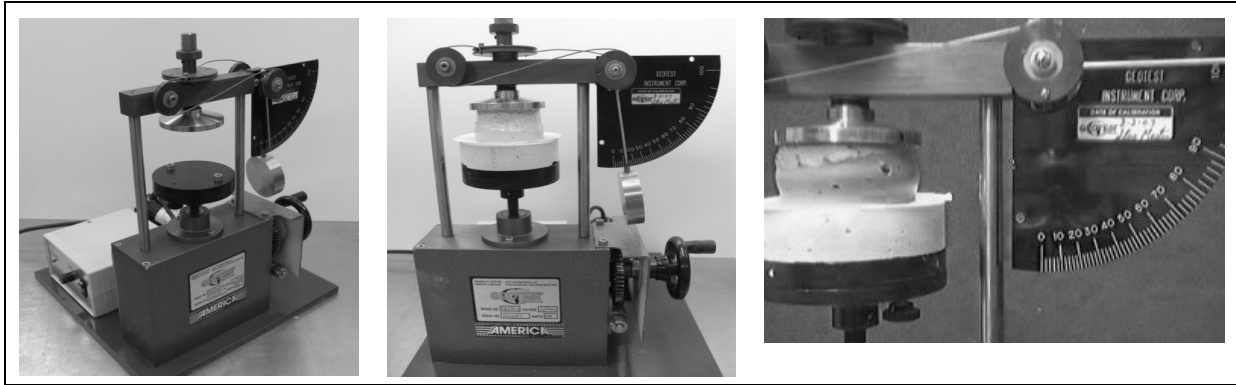


Abb. 4.1: Emley Plastizimeter

### 4.2.3 Bestimmung der Viskosität

Parallel zur Bestimmung der Emley-Plastizität wurden Messungen der dynamischen Viskosität mittels Rotationsviskosimeter mit koaxialem Zylindermeßsystem der Firma Haake an ausgewählten Kalkmilchproben durchgeführt. Der Kalkmilch lag ein Wasser/Calciumoxid-Verhältnis von 4 : 1 zugrunde. Die Messungen erfolgten mit Scherspannungen bis zu 900 s bei Scherraten von 14 bis 42 s<sup>-1</sup>. Die Temperatur der Proben betrug konstant 20 ± 5 °C. Je Probe wurden mindestens zwei Messungen durchgeführt und das arithmetische Mittel gebildet.

Aufgrund der stark differierenden Ergebnisse wurde das vorhandene Rotationsviskosimeter mit koaxialem Zylindermeßsystem als ungeeignetes Messgerät erachtet. Somit wurden die rheologischen Untersuchungen nicht weiterverfolgt.

### 4.2.4 Röntgenphasenanalyse

Es wurden charakteristische Teilproben (Korndurchmesser < 40 µm) sowohl der Weißfeinkalke als auch der Kalkhydrate röntgenographisch mittels Pulverdiffraktometrie analysiert. Der Phasenbestand des Materials ist aus den Peakhöhen und den Peakhalbwertsbreiten semiquantitativ abgeschätzt worden. Die röntgenographische Phasenanalyse ist mit den in Tab. 4.2 angegebenen Parametern durchgeführt worden.

Parameter	Einstellung
Geräte Typ	Philips PW 1830 / 3020
Scan-Achse	Gonio
Startposition [°2 $\theta$ ]	5,00
Endposition [°2 $\theta$ ]	65,00
Schrittweite [°2 $\theta$ ]	0,02
Schrittzeit [s]	1,0
Scan Modus	kontinuierlich
Anodenmaterial	Cu
Generatoreinstellung	30 mA, 40 kV

Tab. 4.2: Messparameter der Röntgendiffraktometrie

#### 4.2.5 Kalorimetrische Untersuchungen

Zur Untersuchung der Reaktivität wurden Wärmeflussverlauf und Gesamtenergieumsatz beim Löschen der Weißfeinkalke mittels Kalorimeter gemessen. Verwendet wurde ein isothermisches Kalorimeter Typ 3115/3238 TAM Air der Firma Thermometric AG. Hierbei handelt es sich um ein 8-kanaliges Wärmeleitkalorimeter. Alle 8 Kanäle formen zusammen einen Kalorimeterblock (single heat-sink block), welcher in einem temperaturkontrollierten Luftthermostat untergebracht ist. Die Wärmesensoren befinden sich unmittelbar unterhalb der Mess- und Referenzproben, wo der Wärmeaustausch mit der Umgebung in Form elektrischer Spannung proportional zum Wärmefluss erfasst wird. Die Messungen wurden bei konstanter Betriebstemperatur des Gerätes von 20 °C durchgeführt.

In den Vorversuchen erwies sich ein Verhältnis von 1,5 g Weißfeinkalk zu 4 ml Wasser als sinnvoll. Die Wasserzugabe erfolgte mittels Admixcelle zwei Stunden nach dem Platzieren der Probe im Messgerät. Da in Vorversuchen eine minimale Beeinflussung der benachbarten Kanäle festgestellt wurde, wurden alle Proben einzeln gemessen.

#### 4.2.6 Lasergranulometrie

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels Lasergranulometrie basiert auf dem Prinzip der Laserbeugung. Die Probe wird in einer Flüssigkeit dispergiert und eventuell vorhandene Agglomerate per Ultraschallbehandlung aufgelöst. Durch die Suspension wird ein Laserstrahl gelenkt, der an den Feststoffteilchen in Abhängigkeit von der Partikelgröße mehr oder minder stark gebeugt wird und so ein korngößenabhängiges, spezifisches Beugungsbild liefert, welches ausgemessen wird. Ermittelt wird die Dichte- bzw. Summenverteilung der Partikelgrößen als Kurvenverlauf. Die Summenverteilungskurve  $Q_r(x)$  entspricht dem Mengenanteil der Partikel, die im jeweiligen Punkt  $x$  die zugehörige Partikelgröße nicht überschreiten, während die Dichteverteilungskurve  $dQ_r(x)/dx$  die Mengenanteile der jeweiligen Partikelklassen wieder gibt. Sie kann mathematisch durch Differentiation der Summenverteilungskurve gebildet werden. Die Mengengart wird durch den Index  $r$  gekennzeichnet. Er kann die Werte 0 (Anzahl), 1 (Länge), 2 (Fläche) bzw. 3 (Volumen oder Masse) annehmen (LESCHONSKI, 1988).

Die Messungen wurden mit einem Sympatec Helos 12 KA SU mit einstellbarer Brennweitendurchgeführt. Die verwendeten Messparameter sind in Tab. 4.3 aufgeführt.

Parameter	Einstellung
Brennweite	50 mm
Flüssigkeit	Isopropylalkohol
Ultraschalldauer	30 sec
Ultraschallpause	60 sec
Messdauer	10,01 sec
Zykluszeit	1000 msec

Tab. 4.3: Messparameter der Lasergranulometrie

#### 4.2.7 Kornformanalyse

Die Untersuchungen wurden durch die Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, im Rahmen eines Unterauftrags durchgeführt und ausgewertet. Die Messung erfolgte ausschließlich durch dynamische fotooptische Partikelanalyse, da im Korngrößenbereich der untersuchten Kalke die normativen Verfahren zur Bestimmung der Kornform nach DIN EN 933-4:2008-06 nicht greifen und zudem die optische Bildanalyse eine genauere Bestimmung der Kornform und die Bestimmung zusätzlicher Funktionen wie Kornformverteilung ermöglicht. Die optische Analyse liefert zudem verlässliche Werte für die Rundheit, also wie nahe die Kornform der eines Kreises entspricht, während die mechanische Bestimmung der Kornform lediglich den Anteil der kubisch geformten Körner liefert. Es gilt jedoch zu beachten, dass bei der fotooptischen Partikelanalyse die Schattenprojektionen der Kalkpartikel ausgewertet werden und damit aus der dreidimensionalen Realität ein zweidimensionales Modell entsteht. Der zwangsläufige Informationsverlust kann jedoch durch einen ausreichend großen Probenumfang kompensiert werden. Aufgrund dieser Zusammenhänge wird im Folgenden von der Rundheit der Körner gesprochen, während in der Literatur oft auch mit dem Begriff Sphärizität gearbeitet wird. Die Sphärizität ist ein Maß, wie gut die Kornform die der Kugel approximiert. Sie wird bei ausreichend großem Probendurchsatz bei einer Kornformbestimmung der Rundheit gleichgesetzt.

$$SPHT = \frac{\text{Oberfläche einer volumengleichen Kugel}}{\text{gemessene Oberfläche des Teilchens}} \quad (2)$$

Die zweidimensionale Betrachtung der Schattenbilder gestattet nur die Berechnung des korrespondierenden Wertes der Zirkularität (C), welcher analog definiert ist:

$$C = \frac{\text{Umfang eines flächengleichen Kreises}}{\text{gemessener Umfang des Partikels}} \quad (3)$$

Zu den Analysen wurde das Partikelmessgerät FPIA 3000 des Herstellers Sysmex eingesetzt. Es verfügt über einen Messbereich für Partikel von 0,8 bis 300  $\mu\text{m}$ . Der prinzipielle Aufbau des Gerätes beinhaltet eine Probenkammer mit Rührer, eine Strömungsmesszelle, eine Einheit zur digitalen Bilderfassung sowie die Steuerungs- und Regeltechnik. Die Messung der Probe erfolgt

in nasstdispersierter Form. Zur Bestimmung der Kornform werden alle suspendierten Partikel der Strömungsmesszelle zugeführt, welche den Partikelstrom in einen flachen laminaren Fließstrom verengt. Während des Durchfließens der Messzelle werden die Partikel durch eine Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera fotografiert und jedes einzelne Partikel als digitales Einzelbild abgespeichert. Die flache Strömung in der Messzelle gewährleistet, dass keine Partikel hintereinander fließen und sie sich stets im Fokus der Kamera befinden. In der Regel gewährleisten die vorherrschenden Strömungsbedingungen eine Ausrichtung der Partikel in der Art, dass die größte Fläche der Kamera zugewandt ist.

Nach der Bildaufnahme wird jedes einzelne Partikel analysiert und die relevanten Kornformparameter wie Partikellänge, -breite, -durchmesser, -fläche, konvexe Partikelfläche und -umfang bestimmt. Aus den so gewonnenen Messdaten wird der zentrale Kornformkennwert, die Rundheit der Partikel berechnet und die Kennwerte aller Partikel statistisch ausgewertet. Als Ergebnis dieser Auswertung entstehen die Korngrößenverteilung und die Kornformverteilung (Zirkularität). Aus der Kombination der beiden Verteilungen ergibt sich das so genannte Scattergram (Streuungsdiagramm) für die Probe. Es ist für jede Probe wie ein „Fingerabdruck“ und zeigt den Zusammenhang zwischen jeder Korngröße und den zugehörigen Kornformen. Beim Streuungsdiagramm wird die Kornform (Ordinate) über der Korngröße (Abszisse) aufgetragen. Aus dem Streuungsdiagramm lässt sich vereinfacht gesagt ablesen, welche Kornformen bei welcher Korngröße in welcher Häufigkeit vorliegen.

#### **Probenvorbereitung:**

Von der Substanzprobe wird ca. eine Spatelspitze in 10 ml Dispersionsmittel (Isopropanol) gegeben, gerührt und anschließend mit Ultraschall beaufschlagt. Die Probendispersion kann dann direkt in die Probenaufgabekammer des FPIA3000 getropft werden.

Die Messungen wurden bei den in Tab. 4.4 aufgeführten unterschiedlichen Vergrößerungen durchgeführt. Bei jeder Vergrößerung ist ein anderer Größenbereich abbildbar.

Vergrößerungsfaktor	Messbereich
5x	6 - 160 $\mu\text{m}$
10x	3 - 80 $\mu\text{m}$
20x	1,5 - 40 $\mu\text{m}$
40x	0,8 - 20 $\mu\text{m}$

Tab. 4.4: Messparameter der Lasergranulometrie

Bei allen untersuchten Proben lag der Modus der Verteilung der Korngrößen in der Größenordnung von ca. 1  $\mu\text{m}$ . Daher wird im Folgenden der Vergrößerungsfaktor von 40x zu Grunde gelegt.

#### **4.2.8 Rasterelektronenmikroskopie**

Für die Rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden die trockenen Pulver der Weißfeinkalke und der technisch gelöschten Kalkhydrate im unbehandelten Zustand gemes-

sen. Die eingesumpften Proben wurden mit Isopropanol gespült und Agglomerate mittels Ultraschall vereinzelt. Anschließend wurde der Dispersion zunächst auf einem Filterpapier Wasser entzogen, dann wurden die Proben für ca. 15 min im Trockenofen bei 40 °C getrocknet.

Für die Untersuchung werden die Proben mit einem Kleber auf entsprechende Al-Träger fixiert, danach werden sie mit Kohle bedampft und zusätzlich dünn mit Gold besputtert, damit die Elektronen während der REM-Untersuchungen von der Probenoberfläche abfließen können. Die entsprechend präparierten Einzelproben wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop der Firma Phillips XL 30 i untersucht. Neben dem großen Vergrößerungsbereich ist insbesondere die hohe Tiefenschärfe im REM sehr vorteilhaft. Hierbei wurden insbesondere Größe und Ausbildung der Partikel betrachtet.

Eine Verifizierung der Ergebnisse im Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) ergab, dass die Probenpräparation keine Auswirkung auf das Ergebnis hat.

#### **4.2.9 Lichtmikroskopie**

Für die lichtmikroskopischen Untersuchungen wurde das Probenmaterial der technisch gelöschten Kalkhydrate als Pulver in Lösung mit entionisiertem Wasser, die Weißfeinkalke in einer Lösung mit Isopropanol bei verschiedenen Vergrößerungen betrachtet. Analysiert wurden die Proben der tKHs jeweils nach Anmischen, nach 7 und nach 14 Tagen. Ausgewählte Proben wurden zusätzlich nach 21 und 28 Tagen betrachtet. Die Weißfeinkalke wurden nicht über einen längeren Zeitraum beobachtet.

#### **4.2.10 Quecksilberdruckporosimetrie**

Mittels Quecksilberdruckporosimeter wurden anhand der vorliegenden trockenen Pulverproben das kumulierte Porenvolumen und die Porenradienverteilung untersucht. Die Proben der einzelnen Weißfeinkalke und Weißkalkhydrate wurden mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Firma ThermoQuest Typ Pascal 140/240 untersucht. Der Druckbereich des Porosimeters reicht von  $p = 0$  bis 200 MPa, dies bedeutet, dass Poren mit einem Durchmesser von ca.  $d = 300 \mu\text{m}$  bis 4 nm erfasst und quantitativ dargestellt werden können. Die Proben wurden in einem Pulverdilatometer bei mittlerer Geschwindigkeit der Druckerhöhung untersucht. Es wurden sowohl die Porenradienverteilung ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) und der mittlere Porenradius ( $\mu\text{m}$ ), als auch die Rein- und Trockenrohddichte ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) mittels MIP ermittelt.

## **5 Versuchsergebnisse und Diskussion**

### **5.1 Probencharakterisierung**

Für die Untersuchungen wurden 10 technisch hergestellte Kalkhydrate unter der Vorgabe ausgewählt, die Spannweite der real möglichen physikalischen und chemischen Parameter abzu-

decken, wobei die wichtigsten Leitparameter die spezifische Oberfläche und der Gehalt an Nebenbestandteilen waren. Die verwendeten Kalkhydrate weisen somit spezifische Oberflächen von 4,7 bis 40,3 m<sup>2</sup>/g und glühverlustfreie CaO-Gehalte von 76,1 bis zu 99,3 M.-% auf.

Für einige vergleichende Untersuchungen wurden außerdem die korrespondierenden Branntkalke beprobt, aus denen die Kalkhydrate hergestellt wurden. Sofern möglich wurden die entsprechenden Weißfeinkalke entnommen, um zusätzlich Aufbereitungsschritte im Labor zu vermeiden, in einigen Fällen standen jedoch nur stückige Branntkalke zur Verfügung. Unabhängig von der Branntkalkkörnung haben alle Branntkalke die Bezeichnung 'WFK Nr.' erhalten, diese ist also nicht mit Weißfeinkalk gleichzusetzen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt, die Zahlenwerte der Analyseergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

## 5.2 Interpretation von Messergebnissen der Laborversuche

### 5.2.1 Verarbeitbarkeit (Emley-Plastizität)

Wird im Folgenden vom dem Begriff „Plastizität“ gesprochen, ist damit stets die Emley-Plastizität gemeint. In den Abb. 5.1 und Abb. 5.2 erkennt man, dass die untersuchten Kalke z. T. unterschiedliche Endpunkte auf der Emley-Skala aufweisen. Dies resultiert nicht aus einem vorzeitigen Messende der jeweiligen Probe, sondern aus der Bildung der Durchschnittswerte für die mehrfach durchgeführten Messungen.

#### **Ausgangsmaterial: technisch gelöschtes Kalkhydrat**

In Abb. 5.1 ist die durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der Proben tKH 1 bis 10 nach einer Einsumpfzeit von 24 Stunden dargestellt.

Die Kalkteige der Proben mit Kurven großer Steigungen zeigen geringere Plastizitätswerte. Umgekehrt sind die Proben mit Kurven geringer Steigungen plastischer („weicher“) und länger verarbeitbar. Anhand des Kurvenverlaufs lässt sich die Plastizitätsentwicklung einer Probe während der Messung erkennen. So beginnen viele Kurven z. B. Probe tKH 9 mit einer geringen Steigung und werden mit abnehmender Plastizität steiler.

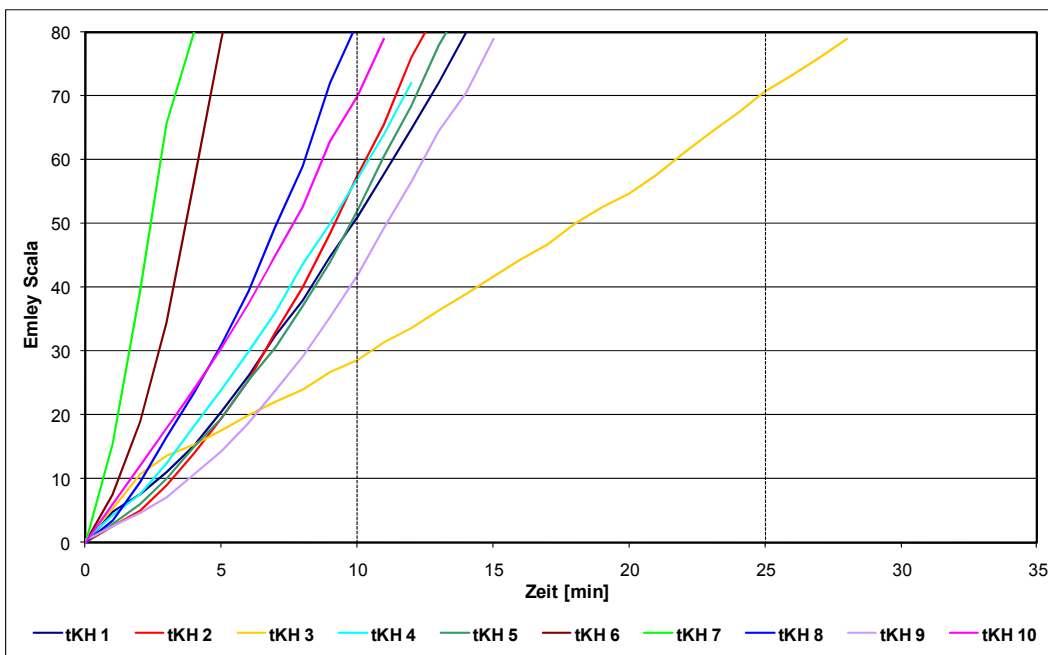


Abb. 5.1: Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der tKHs nach 24 h Einsumpfzeit

Vergleicht man diese Kurven mit denen nach einer Einsumpfzeit von 28 Tagen (Abb. 5.2), erkennt man, dass viele Kurven eine geringere Steigung aufweisen und die Kalkteige somit plastischer geworden sind. Insbesondere Probe tKH 1 befindet sich nach 24 Stunden noch im durchschnittlichen Bereich der hier untersuchen Proben, ist nach 28 Tagen jedoch mit der Kurve geringster Steigung dem plastischsten Material zuzuordnen. Eine längere Einsumpfzeit scheint sich jedoch nicht für alle Proben auf die Plastizität auszuwirken. Probe tKH 2 hat nach 24 Stunden eine durchschnittliche Plastizität und weist auch nach längerer Einsumpfzeit keine signifikanten Veränderungen auf. Probe tKH 3 zeigt ebenfalls keine signifikanten Änderungen, hat aber bereits nach 24 Stunden eine hohe Plastizität.

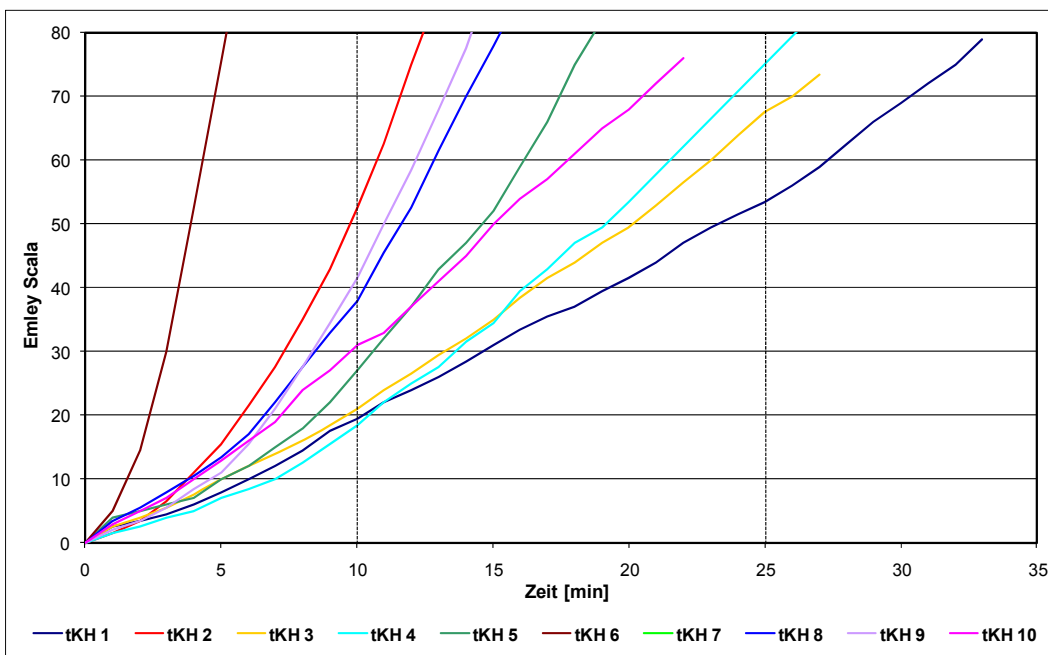


Abb. 5.2: Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der tKHs nach 28 Tagen Einsumpfzeit

Bei Analyse der Plastizitätsentwicklung einer Probe zu verschiedenen Einsumpfzeiten ergaben sich zwei Entwicklungsfälle. Im folgenden Abschnitt werden diese Fälle anhand der verschiedenen Proben mit Ausgangsmaterial technisch gelöschter Kalkhydrat genauer erläutert.

Fall 1: kontinuierliche Plastizitätssteigerung mit zunehmender Einsumpfzeit

Fall 2: unregelmäßige Plastizitätsentwicklung mit zunehmender Einsumpfzeit

### Fall 1

Diesem Fall sind drei der untersuchten Proben zuzuordnen. Hier steigt die Plastizität mit zunehmender Einsumpfzeit kontinuierlich an. Dabei handelt es sich um die Proben 1, 4 und 10, deren Plastizitätsentwicklung in der Abb. 5.3 zu sehen ist.

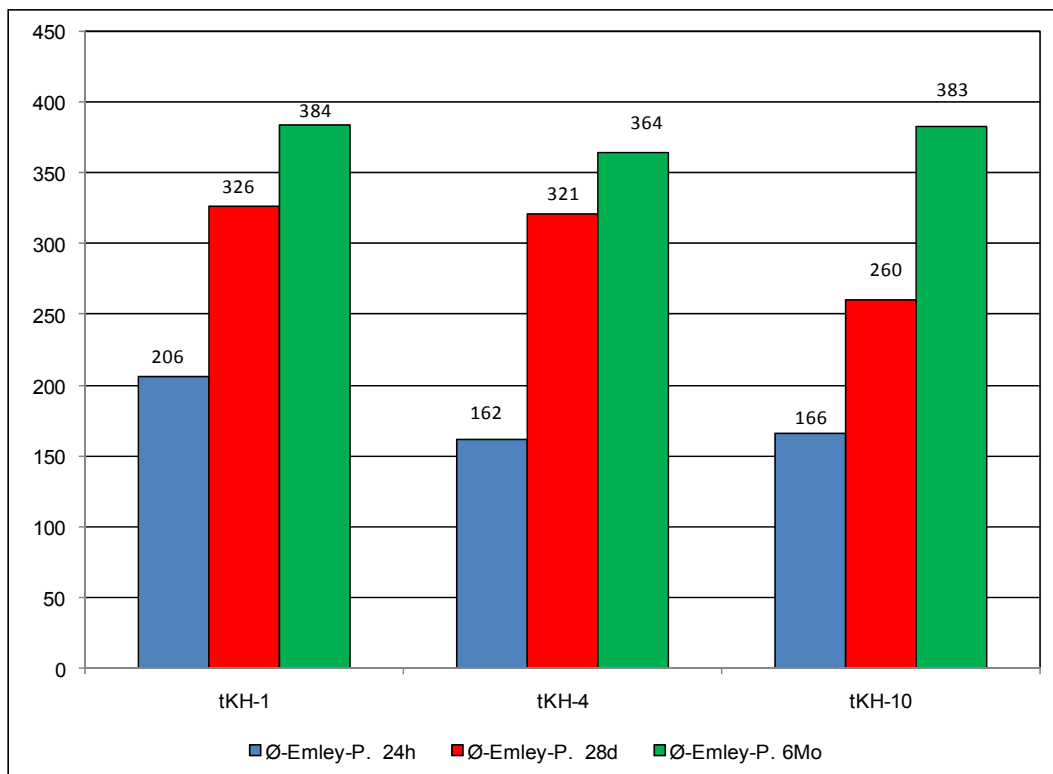


Abb. 5.3: Durchschnittliche Plastizitätswerte der tKHs im Fall 1

### Fall 2

Fall 2 sind all diejenigen Kalke zuzuordnen, deren Plastizität mit zunehmender Einsumpfzeit weder kontinuierlich steigen noch sinken. In der vorliegenden Untersuchung handelt es sich dabei um die Proben 2, 3, 5, 6, 8 und 9.

Anhand der Abb. 5.4 erkennt man, dass die Plastizität der Proben 2, 5 und 8 nach einer längeren Einsumpfzeit höher ist als nach 24 Stunden. Eine weitere Steigerung der Plastizität nach 6 Monaten lässt sich jedoch nicht feststellen, sie bleibt bei den Proben 2 und 8 nahezu unverändert. Bei tKH 5 nimmt der Wert wieder ab. Probe 9 weist die höchste Plastizität nach 24 Stunden auf. Die Werte der Langzeitmessungen liegen mit annähernd gleicher Höhe darunter. Nach 6 Monaten zeigt nur die Probe 3 den höchsten Wert, allerdings weist sie nach 28 Tagen

die geringste Plastizität auf. Die Steigerung der Werte von tKH 6 ist so gering, dass sie als gleichbleibend erachtet werden können. Für die Probe tKH 7 waren nach längerer Einsumpfzeit keine reproduzierbaren Messungen möglich.

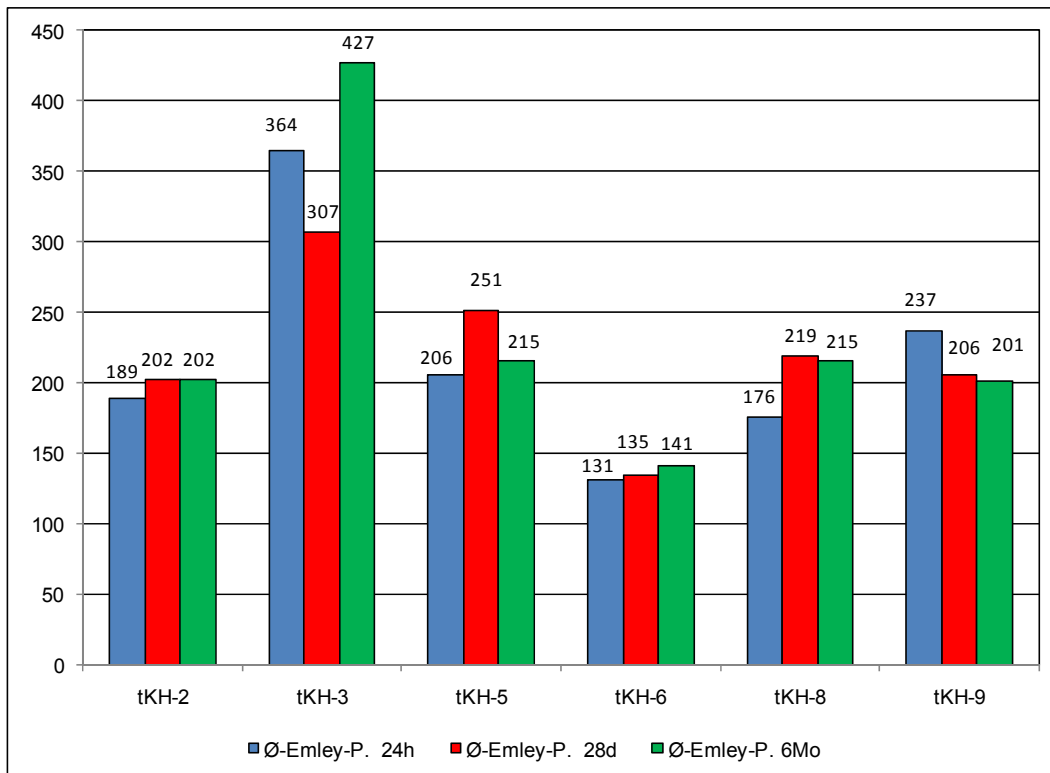


Abb. 5.4: Durchschnittliche Plastizitätswerte der tKHs im Fall 2

Zusätzlich wurden an den technisch gelöschten Kalkhydraten Messungen durchgeführt, nachdem sie für 28 Tage mit einem geringeren Wasser/Bindemittel-Verhältnis eingesumpft wurden. Um die für die Messung geforderte Konsistenz zu erhalten, mussten die Proben ebenfalls vorher getrocknet werden. Obwohl die Proben auch hier im Wasserüberschuss lagerten, ist anhand Probe tKH 1 (Abb. 5.5) ein Unterschied der Plastizitätsentwicklung erkennbar. Die Plastizität scheint sich somit beim Einsumpfen mit höherem Wasser/Bindemittel-Verhältnis stärker zu entwickeln. Diese Tendenz ist jedoch nicht für alle Proben zu beobachten, sondern hauptsächlich bei den Proben 1, 5, 8 und 10, die eine signifikante Plastizitätssteigerung zwischen den 24 Stunden- und 28 Tage-Werten aufweisen.

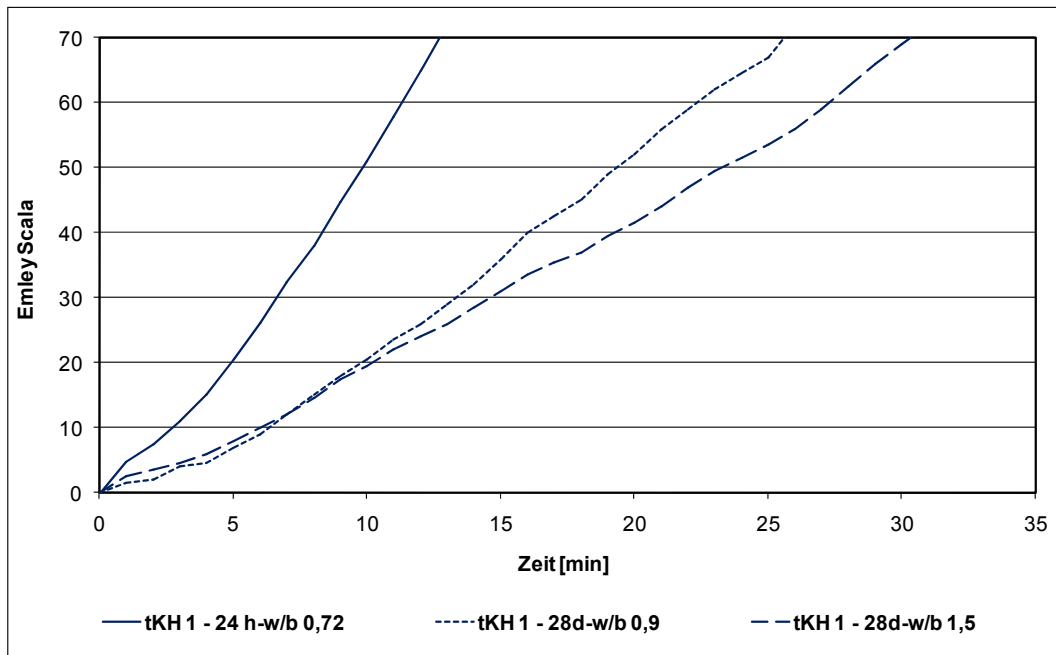


Abb. 5.5: Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung bei unterschiedlichen w/b-Verhältnissen

Die entsprechenden Wasser/Bindemittel-Verhältnisse während der Einsumpfzeit und zum Messzeitpunkt sind in Tab. 5.1 zusammengestellt. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wasser/Bindemittel-Verhältnis und dem Emley-Wert scheint nicht zu bestehen (vgl. Abb. 5.6).

Probe	tKH-1	tKH-2	tKH-3	tKH-4	tKH-5	tKH-6	tKH-7	tKH-8	tKH-9	tKH-10
w/b-Verhältn. bei Messung	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Plastizität 24h	206	189	364	162	206	131	117	176	237	166
w/b-Verhältn. bei Sumpfen	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
w/b-Verhältn. bei Messung	0.67	0.72	0.72	1.14	0.56	0.81	0.90	0.63	0.68	0.95
Plastizität 28d	326	202	307	321	251	135	---	219	206	260
w/b-Verhältn. bei Sumpfen	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
w/b-Verhältn. bei Messung	0.84	0.82	0.86	0.87	0.74	0.61	0.75	0.70	0.88	0.93
Plastizität 28d	321	189	423	355	206	125	119	180	189	210

Tab. 5.1: Plastizitätswerte mit zugehörigen w/b-Verhältnissen

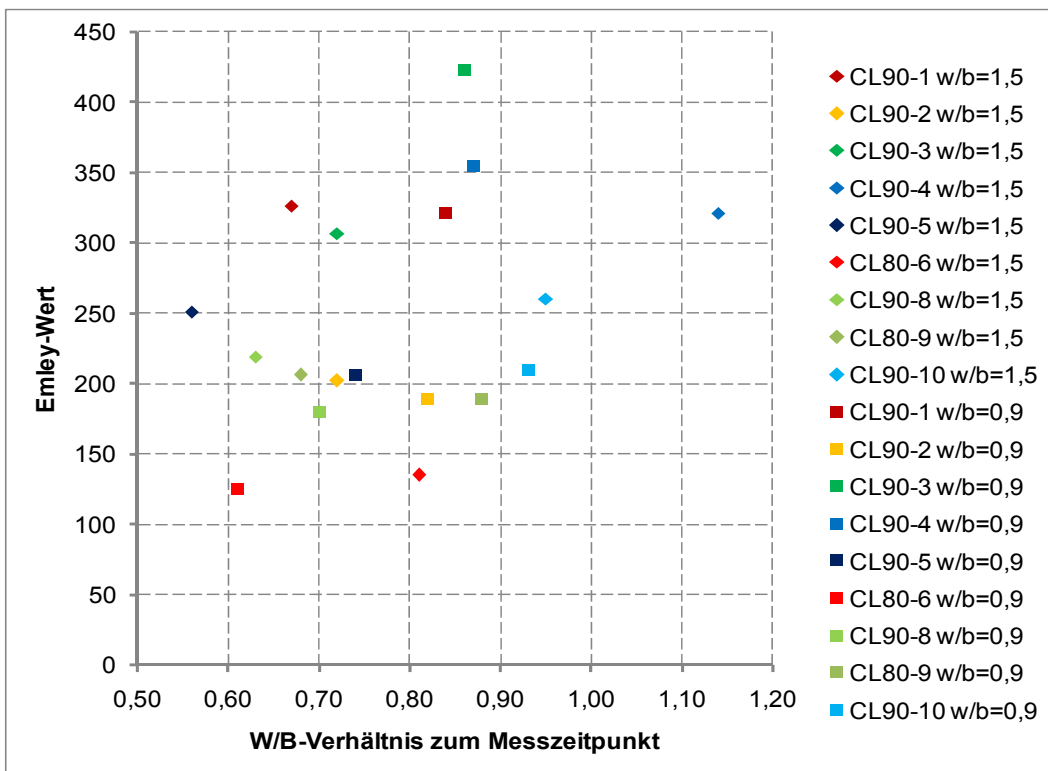


Abb. 5.6: Plastizitätswerte mit zugehörigen w/b-Verhältnissen

**Ausgangsmaterial: Weißfeinkalk, nassgelöscht**

In Abb. 5.7 ist die durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der Proben WFK 1 bis 10 nach einer Einsumpfzeit von 24 Stunden dargestellt. Die Kalkteige der Proben mit den Kurven großer Steigung erreichen geringere Plastizitätswerte. Umgekehrt sind die Proben mit Kurven geringer Steigung plastischer („weicher“) und länger verarbeitbar. Auch hier lässt sich anhand der Kurvenverläufe die Plastizitätsentwicklung einer Probe während der Messung erkennen.

Vergleicht man diese Kurven mit denen nach einer Einsumpfzeit von 28 Tagen (Abb. 5.8), sind Veränderungen erkennbar. Ein deutliches Abflachen der Kurven, wie es bei den tKHs zu beobachten war, ist hier nicht der Fall. Beim Vergleich der 24-Stunden- mit den 28-Tage-Werten ist bei den WFKs zu beachten, dass die Löschttemperatur aufgrund unterschiedlicher Wassermengen verschieden war. Für die 24-Stunden-Versuche wurde die experimentell ermittelte Wassermenge verwendet, für die 28-Tage-Versuche sollte das Material im Wasserüberschuss lagern.

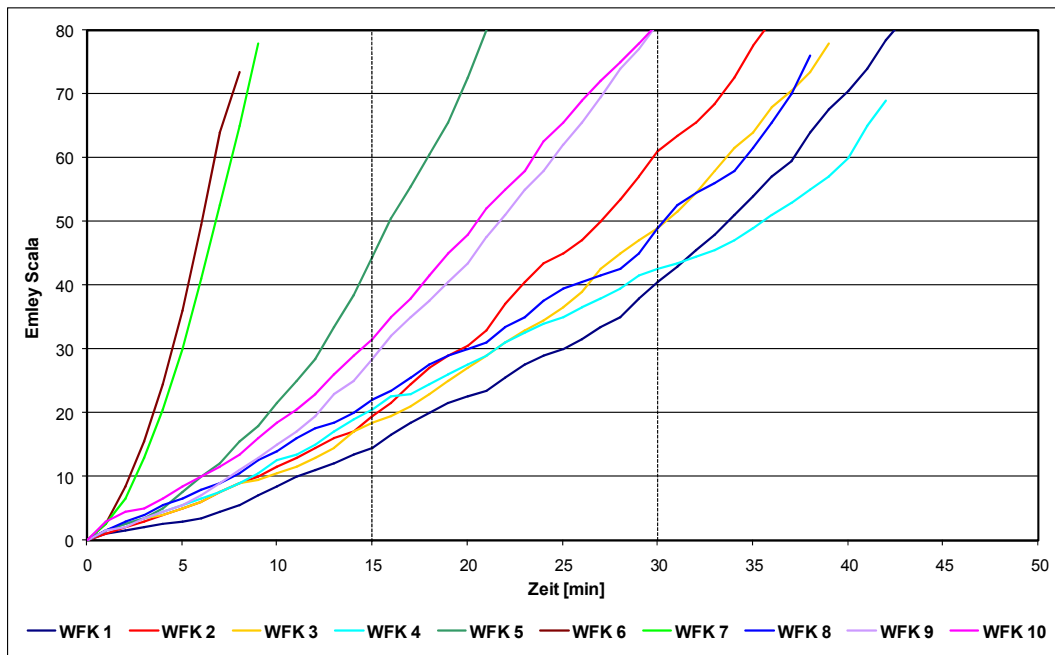


Abb. 5.7: Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der WFK nach 24 h Einsumpfzeit

Im Vergleich zu den tKHs scheinen die WFKs insgesamt höhere Plastizitätswerte zu erreichen, was an der längeren Messdauer und somit flacheren Kurven ersichtlich ist. Die unterschiedliche Plastizitätsentwicklung von technisch gelöschten Kalkhydraten und ihren korrespondierenden Weißfeinkalken könnte im unterschiedlichen Löschprozess begründet sein.

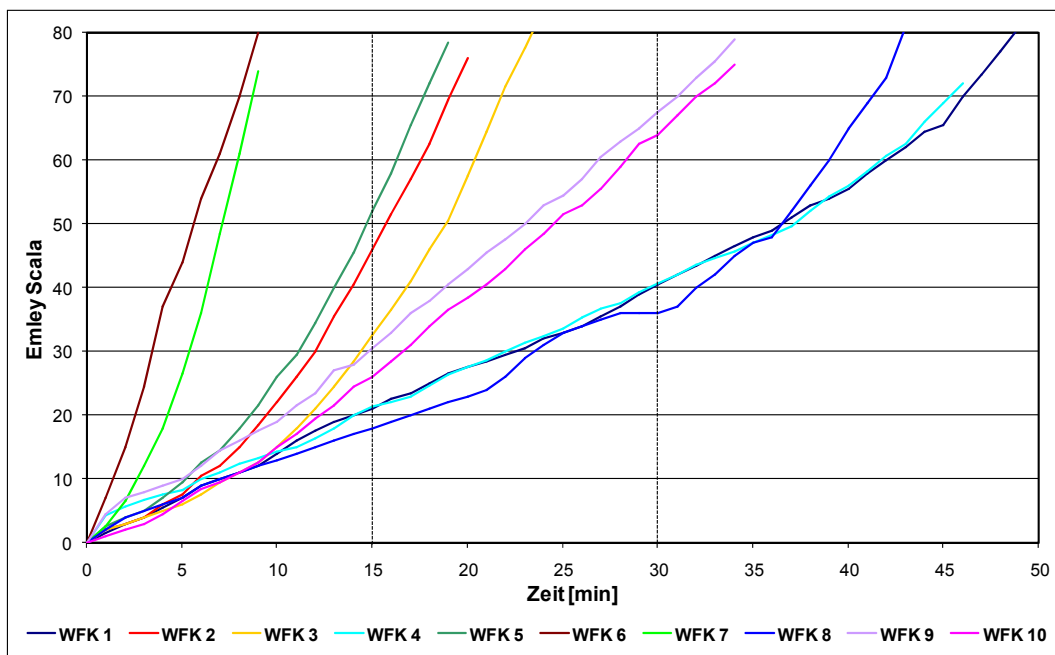


Abb. 5.8: Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der WFK nach 28 d Einsumpfzeit

Bei Analyse der Plastizitätsentwicklung der WFK-Proben zu verschiedenen Einsumpfzeiten ergaben sich auch hier die zwei Entwicklungsfälle.

### Fall 1

Diesem Fall sind etwa die Hälfte der untersuchten Kalkproben zuzuordnen. Hier steigt die Plastizität mit zunehmender Einsumpfzeit kontinuierlich an. Dabei handelt es sich um die Proben 1, 4, 7, (8) und 10, deren Plastizitätsentwicklung in der Abb. 5.9 zu sehen ist.

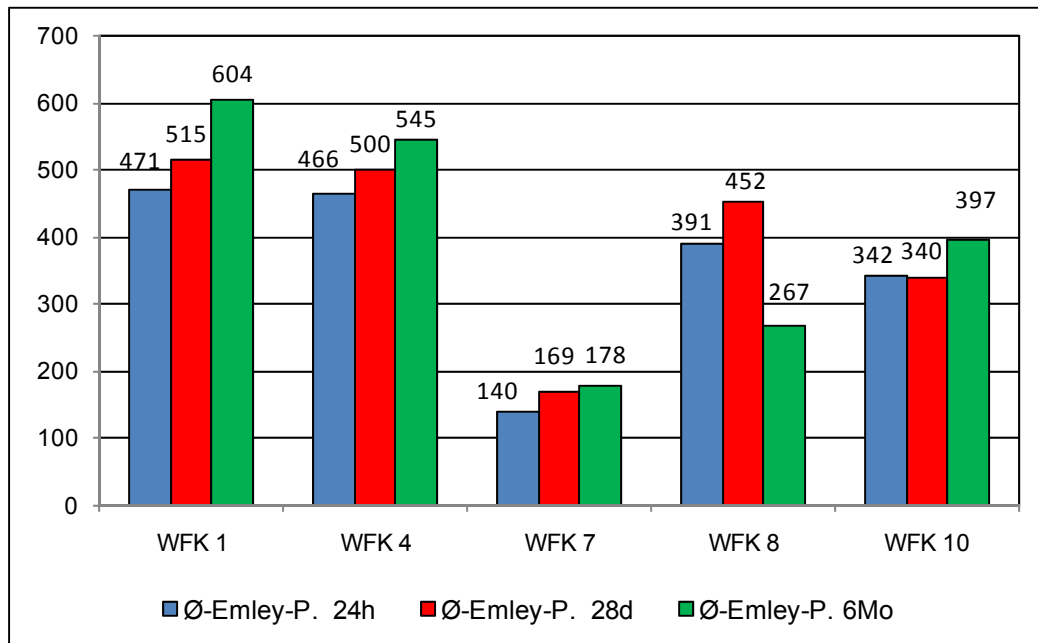


Abb. 5.9: Durchschnittliche Plastizitätswerte im Fall 1

Die Plastizitätsmessung zeigte bei WFK 8 Unregelmäßigkeiten auf, die nicht auf das Messverfahren zurückzuführen sind, sondern mit der Veränderung der Kalkhydratausbildung bei zunehmender Einsumpfzeit einhergehen. Bei der 24-Stunden- und 28-Tage-Messung lief die Messung ohne vorzeitigen Messabbruch ab, bei der 6-Monats-Messung hingegen war die Messung unregelmäßig beendet, bevor ein Skalen-Wert von 100 erreicht werden konnte.

WFK 8 wurde mit einer durchschnittlichen Korngröße von 8 - 16 mm geliefert und enthielt Anteile an carbonatisiertem Kalk und Verunreinigungen mit großen Korngrößen, die sich auch mit zunehmender Einsumpfzeit nicht gelöst haben. Die Vermutung liegt nahe, dass diese Teilchen dafür verantwortlich sind, dass das Kalkhydrat bei der Emley-Messung auseinander gebrochen und von der Trägerplatte herabgefallen ist. Betrachtet man die Kurvenverläufe in Abb. 5.10, zeigt sich, dass die Kurve der 6-Monats-Probe eine geringere Steigung aufweist, als die der 24-Stunden- und 28-Tage-Probe. Daraus folgt, dass bei einem Durchlaufen der Messung bis zu einem Skalen-Wert von 100 eine höhere Plastizität zu erzielen wäre als bei der 24-Stunden und 28-Tage Messung. Demnach ist WFK 8 dem Fall 1 zuzuordnen.

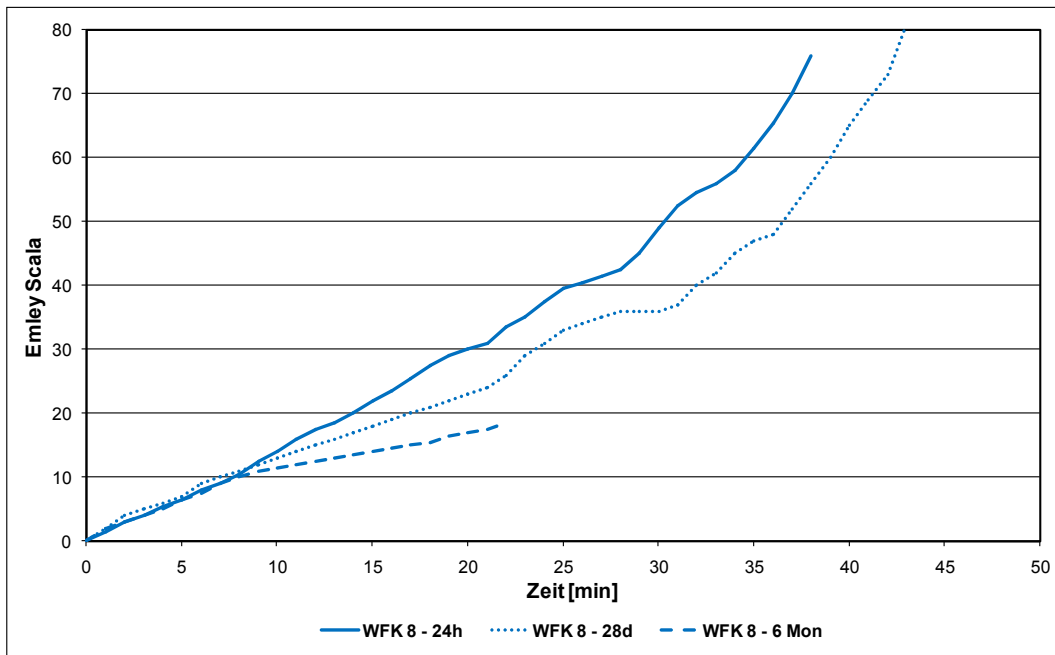


Abb. 5.10: Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung von WFK 8

## Fall 2

Fall 2 sind all diejenigen Kalke zuzuordnen, deren Plastizität mit zunehmender Einsumpfzeit weder kontinuierlich steigen noch sinken. In der vorliegenden Untersuchung handelt es sich dabei um die Proben 2, 3, 5, 6 und 9.

Anhand der Abb. 5.11 erkennt man, dass die Plastizität der Proben 2, 3, 5 und 6 nach einer Einsumpfzeit von 28 Tagen geringer ist als die zu andern Messzeitpunkten. Probe 9 hingegen weist die höchste Plastizität nach 28 Tagen auf. Nach 6 Monaten zeigen nur die Proben 3, 5 und 6 gesteigerte Werte.

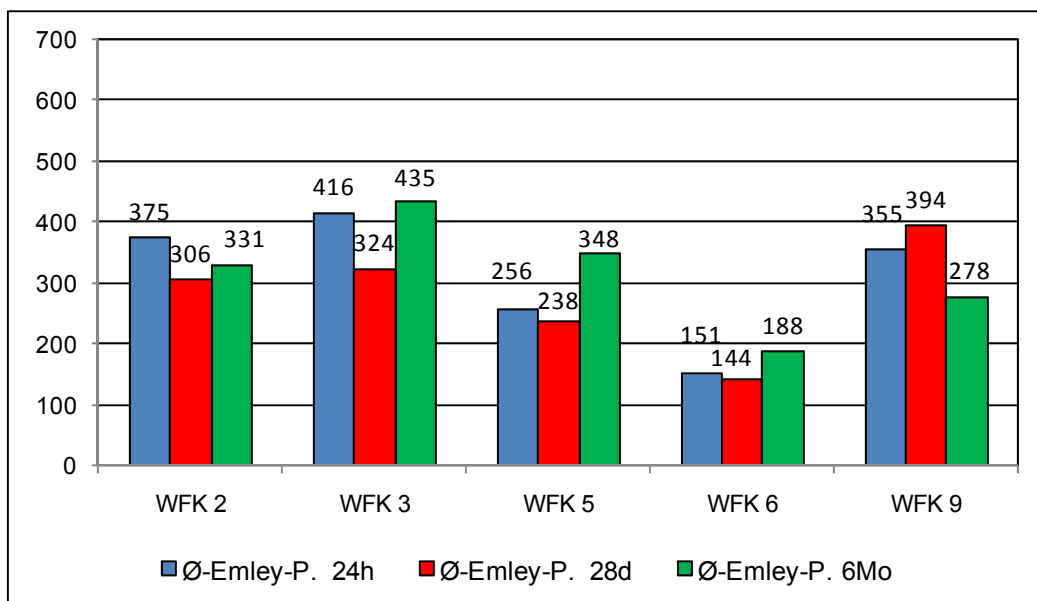


Abb. 5.11: Durchschnittliche Plastizitätswerte im Fall 2

In den Gruppierungen zur Plastizitätsentwicklung zu unterschiedlichen Einsumpfzeiten lassen sich bei den tKHs und bei den WFKs die gleichen Proben wiederfinden. Ausnahmen bilden die Proben 7 und 8, bei denen keine reproduzierbaren Messungen möglich waren. Somit scheint für die Plastizitätsentwicklungen infolge längerer Einsumpfzeiten der Löschprozess eine untergeordnete Rolle zu spielen.

### 5.2.2 Mineralphasenbestand

Mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie wurde der Mineralbestand der untersuchten Kalkhydrate und Weißfeinkalke röntgenographisch bestimmt. Eine vergleichende Darstellung der Diffraktogramme ist Abb. 5.12 bis Abb. 5.15 zu entnehmen.

Wie in Tab. 5.2 zusammengestellt, bestehen die untersuchten Kalkhydrate überwiegend aus Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) als Hauptphase und Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) als Nebenphase. Mit Ausnahme von tKH 1 und tKH 4 enthalten alle Proben auch Quarz ( $\text{SiO}_2$ ). Die Proben tKH 2, 5, 6, 7 und 9 enthalten zusätzlich Anteile von Calciumoxid, die Proben tKH 6 und 9 (CL 80) und tKH 7 (CL 70) enthalten zusätzlich Larnit (Belit =  $\text{C}_2\text{S}$ ) und Hydrogranat. Bei tKH 2, 3 und 10 ist zusätzlich Periklas ( $\text{MgO}$ ), bei tKH 3, 6 und 10 Brucit ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) nachweisbar.

	tKH-1	tKH-2	tKH-3	tKH-4	tKH-5	tKH-6	tKH-7	tKH-8	tKH-9	tKH-10
<b>Portlandit</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>Calcit</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>Quarz</b>		x	x		x	x	x	x	x	x
<b>Calciumoxid</b>		x			x	x	x		x	
<b>Magnesiumoxid</b>		x	x							x
<b>Brucit</b>			x			x				x
<b>Larnit</b>						x	x		x	
<b>Hydrogranat</b>						x	x		x	

Tab. 5.2: Enthaltene Mineralphasen (tKH)

Anhand der Abb. 5.12 und Abb. 5.13 ist erkennbar, dass der Anteil der Nebenbestandteile der Proben tKH 6 (CL 80) und tKH 7 (CL 70) deutlich größer ist als der anderer Proben.

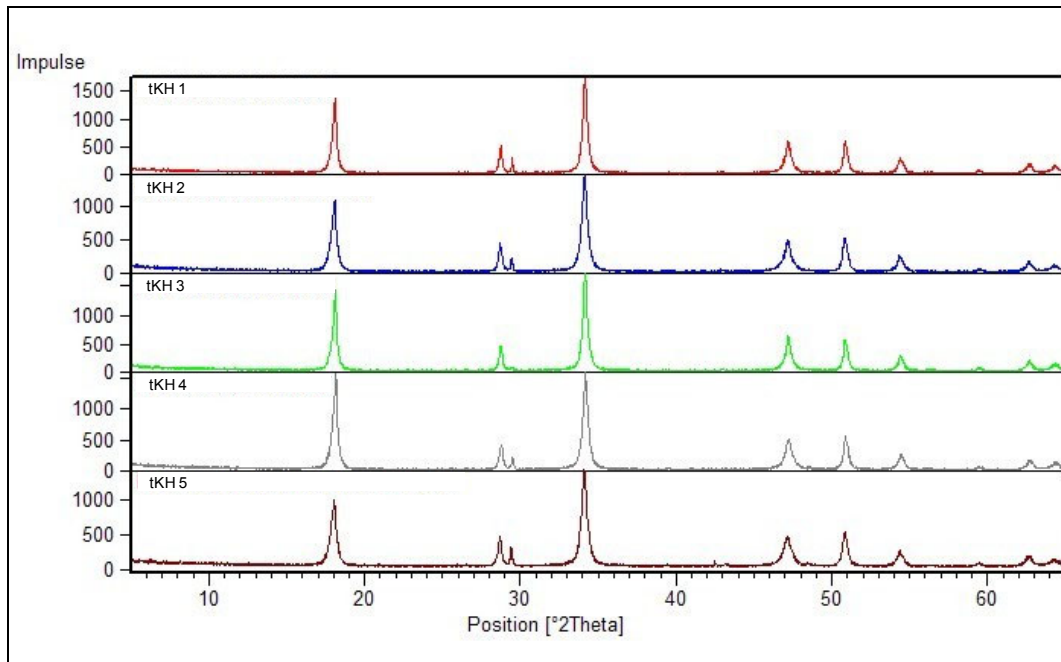


Abb. 5.12: Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben tKH 1 bis 5 (CL90)

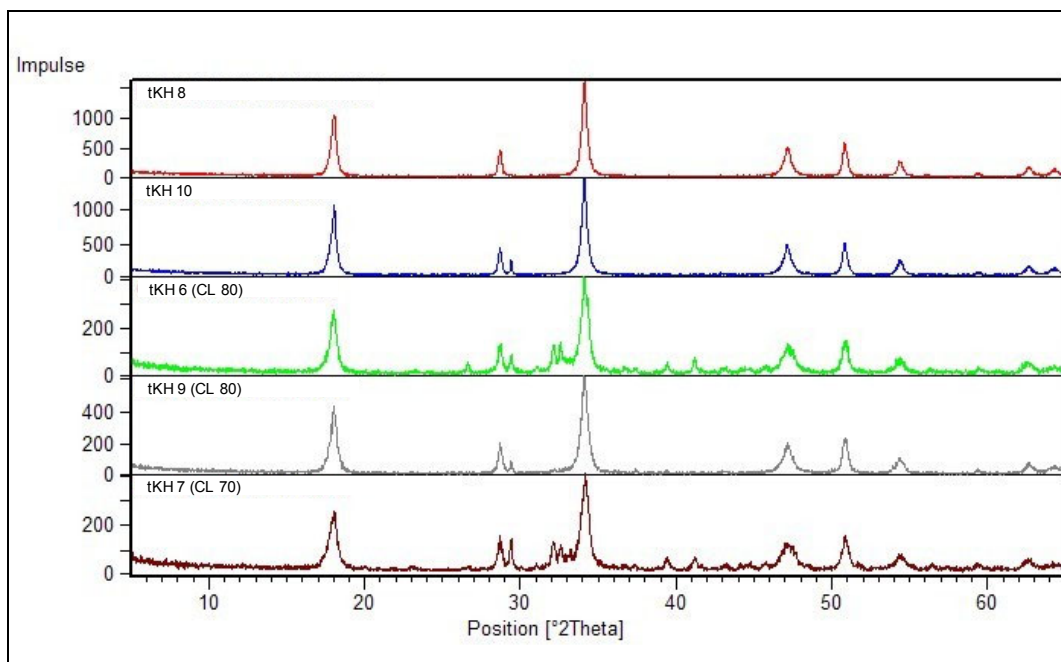


Abb. 5.13: Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben tKH 8 bis 10 (CL90) und tKH 6 und tKH 9 (CL80) sowie tKH 7 (CL 70)

Wie in Tab. 5.3 zusammengestellt, bestehen die untersuchten Weißfeinkalke überwiegend aus Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ), Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) und Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ). Mit Ausnahme von WFK 4, 7, 8 und 9 enthalten alle Proben auch Periklas ( $\text{MgO}$ ). Außer bei den Proben WFK 1 und WFK 8 war ebenfalls Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) nachzuweisen. Die Probe WFK 8 enthält zusätzlich Spuren von Pseudobrookite ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_2$ ), die Proben WFK 6, 7, 9 und 10 enthalten zusätzlich Larnit ( $\text{SiO}_4$ ). In WFK 2 ist Magnesit ( $\text{MgCO}_3$ ) nachweisbar, in WFK 10 befinden sich Spuren von Strontianit.

	WFK-1	WFK-2	WFK-3	WFK-4	WFK-5	WFK-6	WFK-7	WFK-8	WFK-9	WFK-10
Calciumoxid	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Portlandit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Calcit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Magnesiumoxid	x	x	x		x	x				x
Quarz		x	x	x	x	x	x		x	x
Pseudobrookite								x		
Larnit						x	x		x	x
Magnesit		x								
Strontianit										x

Tab. 5.3: Enthaltene Mineralphasen (tKH)

Anhand der Abb. 5.14 und Abb. 5.15 ist erkennbar, dass der Anteil der Nebenbestandteile der Proben WFK 6 (CL 80) und WFK 7 (CL 70) deutlich größer ist als der anderer Proben.

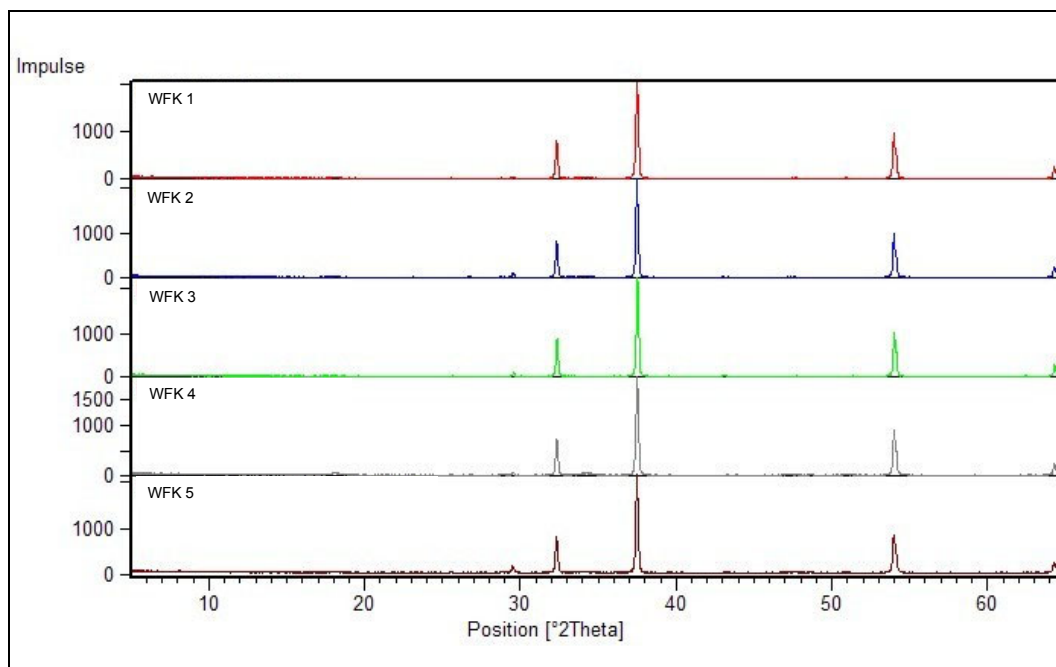


Abb. 5.14: Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben WFK 1 bis 5 (CL90)

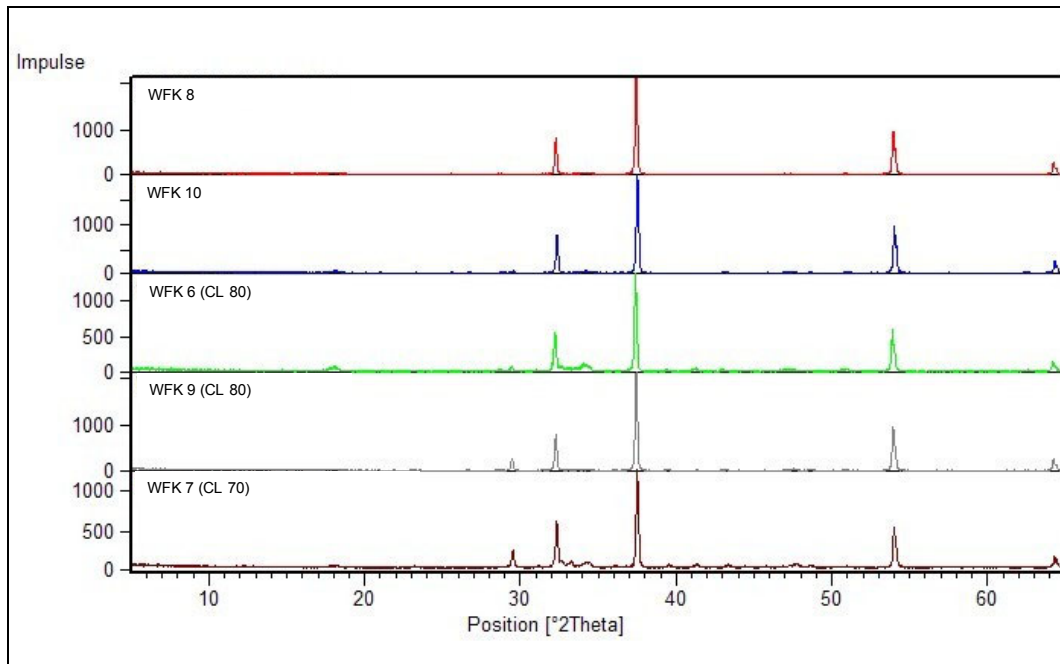


Abb. 5.15: Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben WFK 8 bis 10 (CL90) und WFK 6 und WFK 9 (CL80) sowie WFK 7 (CL 70)

### 5.2.3 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der Proben ist Abb. 5.16 und Abb. 5.17 zu entnehmen. Eine direkte Korrelation mit der Verarbeitbarkeit konnte weder für chemische Einzel- noch für bestimmte Summenparameter ermittelt werden. Es lässt sich lediglich festhalten, dass die beiden Proben mit dem höchsten Gehalt an Nebenbestandteilen die geringsten Emley-Werte aufweisen (Abb. 5.18, Abb. 5.19).

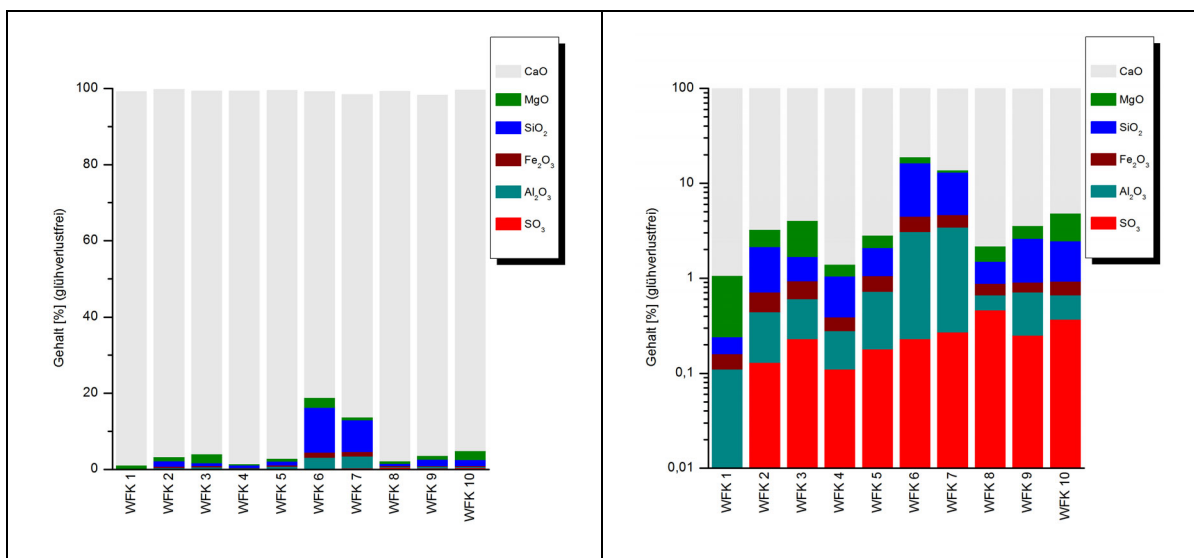


Abb. 5.16: Glühverlustfreie, chemische Zusammensetzung der Branntkalk, links lineare Darstellung, rechts logarithmische Darstellung zur Hervorhebung der Nebenbestandteile

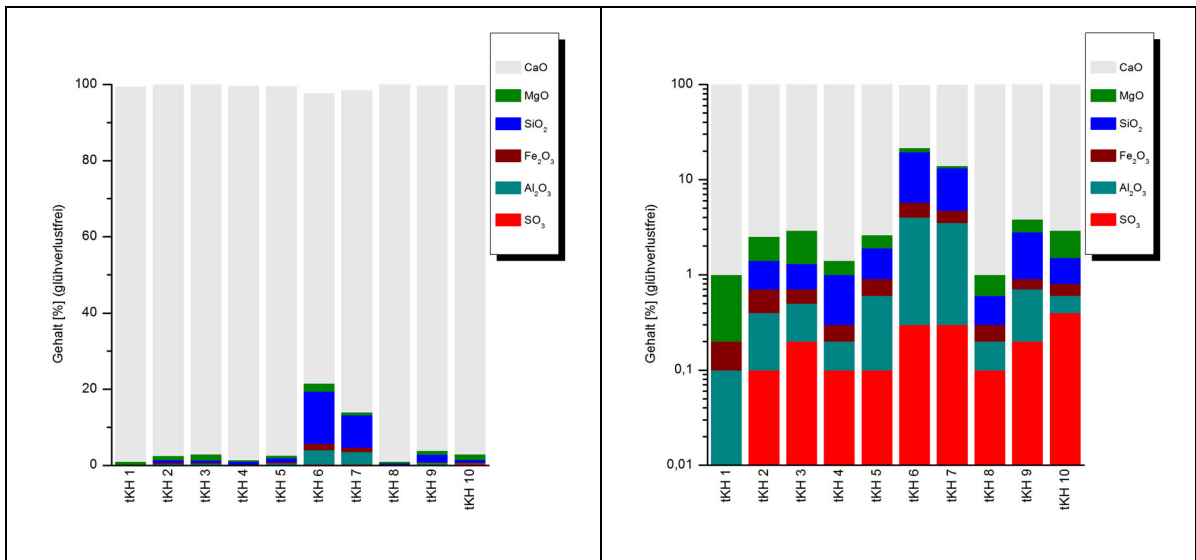


Abb. 5.17: Glühverlustfreie, chemische Zusammensetzung der trockenen Kalkhydrate, links lineare Darstellung, rechts logarithmische Darstellung zur Hervorhebung der Nebenbestandteile

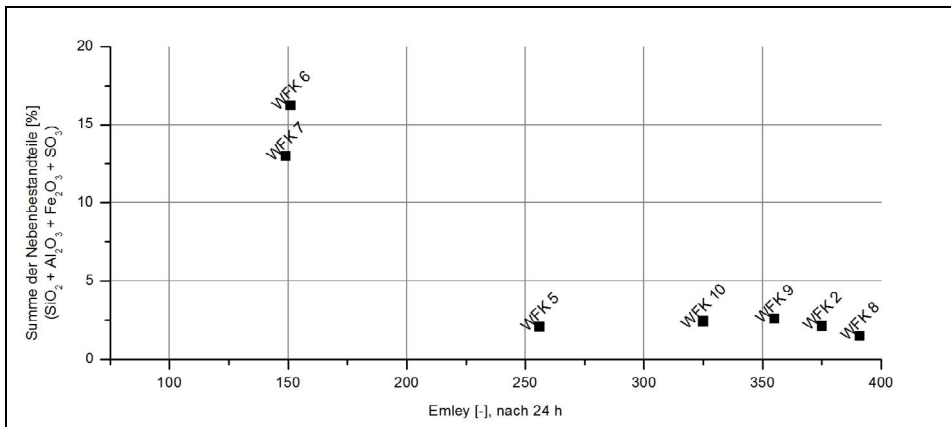


Abb. 5.18: Gegenüberstellung der Summe der Nebenbestandteile der Branntkalk und Emley-Werte der nassgelöschten Proben nach 24 h

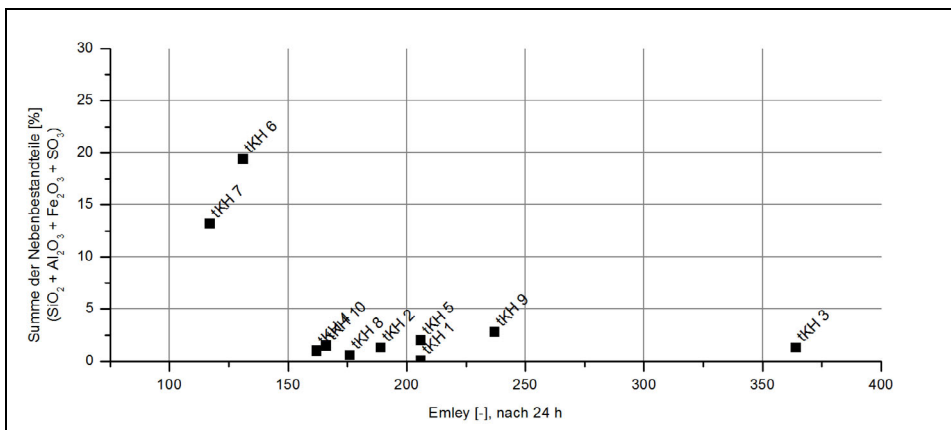


Abb. 5.19: Gegenüberstellung der Summe der Nebenbestandteile der trockenen Hydrate und Emley-Werte der Proben nach 24-stündiger Einsumpfzeit

Die detaillierten Messwerte der chemischen Analysen können dem Anhang unter Abschnitt 8.1.1 entnommen werden.

### 5.2.4 Reaktivität - Kalorimetrie

Mittels kalorimetrischer Messungen wurden sowohl der Wärmeflussverlauf als auch der Gesamtenergieumsatz der Weißfeinkalke beim Löschen mit Wasser aufgezeichnet. Anhand Abb. 5.20 ist erkennbar, dass Probe WFK 8 den mit Abstand größten Energieumsatz hat. Allerdings gilt das nur für die Probe, bei der die Körnung kleiner 2 mm ausgesiebt und gemessen wurde. Nachdem WFK 8 zerkleinert wurde, weist die Probe den geringsten Energieumsatz auf. Grund dafür ist die Beeinflussung der Probe durch die Aufbereitung.

Bei den Proben WFK 6 und 7 ist auffällig, dass sie auch nach zehn Stunden eine leicht ansteigende Kurve aufweisen und somit noch mehr Energie umsetzen als die anderen Proben. Wie auch die röntgenographische Untersuchung gezeigt hat, handelt es sich bei den Proben WFK 6 und 7 um Material mit zusätzlichen Nebenbestandteilen, auf die das Reaktionsverhalten zurückzuführen ist.

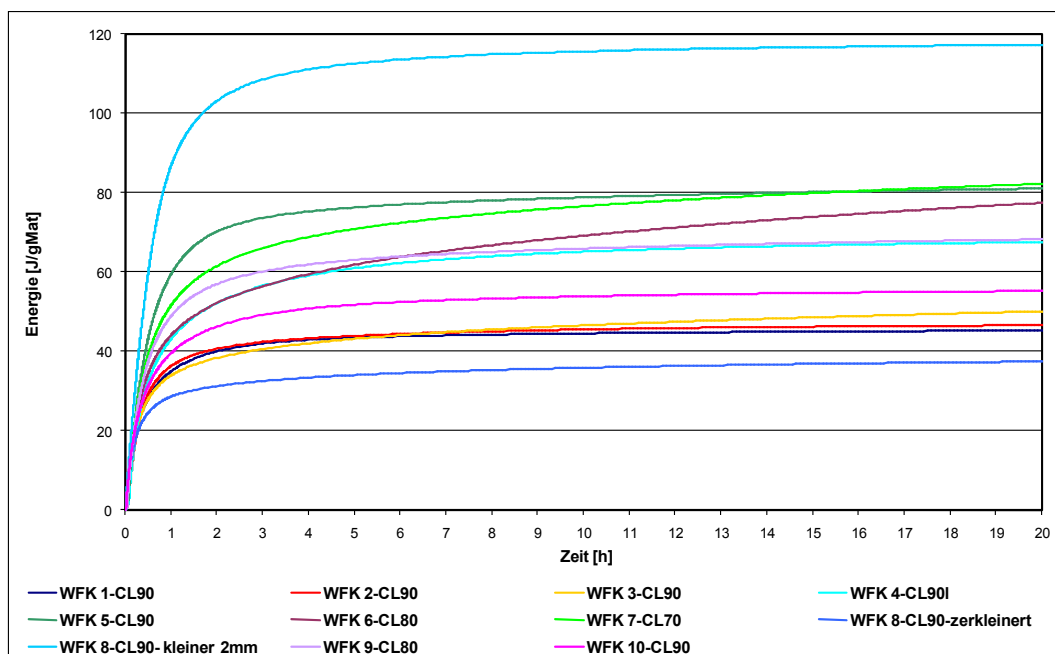


Abb. 5.20: Gesamtenergieeintrag

In Abb. 5.21 ist der Wärmeflussverlauf der Proben WFK 1 bis 10 dargestellt. Auch hier ist der Unterschied der Probenform bei WFK 8 ersichtlich. Die zerkleinerte Probe entwickelt zu Anfang deutlich mehr Wärme, wohingegen die Kurve der gesiebten Probe von allen Kurven am niedrigsten verläuft. Sie flacht jedoch auch am langsamsten ab, was auf eine fortschreitende Reaktion unter Wärmeabgabe hinweist. Dieser Unterschied ist dadurch zu erklären, dass bei der gesiebten Probe größere Stücke vorlagen. Zunächst konnte die Reaktion nur an der Oberfläche der Stücke stattfinden und erst mit deren Auflösung nach und nach fortschreiten.

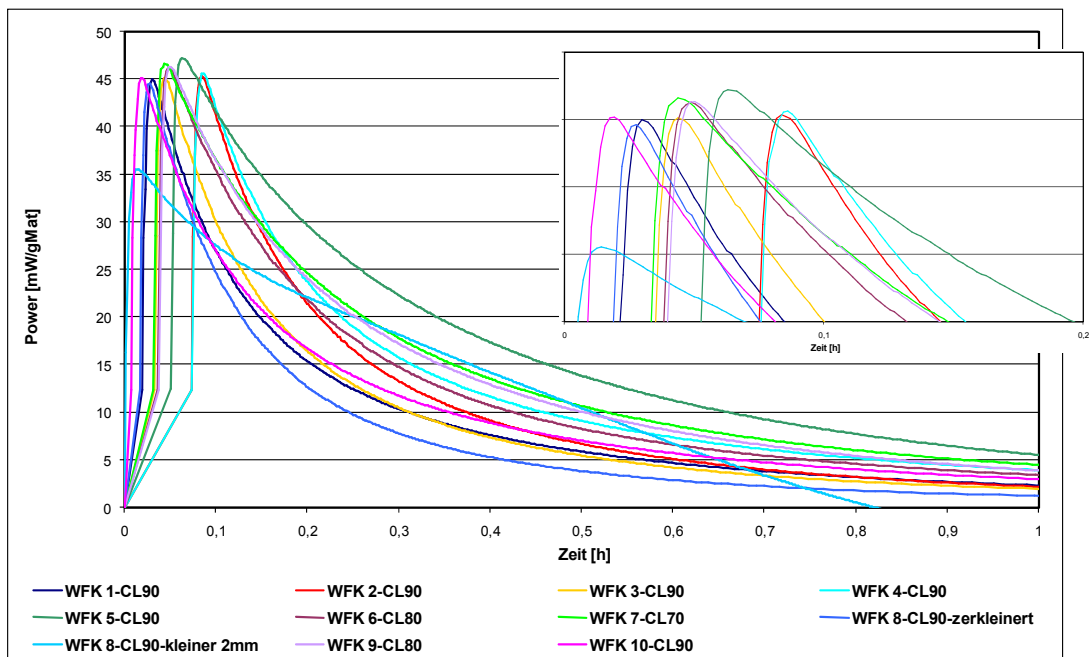


Abb. 5.21: Wärmeflussverlauf

### 5.2.5 Reaktivität - Nasslöschkurve gem. EN 459-2

Die ermittelten Nasslöschkurven der Branntkalkle sind in Abb. 5.22 dargestellt. Die körnige Probe WFK 8 wurde vor der Messung auf < 2 mm abgeseibt. Für die auf 80 % Umsatz bezogenen Reaktivitätsparameter  $T_{u80}$  [°C] bzw.  $t_{u80}$  [min] ergibt sich für die Zeit, bis 80 % der Probe mit Wasser reagiert haben ( $t_{u80}$  [min]) eine lineare Korrelation mit den Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit mit einem  $R^2$  von 0,74 (Abb. 5.23).

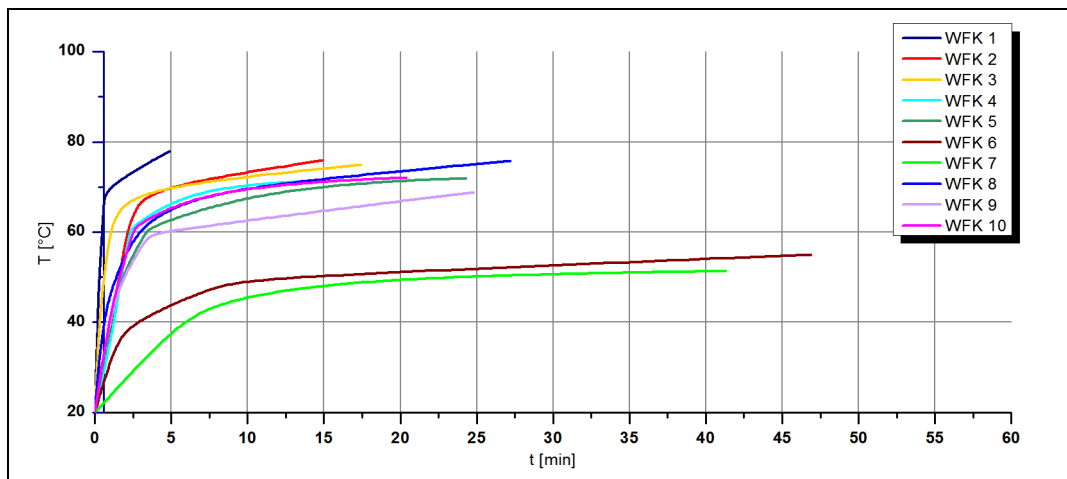


Abb. 5.22: Nasslöschkurven der Branntkalkle

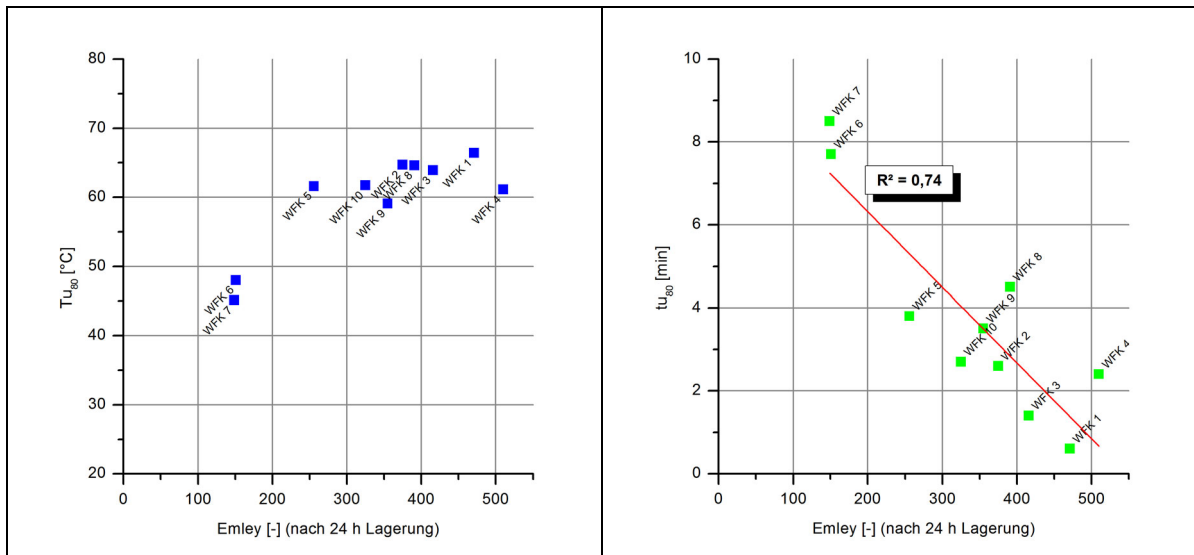


Abb. 5.23: Gegenüberstellung von Reaktivitätsparametern und Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit, links  $T_{u80}$  [°C], rechts  $t_{u80}$  [min]

## 5.2.6 Partikelgrößenverteilung

Die gemessenen Partikelgrößenverteilungen werden im Folgenden für die jeweilige Probe zusammengefasst dargestellt. Dazu werden das trockene Produkt und die Kalkteigprobe nach verschiedene Lagerungsdauern im Wasserüberschuss unterschieden.

Neben der Summen- und Dichteverteilungen sind in einem separaten Diagramm außerdem jeweils die Veränderungen der Volumenanteile der einzelnen Partikelklassen dargestellt. Diese wurden durch Subtraktion der ermittelten Partikelgrößen der über 24 Stunden gelagerten Kalkteige von den Messwerten der Kalkteige mit längerer Lagerungsdauer der jeweiligen Kornklasse ermittelt. Die Nulllinie des Diagramms entspricht somit der 24-stündigen Probe, positive Abweichungen stellen eine Zunahme, negative eine Abnahme der Volumenanteile der jeweiligen Partikelklasse dar.

Die Messungen erfolgten mit einer Brennweite von 50 mm, um einen möglichst feinen Bereich der Partikel zu erfassen, da zu vermuten war, dass die Feinstbestandteile einen überproportionalen Einfluss auf die Plastizität ausüben (siehe auch NEY 1958). Dies führte allerdings dazu, dass nicht an allen Proben erfolgreiche Messungen durchgeführt werden konnten, da zum Teil aufgrund größerer Bestandteile der zulässige Messbereich überschritten wurde. In diesen Fällen sind die Messungen in den folgenden Diagrammen als 'n. b.' (nicht bestimmt) gekennzeichnet.

Die Volumenveränderung fällt für gWKH- und gWFK-Proben mit unterschiedlichen Tendenzen aus. Die gWKH-Proben weisen zum Teil sowohl Zu- als auch Abnahmen bestimmter Partikelgrößen in einer Probe auf. Diese Tendenzen können sich sogar innerhalb einer Probe über die Lagerungsdauer deutlich verändern und sogar umkehren (Abb. 5.30, Abb. 5.32). Die Proben der gWFK dagegen zeigen für jede Probe über die Lagerungsdauer nur Veränderungen in eine Richtung, die sich auch nur auf einen Partikelbereich beschränken. Vorherrschend ist eine Zunahme der Volumenverteilung im Partikelgrößenbereich  $> 5 \mu\text{m}$ , ohne das in anderen Be-

reichen eine Abnahme zu verzeichnen wäre. Einzig die beiden Proben mit einem höheren Gehalt an Nebenbestandteilen (gWFK 6 und 7) weisen ein anderes Verhalten auf und durchlaufen eine signifikante Reduktion des Partikelvolumens im Größenbereich von 10  $\mu\text{m}$ . (Abb. 5.39, Abb. 5.40).

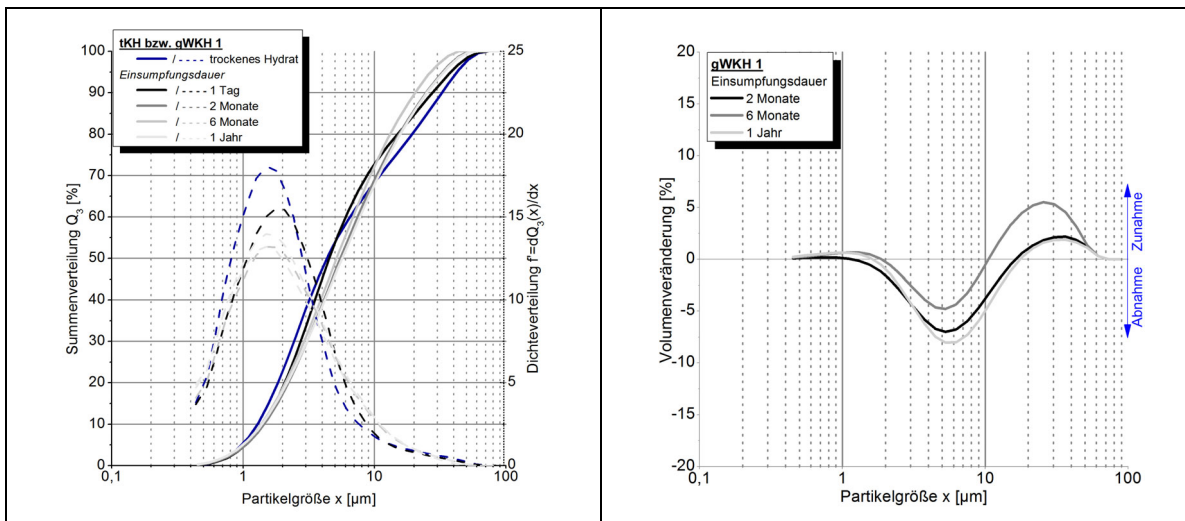


Abb. 5.24: tKH bzw. gWKH1, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

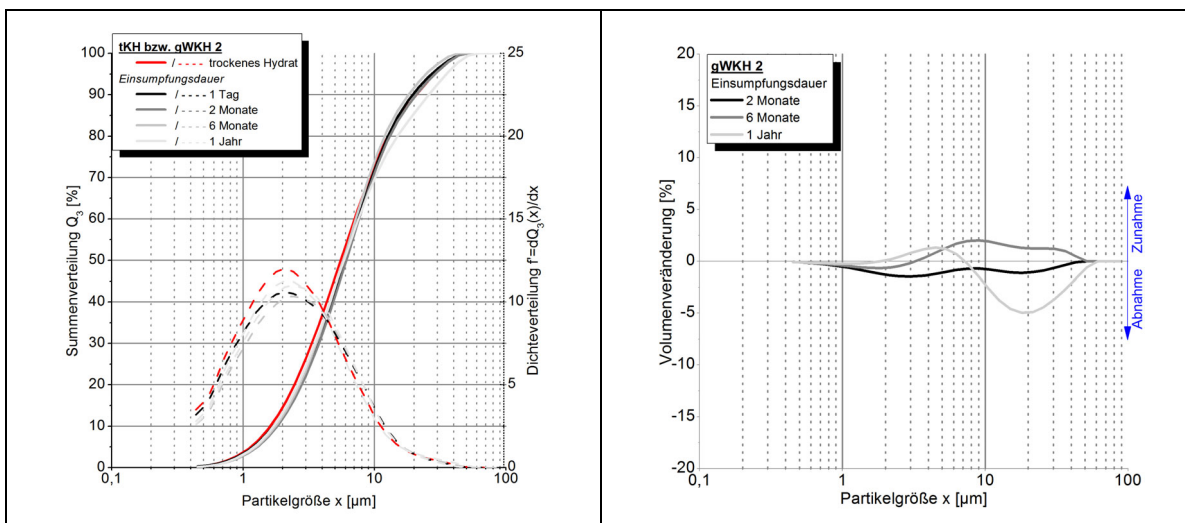


Abb. 5.25: tKH bzw. gWKH 2, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

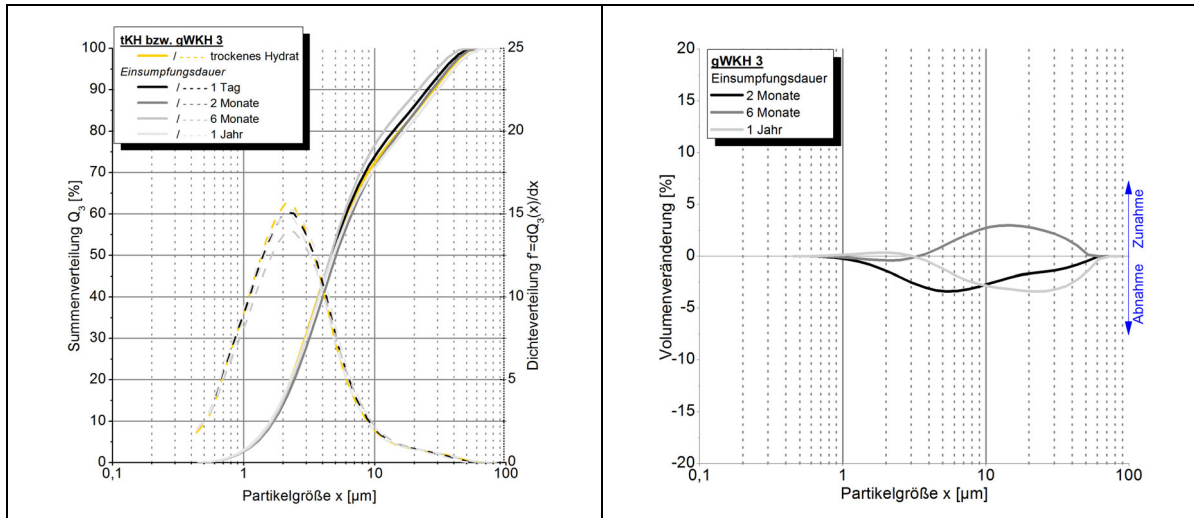


Abb. 5.26: tKH bzw. gWKH 3, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einimpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

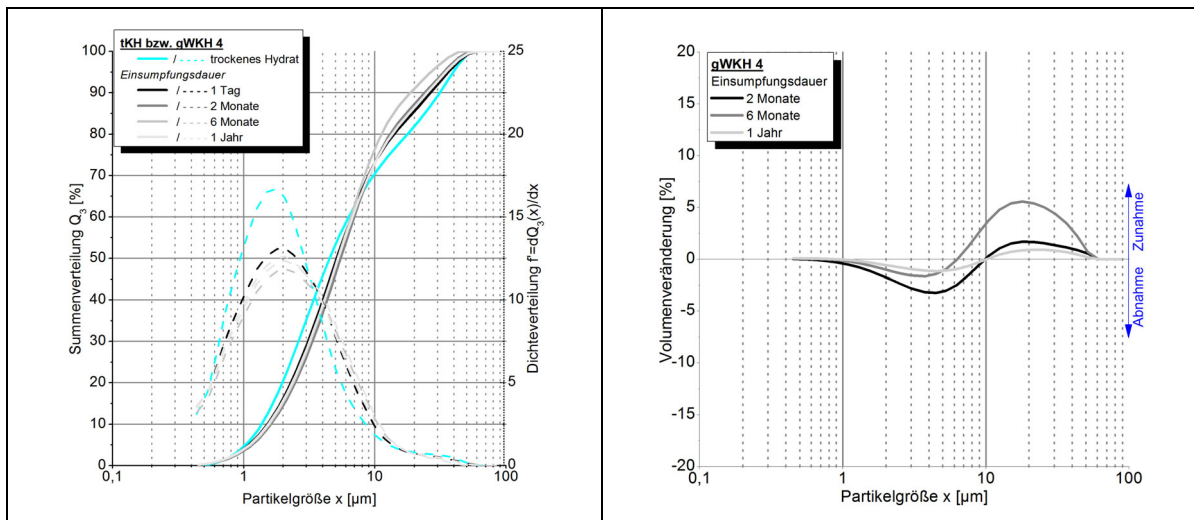


Abb. 5.27: tKH bzw. gWKH 4, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einimpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

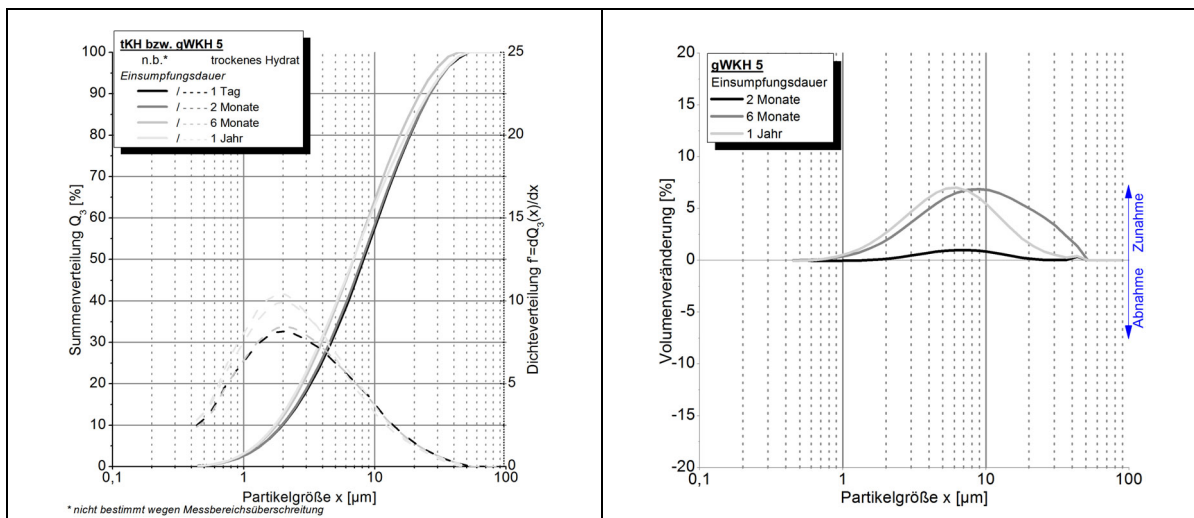


Abb. 5.28: tKH bzw. gWKH 5, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einimpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

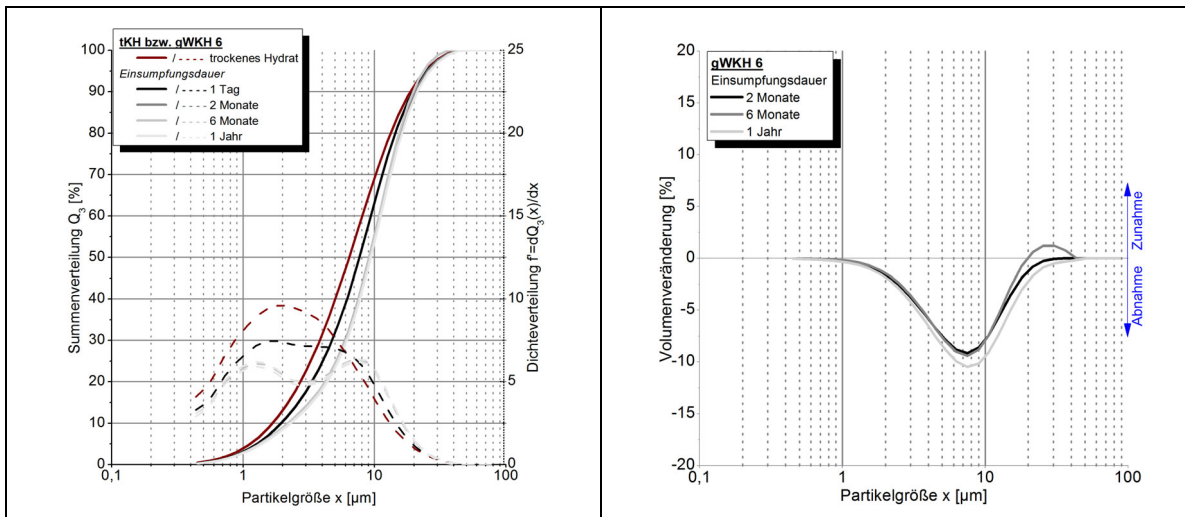


Abb. 5.29: tKH bzw. gWKH 6 links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

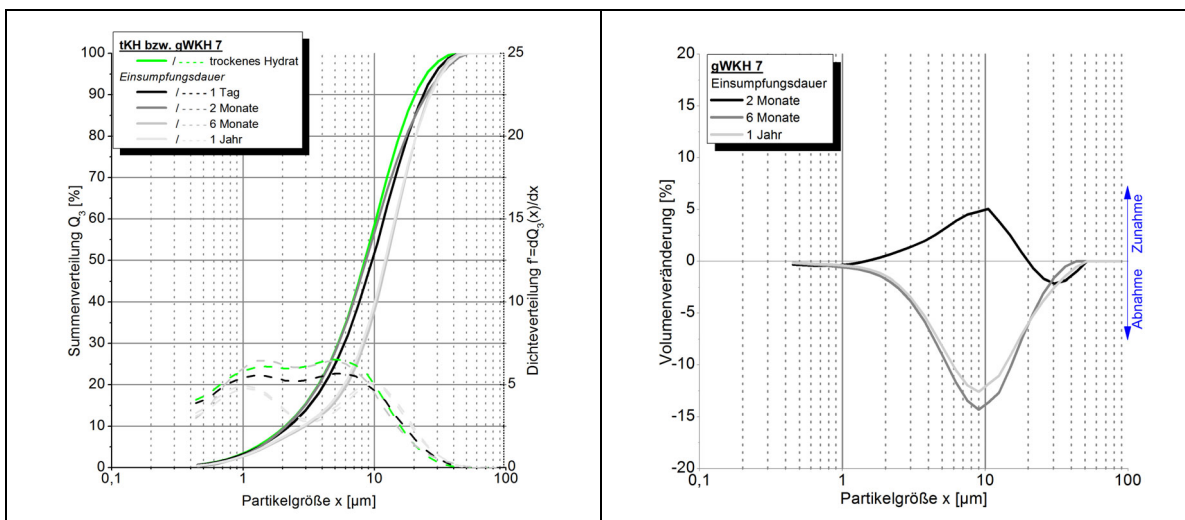


Abb. 5.30: tKH bzw. gWKH 7, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

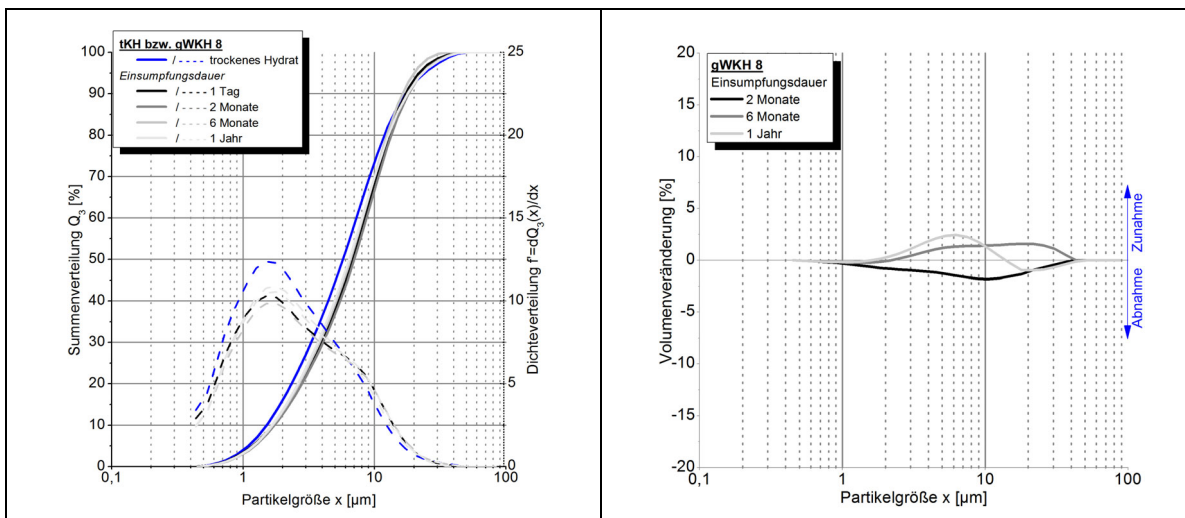


Abb. 5.31: tKH bzw. gWKH 8, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

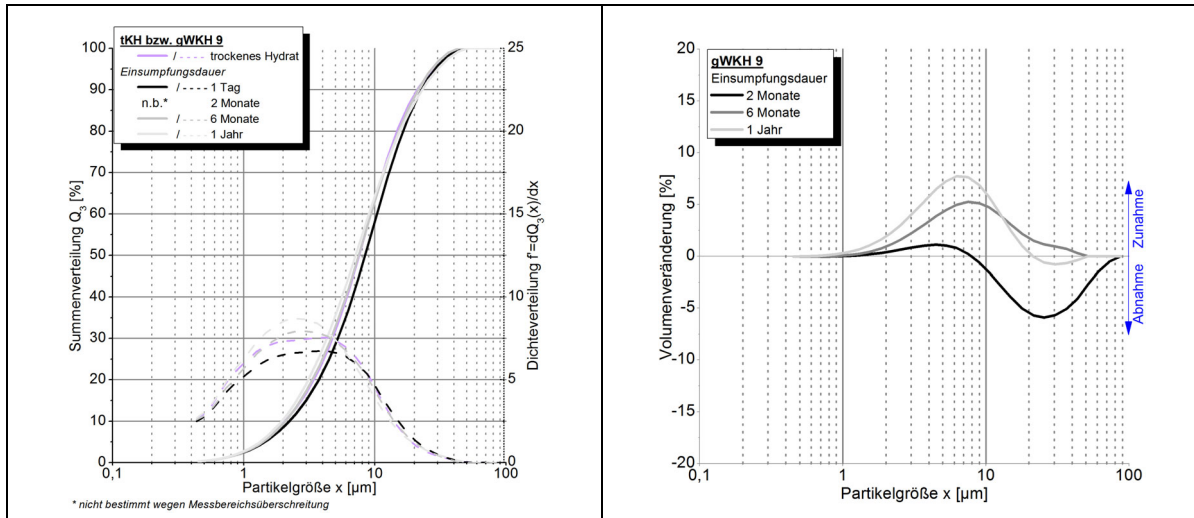


Abb. 5.32: tKH bzw. gWVKH 9, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

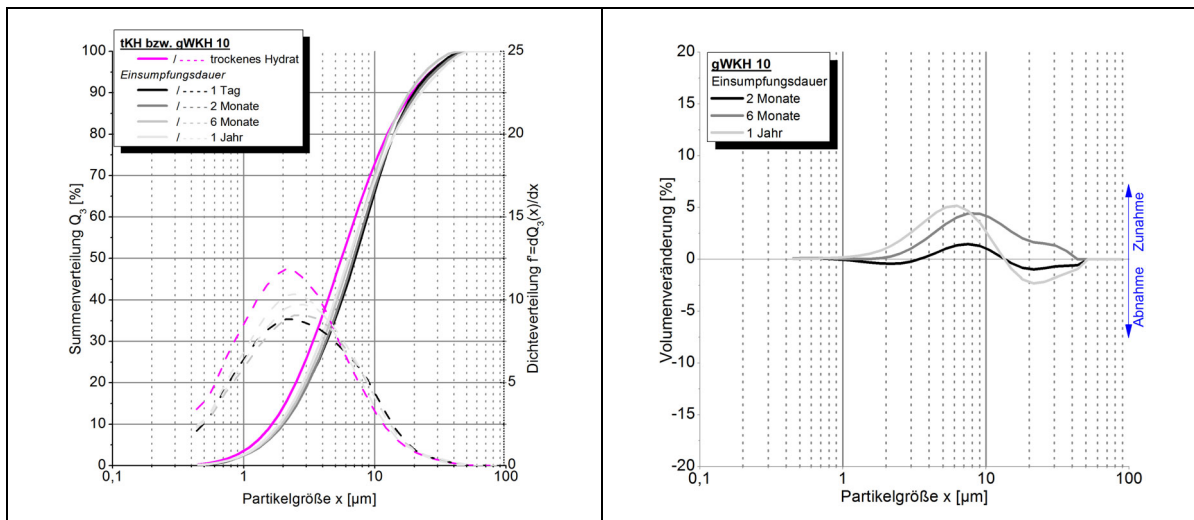


Abb. 5.33: tKH bzw. gWVKH 10, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

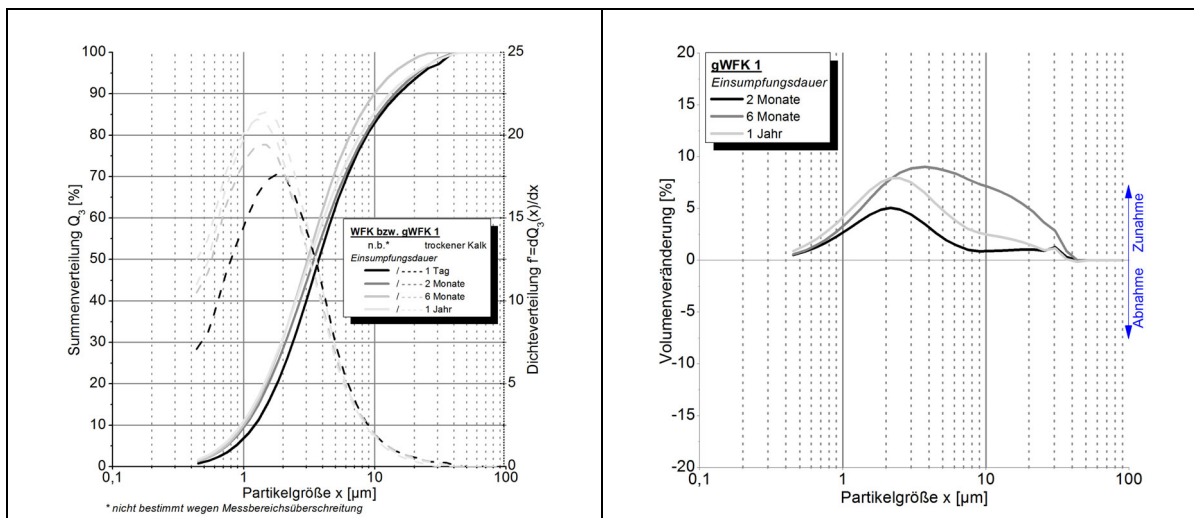


Abb. 5.34: WFK bzw. gWFK 1, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

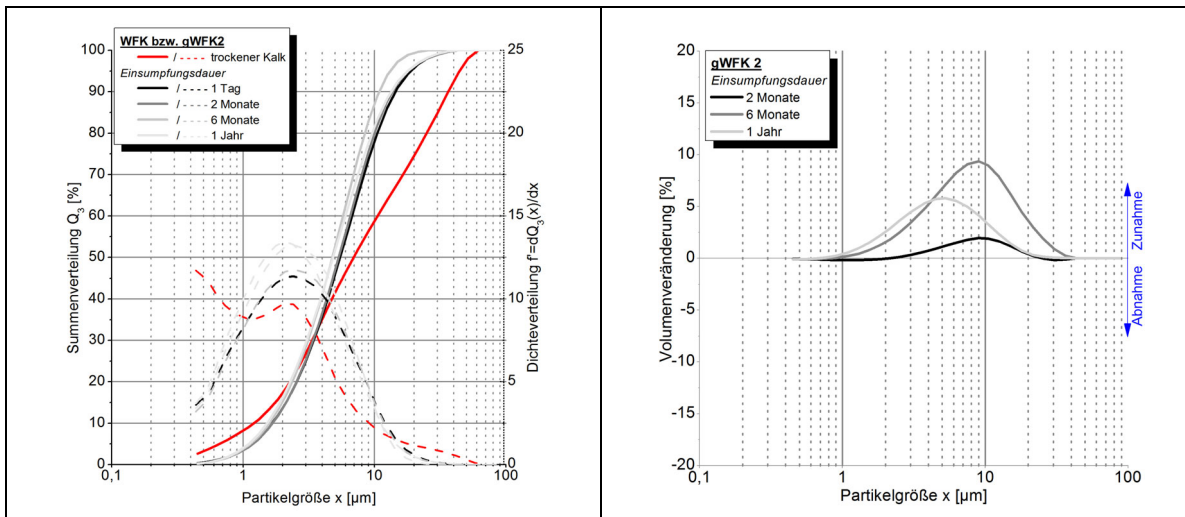


Abb. 5.35: WFK bzw. gWFK 2, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

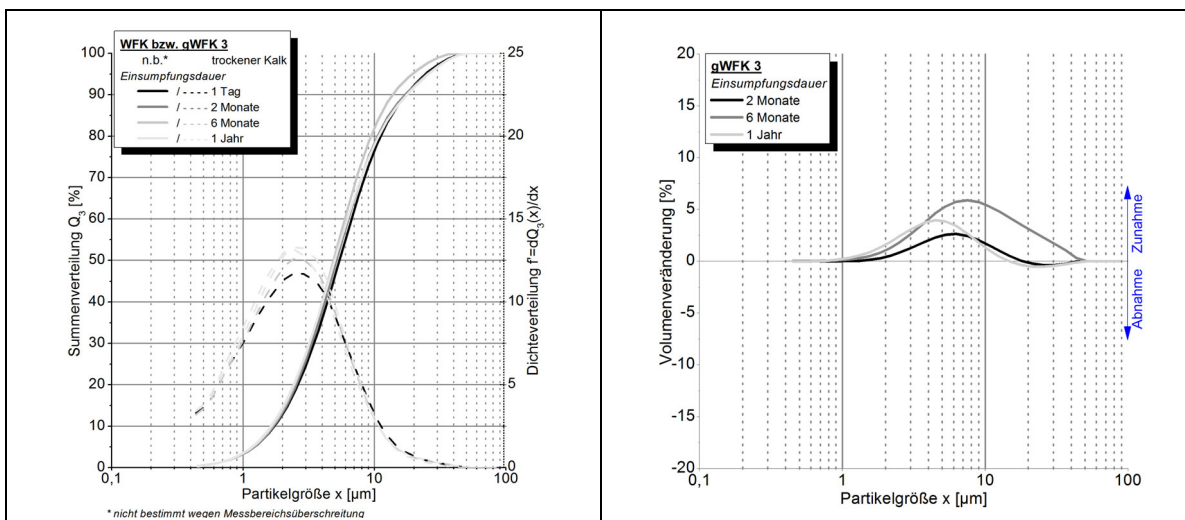


Abb. 5.36: WFK bzw. gWFK 3, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

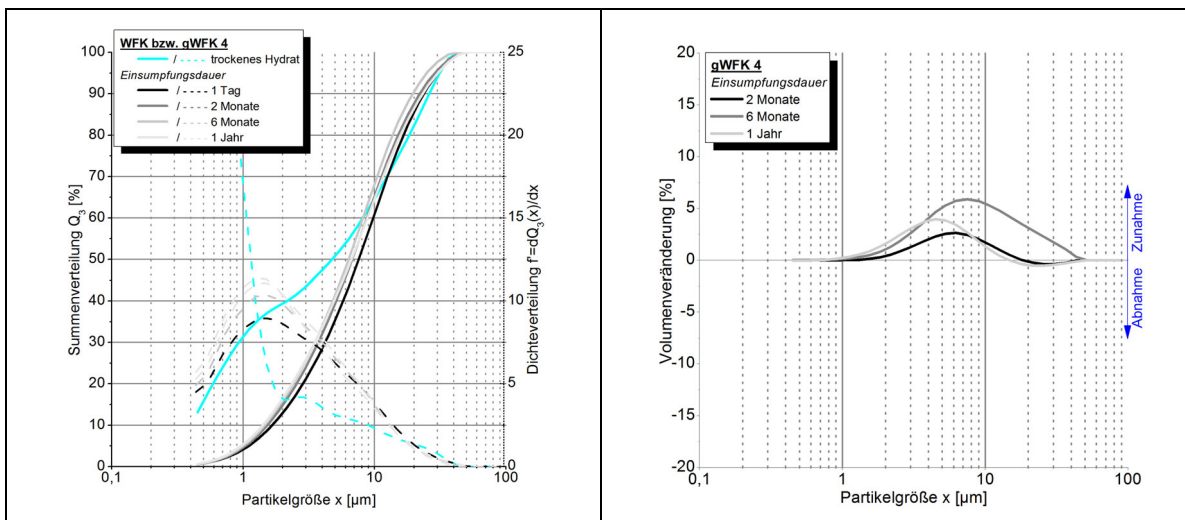


Abb. 5.37: WFK bzw. gWFK 4, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

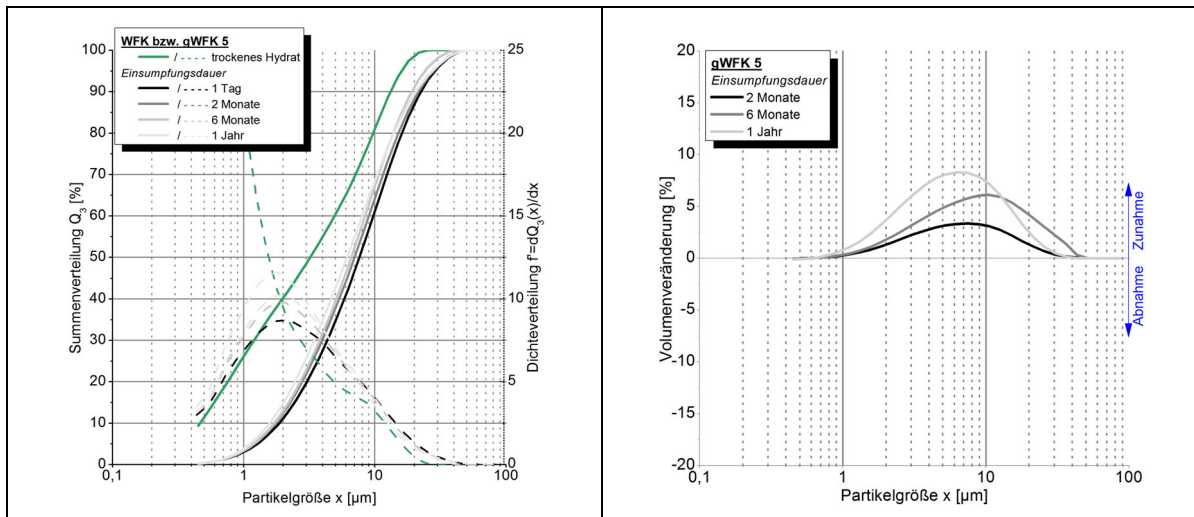


Abb. 5.38: WFK bzw. gWFK 5, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

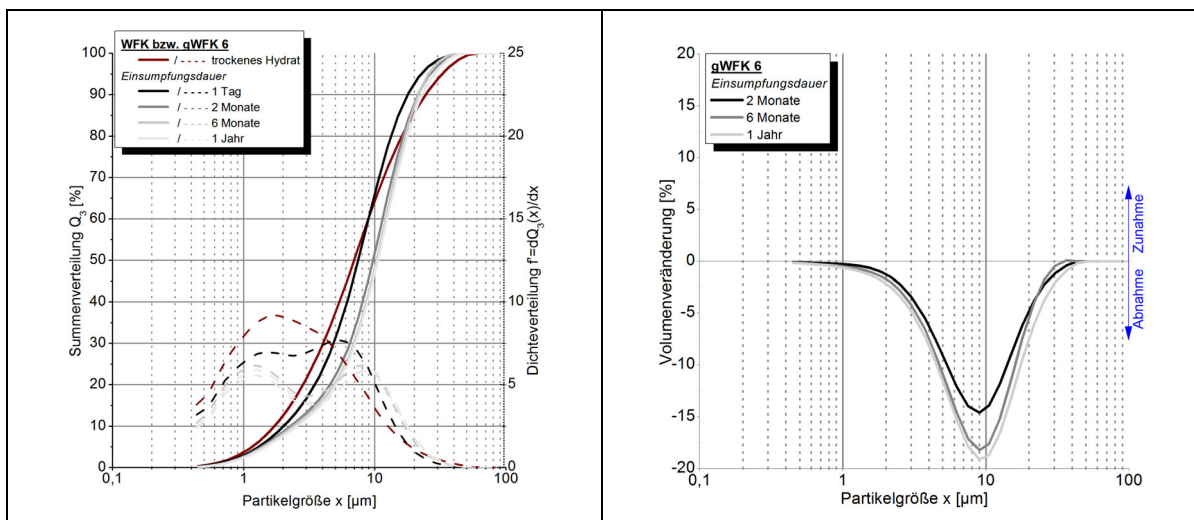


Abb. 5.39: WFK bzw. gWFK 6 links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

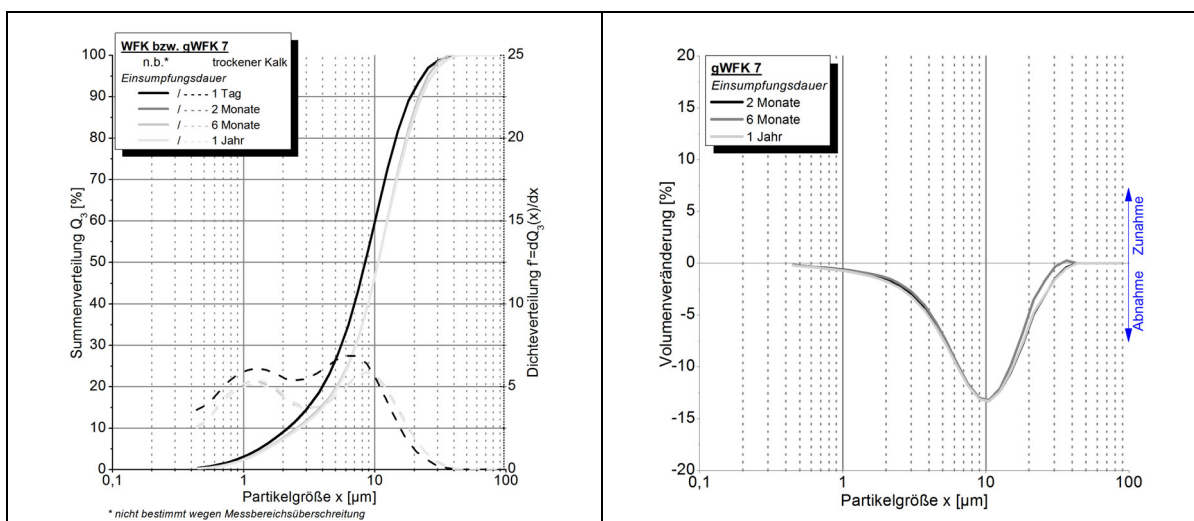


Abb. 5.40: WFK bzw. gWFK 7, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

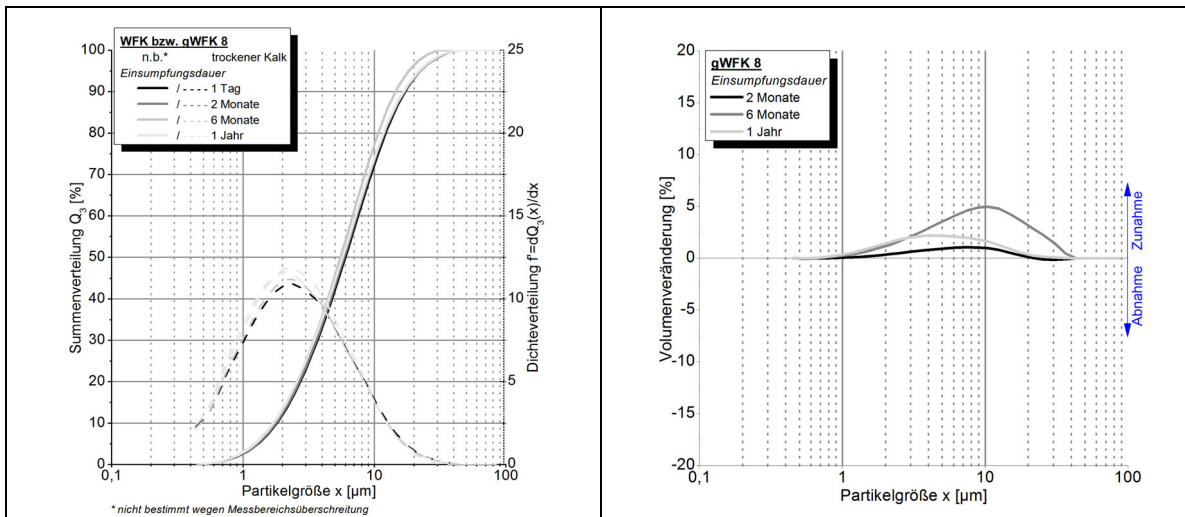


Abb. 5.41: WFK bzw. gWFK 8, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

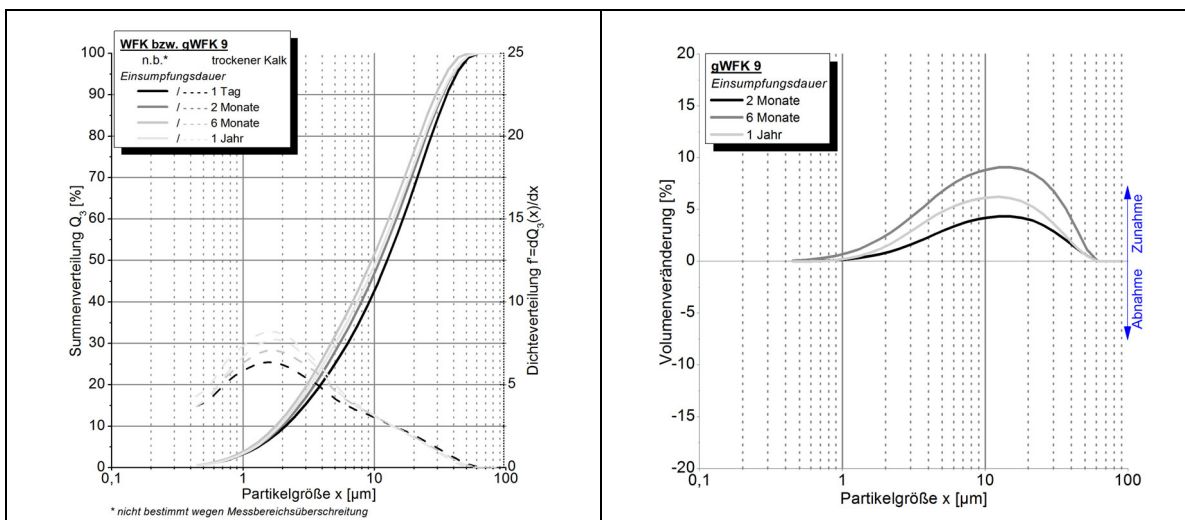


Abb. 5.42: WFK bzw. gWFK 9, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

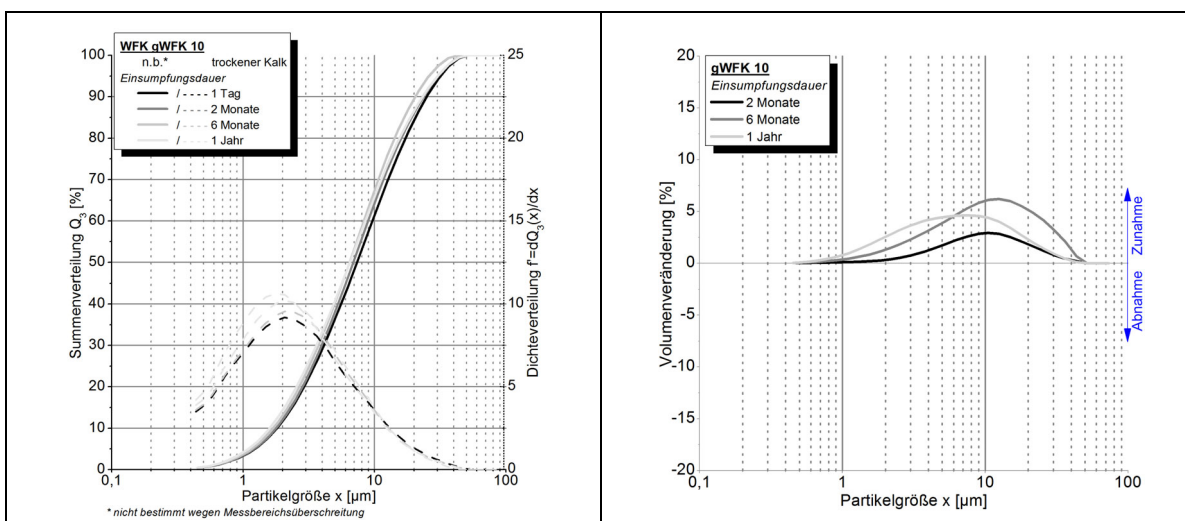


Abb. 5.43: WFK bzw. gWFK 10, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h

Die Gesamtbetrachtung der Summenverteilungen aller trockenen Kalkhydrate lässt die Unterscheidung in zwei Gruppen zu. Zum einen sind dies die Proben mit einer relativ gleichmäßigen und steilen Steigung (in Abb. 5.44 als dünne Linien gekennzeichnet) und zum anderen die Proben tKH 1, 3 und 4, welche sich durch eine vergleichbare Steigung bis etwa 60 % der Partikelsumme auszeichnen, dann jedoch in einen deutlich flacheren Verlauf übergehen und somit eine weitere Bandbreite der Partikelgrößen abdecken, als dies bei den anderen Proben der Fall ist. Hierbei handelt es sich um die drei Proben, die nach 28 Tagen Lagerung die höchsten Emley-Werte aufweisen.

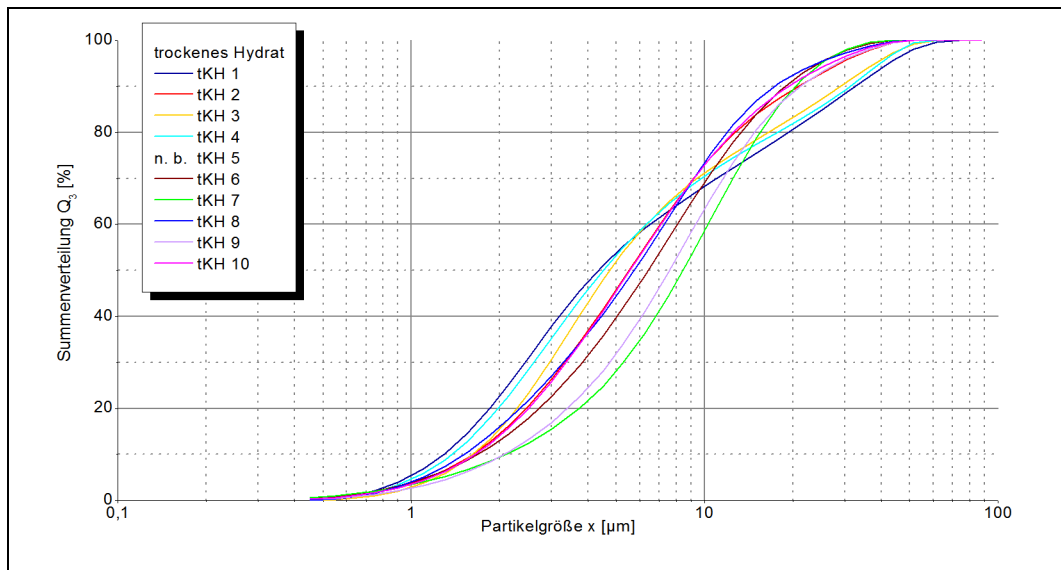


Abb. 5.44: Summenverteilungen der trockenen Kalkhydrate

Zur Beschreibung der Partikelsummenverteilung wurde der Parameter  $U_{90}$  herangezogen:

$$U_{90} = \frac{d_{90}}{d_{10}} \quad (4)$$

mit  $d_{90}$  maximale Partikelgröße für 90 % des Massenanteils der Grundmasse  
 $d_{10}$  maximale Partikelgröße für 10 % des Massenanteils der Grundmasse.

Die Abb. 5.45 stellt für die eingesumpften gWFK bzw. gWKH Emley und  $U_{90}$  des jeweiligen Lagerungszeitpunktes gegenüber. Dieser Vergleich ergibt jedoch keine Zusammenhänge.

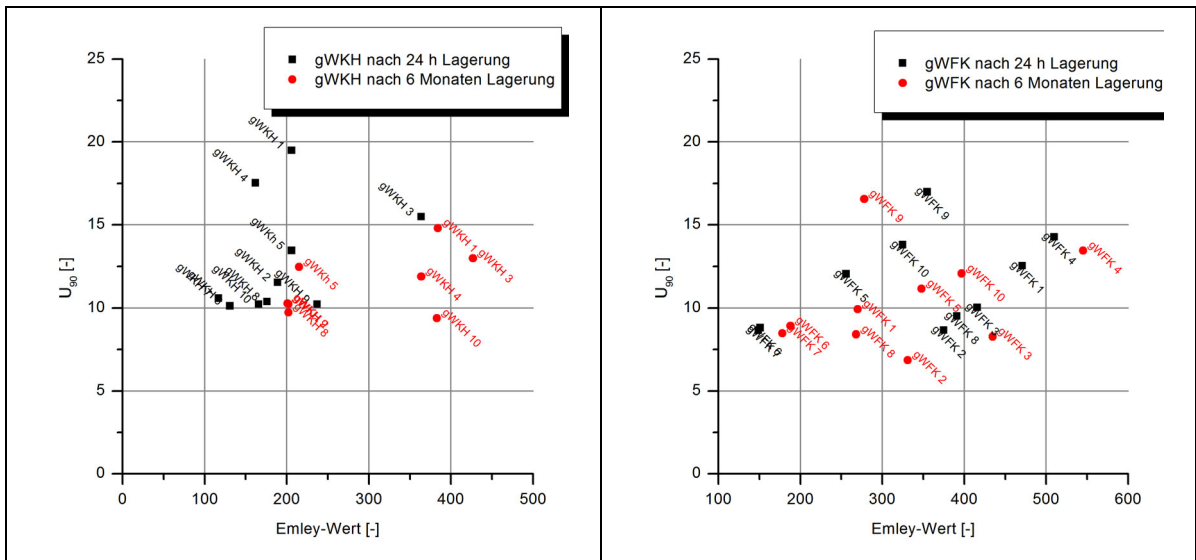


Abb. 5.45: Gegenüberstellung von  $U_{90}$  und Emley nach definierter Lagerungsdauer

Eine Gegenüberstellung der Emley-Werte für verschiedene Lagerungszeiten mit den  $U_{90}$ -Werten des trockenen Hydrates weist eine Gruppenbildung für die Kalke mit guter Verarbeitbarkeit (tKH1, 3 und 4) für beide Lagerungsformen (w/b 1,5 und 0,9) nach 28 Tagen auf.  $U_{90}$ -Wert dieser trockenen Hydrate liegt bei mindestens 17,4 gegenüber einem Mindestemley-Wert von 307 (w/b = 1,5) bzw. 321 (w/b = 0,9). Bei kürzeren Lagerungszeiten tritt dieser Zusammenhang noch nicht auf und verliert sich auch wieder bei längerer Lagerungsdauer.

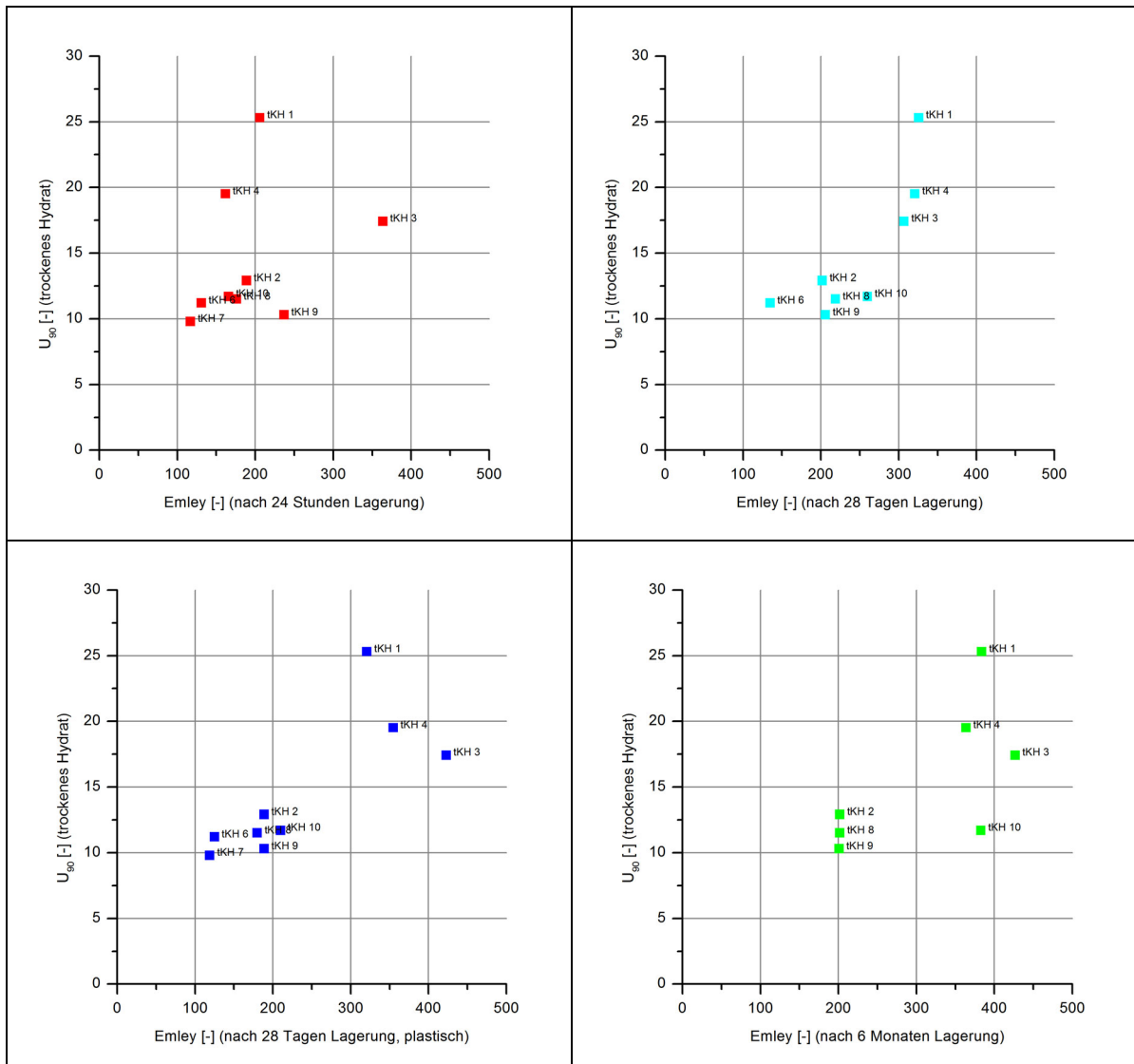


Abb. 5.46: Gegenüberstellung von  $U_{90}$  des trockenen Hydrates und Emley nach definierter Lagerungsdauer

Einige Hydrate wurden im Sieb aufbereitet, um ein möglichst schmales Partikelband zu erhalten und so den Einfluss einer möglichst vereinzelter Partikelgröße nachzustellen. Abb. 5.47 zeigt, dass die Siebenaufbereitung für die Proben WKH B und C erfolgreich waren und deutlich steiler verlaufen, während dagegen die Partikelsummenverteilung der Probe WKH A nahezu den tKH-Proben entspricht.

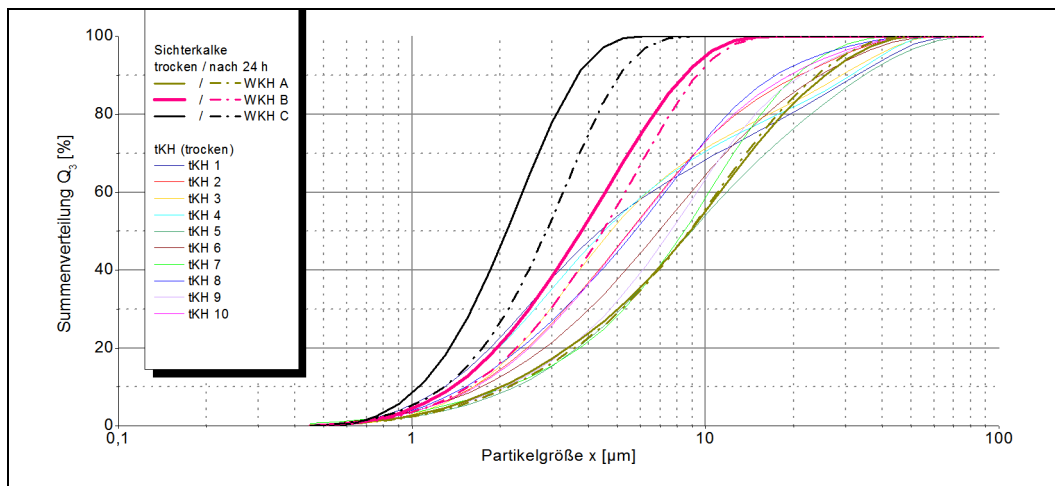


Abb. 5.47: Partikelsummenverteilung der Sichterkalke im Vergleich zu den trockenen Hydraten des Untersuchungsprogramms

Wie anhand der Partikelgrößenmessungen und REM-Aufnahmen erkennbar ist, zeigen viele Proben eine Verfeinerung der Partikel mit zunehmender Einsumpfzeit. Der Prozess der Verfeinerung lässt sich auch anhand der Abb. 5.48 erkennen. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung rückt bei den Proben, die mit der Zeit ihre Plastizität steigern, nach zwei Wochen Sumpfzeit in den Bereich der feineren Partikelgrößen (Probe tKH 1). Proben, die mit der Zeit nur geringfügig zunehmende Emley-Werte aufweisen, zeigen nur geringe Änderungen der Kurvenverläufe (Probe tKH 3). Mehrfach zu beobachten sind auch deutlich steiler werdende Kurven, die weniger eine Verfeinerung, sondern eine Anhäufung von Partikeln gleicher Größe anzeigen. Für diese Proben können keine zunehmenden Plastizitätswerte verzeichnet werden (Probe tKH 2).

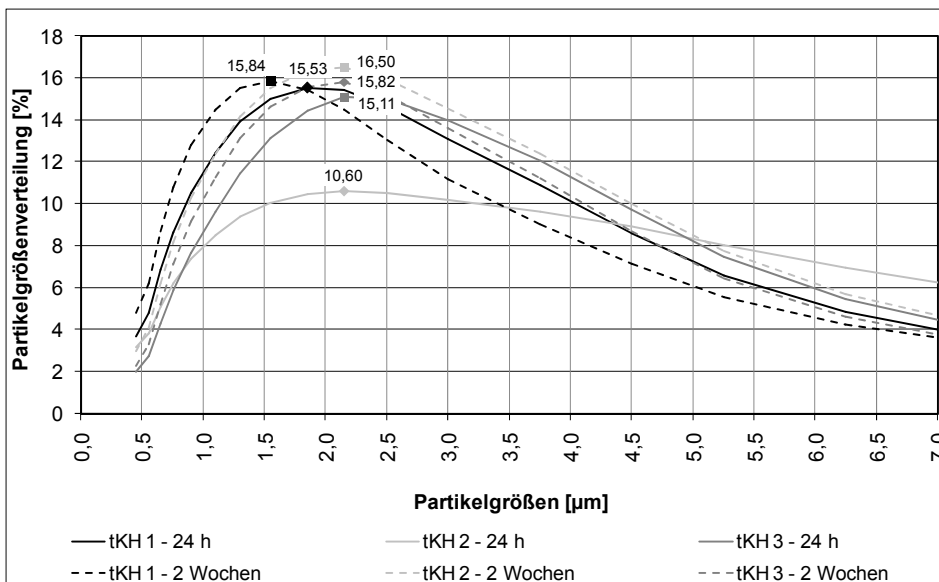


Abb. 5.48: Änderung der Partikelgrößenverteilung nach längerer Einsumpfzeit

Da die Kurven dreier Proben, die unterschiedliche Plastizitätsentwicklungen und -werte aufweisen, sich nach dem Einsumpfen sehr ähneln, lassen sich anhand der Partikelgröße und

-größenverteilung allein noch keine Rückschlüsse auf die Plastizität ziehen. Es lassen sich jedoch die Veränderungen innerhalb einer Kalkhydratprobe infolge des Einsumpfens ablesen.

### 5.2.7 Kornform

#### Korngrößen

Im Folgenden sind die Medianwerte der anzahlbasierten (alle Partikel werden in der Verteilung gleich gewichtet) Durchmesserverteilung angegeben (Tab. 5.4). Mit Durchmesser ist hier der CE-Durchmesser gemeint. Der CE-Durchmesser entspricht bei einem nicht-runden Partikel dem Durchmesser eines Kreises derselben Fläche wie die 2-dimensionale Projektion des gemessenen Partikels.

In der Tabelle ist jeweils für ein Wertepaar aus gesumpfter und trockener Probe (z.B. tkh1 vs. gwkh1) mithilfe roter und grüner Pfeile veranschaulicht, welches der größere und welches der kleinere der beiden Werte ist (z. B.  $\uparrow$  (tkh1) >  $\downarrow$  (gwkh1)).

40X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
tkh	$\uparrow$ 0,695	$\uparrow$ 1,113	$\uparrow$ 0,842	$\uparrow$ 0,755	$\uparrow$ 0,921	$\uparrow$ 1,642	$\uparrow$ 1,232	$\uparrow$ 1,246	$\uparrow$ 0,983	$\uparrow$ 1,04		trocken	Ca(OH) <sub>2</sub> -technisch gelöscht
gwkh	$\downarrow$ 0,502	$\downarrow$ 0,562	$\downarrow$ 0,619	$\downarrow$ 0,648	$\downarrow$ 0,718	$\downarrow$ 0,574	$\downarrow$ 0,625	$\downarrow$ 0,806	$\downarrow$ 0,479	$\downarrow$ 0,551		gesumpft	
wfk	$\uparrow$ 0,912	$\uparrow$ 1,25	$\uparrow$ 1,114	$\uparrow$ 0,974	$\uparrow$ 1,045	$\uparrow$ 1,163	$\uparrow$ 1,053		$\uparrow$ 0,979	$\uparrow$ 1,16		trocken	CaO
gwfk	$\downarrow$ 0,744	$\downarrow$ 0,49	$\downarrow$ 0,444	$\downarrow$ 0,644	$\downarrow$ 0,523	$\downarrow$ 0,756	$\downarrow$ 1,208	$\downarrow$ 0,522	$\downarrow$ 0,538	$\downarrow$ 0,481		gesumpft	

Tab. 5.4: Medianwerte der anzahlbasierten Durchmesserverteilung

Wie die Messungen der Universität Kassel ergeben haben, ist zu erkennen, dass mit Ausnahme von Probe 7 (hier ist der Medianwert der Durchmesser der trockenen frisch gebrannten Probe größer als bei der gesumpften Variante) die mittleren Durchmesser durch die Einlagerung in Wasser tendenziell abnehmen.

#### Kornformen (Zirkularität, C)

In der Tab. 5.5 sind die Medianwerte der Rundheit der einzelnen Proben dargestellt. Hier ist jeweils für ein Wertepaar aus gesumpfter und trockener Probe (z.B. tKH1 vs. gWKH1) mithilfe roter und grüner Pfeile veranschaulicht, welches der größere und welches der kleinere der beiden Werte ist (z.B.  $C(tKH1) < C(gWKH1)$ ).

40X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
tkh	$\downarrow$ 0,894	$\downarrow$ 0,721	$\downarrow$ 0,783	$\downarrow$ 0,804	$\downarrow$ 0,743	$\downarrow$ 0,788	$\downarrow$ 0,753	$\downarrow$ 0,679	$\downarrow$ 0,742	$\uparrow$ 0,939		trocken	Ca(OH) <sub>2</sub> -technisch gelöscht
gwkh	$\uparrow$ 0,93	$\uparrow$ 0,91	$\uparrow$ 0,879	$\uparrow$ 0,86	$\uparrow$ 0,811	$\uparrow$ 0,906	$\uparrow$ 0,893	$\uparrow$ 0,813	$\uparrow$ 0,917	$\downarrow$ 0,893		gesumpft	
wfk	$\uparrow$ 0,949	$\uparrow$ 0,946	$\uparrow$ 0,934	$\uparrow$ 0,949	$\uparrow$ 0,948	$\uparrow$ 0,935	$\uparrow$ 0,932		$\uparrow$ 0,948	$\uparrow$ 0,945		trocken	CaO
gwfk	$\downarrow$ 0,788	$\downarrow$ 0,92	$\downarrow$ 0,931	$\downarrow$ 0,863	$\downarrow$ 0,918	$\downarrow$ 0,769	$\downarrow$ 0,684	$\downarrow$ 0,918	$\downarrow$ 0,876	$\downarrow$ 0,912		gesumpft	

Tab. 5.5: Medianwerte der Rundheit

Im Fall der Proben WFK1 bis WFK10 nimmt durch die Einlagerung in Wasser die Rundheit ab. Diese Beobachtung wird durch die REM-Aufnahmen gestützt, wobei deutlich zu erkennen ist, dass die gesumpften Proben allgemein eine eher sechseckige, plättchenförmige Struktur zeigen. Auch sind, bei den gesumpften Proben verstärkt auftretende, nadelförmige Kristalle zu erkennen.

Die technisch gelöschten Kalke tKH und gWKH zeigen die umgekehrte Tendenz. Es sind hier die gesumpften Proben, die höhere Medianwerte der Rundheit besitzen. Die einzige Ausnahme

bildet Probe 10. Auf den REM-Bildern sind im Fall der technisch gelöschten Kalke die Unterschiede der Rundheit zwischen trockenen und gesumpften Proben weniger deutlich zu erkennen.

### 5.2.8 Morphologie (REM)

Mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde die Morphologie der Weißfeinkalke und der technisch gelöschten Kalkhydrate sowohl im Anlieferungszustand als auch nach längerer Einsumpfzeit im Wasserüberschuss betrachtet. Vergleicht man die Proben der technisch gelöschten Kalkhydrate vor und nach der Einsumpfzeit, so lassen sich bei fast allen Proben eindeutige Veränderungen der Partikelgröße und der Partikelform erkennen.

Probe tKH 1 mit einer der signifikantesten Plastizitätsänderungen zeigt eine deutliche Verfeinerung der Partikel (Abb. 5.49). Bei Probe tKH 4, die ebenfalls eine erhebliche Steigerung der Plastizität mit steigender Einsumpfzeit aufweist, ist diese Änderung der Partikel anhand der REM-Aufnahmen nicht erkennbar (Abb. 5.50).

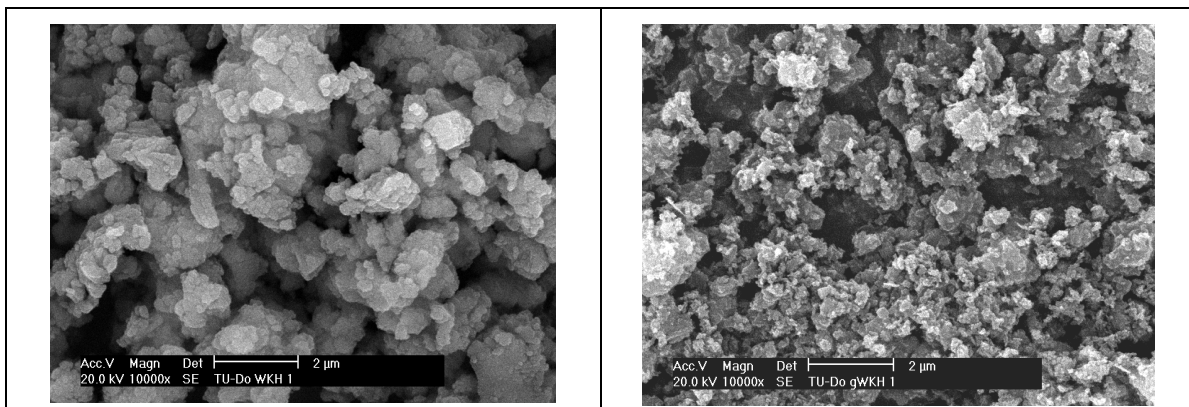


Abb. 5.49: tKH 1, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

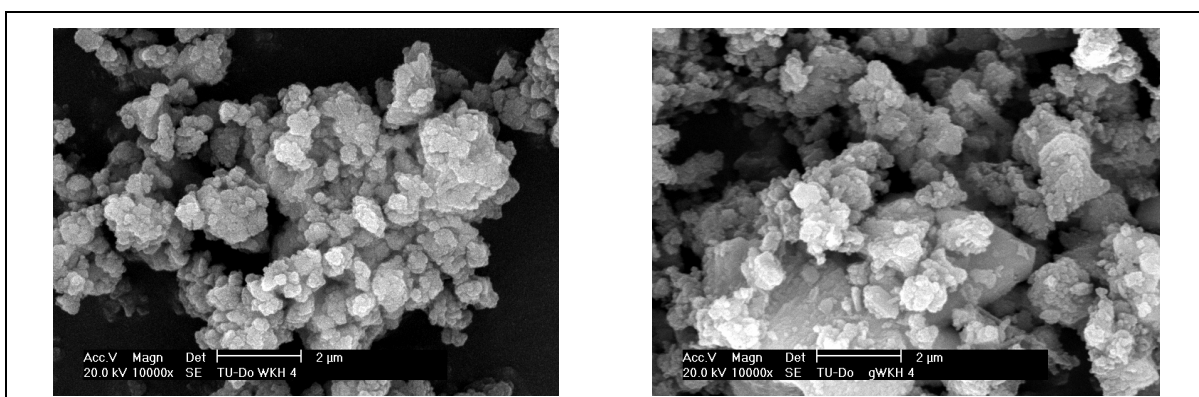


Abb. 5.50: tKH 4, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

Probe tKH 3, die nach 28 Tagen keine Plastizitätssteigerung aufweist, zeigt eine Veränderung der Kalkhydratteilchen. Hier scheint sich mit zunehmender Einsumpfzeit sowohl das Spektrum der Partikelgrößen als auch das der Partikelformen zu erweitern (Abb. 5.51).

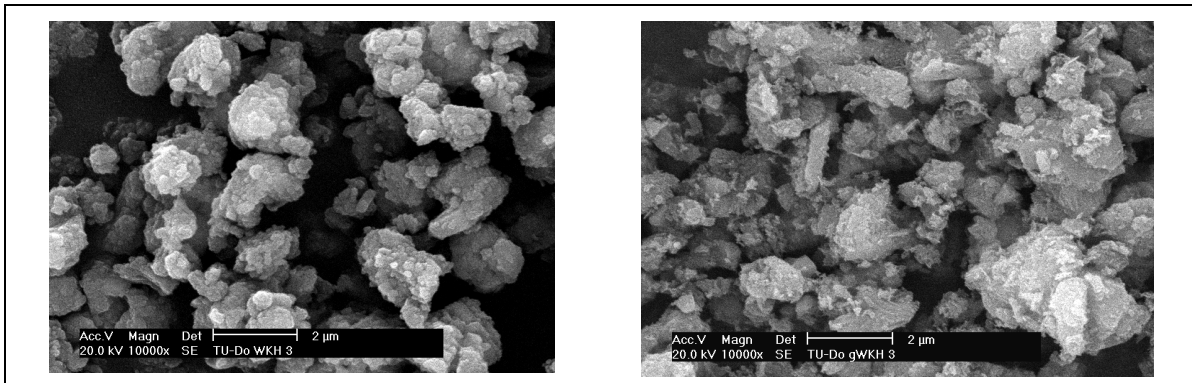


Abb. 5.51: tKH 3, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

Auch bei den Proben, die eine weniger signifikante Änderung der Plastizität zeigen, sind Änderungen infolge Einsumpfens erkennbar. In den meisten Fällen ist sowohl eine Verfeinerung der Partikel als auch eine Änderung der Form und der Struktur erkennbar (Abb. 3.1 bis Abb. 5.55).

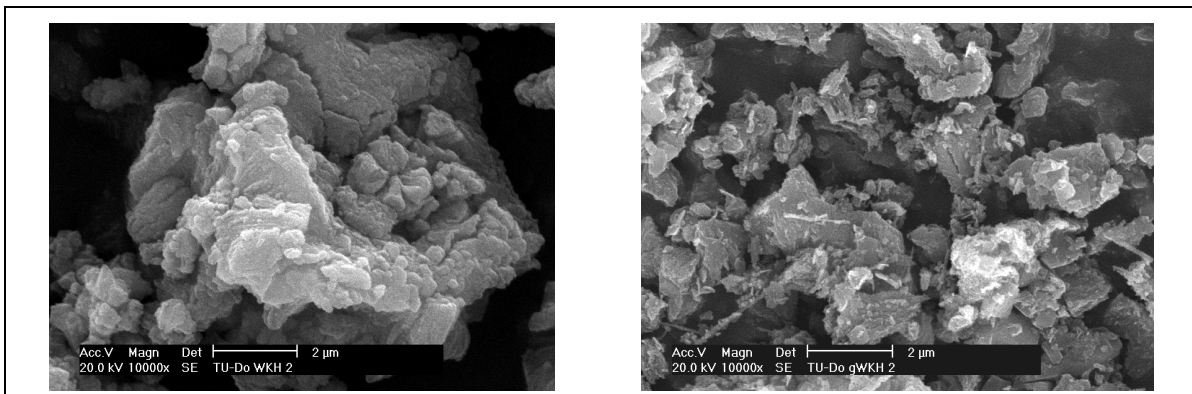


Abb. 5.52: tKH 2, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

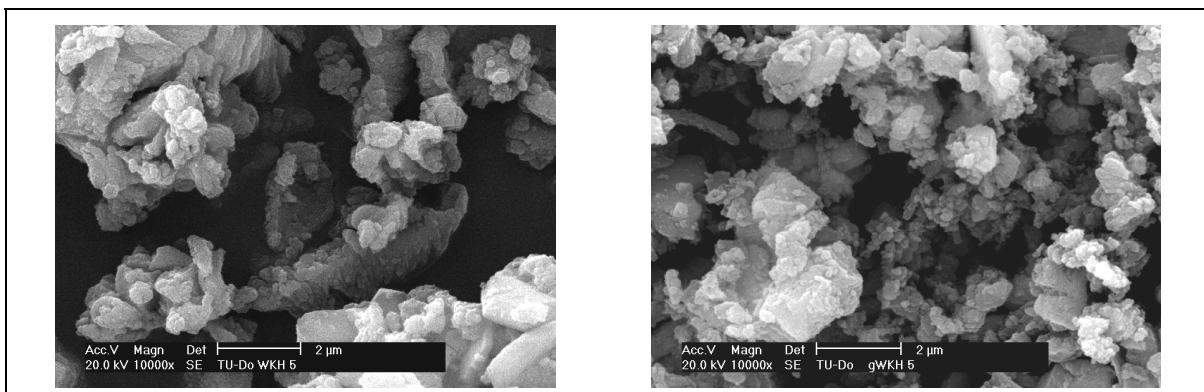


Abb. 5.53: tKH 5, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

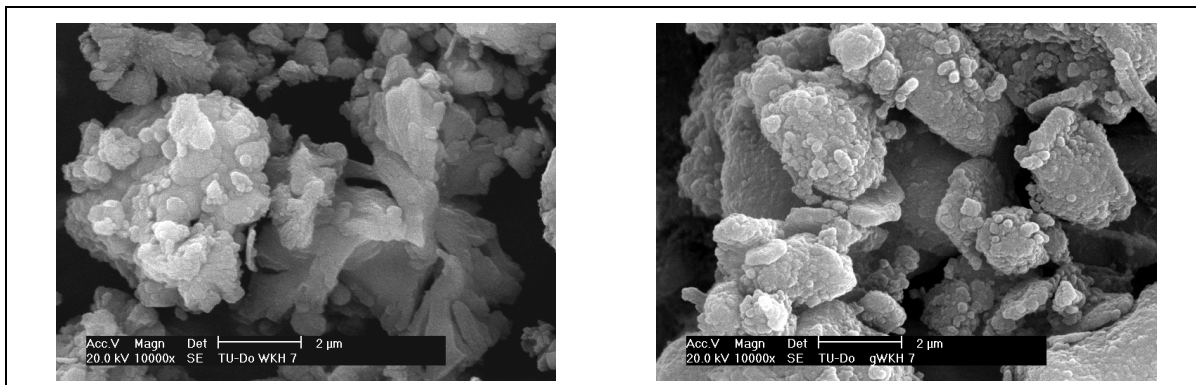


Abb. 5.54: tKH 7, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

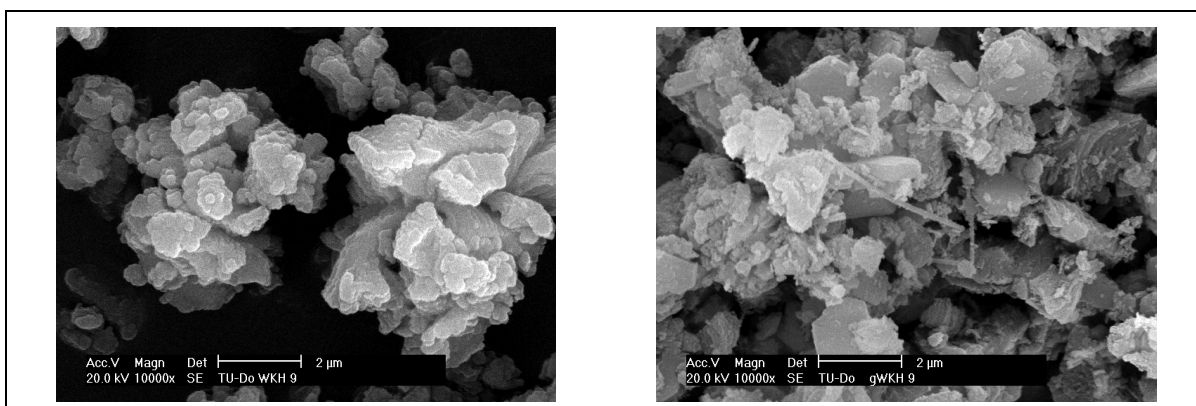


Abb. 5.55: tKH 9, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

Anhand der REM-Aufnahmen der WFKs im Anlieferungszustand lässt sich der unterschiedliche Brenngrad des Materials feststellen. Auch die gesumpften Proben unterscheiden sich stark voneinander. So weisen die Proben WFK 2 und 5 sechseckige Plättchen auf (Abb. 5.57 und Abb. 5.60). Bei den Proben WFK 7 und 9 sind auch nadelförmige Kristalle sichtbar (Abb. 5.61 und Abb. 5.62). Die Proben WFK 1, 3 und 4, die zu den Proben mit den höheren Plastizitäten gehören, scheinen homogenere und kleine Partikel entwickelt zu haben (Abb. 5.56, Abb. 5.58 und Abb. 5.59). Wie auch die röntgenographischen Untersuchungen gezeigt haben, enthält Probe WFK 1 deutlich weniger Nebenbestandteile, als es bei anderen Proben der Fall ist. Dies spiegelt sich auch in der Ausbildung der Partikel wider.

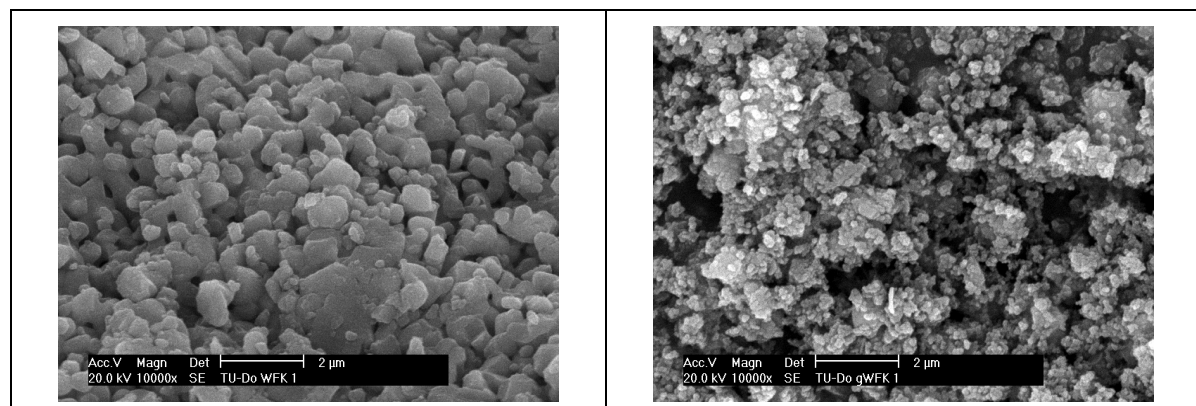


Abb. 5.56: WFK 1, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

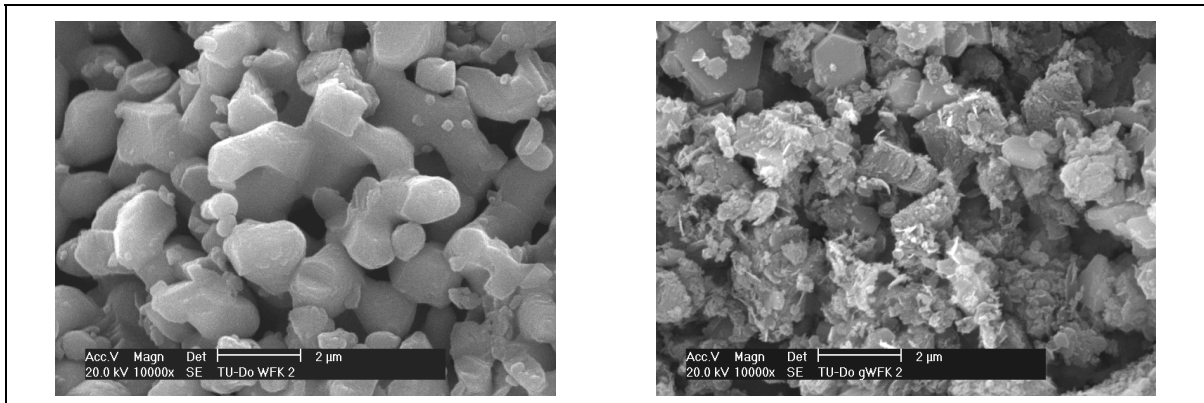


Abb. 5.57: WFK 2, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

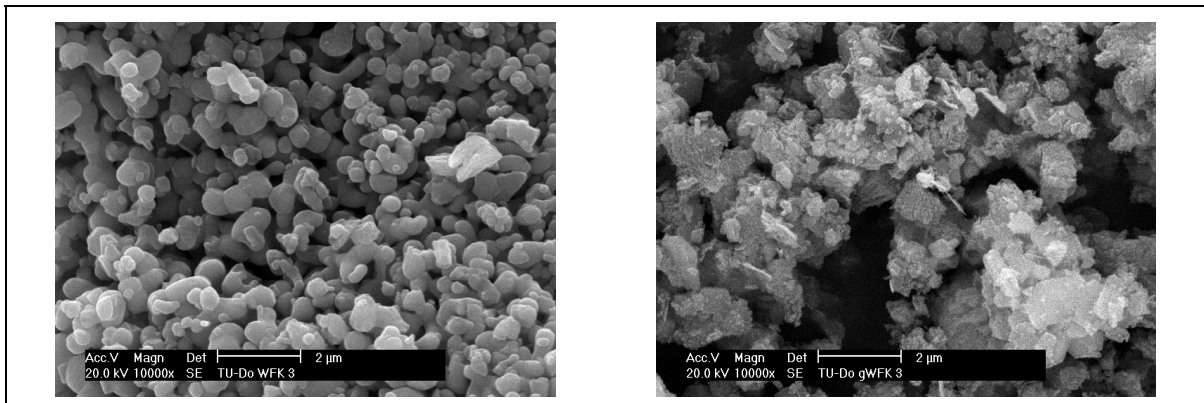


Abb. 5.58: WFK 3, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

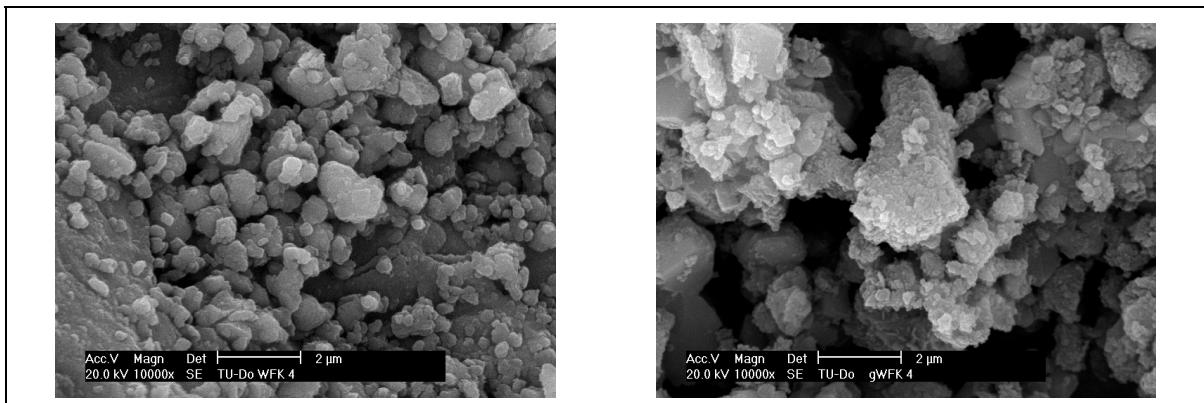


Abb. 5.59: WFK 4, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

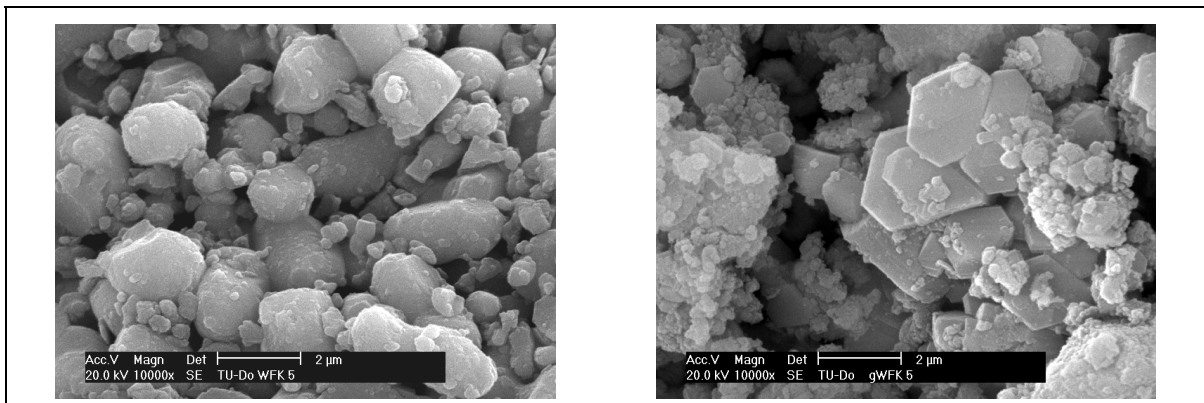


Abb. 5.60: WFK 5, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

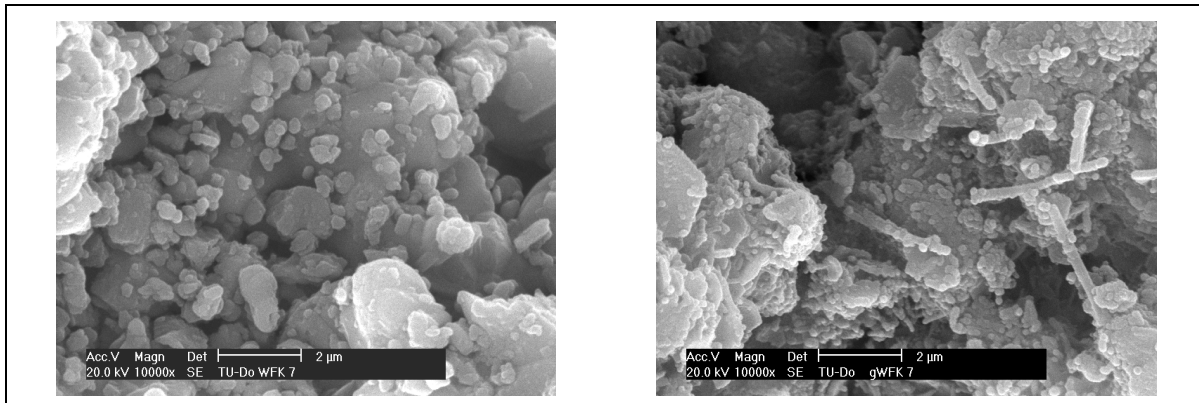


Abb. 5.61: WFK 7, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

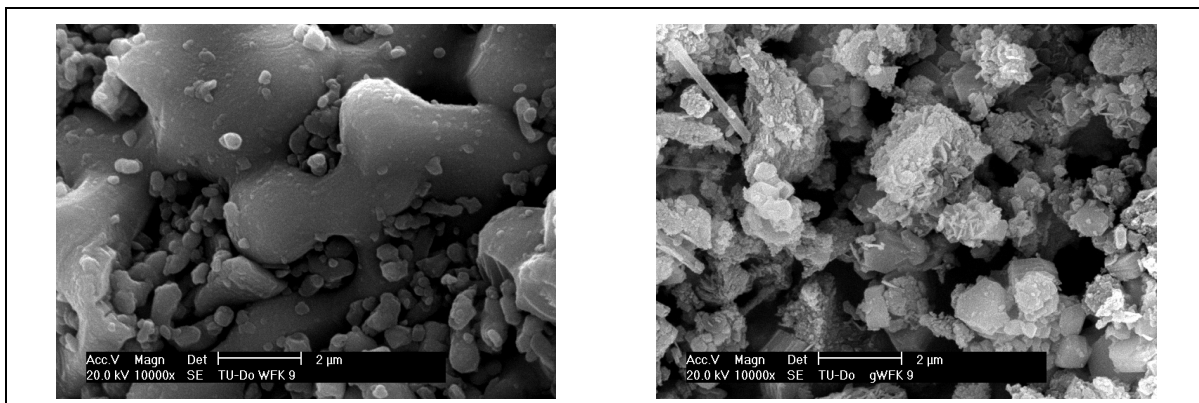


Abb. 5.62: WFK 9, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen

Eine Verifizierung der Ergebnisse im Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) ergab, dass die Probenpräparation keine Auswirkung auf das Ergebnis hat. Wie im Vergleich der Abb. 5.63 und Abb. 5.64 zu erkennen ist, sind keine nennenswerten Unterschiede erkennbar. Die Aufnahmen im ESEM stammen von Dr. Bernd Möser vom Finger Institut für Baustoffkunde (Weimar) und wurden für dieses Projekt freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

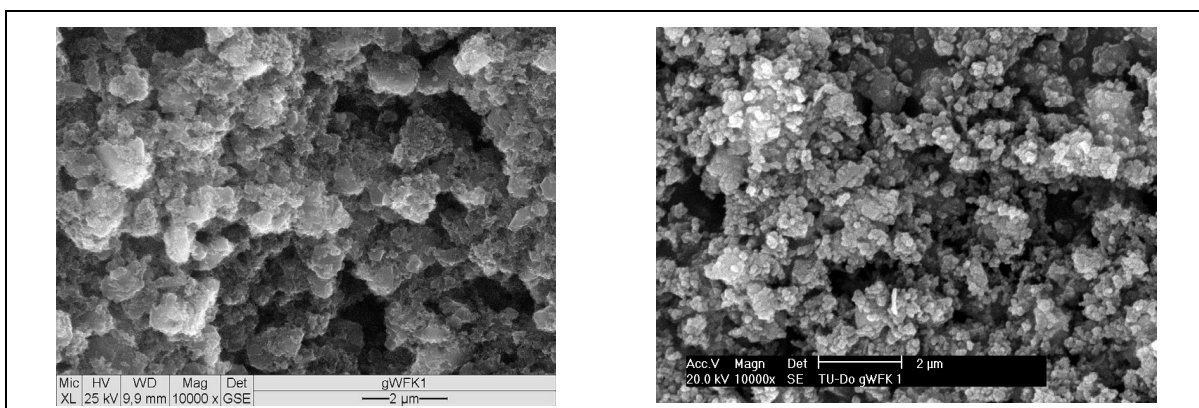


Abb. 5.63: WFK 1 nach Sumpfen, links im ESEM, rechts im REM

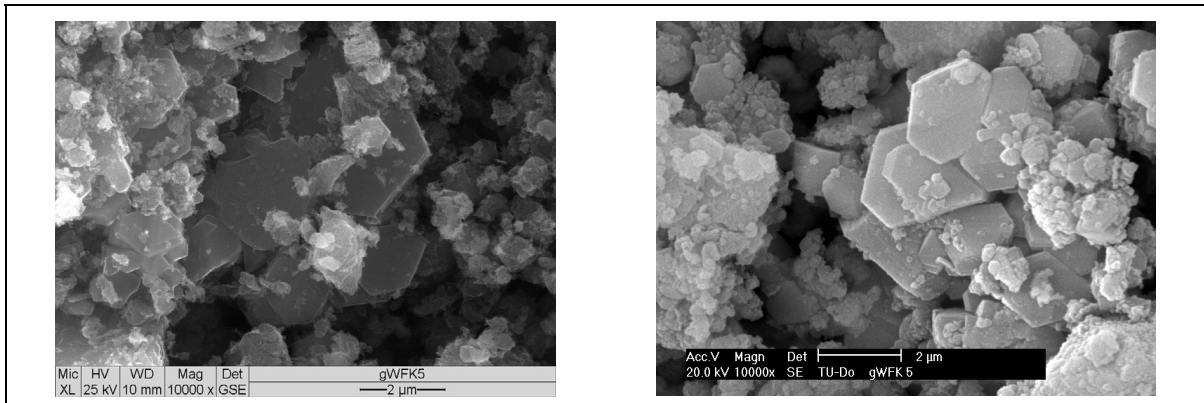


Abb. 5.64: WFK 5 nach Sumpfen, links im ESEM, rechts im REM

### 5.2.9 Morphologie (Lichtmikroskopie)

Bei den lichtmikroskopischen Aufnahmen ist erkennbar, dass Probe tKH 1 in Wasser gelöst bereits am Tag 0 ausgeprägt wachsende Kristalle aufweist, wohingegen diese Kristallbildung bei anderen Proben erst nach 7 Tagen sichtbar ist (vgl. Abb. 5.65 bis Abb. 5.68).

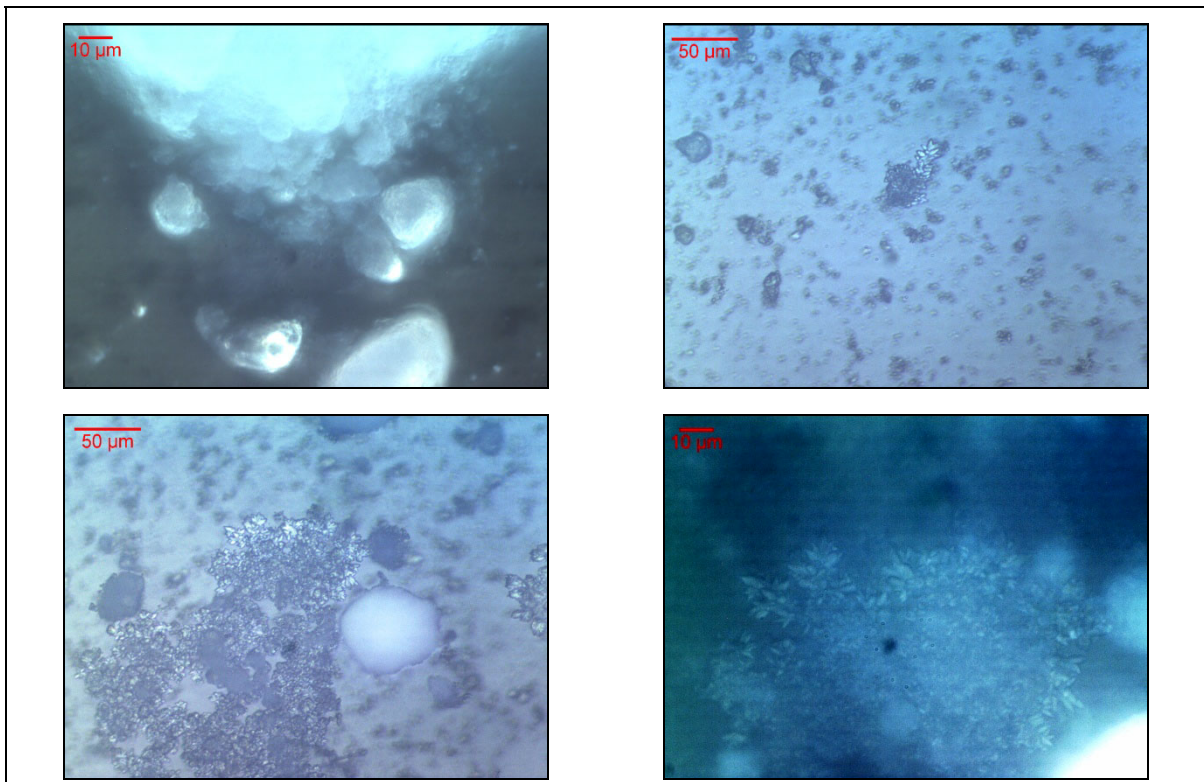


Abb. 5.65: tKH 1 in Wasser am Tag 0

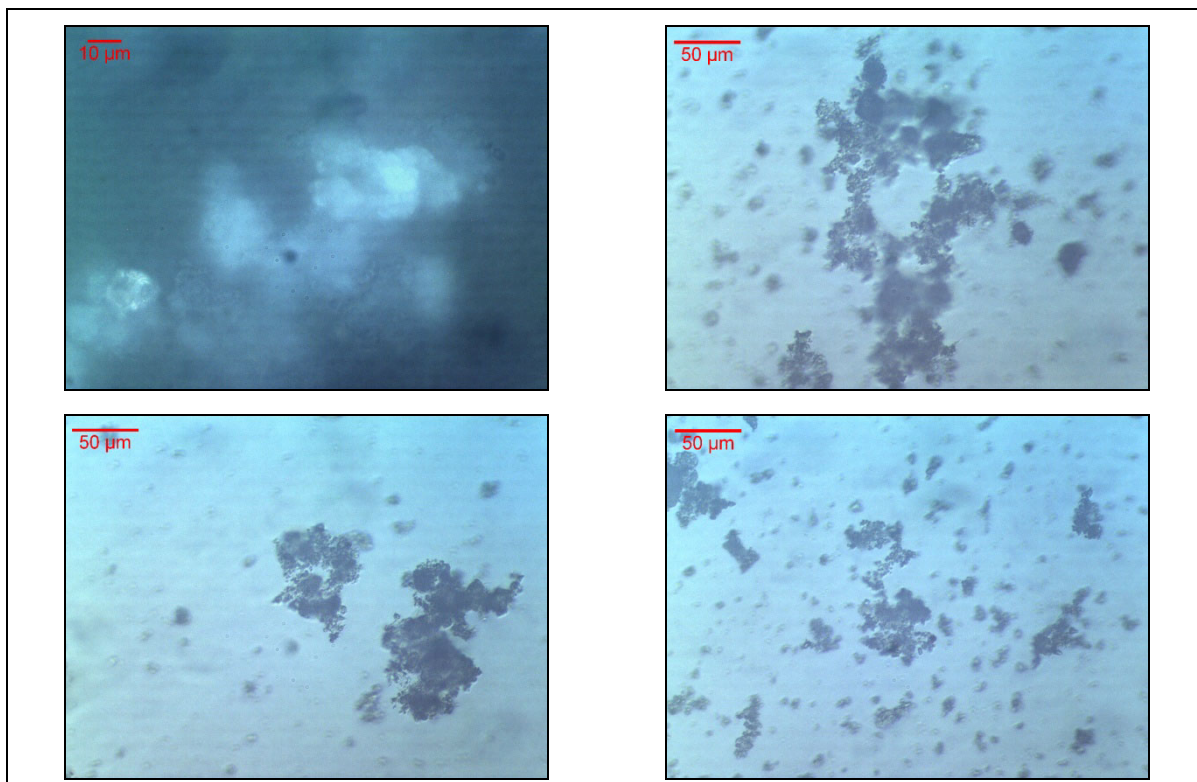


Abb. 5.66: tKK 10 in Wasser am Tag 0

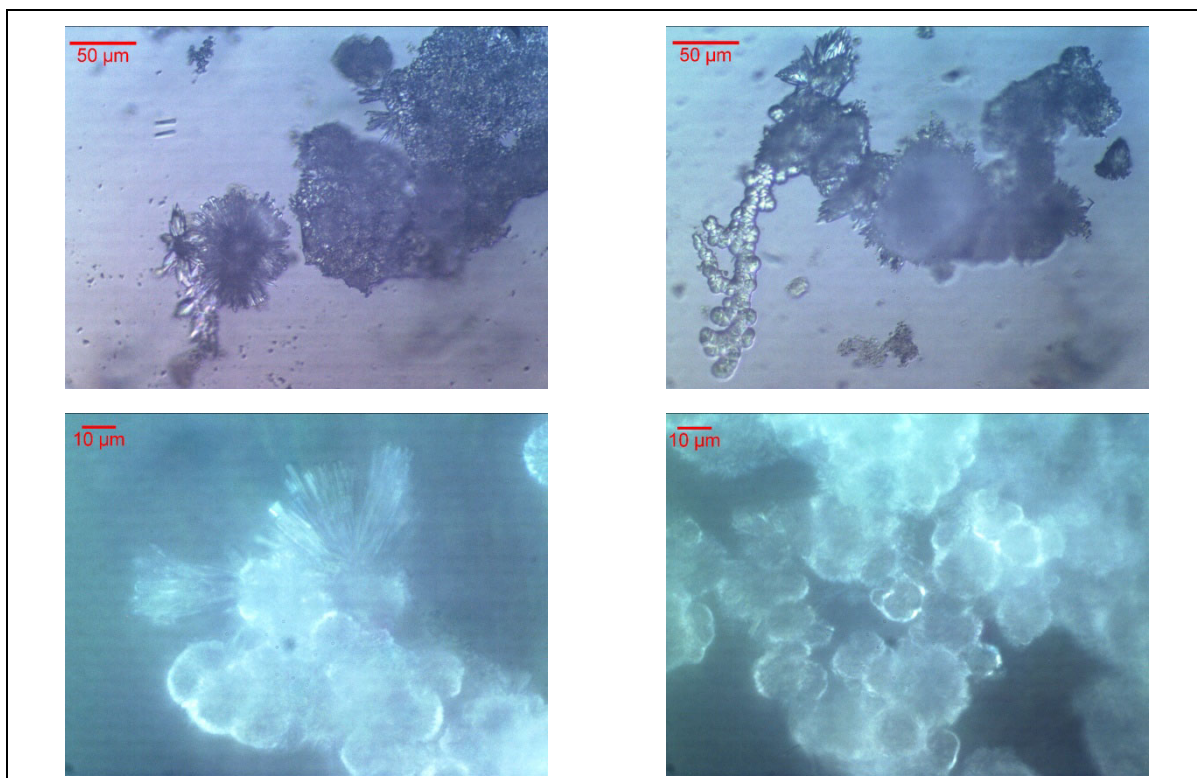


Abb. 5.67: tKK 1 in Wasser am Tag 7

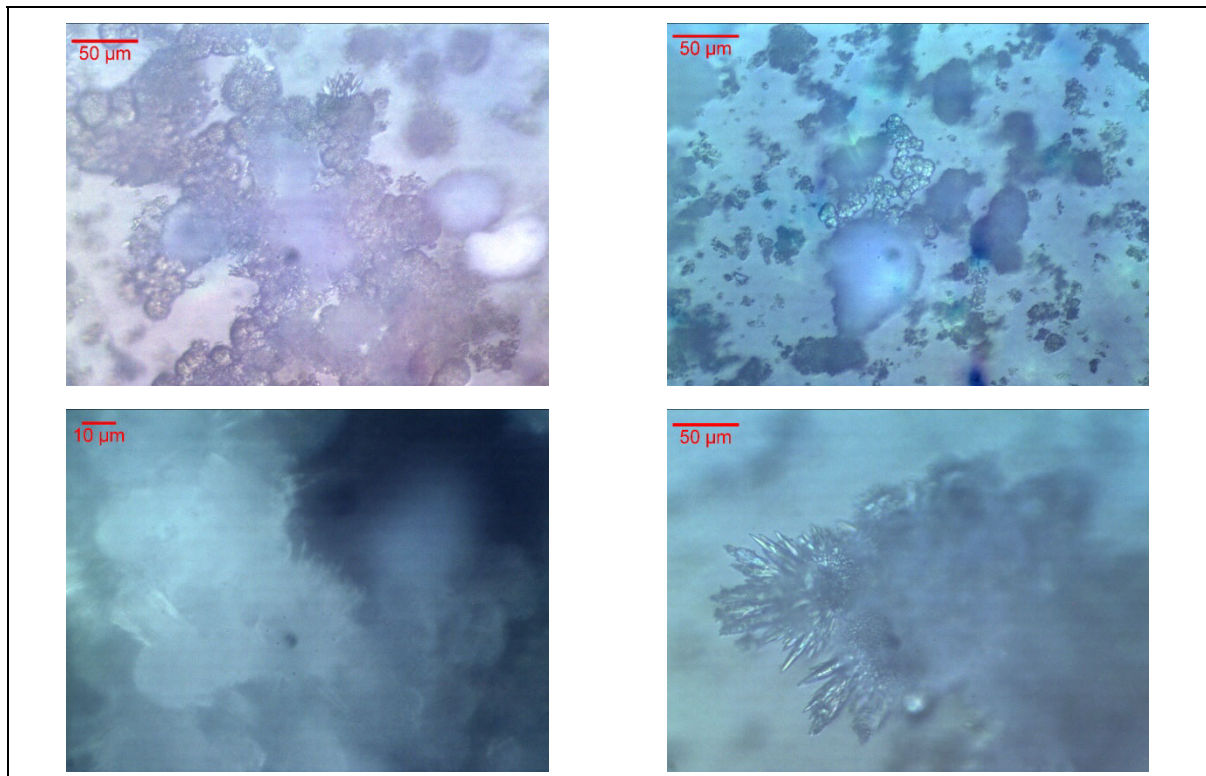


Abb. 5.68: tKK 10 in Wasser am Tag 7

Bei Betrachtung der Weißfeinkalke zeigte sich, wie in röntgenographischen und chemischen Untersuchungen belegt, dass Probe WFK 1 deutlich weniger Nebenbestandteile enthält, als es bei anderen Proben der Fall ist. Dies spiegelt sich auch in der Ausbildung unterschiedlicher Partikel wieder. Anhand der lichtmikroskopischen Aufnahmen ist erkennbar, dass hier hauptsächlich Partikel vorliegen, die eine homogene Farbigkeit aufweisen (Abb. 5.69).

Die Proben WFK 5 und 7, bei denen auf den REM-Bildern nach längerer Einsumpfzeit 6-eckige Plättchen oder Nadeln sichtbar waren, weisen im Ausgangsmaterial Partikel inhomogener Farbigkeit auf (Abb. 5.70 und Abb. 5.71).

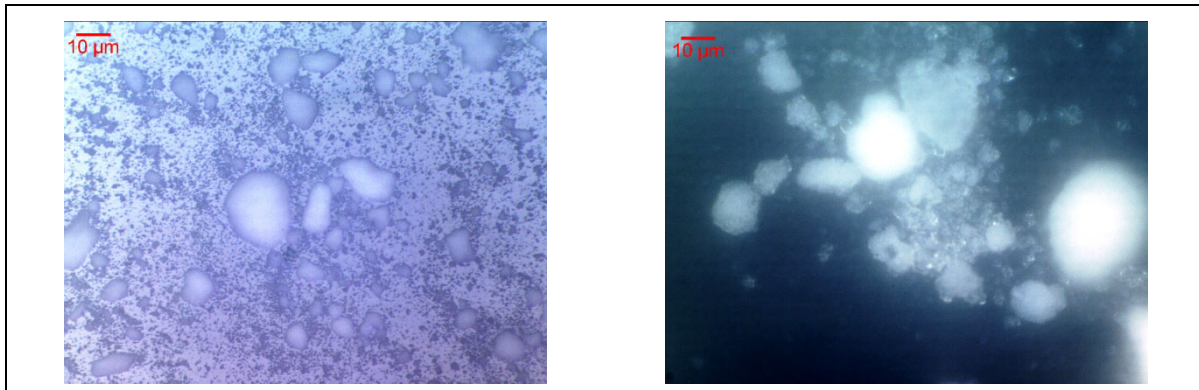


Abb. 5.69: WFK 1 in Isopropanol

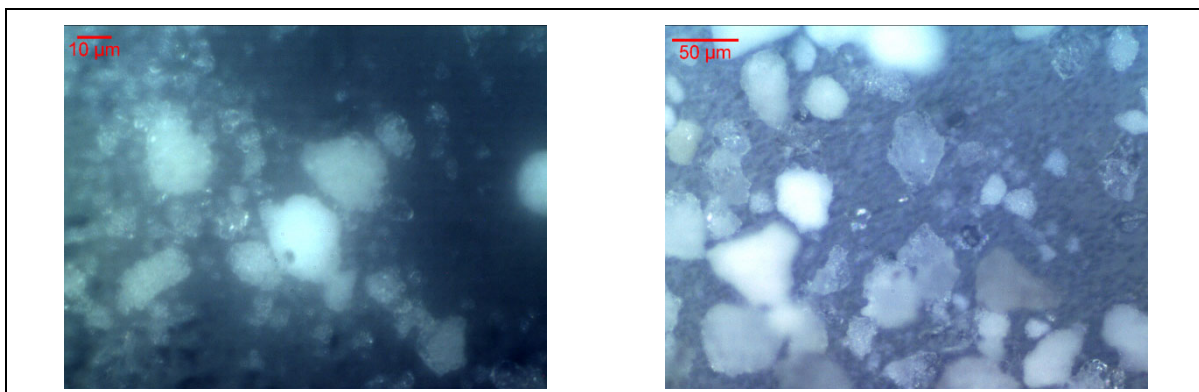


Abb. 5.70: WFK 5 in Isopropanol

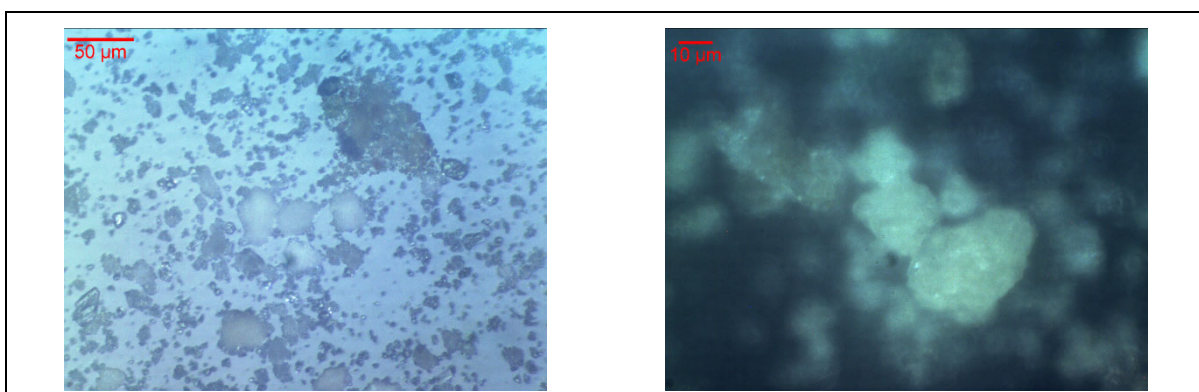


Abb. 5.71: WFK 7 in Isopropanol

### 5.2.10 Porenradienverteilung

Die Untersuchung der Porenradienverteilungen der technisch gelöschten Kalkhydrate ergab, dass die Proben tKH 1 und 4 die kleinsten Porenradien aufweisen (Abb. 5.72). Bei Probe tKH 4 ist der Anteil der Poren mit einem Radius von 0,3 µm am höchsten. Bei den Plastizitätsmessungen war für diese Proben nach längerer Einsumpfzeit mit die höchste Plastizität vorzufinden. Auch für Probe tKH 3 ist ein hoher Anteil von Poren mit einem kleinen Radius erkennbar.

Für den Bereich der Poren mit einem Radius zwischen 0,004 und 0,02 µm ist lediglich bei Probe tKH 3 ein höherer Porenanteil nachzuweisen (Abb. 5.73). Probe tKH 3 weist bereits bei der 24-Stunden-Messung eine hohe Plastizität auf.

Die Proben tKH 8, 9 und 10 weisen die größten Anteile von Poren zwischen 0,5 und 0,9  $\mu\text{m}$  auf. Die Proben tKH 5 und 6 haben ebenfalls den größten Porenanteil in diesem Bereich, jedoch ist bei ihnen der Anteil geringer. Für die Proben tKH 2 und 7 sind die größten Porenanteile mit Durchmesser 0,8 bis 1  $\mu\text{m}$  nachzuweisen, wobei der Anteil bei Probe tKH 7 höher ist.

Im Porenradienbereich größer 1,1  $\mu\text{m}$  sind überwiegend schwankende Messwerte verzeichnet (Abb. 5.72 und Abb. 5.73). Dies ist auf Ausfüllung von Hohlräumen zwischen den Partikeln und aufbrechende Poren infolge zunehmenden Quecksilberdruckes zurückzuführen.

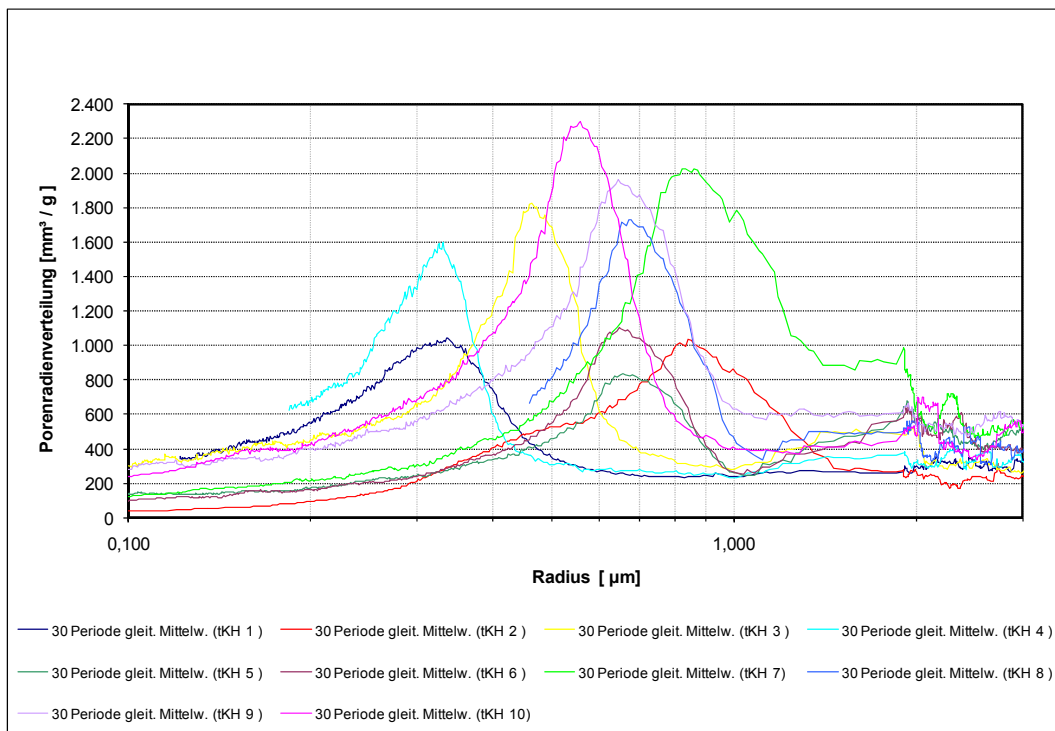


Abb. 5.72: Porenradienverteilung der technisch gelöschten Kalkhydrate

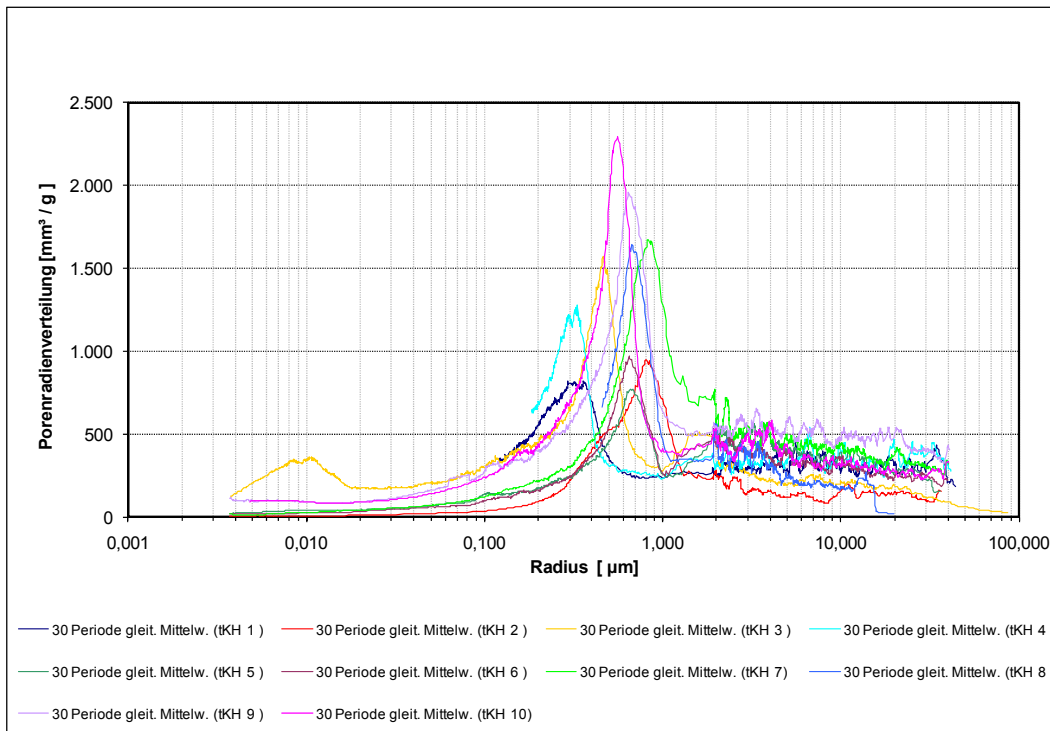


Abb. 5.73: Porenradienverteilung der technisch gelöschten Kalkhydrate

Die Porenradienverteilung der Weißfeinkalke ist in Abb. 5.74 dargestellt. Sie unterscheidet sich insgesamt von der der technisch gelöschten Kalkhydrate. Insgesamt liegt hier eine breitere Verteilung der Porenradien vor und der Anteil einzelner Porenradien ist geringer.

Im Bereich von 0,1 bis 0,2 µm weist Probe WFK 1 den höchsten Anteil auf. Im Bereich 0,3 bis 0,7 µm haben die Proben WFK 8 und WFK 4 den größten Anteil. Eine weitere Ansammlung lässt sich bei etwa 0,9 µm für die Proben WFK 2, 5 und 10 erkennen. Die Proben WFK 1, 3, 6, 7 und 9 zeichnen sich durch einen hohen Porenanteil zwischen 1 und 2 µm aus.

Einen direkten Zusammenhang zu den Plastizitätsmessungen kann man nicht erkennen. Untersucht wurde hier das trockene Weißkalkhydrat. Für Plastizitätsmessungen ist ein Anteil mit Wasser erforderlich, wodurch sich bei der Reaktion zu Kalkhydrat die Struktur und somit auch die Poren ändern.

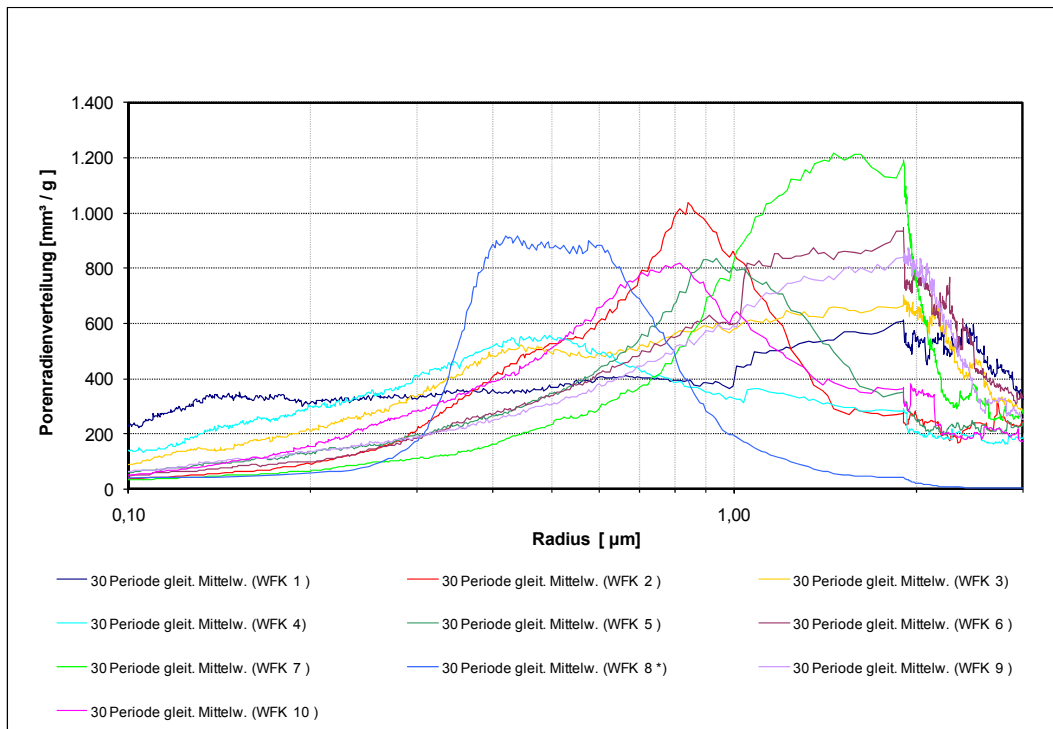


Abb. 5.74: Porenradialverteilung der Brantkalk

Es ist bekannt, dass die Plastizität von Kalkhydrat-Wasser-Suspensionen (Kalkteige) von der Menge und der Form der vorhandenen Hydratfeinstanteile beeinflusst wird. Die Plastizität resultiert auch aus der Wechselwirkung der flüssigen Phase mit den Hydratteilchen und hängt deshalb von der spezifischen Oberfläche ab.

Im Zusammenhang mit den spezifischen Oberflächen stehen auch die Porenradialverteilungen. Je größer der Anteil kleiner Poren, desto größer ist die spezifische Oberfläche. Die Porenradialverteilung des Ausgangsmaterials scheint sich insbesondere auf die Plastizitätsentwicklung der tKHS nach längerer Einsumpfung auszuwirken. So ist in Abb. 5.75 anhand der Korrelation des Maximums der Porenradialverteilung und der Emley-Werte nach unterschiedlichen Einsumpfungzeiten erkennbar, dass kleine Porenradialen im Ausgangsmaterial nach längerer Einsumpfung zu höheren Plastizitäten führen.

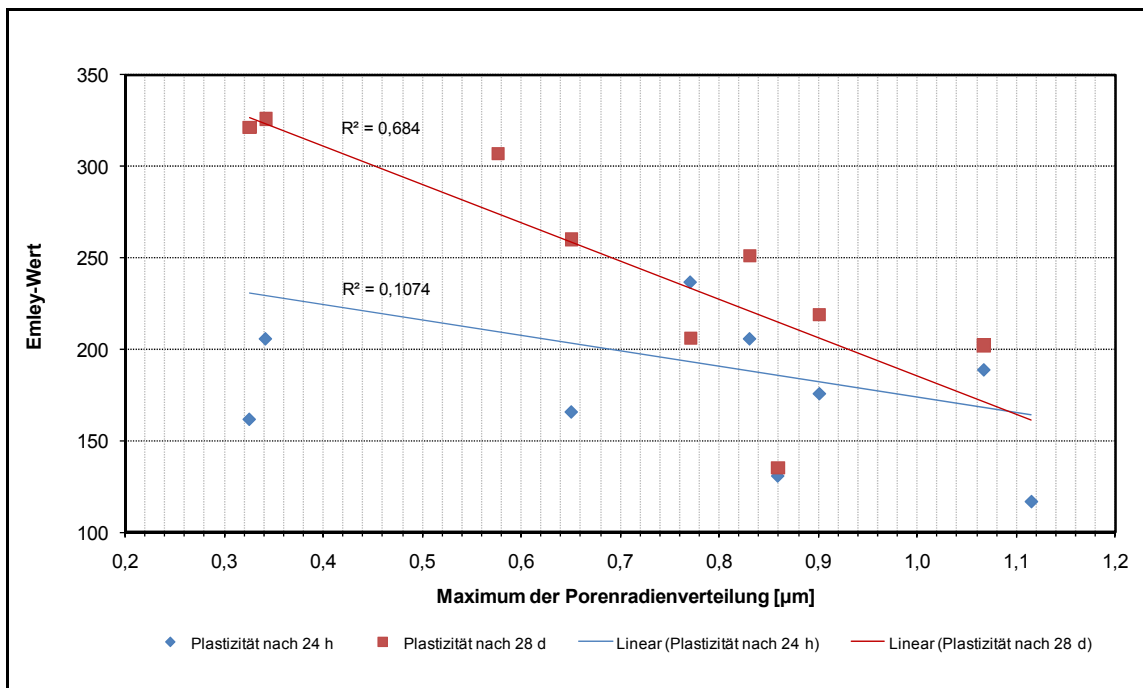


Abb. 5.75: Zusammenhang von Porenradienverteilung und Plastizität

Der Zusammenhang von Porenradienverteilung und Plastizitätssteigerung wird deutlich, wenn man nur die Proben, die nach längerer Einsumpfzeit ihre Plastizität steigern, mit den jeweiligen Porenradienverteilungen betrachtet (Abb. 5.76). Für diese Gruppe der Kalke ergibt der Korrelationskoeffizient einen Wert von 0,96, wohingegen er bei Korrelation der Werte aller Proben bei 0,68 lag.

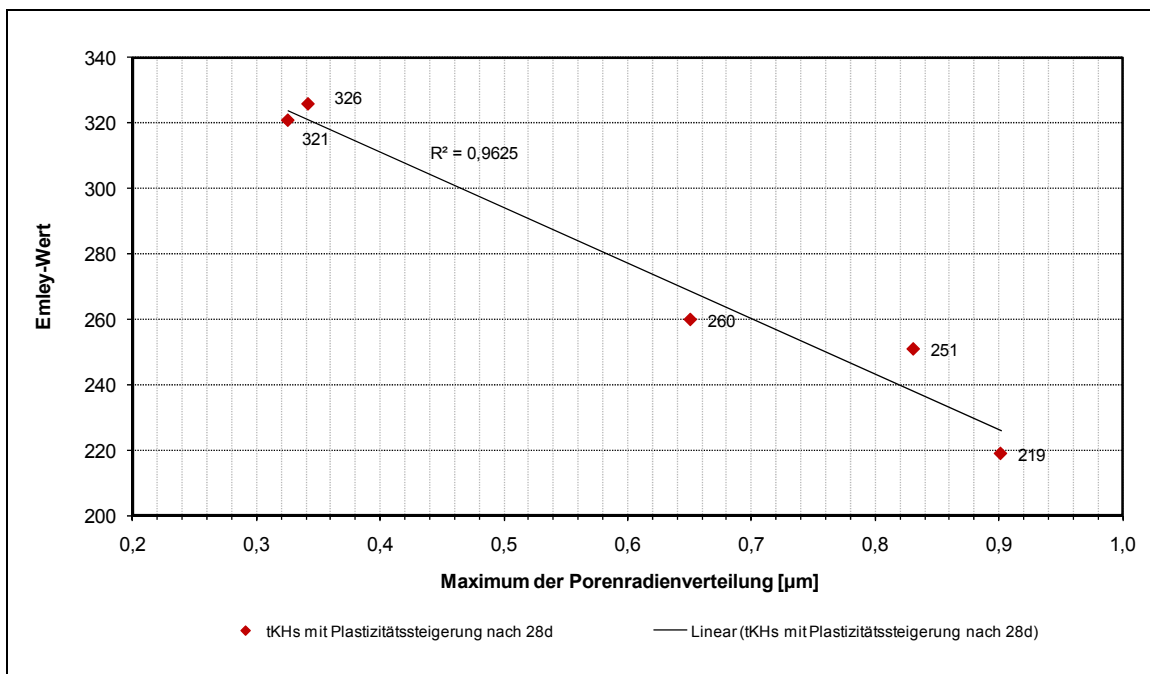


Abb. 5.76: Zusammenhang von Porenradienverteilung und Plastizität bei Plastizitätssteigerung

### 5.2.11 Rohdichte

Die Rohdichten der trockenen Branttkalke und Hydrate sowie der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfungzeit sind Abb. 5.77 und Abb. 5.78 zu entnehmen. Weder für die Dichten der trockenen Proben noch der eingesumpften Hydrate lassen sich Korrelationen ermitteln (Abb. 5.79 bis Abb. 5.81).

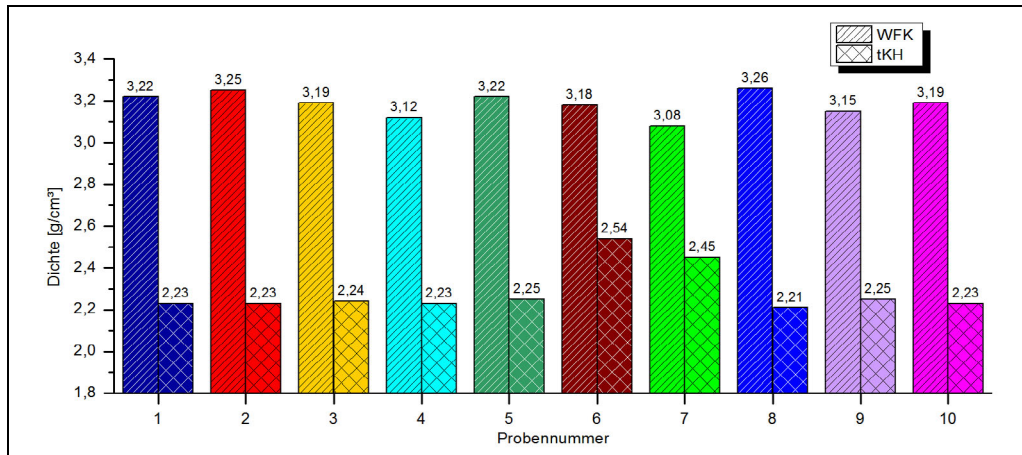


Abb. 5.77: Rohdichten der trockenen Proben, Pyknometer-Bestimmung

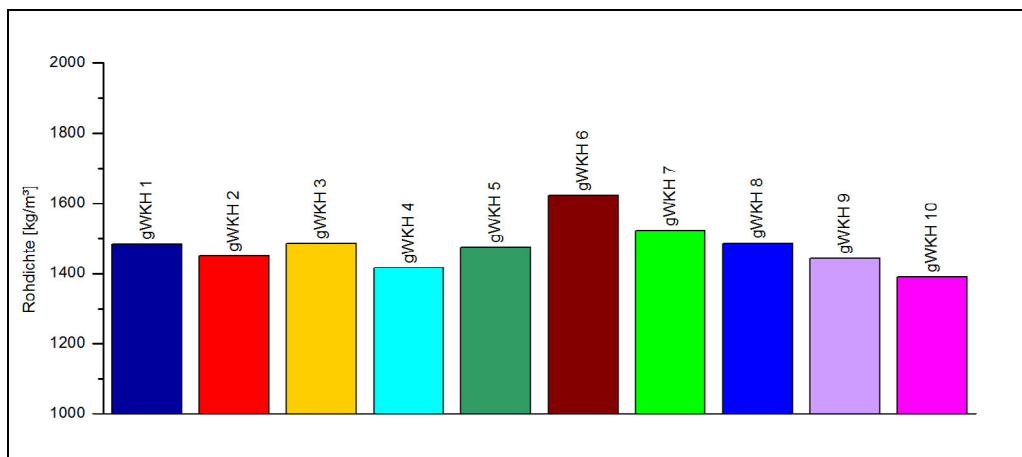


Abb. 5.78: Rohdichten der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfungzeit

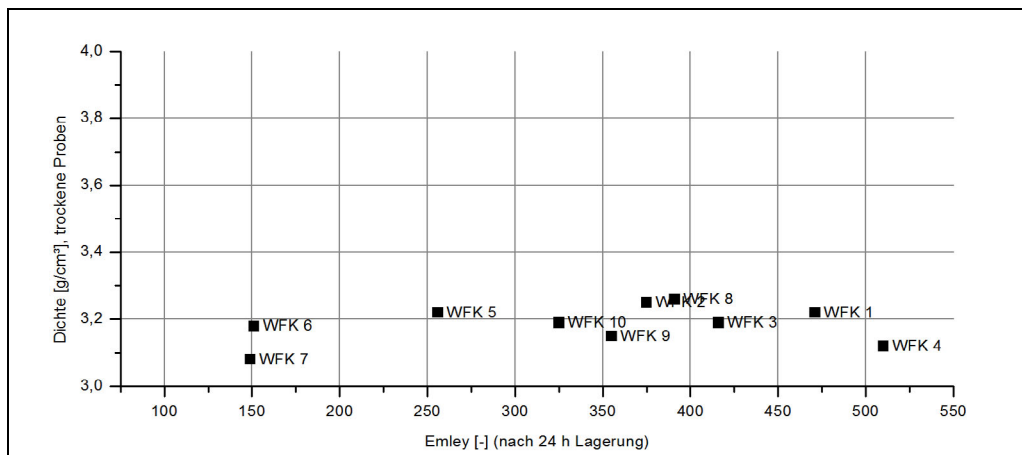


Abb. 5.79: Gegenüberstellung von Rohdichten der Branttkalke und Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfungzeit

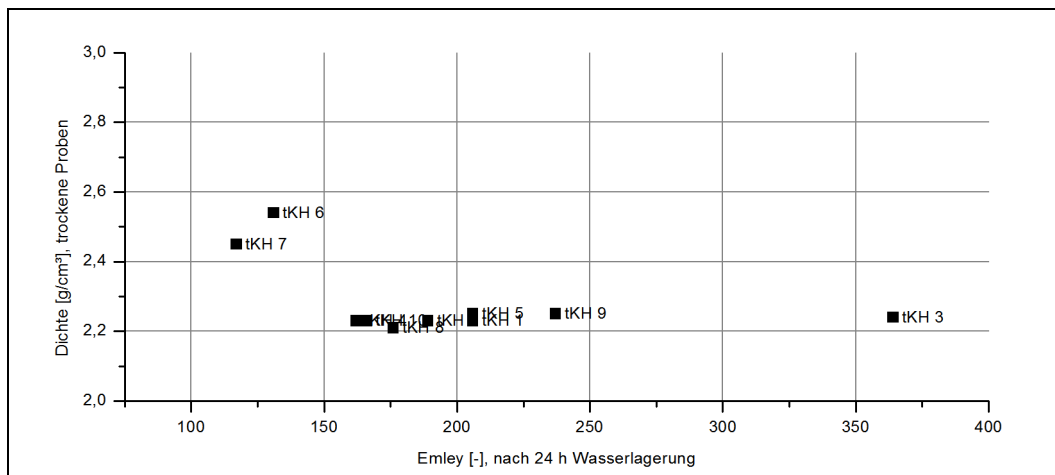


Abb. 5.80: Gegenüberstellung von Rohdichten der trockenen Hydrate und Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit

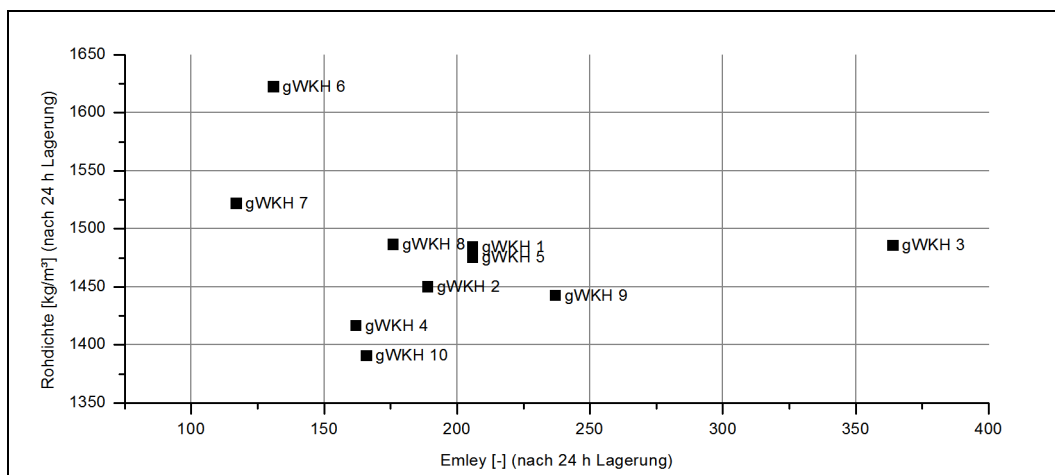


Abb. 5.81: Gegenüberstellung von Rohdichten und Emley-Werten der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit

### 5.2.12 Spezifische Oberfläche

Die spezifischen Oberflächen der trockenen Hydrate sind in Abb. 5.82 dargestellt. Sie können mit den Emley-Werten der Proben nach 24 Stunden und nach 28 Tagen Einsumpfdauer mit einem  $R^2$  von 0,81 bzw. 0,86 korreliert werden (Abb. 5.83). Voraussetzung dabei ist allerdings, dass die längere Lagerungsdauer unter einem w/b-Wert von 0,9 stattfindet. Bei höheren Wassergehalten (w/b-Wert 1,5) bzw. verlängerter Lagerungsdauer (6 Monate) verliert sich der Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche der trockenen Proben und deren Verarbeitbarkeit (Abb. 5.84). Wahrscheinlich erfolgt die Geschwindigkeit der Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Hydratpartikel in Abhängigkeit vom Wasserangebot in der Probe, so dass das höhere Wasserangebot bei einem w/b-Wert von 1,5 zu einer schnelleren Veränderung führt, während die eher plastischen Proben mit einem w/b-Wert von 0,9 die spezifische Oberfläche länger konservieren und dadurch noch einen Bezug zu den Oberflächeneigenschaften des trockenen Hydrates aufweisen.

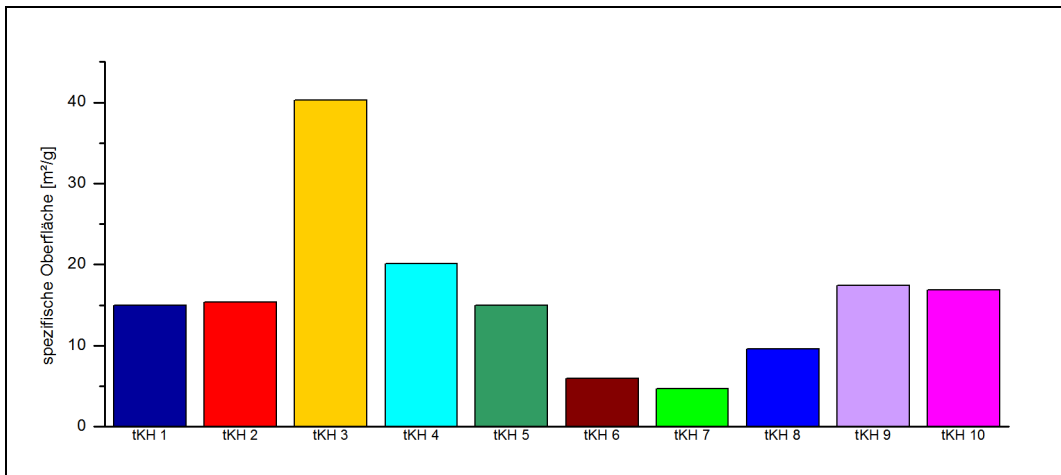


Abb. 5.82: Spezifische Oberflächen der trockenen Hydrate

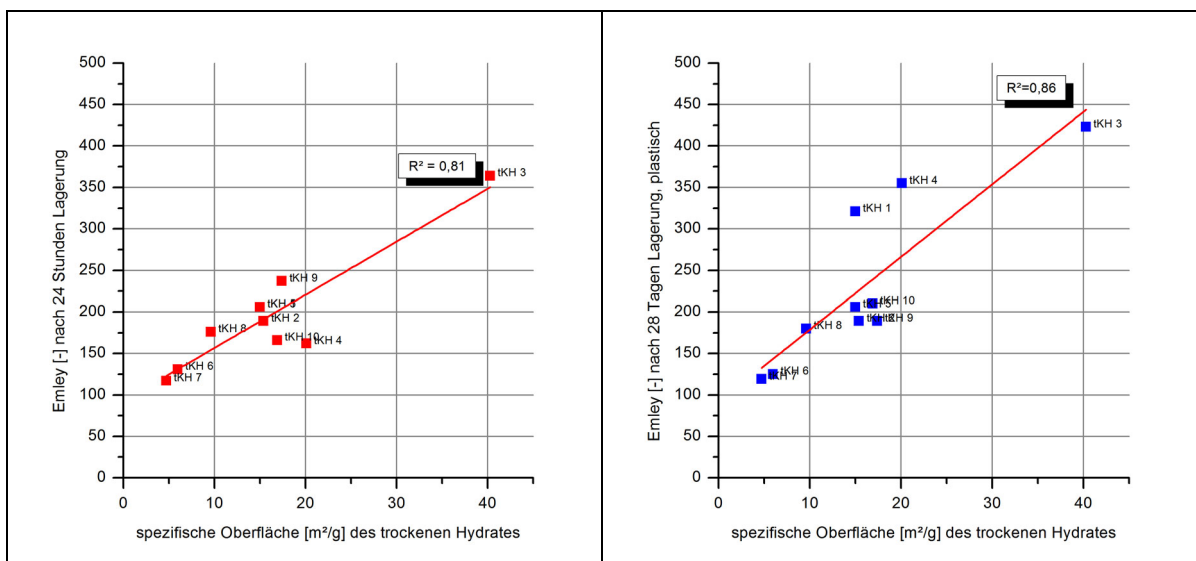


Abb. 5.83: Gegenüberstellung von spezifischen Oberfläche des trockenen Hydrates mit Emley-Werten nach 24 Stunden und 28 Tagen ( $w/b$ -Wert 0,9)

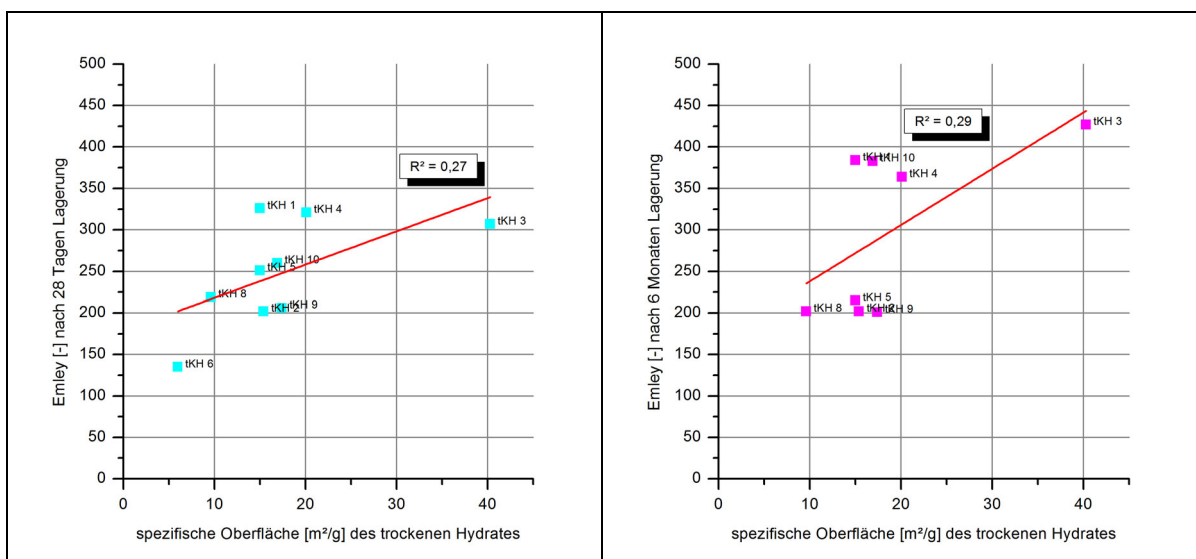


Abb. 5.84: Gegenüberstellung von spezifischen Oberfläche des trockenen Hydrates mit Emley-Werten nach 28 ( $w/b$ -Wert 1,5) und nach 6 Monaten

### 5.2.13 Ergiebigkeit

Die Ergiebigkeit der Branntkalkle ist in Abb. 5.85 für die einzelnen Proben dargestellt. Eine Korrelation der Ergiebigkeit mit den Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit konnte nicht festgestellt werden (Abb. 5.86).

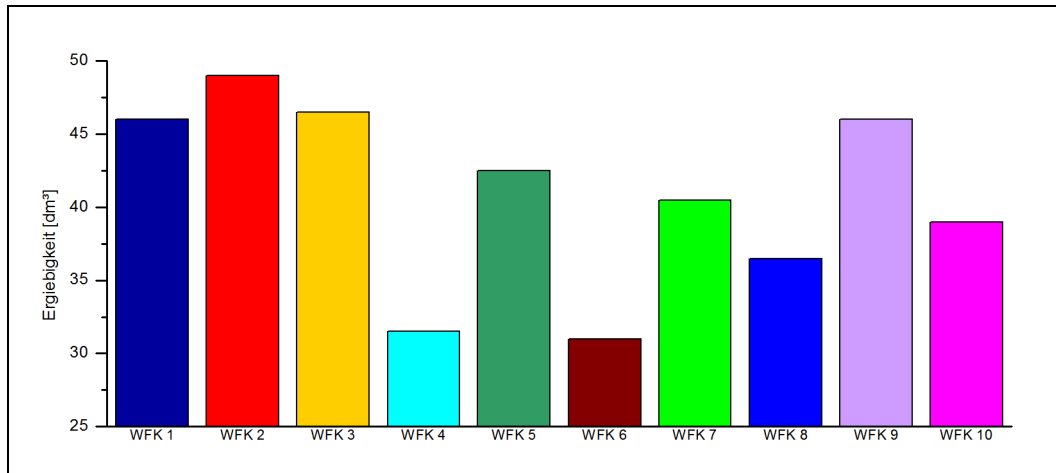


Abb. 5.85: Ergiebigkeit der Branntkalkle

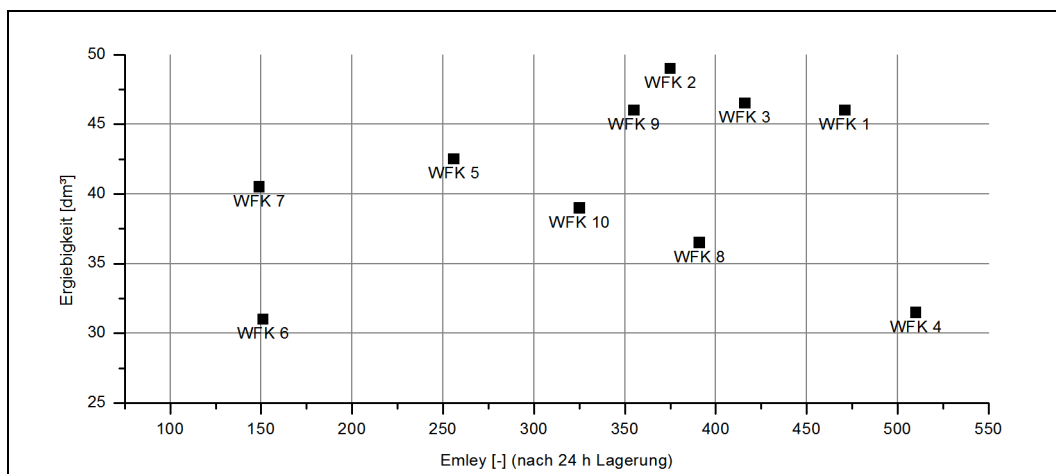


Abb. 5.86: Gegenüberstellung von Ergiebigkeit der Branntkalkle und Emley-Werten nach 24 h

### 5.2.14 Schüttdichte

An allen Hydraten wurde die Schüttdichte nach EN 459-2 ermittelt (Abb. 5.87), aber auch für diesen Parameter konnte keine Korrelation mit den Emley-Werten der eingesumpften Proben nach 24 Stunden festgestellt werden (Abb. 5.88).

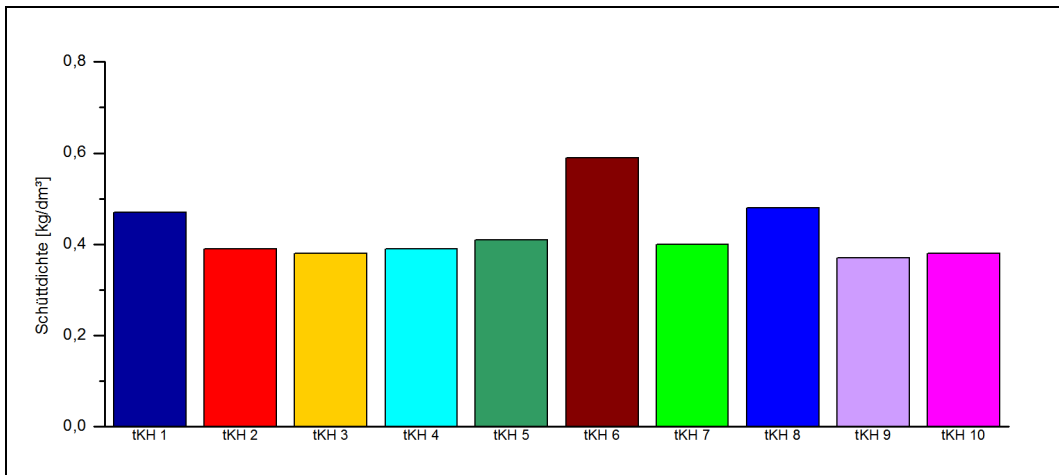


Abb. 5.87: Schüttdichte der Hydrate

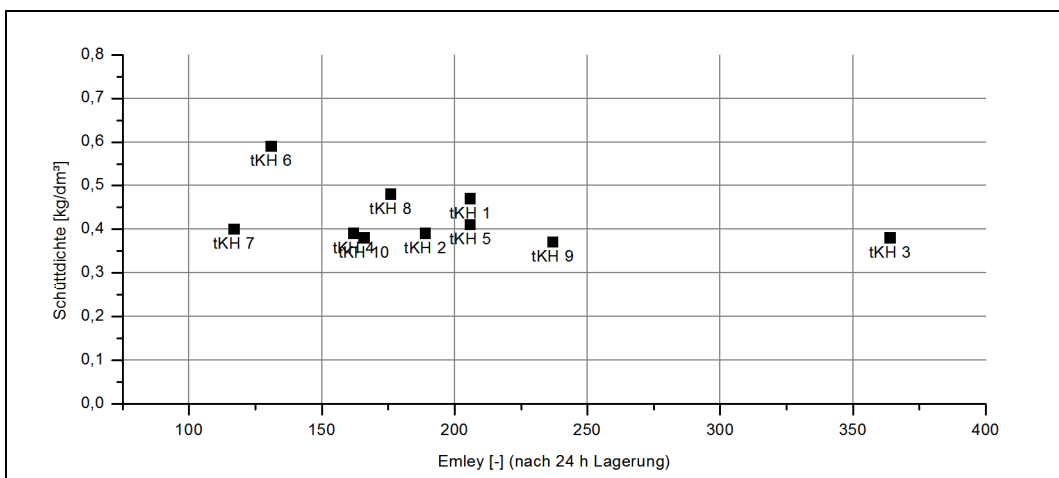


Abb. 5.88: Gegenüberstellung von Schüttdichte der Hydrate und Emley-Werten nach 24 h

### 5.2.15 Wasserrückhaltevermögen

Das Wasserrückhaltevermögen eines Putzes ist einer der wichtigsten Parameter für die Verarbeitung. Die ermittelten Werte der 24 Stunden gelagerten Hydrate sind der Abb. 5.89 zu entnehmen. Ein Vergleich mit den entsprechenden Emley-Werten lässt zwar einen Trend erkennen, bei dem ein höheres Wasserrückhaltevermögen auf höhere Emley-Werte hindeutet, der Versuch einer linearen Anpassung ergibt aber nur ein  $R^2$  von 0,47, so dass es sich nicht um eine direkte Korrelation handelt.

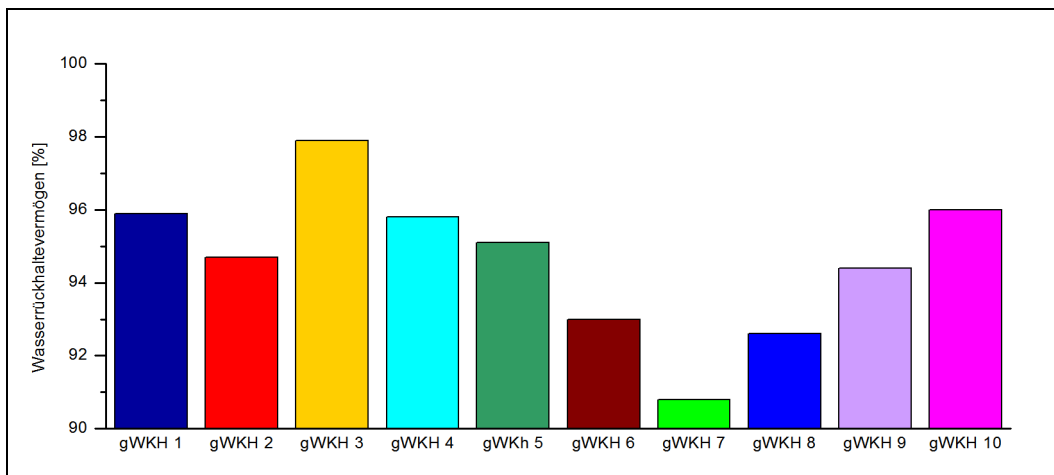


Abb. 5.89: Wasserrückhaltevermögen der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit

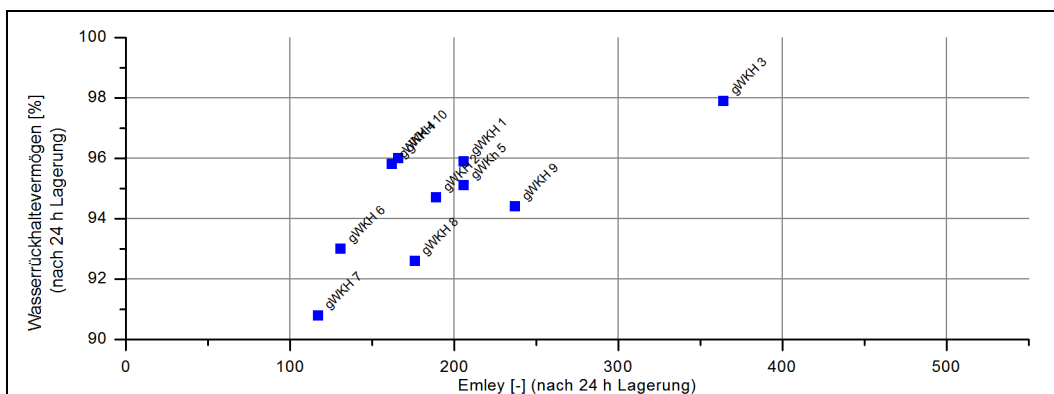


Abb. 5.90: Gegenüberstellung von Wasserrückhaltevermögen und Emley-Werten der Hydrate nach 24 h Einsumpfzeit

### 5.2.16 Konsistenz

Die Abb. 5.91 stellt die Ausbreitmaße der Hydratproben (gWKH) nach 24-stündiger Einsumpfzeit dar. Auch hier könnte ähnlich wie beim Wasserrückhaltevermögen ein Trend zu höheren Emley-Werten bei größerem Ausbreitmaß vermutet werden, der sich aber keiner mathematischen Korrelation zuordnen lässt.

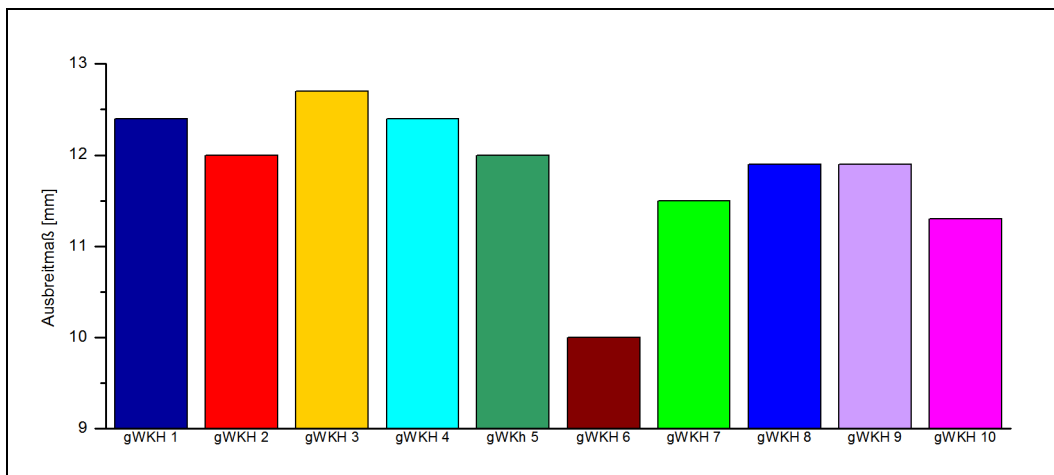


Abb. 5.91: Ausbreitmaß der Hydrate nach 24 h Einsumpfzeit

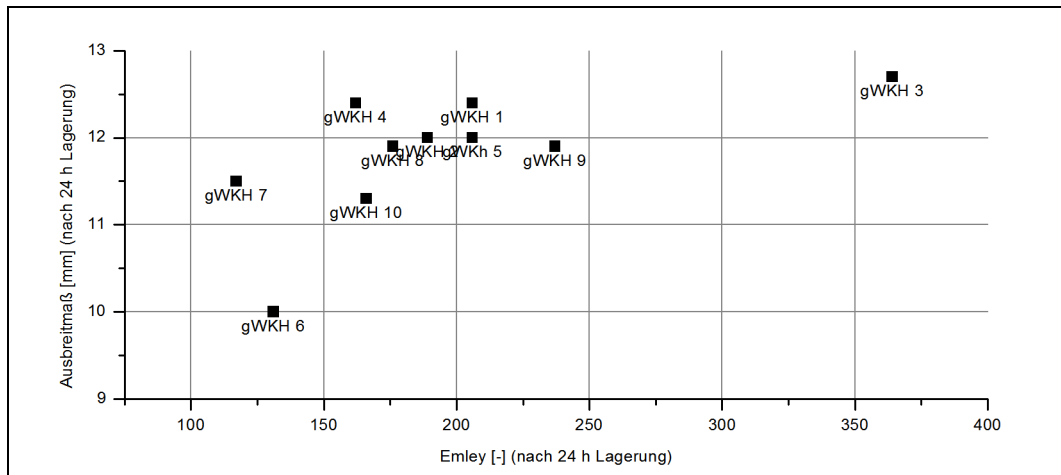


Abb. 5.92: Gegenüberstellung von Ausbreitmaß und Emley-Werten der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit

### 5.3 Technikumsversuche zur Übertragung der plastizitätsrelevanten Parameter in die Praxis

Die Mörtel wurden nach Vorgaben des Anwendungslabors im Eimer mittels Quirl mit Wasser angemischt (). Eine Maschinenverarbeitung ohne Zugabe von Zellulose war nicht möglich. Untersucht wurde je ein Mörtel, der aus Probe tKH 3 und aus Probe tKH 7 hergestellt wurde. Bei der verwendeten Gesteinskörnung handelte es sich um einen quarzitären Sand mit einem Größtkorn von 2 mm.

Die Messwerte und Vorgaben des Anwendungslabors sind der Tab. 5.6 zu entnehmen.

	Mörtel mit tKH 3	Mörtel mit tKH 7
Mischung (1 : 4)	1,8 kg Kalk - 18,72 kg Sand	1,96 kg Kalk - 18,72 kg Sand
Wasseranspruch [%]	20,0	18,6
Ausbreitmaß [mm]	18,0	18,5
LP-Gehalt [%]	4,7	5,2
Frischrohddichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,96	2,0
Wasserrückhaltevermögen [%]	85,4	82,6

Tab. 5.6: Messwerte und Vorgaben für untersuchte Mörtel



Abb. 5.93: Anmischen, Aufbringen und Abziehen der Mörtelmischungen per Hand

Der Mörtel unter Verwendung von tKH 7 wurde mit 40 kg Mörtelmischung und 8 Liter Wasser hergestellt. Nach Aufbringen des Mörtels auf die Ziegelwand war unmittelbar ein Festwerden des Mörtels und Feuchtigkeitsaufnahme der Wand zu beobachten (Abb. 5.94). Nach Aussagen des Putzmeisters war das Material „im Grunde nicht zu verarbeiten“. Es fehle dem Mörtel etwas, weshalb auch die Klebekraft nicht optimal sei. In den Randbereichen war erkennbar, dass der Mörtel nicht durchgängig auf der Wand haftete (Abb. 5.95). Auch ließ sich der Mörtel unmittelbar nach dem Aufbringen nicht glattstreichen. Die Kratzgeräusche beim Abziehen veranschaulichten die fehlende Geschmeidigkeit und Steifigkeit nach dem Aufbringen auf die Wand. In Abb. 5.96 ist im unteren Bereich der steife, angetrocknete Mörtel, im oberen Bereich ein Teil noch plastischen Materials erkennbar, das beim Abziehen ausfranst.



Abb. 5.94: Feuchtigkeitsabgabe an Wand

Abb. 5.95: Fehlende Haftung

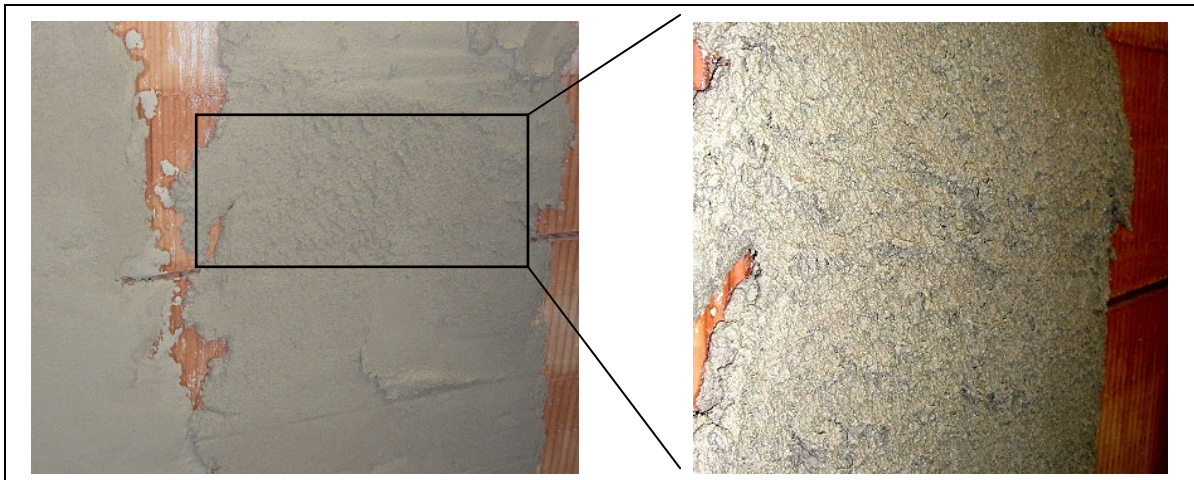


Abb. 5.96: Mörtel aus tKH 7 nach Abziehen

In einem zusätzlichen Versuch wurde dem Mörtel noch mehr Material der trockenen Mörtelmischung hinzugegeben. Auch bei dieser Zusammensetzung fehlte es an Geschmeidigkeit. Der Mörtel wurde als „stumpf“ bezeichnet und bröckelte beim Abziehen auf.

Beim Herstellen des Mörtels aus 40 kg Mörtelmischung (tKH 3) und 10 Liter Wasser beurteilte der Anwendungstechniker die Geschmeidigkeit bereits besser als die des Mörtels mit tKH 7. Bei dieser Mischung waren keine Kratzgeräusche beim Abziehen zu vernehmen, jedoch ließ sich auch diese Mischung nicht glatt abziehen, sondern franste aus (Abb. 5.97 und Abb. 5.98), weil er nach Angaben des Putzmeisters „zu stumpf“ war. Insgesamt wurde die Verarbeitbarkeit als länger und besser bewertet als die der Mischung mit tKH 7.

In einem zusätzlichen Versuch wurde dem Mörtel noch mehr Material der trockenen Mörtelmischung hinzugegeben, was zu Lasten der Geschmeidigkeit und Klebefähigkeit ging.

Die Proben beider Hydrate (tKH 3 und tKH 7) waren fast direkt nach dem Abziehen steif und nicht mehr zu verarbeiten.



Abb. 5.97: Ausfransen der Mörtelränder



Abb. 5.98: Mörtel aus tKH 3 nach Abziehen

Nach Einschätzung des Putzmeisters lässt sich der Mörtel unter Verwendung von tKH 3 jedoch eindeutig besser verarbeiten als der unter Verwendung von tKH 7, womit die Ergebnisse vorangegangener Messungen und Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes bestätigt wurden. Anhand von Analysen der reinen Kalkhydrate und Plastizitätsmessungen der Kalkteige wurde die Plastizität für tKH 3 deutlich höher bewertet als für tKH 7.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Die Plastizität von Kalkhydraten tritt nur beim Anteigen mit Wasser auf. Die Erfahrung und der Vergleich der rheologischen Eigenschaften anderer mineralischer Systeme zeigen, dass die Korngrößenverteilung und die Kornform, sowie die Oberflächenausbildung von elementarer Bedeutung sind.

Es ist bekannt, dass die Plastizität von Kalkhydrat-Wasser-Suspensionen (Kalkteige) von der Menge und der Form der vorhandenen Hydratfeinstanteile beeinflusst wird. Die Plastizität resultiert auch aus der Wechselwirkung der flüssigen Phase mit den Hydratteilchen, was sich in der Abhängigkeit von steigenden Emley-Einheiten bei zunehmender spezifischer Oberfläche (BET) belegen lässt.

Im Zusammenhang mit den spezifischen Oberflächen stehen auch die Porenradienverteilungen des Pulvers. Je größer der Anteil kleiner Poren, desto größer ist die spezifische Oberfläche. Die Porenradienverteilung des Ausgangsmaterials scheint sich insbesondere auf die Plastizitätsentwicklung nach längerer Einsumpfzeit auszuwirken. So war erkennbar, dass kleine Porenradien ( $< 0,4 \mu\text{m}$ ) im Ausgangsmaterial nach längerer Einsumpfzeit zu höheren Plastizitäten führen.

Ebenfalls im Zusammenhang mit den spezifischen Oberflächen stehen die Partikelgrößen. Wie anhand der Partikelgrößenmessungen und REM-Aufnahmen erkennbar ist, weisen viele Proben eine Partikelverfeinerung mit zunehmender Einsumpfzeit auf. Die Partikelgrößen zeigen sich abhängig von der Verteilung, lassen sich jedoch nicht zahlenmäßig korrelieren. Anhand der Partikelgröße und -größenverteilung allein lassen sich noch keine Rückschlüsse auf die

Plastizität ziehen. Es sind jedoch die Veränderungen innerhalb einer Kalkhydratprobe infolge des Einsumpfens ablesbar.

NEY (1958) zufolge tragen die Feinstpartikel mit 0,02 - 0,2  $\mu\text{m}$  stark zu einer hohen spezifischen Oberfläche bei. Die Feinstpartikel haben einen überproportional hohen Einfluss auf die spezifische Oberfläche eines Hydrates. Demnach bedingen 10 % Feinstanteile etwa 95 % der spezifischen Oberfläche. Mit der im Rahmen dieses Projektes eingesetzten Lasergranulometrie können diese Bereiche nicht mehr erfasst werden. In einem möglichen weiteren Schritt müssten die bisher nicht erfassten Feinstanteile analysiert und ihr Zusammenhang mit der Plastizität und Plastizitätsentwicklung untersucht werden. Mittels PIDS (Polarization Intensity Differential Scattering) –Technologie, bei der die Unterschiede in den Streumustern von Partikeln bei der Bestrahlung mit horizontal und vertikal polarisiertem Licht ausgenutzt wird, können Messungen im Submikronbereich durchgeführt werden.

Die Reaktivität der Branntkalke konnte über den  $t_{u80}$ -Wert ebenfalls mit der Plastizität korreliert werden. Inwiefern die Reaktionsgeschwindigkeit der Löschreaktion tatsächlich Einfluss auf die entstehende Plastizität hat oder ob sie in den untersuchten Proben nur der Ausdruck der Partikelgröße und Oberflächeneigenschaften ist, welche sowohl die Reaktionsgeschwindigkeit des Branntkalkes als auch die Plastizität des entstehenden Hydrates beeinflussen, konnte in diesem Vorhaben nicht abschließend geklärt werden.

In den Gruppierungen zur Plastizitätsentwicklung zu unterschiedlichen Einsumpfzeiten lassen sich bei den technisch gelöschten Kalkhydraten und bei den Weißfeinkalken die gleichen Proben wiederfinden. Somit scheint für die Plastizitätsveränderung (Steigerung mit zunehmender Einsumpfzeit) infolge längerer Einsumpfzeiten die Art des Löschprozesses eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das gesetzte Ziel der Beschreibung des Einflusses der Morphologie von Kalkhydrat auf die Plastizitätseigenschaften von Mörtelsystemen zum Teil erreicht. Ein Modell, das die plastizitätsbestimmenden Parameter erfasst und einander gegenüberstellt, konnte nicht gefunden werden. Es konnten jedoch unterschiedliche Fälle der Plastizitätsentwicklung festgestellt werden. Für die Kalkhydrate, die mit zunehmender Einsumpfzeit ihre Plastizität steigern, bestehen unmittelbare Zusammenhänge zu den physikalischen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien, als es bei den Proben mit unregelmäßiger Plastizitätsentwicklung der Fall ist. Bei Betrachtung der reinen Plastizitätswerte nach 24 Stunden sind die chemisch-mineralogischen Eigenschaften ausschlaggebend.

## 7 Literaturverzeichnis

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2002): Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone - ASTM C110-03, 21 S.

BAI, T.A., et al. (1994): Phase transition, dehydration and melting relationships of portlandite. - *American Mineralogist*, (79): 1223-1226.

BOWLES, O. (1926): Present Progress and Future Tendencies in the Lime Industry. - *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19 (5).

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2002): DIN EN 459-1 - Baukalk – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien. – 39 S., Beuth-Verlag, Berlin.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2002): DIN EN 459-2 - Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren. – 39 S., Beuth-Verlag, Berlin.

ELERT, K. et al. (2002): Untersuchungen am Löschkalk. - *Fraunhofer IRB Kurztexte zur Denkmalpflege*, Stuttgart.

EMLEY, W. E. (1920): Measurement of Plasticity of Mortars and Plasters. - *Technologic Papers of the Bureau of Standards*, No. 169, 27 S.

GETTY CONSERVATION INSTITUTE (2003): Preservation of Lime Mortars and Plasters. – *The GCI Project Bibliographies Series*, 195 S.

HEDIN, R. & THOREN, R. (1949): Lime Researche at the Chemical Department of the Swedish Cement and Concrete Institute Meddenlanden. - *Svenska Forskninginstitutet för Cement och Betong, Bulletins (16)* Stockholm.

HOGEWONING, S. & WOLTER, A. (2008): Vorhersage und Beeinflussung der Reaktivität von Branntkalk - *Forschungsberichte der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.*, 1/08: 142 S., Köln.

ILIIN, B., MASSILLON, T. & ZACHARAOFF, N. (1933): Bestimmung der Reibung plastischer Massen mit Hilfe des Pendelviskosimeters. - *Colloid Polym. Sci.*, Vol. 63 (1), Heidelberg.

JOHANNES, K. & RADEMACHER, S. (1999): Modelling the Kinetics of Calcium Hydroxide Dissolution in Water. - *Acta hydrochim. hydrobiol.*, (27): 72-78, Weinheim.

KLEIN, D., HOGEWONING, S, SCHMIDT, S.-O. & MIDDENDORF, B. (2009): Einfluss von Kalkhydrat auf die Plastizitätseigenschaften von Mörtelsystemen. - 17. *ibausil*, 23. - 26.09.2009, Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Tagungsbericht - Band 1: 863 - 868.

KLEIN, D., HOGEWONING, S, SCHMIDT, S.-O. & MIDDENDORF, B (2010): The Influence of Calcium Hydroxide on the Plasticity of Lime Putties. - 2nd *Historic Mortars Conference & RILEM TC 203-RHM Repair Mortars for Historic Masonry Final Workshop*, 22.-24. 09.2010, Prague, Insti-

tute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Conference Proceedings, II.11.

KLEIN, D., HOGEWONING, S, SCHMIDT, S.-O. & MIDDENDORF, B (2010): Plastizitätssteuernde Parameter in kalkbasierten Mörtelsystemen. - Gesellschaft Deutscher Chemiker - Monographie Bd. 42: 35-42, Tagung Bauchemie der GDCh-Fachgruppe Bauchemie - 07.- 08.10.2010, Dortmund.

KREUTZ, M. & SCHIMMEL, G: (1959): Löschversuche an Branntkalk mit Wasserdampf. - Zement-Kalk-Gips, (10): 471-477, Wiesbaden.

KRUMNACHER, P. J. (2001): Lime and Cement Technology: Transition from Traditional to Standardized Treatment Methods. - Master of Science Thesis paper, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 90 S., Blacksburg.

LESCHONSKI, K. (1988): Überblick über die moderne Partikelmeßtechnik. - Fortschr. Miner., 66: 161-173, Stuttgart.

MATHERS, F. C. & GOSNELL, E. C. (1930): Bestimmung der Plastizität von gelöschten Kalk. - Fresenius J. Anal. Chem., Vol. 82 (1), Heidelberg.

MIRA, P., PAPADAKIS, V. G. & TSIMAS, S. (2002): Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. - Cem. Concr Res., (32): 683-689.

NEY, P. (1958): Physikochemische Grundlagen der Bildsamkeit von Kalken unter Einbeziehung des Begriffs der aktiven Oberfläche. - Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministerium NRW, (528): 80 S., Köln.

NEY, P. (1964): Einfluß der Zusammensetzung der flüssigen Phase beim Löschvorgang auf die Plastizitätseigenschaften des Kalkes nach Emley. - Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministerium NRW, (1342): 64 S., Köln.

PAVIA, S. & TREACY, E. (2006): A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. - Mater. struct. (39): 391-398.

POTGIETER, J. H. (1996) An Investigation into the Correlation between different Surface Area Determination Techniques applied to various Limestone-related Compounds. - Cem. Concr Res. (26): 1613-1617.

RAMACHANDRAN, V.S., SEREDA, P. J. & FELDMAN, R. F. (1964): Mechanism of hydration of calcium oxide. - Nature, 201: S.288-289.

SPEISER, C., BAUMANN, T. & NIESSNER, R. (2000): Morphological and Chemical Characterization of Calcium-Hydrate Phases Formed in Alteration Processes of Deposited Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. - Environ. Sci Technol.,(34): 5030-5034

RODT, V. (1936): Die Isotherme des Systems  $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$  - Z. anorg. u. allg. Chem., 228: 175-177, Weinheim.

SCHWARZ, F. (1957): Kristallchemische Betrachtung der Bildsamkeit. - Berg- u. Hüttenmann. Monatsh. (102): 16-21.

THOMSON, M. (2005): Properties of Lime Mortar. - Structure magazine, 26-29, Reedsburg.

WITTNEBEN, U. (1978): Untersuchungen zur Reaktionsfähigkeit und Viskosität wässriger Kalkhydratsuspensionen. - Forschungsbericht der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel Nr. 3, Köln.

WOLTER, A., BAUM, CH. & LUGER, S. (2003): Zur Kinetik der Hydratation von Branntkalk. - 15. Int. Baustofftagung, Tagungsbericht - Band 1 - Weimar

WOLTER, A., LUGER, S. & SCHAEFER, G. (2004): Zur Kinetik der Hydratation von Branntkalk. - Zement-Kalk-Gips, 57: 60-68, Wiesbaden.

WUHRER, J. , RADERMACHER, G, & ZAGER, L. (1959): Hydratationsmechanismus des Calciumoxyds und plastische Eigenschaften der Kalkhydratbreie. Zement-Kalk-Gips, 10: 456-466, Wiesbaden.

ZANDER, H. (1958): Kornform und Korngröße trocken und naßgelöschter Kalkhydrate. - Zement-Kalk-Gips, (11): 41-45, Wiesbaden.

ZANDER, H. et. al. (1960): Arbeitsergebnisse und Probleme auf dem Gebiet des Löschens. Interner Bericht liegt vor. . - Bericht über die Tätigkeit des Löschausschusses der deutschen Kalkindustrie 15.11.1960

## 8 Anhang

### 8.1 Charakterisierung der Proben

#### 8.1.1 Chemische Zusammensetzung

	Probe / Parameter	WFK 1	WFK 2	WFK 3	WFK 4	WFK 5	WFK 6	WFK 7	WFK 8	WFK 9	WFK 10
Anlieferungszustand	CaO [%]	96,0	94,8	93,6	94,4	93,3	77,9	78,3	95,8	91,1	92,1
	MgO [%]	0,80	1,09	2,30	0,34	0,69	2,52	0,67	0,67	0,92	2,29
	SiO <sub>2</sub> [%]	0,08	1,40	0,73	0,63	1,00	11,40	7,74	0,61	1,64	1,48
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,05	0,27	0,32	0,11	0,32	1,34	1,10	0,21	0,18	0,25
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,10	0,30	0,36	0,16	0,52	2,75	2,91	0,20	0,44	0,28
	SO <sub>3</sub> [%]	0,01	0,13	0,23	0,11	0,17	0,22	0,25	0,45	0,24	0,36
	CO <sub>2</sub> [%]	0,73	0,98	1,70	1,07	3,66	3,03	6,50	1,12	3,82	1,26
	Glühverlust [%]	2,2	1,8	1,8	3,7	3,5	3,2	7,5	1,4	3,8	2,9
Glühverlustfrei	CaO [%]	98,1	96,5	95,3	98,0	96,7	80,4	84,7	97,1	94,7	94,8
	MgO [%]	0,82	1,11	2,34	0,35	0,72	2,60	0,72	0,68	0,96	2,36
	SiO <sub>2</sub> [%]	0,08	1,43	0,74	0,65	1,04	11,77	8,37	0,62	1,70	1,52
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,05	0,27	0,33	0,11	0,33	1,38	1,19	0,21	0,19	0,26
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,10	0,31	0,37	0,17	0,54	2,84	3,15	0,20	0,46	0,29
	SO <sub>3</sub> [%]	0,01	0,13	0,23	0,11	0,18	0,23	0,27	0,46	0,25	0,37

Tab. 8.1: Chemische Parameter der Branntkalk

	Probe / Parameter	tKH 1	tKH 2	tKH 3	tKH 4	tKH 5	tKH 6	tKH 7	tKH 8	tKH 9	tKH 10
Anlieferungszustand	CaO [%]	73,7	73,0	73,0	73,2	71,9	63,7	66,1	74,2	72,1	72,2
	MgO [%]	0,61	0,80	1,17	0,27	0,53	1,76	0,57	0,30	0,73	1,05
	SiO <sub>2</sub> [%]	0,03	0,50	0,47	0,50	0,76	11,50	6,66	0,22	1,41	0,54
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,04	0,21	0,18	0,08	0,24	1,40	0,95	0,11	0,16	0,15
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,04	0,19	0,22	0,10	0,38	3,08	2,49	0,08	0,37	0,12
	SO <sub>3</sub> [%]	< 0,01	0,10	0,13	0,10	0,10	0,28	0,21	0,04	0,17	0,30
	CO <sub>2</sub> [%]	1,12	0,97	1,54	1,55	2,79	2,36	7,10	0,54	2,61	1,95
	Glühverlust [%]	25,0	25,3	24,9	25,4	25,7	16,3	21,8	25,3	24,7	25,5
Glühverlustfrei	CaO [%]	98,3	97,7	97,2	98,1	96,8	76,1	84,5	99,3	95,8	96,9
	MgO [%]	0,8	1,1	1,6	0,4	0,7	2,1	0,7	0,4	1,0	1,4
	SiO <sub>2</sub> [%]	0,0	0,7	0,6	0,7	1,0	13,7	8,5	0,3	1,9	0,7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	1,7	1,2	0,1	0,2	0,2
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	0,1	0,3	0,3	0,1	0,5	3,7	3,2	0,1	0,5	0,2
	SO <sub>3</sub> [%]	< 0,01	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,4

Tab. 8.2: Chemische Parameter der Kalkhydrate

### 8.1.2 Physikalische Parameter

Probe / Parameter	WFK 1	WFK 2	WFK 3	WFK 4	WFK 5	WFK 6	WFK 7	WFK 8	WFK 9	WFK 10
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	3,22	3,25	3,19	3,12	3,22	3,18	3,08	3,26	3,15	3,19
Ergiebigkeit [dm <sup>3</sup> ]	46,0	49,0	46,5	31,5	42,5	31,0	40,5	36,5	46,0	39,0
Reaktivität (NLK)										
t <sub>40</sub> [min]	0,2	1,1	0,3	1,3	1,0	2,4	5,4	0,5	0,9	0,9
t <sub>50</sub> [min]	0,3	1,6	0,6	1,7	1,7	10,8	17,5	1,3	1,8	1,6
t <sub>60</sub> [min]	0,5	2,1	1,0	2,3	3,3	-	-	2,7	3,8	2,5
t <sub>u80</sub> [min]	0,6	2,6	1,4	2,4	3,8	7,7	8,5	4,5	3,5	2,7
T <sub>u80</sub> [°C]	66,4	64,7	63,9	61,1	61,6	48,0	45,1	64,6	59,1	61,7
T <sub>max</sub> [°C]	78,0	75,9	74,9	71,4	72,0	55,0	51,4	75,8	68,9	72,1

Tab. 8.3: Physikalische Parameter der Branntkalk

Probe / Parameter	tKH 1	tKH 2	tKH 3	tKH 4	tKH 5	tKH 6	tKH 7	tKH 8	tKH 9	tKH 10
spez. Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	15	15,4	40,3	20,1	15	5,96	4,7	9,61	17,4	16,9
Schüttdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,47	0,389	0,375	0,39	0,41	0,59	0,4	0,476	0,37	0,378
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,23	2,23	2,24	2,23	2,25	2,54	2,45	2,21	2,25	2,23

Tab. 8.4: Physikalische Parameter der Kalkhydrate

### 8.1.3 Emley-Werte

Probe / Sumpfdauer	WFK 1	WFK 2	WFK 3	WFK 4	WFK 5	WFK 6	WFK 7	WFK 8	WFK 9	WFK 10
24 Stunden	471	375	416	510	256	151	149	391	355	325
28 Tage	515	306	373	500	238	144	169	279	394	340
6 Monate	270	331	435	545	348	188	178	268	278	397

Tab. 8.5: Emley-Werte der Branntkalke

Probe / Sumpfdauer	tKH 1	tKH 2	tKH 3	tKH 4	tKH 5	tKH 6	tKH 7	tKH 8	tKH 9	tKH 10
24 Stunden	206	189	364	162	206	131	117	176	237	166
28 Tage	326	202	307	321	251	135	---	219	206	260
28 Tage, plastisch	321	189	423	355	206	125	119	180	189	210
6 Monate	384	202	427	364	215	---	---	202	201	383

Tab. 8.6: Emley-Werte der Kalkhydrate

## 8.1.4 Partikelgrößenverteilungen

Probe	tKH 1					tKH 2				
	Lagerung µm / %	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	0	0,08	0,17	0,24	0,31	0,23	0,22	0,14	0,14	0,13
0,55	0,38	0,45	0,58	0,71	0,8	0,58	0,54	0,4	0,4	0,41
0,65	1,09	1,04	1,2	1,4	1,49	1,06	0,99	0,78	0,8	0,82
0,75	2,06	1,82	1,99	2,27	2,36	1,67	1,56	1,26	1,3	1,36
0,9	3,89	3,25	3,4	3,82	3,88	2,77	2,57	2,14	2,22	2,34
1,1	6,85	5,56	5,61	6,22	6,2	4,51	4,17	3,54	3,69	3,92
1,3	10,2	8,22	8,07	8,87	8,74	6,49	5,97	5,16	5,4	5,74
1,55	14,68	11,87	11,34	12,34	12,04	9,21	8,41	7,4	7,76	8,25
1,85	20,13	16,5	15,33	16,56	16	12,7	11,51	10,29	10,84	11,49
2,15	25,35	21,19	19,24	20,65	19,8	16,3	14,69	13,33	14,08	14,86
2,5	30,91	26,52	23,59	25,16	23,95	20,5	18,4	16,95	17,94	18,83
3	37,96	33,56	29,3	31,04	29,35	26,32	23,61	22,13	23,44	24,39
3,75	45,51	42,63	36,82	38,75	36,42	34,42	31,09	29,69	31,43	32,26
4,5	51,11	49,9	43,19	45,27	42,43	41,66	38,07	36,84	38,91	39,39
5,25	55,17	55,55	48,55	50,77	47,52	47,99	44,45	43,4	45,72	45,65
6,25	59,16	61,18	54,41	56,84	53,17	55,17	51,98	51,13	53,66	52,68
7,5	62,89	66,24	60,29	63	58,97	62,51	59,99	59,27	61,93	59,75
9	66,39	70,59	65,93	68,96	64,67	69,43	67,79	67,1	69,8	66,31
10,5	69,23	73,8	70,43	73,75	69,32	74,69	73,85	73,08	75,77	71,25
12,5	72,33	77,01	75,09	78,71	74,23	79,73	79,74	78,81	81,44	76,01
15	75,51	80,05	79,5	83,32	78,91	84,01	84,69	83,62	86,14	80,12
18	78,73	82,99	83,54	87,44	83,16	87,54	88,59	87,47	89,87	83,63
21,5	82	85,92	87,26	91,11	86,98	90,57	91,69	90,64	92,92	86,8
25,5	85,23	88,74	90,59	94,24	90,33	93,24	94,19	93,3	95,43	89,74
30,5	88,71	91,63	93,76	96,93	93,5	95,8	96,4	95,75	97,59	92,74
36,5	92,25	94,41	96,57	98,93	96,29	97,99	98,25	97,89	99,22	95,58
43,5	95,51	96,84	98,71	100	98,47	99,49	99,55	99,45	100	97,93
51,5	98,01	98,63	99,89	100	99,73	100	100	100	100	99,43
61,5	99,57	99,7	100	100	100	100	100	100	100	100
73,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	1,29	1,42	1,45	1,38	1,4	1,62	1,7	1,82	1,77	1,71
d <sub>50</sub>	4,35	4,51	5,5	5,14	5,69	5,53	5,99	6,1	5,79	5,87
d <sub>90</sub>	32,69	27,68	24,79	20,44	25,1	20,85	19,59	20,8	18,14	25,93
U <sub>90</sub>	25,3	19,5	17,1	14,8	17,9	12,9	11,5	11,4	10,2	15,2

Tab. 8.7: Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate

Probe	tKH 3					tKH 4				
	Lagerung $\mu\text{m} / \%$	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	0	0	0	0	0	0	0,14	0,16	0,21	0,21
0,55	0,18	0,2	0,2	0,2	0,2	0,31	0,5	0,48	0,56	0,57
0,65	0,52	0,55	0,53	0,55	0,58	0,9	1,04	0,97	1,08	1,11
0,75	1,01	1,06	1	1,03	1,11	1,72	1,73	1,58	1,73	1,78
0,9	2	2,06	1,91	1,99	2,16	3,29	2,99	2,69	2,91	2,99
1,1	3,73	3,8	3,47	3,65	3,96	5,87	4,99	4,46	4,77	4,91
1,3	5,88	5,92	5,39	5,69	6,15	8,84	7,26	6,47	6,87	7,08
1,55	9,04	9	8,18	8,69	9,3	12,89	10,34	9,21	9,73	10,02
1,85	13,35	13,18	11,97	12,79	13,51	17,94	14,23	12,68	13,35	13,74
2,15	17,99	17,66	16,07	17,25	17,99	22,92	18,18	16,24	17,06	17,54
2,5	23,52	23,01	21	22,64	23,26	28,38	22,72	20,38	21,37	21,93
3	31,07	30,39	27,89	30,19	30,44	35,28	28,92	26,13	27,35	27,96
3,75	40,97	40,3	37,29	40,5	39,9	43,64	37,42	34,26	35,78	36,33
4,5	48,87	48,48	45,2	49,14	47,57	49,98	44,88	41,65	43,46	43,74
5,25	54,92	54,92	51,55	56,03	53,54	54,83	51,22	48,19	50,27	50,11
6,25	60,83	61,33	57,98	62,94	59,43	59,74	58,07	55,6	58,01	57,11
7,5	66	66,97	63,79	69,09	64,62	64,32	64,61	63,03	65,8	63,93
9	70,35	71,67	68,76	74,21	68,98	68,42	70,3	69,78	72,92	70,02
10,5	73,52	75,02	72,39	77,83	72,14	71,5	74,33	74,66	78,1	74,42
12,5	76,67	78,29	75,97	81,25	75,24	74,57	78,03	79,1	82,82	78,48
15	79,65	81,35	79,33	84,33	78,16	77,46	81,18	82,7	86,58	81,89
18	82,54	84,32	82,55	87,21	81,01	80,26	83,96	85,66	89,52	84,82
21,5	85,44	87,34	85,73	90,06	83,96	83,11	86,66	88,33	92,06	87,57
25,5	88,33	90,31	88,82	92,79	86,95	86,07	89,34	90,88	94,36	90,25
30,5	91,44	93,37	92,02	95,51	90,17	89,5	92,22	93,56	96,6	93,06
36,5	94,6	96,25	95,13	97,92	93,4	93,29	95,09	96,23	98,56	95,78
43,5	97,42	98,56	97,75	99,6	96,3	96,93	97,62	98,5	99,85	98,07
51,5	99,34	99,87	99,43	100	98,44	99,45	99,32	99,85	100	99,51
61,5	100	100	100	100	99,7	100	100	100	100	100
73,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	1,62	1,62	1,69	1,65	1,6	1,37	1,52	1,62	1,57	1,55
d <sub>50</sub>	4,64	4,68	5,07	4,59	4,81	4,5	5,11	5,49	5,22	5,24
d <sub>90</sub>	28,19	25,08	27,35	21,43	30,23	26,65	26,65	24,12	18,66	25,13
U <sub>90</sub>	17,4	15,5	16,2	13,0	18,9	19,5	17,5	14,9	11,9	16,2

Tab. 8.8: Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate

Probe	tKH 5					tKH 6				
	Lagerung µm / %	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	n. b.	0,17	0,14	0,15	0,11	0,48	0,33	0,3	0,3	0,28
0,55	n. b.	0,42	0,38	0,43	0,39	0,89	0,66	0,61	0,61	0,57
0,65	n. b.	0,78	0,72	0,83	0,82	1,42	1,08	1	1,01	0,95
0,75	n. b.	1,22	1,16	1,34	1,36	2,03	1,58	1,47	1,49	1,41
0,9	n. b.	2,02	1,95	2,27	2,36	3,09	2,44	2,26	2,3	2,18
1,1	n. b.	3,26	3,21	3,74	3,94	4,69	3,74	3,42	3,49	3,31
1,3	n. b.	4,67	4,64	5,42	5,73	6,43	5,14	4,63	4,73	4,5
1,55	n. b.	6,58	6,59	7,71	8,18	8,73	6,98	6,16	6,29	5,98
1,85	n. b.	8,99	9,07	10,63	11,28	11,59	9,23	7,93	8,08	7,69
2,15	n. b.	11,45	11,62	13,63	14,42	14,48	11,46	9,58	9,75	9,28
2,5	n. b.	14,3	14,58	17,11	18,03	17,83	14,01	11,4	11,57	11,02
3	n. b.	18,25	18,7	21,89	22,94	22,53	17,61	13,88	14,03	13,39
3,75	n. b.	23,88	24,54	28,56	29,68	29,33	22,95	17,61	17,68	16,96
4,5	n. b.	29,12	29,94	34,59	35,65	35,78	28,29	21,54	21,51	20,73
5,25	n. b.	33,97	34,89	40,01	40,88	41,76	33,6	25,74	25,62	24,79
6,25	n. b.	39,89	40,86	46,4	46,89	48,94	40,54	31,73	31,52	30,61
7,5	n. b.	46,54	47,51	53,33	53,22	56,78	48,82	39,67	39,41	38,34
9	n. b.	53,57	54,47	60,43	59,57	64,74	57,92	49,3	49,1	47,76
10,5	n. b.	59,63	60,42	66,39	64,83	71,24	65,77	58,3	58,28	56,65
12,5	n. b.	66,34	66,95	72,79	70,5	77,99	74,12	68,49	68,8	66,84
15	n. b.	72,97	73,39	78,94	76,03	84,06	81,67	78,07	78,83	76,62
18	n. b.	79,11	79,35	84,48	81,18	89,06	87,75	85,84	87	84,69
21,5	n. b.	84,56	84,67	89,32	85,9	92,94	92,25	91,43	92,85	90,58
25,5	n. b.	89,19	89,22	93,33	90,03	95,77	95,39	95,12	96,58	94,51
30,5	n. b.	93,31	93,32	96,66	93,81	97,9	97,7	97,64	98,89	97,2
36,5	n. b.	96,64	96,66	98,97	96,9	99,32	99,23	99,22	99,97	98,91
43,5	n. b.	98,64	98,98	100	99,03	100	100	100	100	99,82
51,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
61,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
73,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	n. b.	1,97	1,96	1,78	1,73	1,68	1,95	2,23	2,2	2,29
d <sub>50</sub>	n. b.	8,24	8,04	6,9	6,86	6,42	7,69	9,12	9,15	9,38
d <sub>90</sub>	n. b.	26,49	26,45	22,18	25,47	18,85	19,75	20,61	19,79	21,15
U <sub>90</sub>	n. b.	13,4	13,5	12,5	14,7	11,2	10,1	9,2	9,0	9,2

Tab. 8.9: Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate

Probe	tKH 7					tKH 8				
	Lagerung $\mu\text{m} / \%$	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	0,64	0,62	0,31	0,42	0,46	0	0,02	0	0	0
0,55	1,05	1,01	0,61	0,73	0,79	0,34	0,31	0,25	0,25	0,24
0,65	1,52	1,45	1,01	1,1	1,19	0,89	0,77	0,66	0,67	0,66
0,75	2,02	1,93	1,48	1,52	1,63	1,61	1,38	1,21	1,24	1,24
0,9	2,84	2,7	2,28	2,19	2,34	2,94	2,49	2,24	2,3	2,33
1,1	4	3,78	3,47	3,14	3,32	5,03	4,24	3,86	4,01	4,07
1,3	5,2	4,89	4,74	4,1	4,31	7,36	6,18	5,69	5,93	6,04
1,55	6,73	6,29	6,37	5,24	5,48	10,43	8,74	8,13	8,51	8,7
1,85	8,56	7,93	8,3	6,48	6,76	14,17	11,85	11,11	11,7	11,98
2,15	10,36	9,53	10,18	7,58	7,87	17,79	14,87	14,04	14,84	15,22
2,5	12,44	11,35	12,31	8,69	9,01	21,79	18,21	17,31	18,36	18,86
3	15,44	13,95	15,31	10,11	10,49	27,06	22,64	21,67	23,07	23,73
3,75	20,07	17,94	19,89	12,16	12,67	34,18	28,73	27,67	29,52	30,41
4,5	24,88	22,09	24,65	14,31	15,01	40,59	34,38	33,21	35,43	36,48
5,25	29,78	26,34	29,51	16,7	17,6	46,43	39,73	38,44	40,95	42,08
6,25	36,31	32,04	35,93	20,33	21,52	53,49	46,55	45,08	47,87	48,98
7,5	44,26	39,06	43,57	25,61	27,09	61,27	54,58	52,93	55,95	56,82
9	53,25	47,15	51,93	32,82	34,54	69,18	63,38	61,59	64,76	65,12
10,5	61,29	54,15	59,19	40,51	42,3	75,51	70,94	69,11	72,35	72,09
12,5	70,28	63,27	67,11	50,59	52,22	81,76	78,89	77,16	80,36	79,3
15	78,87	72,13	74,63	61,85	63,02	86,97	85,88	84,36	87,41	85,59
18	86,14	80,29	81,16	72,75	73,25	90,87	91,19	89,87	92,76	90,24
21,5	91,69	87,14	86,5	82,09	81,89	93,68	94,81	93,87	96,37	93,85
25,5	95,51	92,36	90,69	89,27	88,55	95,72	97,08	96,38	98,52	96,18
30,5	98,1	96,32	94,2	94,77	93,8	97,39	98,56	98,11	99,67	97,88
36,5	99,55	98,85	96,99	98,35	97,43	98,75	99,5	99,31	100	99,12
43,5	100	100	98,98	100	99,46	99,71	100	100	100	99,88
51,5	100	100	99,99	100	100	100	100	100	100	100
61,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
73,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	2,09	2,24	3,04	2,96	2,83	1,51	1,67	1,74	1,69	1,67
d <sub>50</sub>	8,46	9,58	12,44	12,38	12,05	5,76	6,79	7,03	6,58	6,41
d <sub>90</sub>	20,44	23,69	27,35	26,17	26,88	17,33	17,33	18,03	16,45	17,74
U <sub>90</sub>	9,8	10,6	9,0	8,8	9,5	11,5	10,4	10,4	9,7	10,6

Tab. 8.10: Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate

Probe	tKH 9					tKH 10				
	Lagerung µm / %	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	0,23	0,29	n. b.	0,24	0,25	0,28	0,09	0,18	0,18	0,13
0,55	0,49	0,54	n. b.	0,5	0,52	0,62	0,3	0,41	0,41	0,37
0,65	0,85	0,87	n. b.	0,83	0,89	1,09	0,64	0,73	0,75	0,72
0,75	1,29	1,26	n. b.	1,24	1,33	1,68	1,06	1,13	1,17	1,17
0,9	2,06	1,94	n. b.	1,96	2,12	2,73	1,84	1,85	1,92	1,99
1,1	3,24	2,96	n. b.	3,07	3,35	4,4	3,09	3	3,14	3,33
1,3	4,54	4,09	n. b.	4,33	4,74	6,3	4,53	4,33	4,56	4,88
1,55	6,27	5,6	n. b.	6,04	6,65	8,92	6,5	6,19	6,54	7,06
1,85	8,43	7,5	n. b.	8,24	9,09	12,31	9,04	8,63	9,15	9,91
2,15	10,62	9,44	n. b.	10,54	11,64	15,84	11,67	11,24	11,95	12,95
2,5	13,2	11,75	n. b.	13,29	14,68	20	14,78	14,39	15,33	16,58
3	16,9	15,06	n. b.	17,26	19,04	25,81	19,17	18,95	20,22	21,76
3,75	22,53	20,1	n. b.	23,2	25,47	33,98	25,56	25,75	27,47	29,26
4,5	28,21	25,16	n. b.	29,03	31,66	41,31	31,66	32,28	34,39	36,2
5,25	33,84	30,19	n. b.	34,65	37,44	47,71	37,4	38,42	40,83	42,44
6,25	41,05	36,73	n. b.	41,7	44,45	54,9	44,52	45,87	48,59	49,7
7,5	49,42	44,52	n. b.	49,75	52,14	62,25	52,64	54,12	57,07	57,34
9	58,32	53,12	n. b.	58,24	59,96	69,25	61,23	62,53	65,63	64,81
10,5	65,8	60,63	n. b.	65,36	66,37	74,71	68,44	69,36	72,52	70,7
12,5	73,63	68,86	n. b.	72,85	73,02	80,14	75,95	76,25	79,39	76,57
15	80,61	76,65	n. b.	79,7	79,1	84,9	82,57	82,22	85,24	81,67
18	86,19	83,33	n. b.	85,48	84,29	88,8	87,77	86,94	89,78	85,85
21,5	90,41	88,68	n. b.	90,18	88,61	91,95	91,58	90,6	93,23	89,29
25,5	93,52	92,75	n. b.	93,88	92,14	94,49	94,32	93,46	95,84	92,18
30,5	96,07	95,97	n. b.	96,9	95,19	96,68	96,61	95,92	97,93	94,87
36,5	98,1	98,3	n. b.	99,01	97,64	98,46	98,59	97,97	99,39	97,24
43,5	99,5	99,68	n. b.	100	99,31	99,65	99,99	99,41	100	99,06
51,5	100	100	n. b.	100	100	100	100	100	100	100
61,5	100	100	n. b.	100	100	100	100	100	100	100
73,5	100	100	n. b.	100	100	100	100	100	100	100
87,5	100	100	n. b.	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	2,06	2,23	n. b.	2,08	1,96	1,65	1,96	2,01	1,94	1,86
d <sub>50</sub>	7,6	8,46	n. b.	7,54	7,15	5,57	7,09	6,88	6,46	6,3
d <sub>90</sub>	21,16	22,8	n. b.	21,37	23,08	19,33	20,05	20,92	18,22	22,48
U <sub>90</sub>	10,3	10,2	n. b.	10,3	11,8	11,7	10,2	10,4	9,4	12,1

Tab. 8.11: Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate

Probe	WFK 1					WFK 2				
	Lagerung $\mu\text{m} / \%$	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	n. b.	0,8	1,31	1,36	1,68	2,66	0,32	0,26	0,23	0,21
0,55	n. b.	1,51	2,36	2,46	2,93	3,83	0,68	0,58	0,57	0,58
0,65	n. b.	2,42	3,65	3,83	4,42	4,89	1,16	1,04	1,07	1,12
0,75	n. b.	3,49	5,13	5,41	6,11	5,88	1,74	1,6	1,69	1,79
0,9	n. b.	5,36	7,62	8,07	8,89	7,28	2,78	2,61	2,81	3,01
1,1	n. b.	8,21	11,25	11,99	12,91	9,06	4,4	4,21	4,61	4,96
1,3	n. b.	11,37	15,1	16,17	17,09	10,81	6,23	6,04	6,67	7,19
1,55	n. b.	15,61	20	21,55	22,35	13,03	8,73	8,57	9,52	10,24
1,85	n. b.	20,89	25,77	27,94	28,44	15,8	11,95	11,85	13,23	14,15
2,15	n. b.	26,2	31,24	34,04	34,12	18,7	15,31	15,3	17,12	18,18
2,5	n. b.	32,19	37,1	40,63	40,12	22,14	19,29	19,41	21,76	22,9
3	n. b.	40,09	44,51	48,97	47,6	26,9	24,97	25,29	28,38	29,43
3,75	n. b.	50,25	53,72	59,27	56,74	33,31	33,25	33,88	38	38,57
4,5	n. b.	58,35	60,95	67,23	63,78	38,61	41,02	41,94	47,01	46,74
5,25	n. b.	64,6	66,54	73,24	69,15	42,89	48,09	49,28	55,18	53,87
6,25	n. b.	70,7	72,13	79,04	74,44	47,44	56,38	57,88	64,6	61,91
7,5	n. b.	76,22	77,21	84,03	79,23	51,96	65,11	66,89	74,2	70,07
9	n. b.	80,8	81,67	88,16	83,42	56,31	73,55	75,49	82,91	77,67
10,5	n. b.	84,07	84,95	91,11	86,51	59,9	80,03	81,92	89	83,31
12,5	n. b.	87,17	88,09	93,83	89,44	63,83	86,16	87,78	94,04	88,48
15	n. b.	89,87	90,84	96	91,92	67,89	91,02	92,18	97,24	92,43
18	n. b.	92,22	93,24	97,66	93,97	72,03	94,41	95,07	98,88	95,14
21,5	n. b.	94,32	95,33	98,96	95,69	76,26	96,67	96,91	99,67	96,99
25,5	n. b.	96,13	97,03	99,78	97,1	80,53	98,13	98,09	100	98,27
30,5	n. b.	97,15	98,42	100	98,3	85,23	99,12	98,95	100	99,18
36,5	n. b.	99,12	99,44	100	99,24	90,1	99,76	99,63	100	99,78
43,5	n. b.	100	100	100	99,86	94,64	100	100	100	100
51,5	n. b.	100	100	100	100	98,1	100	100	100	100
61,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
73,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	n. b.	1,21	1,03	1	0,96	1,21	1,67	1,68	1,59	1,53
d <sub>50</sub>	n. b.	3,73	3,45	3,08	3,2	6,96	5,48	5,33	4,77	4,84
d <sub>90</sub>	n. b.	15,17	14,24	9,94	13,07	36,38	14,47	13,76	10,9	13,46
U <sub>90</sub>	n. b.	12,54	13,83	9,94	13,61	30,07	8,66	8,19	6,86	8,80

Tab. 8.12: Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke

Probe	WFK 3					WFK 4				
	Lagerung $\mu\text{m} / \%$	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	n. b.	0,33	0,34	0,35	0,29	13,14	0,52	0,5	0,55	0,62
0,55	n. b.	0,66	0,66	0,69	0,63	18,19	0,97	0,99	1,08	1,19
0,65	n. b.	1,09	1,09	1,13	1,09	22,28	1,53	1,62	1,76	1,93
0,75	n. b.	1,62	1,61	1,67	1,65	25,6	2,19	2,37	2,57	2,79
0,9	n. b.	2,55	2,54	2,63	2,68	29,45	3,3	3,65	3,95	4,25
1,1	n. b.	4,02	4,03	4,19	4,33	33,05	4,94	5,54	6	6,39
1,3	n. b.	5,72	5,76	6	6,25	35,4	6,69	7,57	8,18	8,65
1,55	n. b.	8,09	8,22	8,58	8,96	37,27	8,93	10,17	10,97	11,51
1,85	n. b.	11,23	11,52	12,06	12,56	38,74	11,62	13,27	14,27	14,86
2,15	n. b.	14,58	15,09	15,83	16,4	39,93	14,23	16,25	17,44	18,01
2,5	n. b.	18,64	19,46	20,44	21,03	41,34	17,16	19,56	20,92	21,43
3	n. b.	24,54	25,8	27,14	27,6	43,48	21,15	23,99	25,57	25,89
3,75	n. b.	33,2	35,07	36,93	36,92	46,55	26,79	30,14	31,97	31,9
4,5	n. b.	41,33	43,63	45,96	45,28	49,2	32,06	35,79	37,81	37,26
5,25	n. b.	48,63	51,17	53,9	52,47	51,59	36,92	40,93	43,11	42,06
6,25	n. b.	56,92	59,54	62,66	60,32	54,61	42,84	47,1	49,47	47,74
7,5	n. b.	65,23	67,67	71,13	67,89	58,17	49,54	53,95	56,52	54,05
9	n. b.	72,79	74,82	78,49	74,59	62,17	56,71	61,13	63,91	60,71
10,5	n. b.	78,28	79,86	83,63	79,4	65,82	62,96	67,2	70,17	66,43
12,5	n. b.	83,35	84,37	88,16	83,81	70,1	69,88	73,7	76,82	72,66
15	n. b.	87,46	87,94	91,63	87,41	74,7	76,61	79,8	82,94	78,61
18	n. b.	90,68	90,72	94,17	90,31	79,48	82,6	85,07	88,07	83,85
21,5	n. b.	93,29	93,05	96,15	92,77	84,38	87,64	89,44	92,2	88,28
25,5	n. b.	95,43	95,04	97,71	94,9	89,31	91,67	92,93	95,38	91,92
30,5	n. b.	97,27	96,87	98,97	96,83	94,36	95,09	95,9	97,86	95,12
36,5	n. b.	98,74	98,48	99,81	98,45	98,46	97,76	98,21	99,48	97,68
43,5	n. b.	99,7	99,67	100	99,57	100	99,47	99,67	100	99,39
51,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
61,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
73,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	n. b.	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	n. b.	1,73	1,71	1,67	1,64	0,4	1,67	1,53	1,46	1,42
d <sub>50</sub>	n. b.	5,42	5,13	4,88	4,99	4,75	7,6	6,78	6,34	6,7
d <sub>90</sub>	n. b.	17,37	17,22	13,82	17,68	26,19	23,84	22,15	19,63	23,39
U <sub>90</sub>	n. b.	10,04	10,07	8,28	10,78	65,48	14,28	14,48	13,45	16,47

Tab. 8.13: Partikelgrößenverteilungen der Branntkalk

Probe	WFK 5					WFK 6				
	Lagerung $\mu\text{m} / \%$	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	9,43	0,27	0,24	0,22	0,16	0,38	0,3	0,2	0,15	0,14
0,55	13,38	0,57	0,56	0,54	0,51	0,76	0,62	0,47	0,4	0,38
0,65	16,85	0,98	1	0,99	1,02	1,27	1,03	0,86	0,75	0,71
0,75	19,9	1,47	1,55	1,55	1,68	1,87	1,53	1,32	1,19	1,13
0,9	23,86	2,35	2,52	2,56	2,85	2,91	2,37	2,13	1,95	1,85
1,1	28,22	3,7	4,05	4,14	4,71	4,48	3,64	3,31	3,07	2,92
1,3	31,75	5,21	5,76	5,92	6,79	6,19	4,99	4,55	4,26	4,04
1,55	35,33	7,26	8,06	8,33	9,58	8,45	6,74	6,09	5,73	5,43
1,85	38,79	9,83	10,97	11,36	13,06	11,21	8,83	7,82	7,39	7
2,15	41,68	12,46	13,92	14,45	16,54	13,96	10,89	9,39	8,89	8,42
2,5	44,66	15,5	17,31	18	20,46	17,11	13,25	11,04	10,45	9,9
3	48,48	19,73	21,95	22,88	25,71	21,48	16,63	13,22	12,47	11,83
3,75	53,51	25,72	28,4	29,65	32,79	27,77	21,9	16,41	15,34	14,62
4,5	57,82	31,25	34,24	35,78	38,99	33,73	27,46	19,78	18,3	17,56
5,25	61,63	36,32	39,49	41,3	44,42	39,27	33,23	23,46	21,52	20,79
6,25	66,24	42,45	45,75	47,87	50,74	45,93	40,97	28,87	26,35	25,63
7,5	71,55	49,35	52,69	55,14	57,57	53,15	50,29	36,33	33,18	32,43
9	77,46	56,75	60,01	62,79	64,57	60,4	60,39	45,78	42,15	41,27
10,5	82,73	63,23	66,32	69,34	70,42	66,29	68,83	54,92	51,19	50,1
12,5	88,51	70,47	73,22	76,4	76,6	72,42	77,44	65,55	62,19	60,78
15	93,66	77,57	79,8	82,99	82,31	78,12	84,82	75,8	73,33	71,57
18	97,37	83,86	85,5	88,53	87,13	83,1	90,39	84,24	82,95	80,93
21,5	99,43	89,01	90,11	92,85	91,02	87,34	94,24	90,39	90,16	88,06
25,5	100	92,93	93,61	95,97	94,03	90,87	96,75	94,49	94,94	92,97
30,5	100	96,04	96,38	98,25	96,52	94,02	98,45	97,3	98	96,42
36,5	100	98,3	98,45	99,65	98,44	96,62	99,51	99,09	99,6	98,61
43,5	100	99,68	99,73	100	99,67	98,54	100	100	100	99,78
51,5	100	100	100	100	100	99,64	100	100	100	100
61,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
73,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
87,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	0,46	1,87	1,75	1,72	1,59	1,72	2,02	2,28	2,4	2,53
d <sub>50</sub>	3,23	7,63	7,02	6,62	6,13	6,95	7,46	9,69	10,3	10,48
d <sub>90</sub>	13,22	22,51	21,42	19,19	20,58	24,51	17,79	21,28	21,42	23,08
U <sub>90</sub>	28,74	12,04	12,24	11,16	12,94	14,25	8,81	9,33	8,93	9,12

Tab. 8.14: Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke

Probe	WFK 7					WFK 8				
	Lagerung µm / %	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	n. b.	0,44	0,25	0,22	0,22	n. b.	0,03	0,01	0,02	0
0,55	n. b.	0,8	0,51	0,48	0,47	n. b.	0,26	0,23	0,26	0,24
0,65	n. b.	1,23	0,86	0,83	0,81	n. b.	0,61	0,59	0,65	0,65
0,75	n. b.	1,72	1,28	1,25	1,21	n. b.	1,08	1,07	1,17	1,19
0,9	n. b.	2,54	1,99	1,96	1,89	n. b.	1,95	1,98	2,13	2,2
1,1	n. b.	3,72	3,02	3	2,89	n. b.	3,39	3,46	3,71	3,85
1,3	n. b.	4,94	4,1	4,09	3,93	n. b.	5,07	5,19	5,56	5,75
1,55	n. b.	6,47	5,42	5,44	5,22	n. b.	7,42	7,61	8,14	8,39
1,85	n. b.	8,24	6,92	6,98	6,69	n. b.	10,49	10,78	11,5	11,78
2,15	n. b.	9,92	8,27	8,38	8,02	n. b.	13,72	14,1	15,02	15,27
2,5	n. b.	11,81	9,7	9,86	9,44	n. b.	17,55	18,04	19,19	19,34
3	n. b.	14,49	11,58	11,8	11,32	n. b.	22,97	23,58	25,06	24,98
3,75	n. b.	18,68	14,33	14,6	14,07	n. b.	30,73	31,49	33,43	32,89
4,5	n. b.	23,2	17,22	17,48	16,99	n. b.	37,88	38,75	41,11	40,06
5,25	n. b.	28,05	20,39	20,61	20,19	n. b.	44,33	45,28	48,01	46,47
6,25	n. b.	34,85	25,14	25,27	24,98	n. b.	51,89	52,91	56,06	53,96
7,5	n. b.	43,55	31,84	31,89	31,73	n. b.	59,96	61,03	64,58	61,93
9	n. b.	53,66	40,63	40,64	40,55	n. b.	68,03	69,07	72,94	69,82
10,5	n. b.	62,75	49,49	49,55	49,44	n. b.	74,52	75,48	79,49	76,11
12,5	n. b.	72,71	60,3	60,59	60,3	n. b.	81,09	81,88	85,87	82,36
15	n. b.	81,82	71,35	72,04	71,42	n. b.	86,82	87,34	91,08	87,7
18	n. b.	88,99	81,07	82,19	81,19	n. b.	91,3	91,55	94,88	91,82
21,5	n. b.	93,44	88,58	89,96	88,69	n. b.	94,6	94,62	97,47	94,86
25,5	n. b.	96,97	93,77	95,17	93,81	n. b.	96,88	96,76	99,11	97,01
30,5	n. b.	98,78	97,3	98,46	97,26	n. b.	98,5	98,34	99,97	98,58
36,5	n. b.	99,71	99,29	99,96	99,22	n. b.	99,54	99,45	100	99,58
43,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
51,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
61,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
73,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
87,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	n. b.	2,16	2,58	2,54	2,65	n. b.	1,8	1,78	1,72	1,69
d <sub>50</sub>	n. b.	8,46	10,59	10,58	10,6	n. b.	6	5,87	5,5	5,72
d <sub>90</sub>	n. b.	18,71	22,59	21,53	22,52	n. b.	17,13	16,9	14,48	16,67
U <sub>90</sub>	n. b.	8,66	8,76	8,48	8,50	n. b.	9,52	9,49	8,42	9,86

Tab. 8.15: Partikelgrößenverteilungen der Branntkalk

Probe	WFK 9					WFK 10				
	Lagerung µm / %	tro- cken	1 d	57 d	178 d	364 d	tro- cken	1 d	57 d	178 d
0,45	n. b.	0,52	0,52	0,58	0,48	n. b.	0,42	0,45	0,46	0,46
0,55	n. b.	0,89	0,89	1,01	0,85	n. b.	0,77	0,81	0,85	0,88
0,65	n. b.	1,32	1,34	1,53	1,31	n. b.	1,22	1,27	1,34	1,44
0,75	n. b.	1,8	1,86	2,13	1,83	n. b.	1,74	1,8	1,92	2,1
0,9	n. b.	2,6	2,71	3,12	2,72	n. b.	2,65	2,72	2,92	3,24
1,1	n. b.	3,76	3,96	4,58	4,04	n. b.	4,03	4,13	4,46	4,98
1,3	n. b.	4,99	5,3	6,14	5,48	n. b.	5,58	5,71	6,19	6,91
1,55	n. b.	6,57	7,05	8,18	7,37	n. b.	7,68	7,86	8,52	9,47
1,85	n. b.	8,49	9,18	10,65	9,69	n. b.	10,35	10,61	11,49	12,66
2,15	n. b.	10,37	11,29	13,09	12,01	n. b.	13,1	13,46	14,55	15,86
2,5	n. b.	12,49	13,68	15,84	14,65	n. b.	16,32	16,82	18,13	19,51
3	n. b.	15,35	16,94	19,56	18,21	n. b.	20,81	21,55	23,1	24,46
3,75	n. b.	19,32	21,47	24,64	23,07	n. b.	27,15	28,27	30,1	31,24
4,5	n. b.	22,9	25,55	29,15	27,35	n. b.	32,91	34,4	36,45	37,24
5,25	n. b.	26,15	29,19	33,11	31,09	n. b.	38,06	39,9	42,12	42,53
6,25	n. b.	30,07	33,52	37,73	35,47	n. b.	44,1	46,32	48,77	48,68
7,5	n. b.	34,57	38,37	42,8	40,34	n. b.	50,66	53,24	55,96	55,28
9	n. b.	39,61	43,68	48,25	45,63	n. b.	57,46	60,29	63,28	62,02
10,5	n. b.	44,31	48,53	53,2	50,46	n. b.	63,24	66,16	69,36	67,63
12,5	n. b.	50,05	54,38	59,13	56,26	n. b.	69,57	72,39	75,77	73,57
15	n. b.	56,54	60,86	65,63	62,64	n. b.	75,73	78,26	81,73	79,14
18	n. b.	63,52	67,71	72,42	69,31	n. b.	81,37	83,47	86,89	84,06
21,5	n. b.	70,7	74,62	79,18	75,96	n. b.	86,33	87,97	91,22	88,34
25,5	n. b.	77,69	81,17	85,49	82,22	n. b.	90,55	91,74	94,7	91,97
30,5	n. b.	84,73	87,57	91,41	88,28	n. b.	94,32	95,08	97,5	95,2
36,5	n. b.	91,04	93,1	96,14	93,48	n. b.	97,33	97,76	99,35	97,76
43,5	n. b.	95,92	97,17	99,08	97,27	n. b.	99,31	99,49	100	99,42
51,5	n. b.	98,9	99,42	100	99,39	n. b.	100	100	100	100
61,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
73,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
87,5	n. b.	100	100	100	100	n. b.	100	100	100	100
d <sub>10</sub>	n. b.	2,09	1,97	1,77	1,89	n. b.	1,81	1,78	1,7	1,6
d <sub>50</sub>	n. b.	12,48	11	9,53	10,36	n. b.	7,37	6,91	6,46	6,5
d <sub>90</sub>	n. b.	35,51	33,14	29,31	32,48	n. b.	24,97	23,65	20,51	23,33
U <sub>90</sub>	n. b.	16,99	16,82	16,56	17,19	n. b.	13,80	13,29	12,06	14,58

Tab. 8.16: Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke

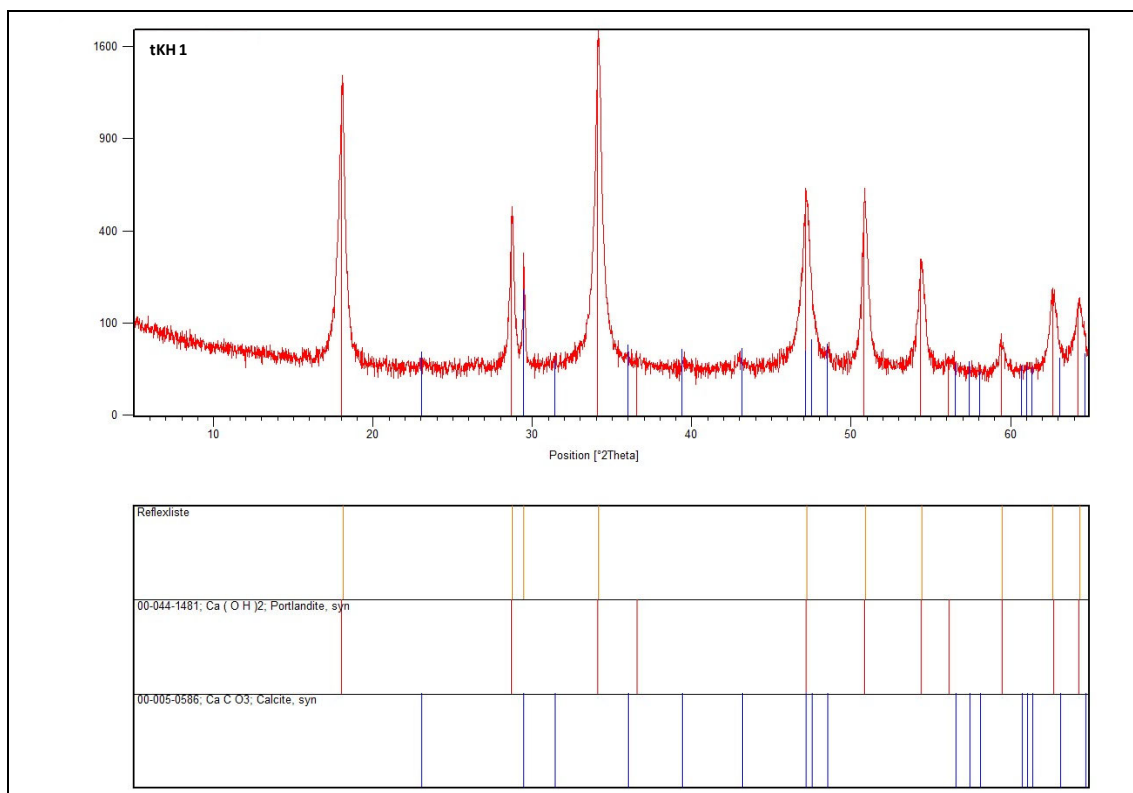


Abb. 8.1: Mineralphasenanalyse von tKH 1

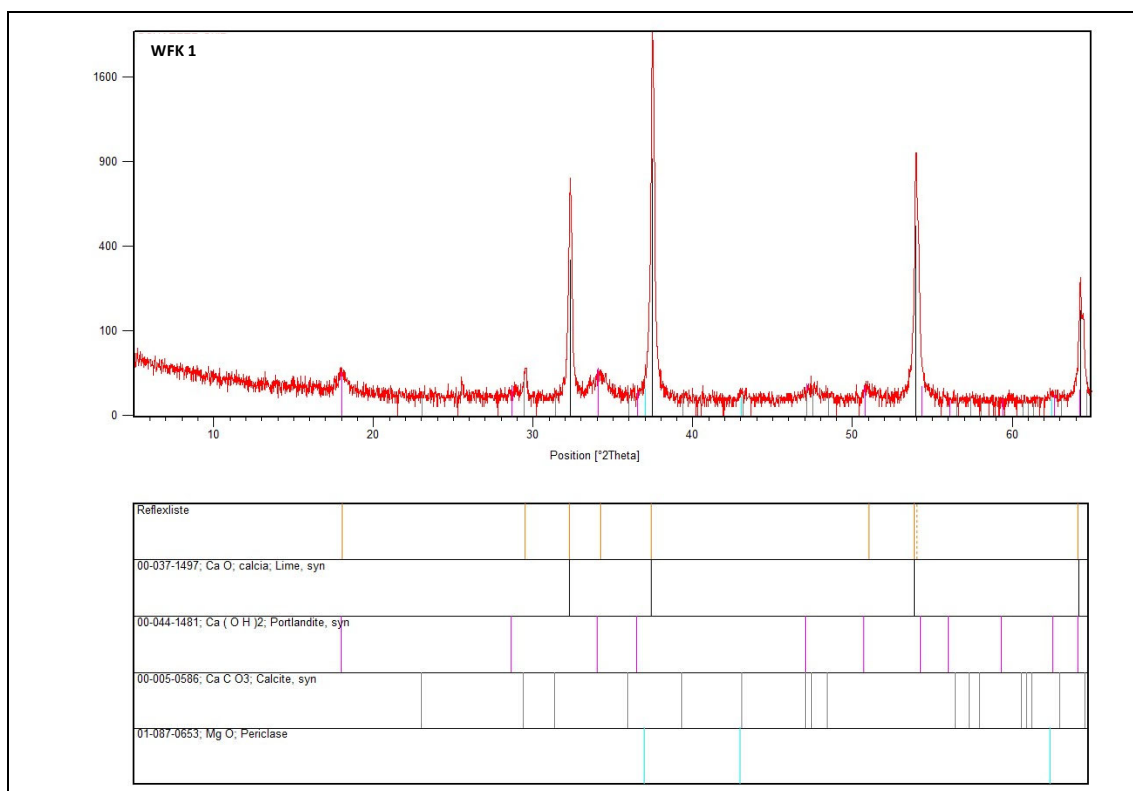


Abb. 8.2: Mineralphasenanalyse von WFK 1

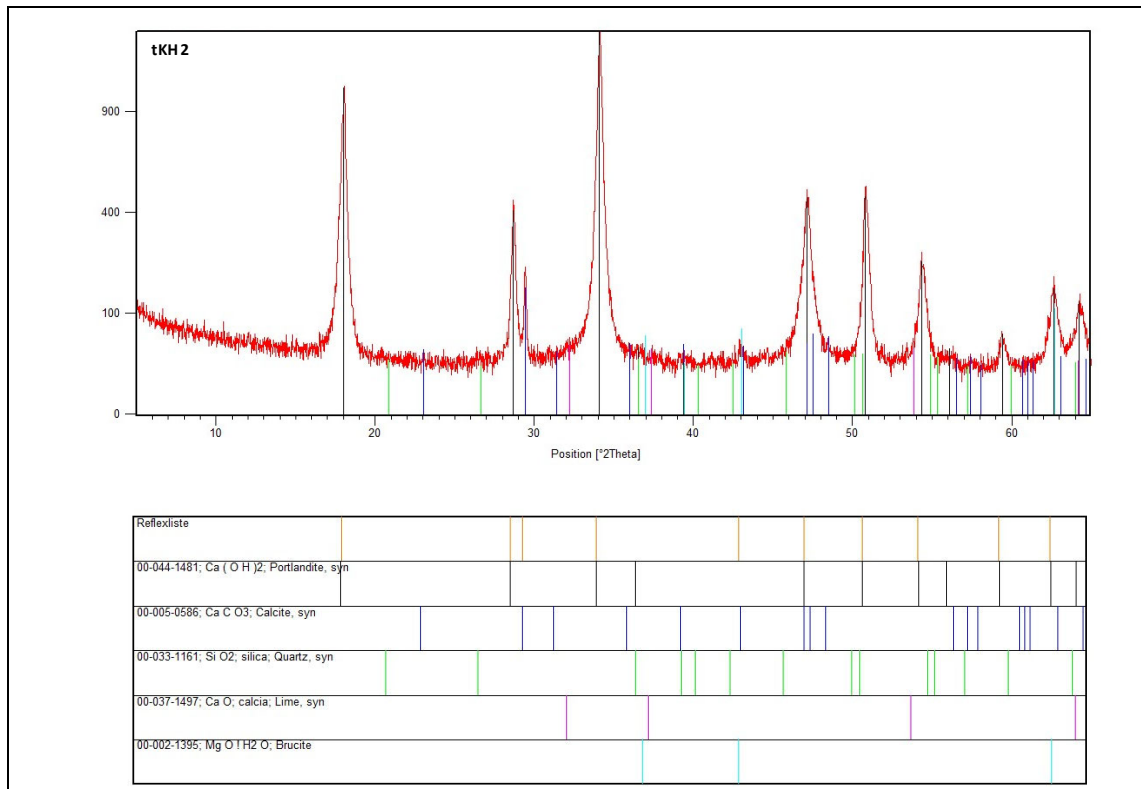


Abb. 8.3: Mineralphasenanalyse von tKH 2

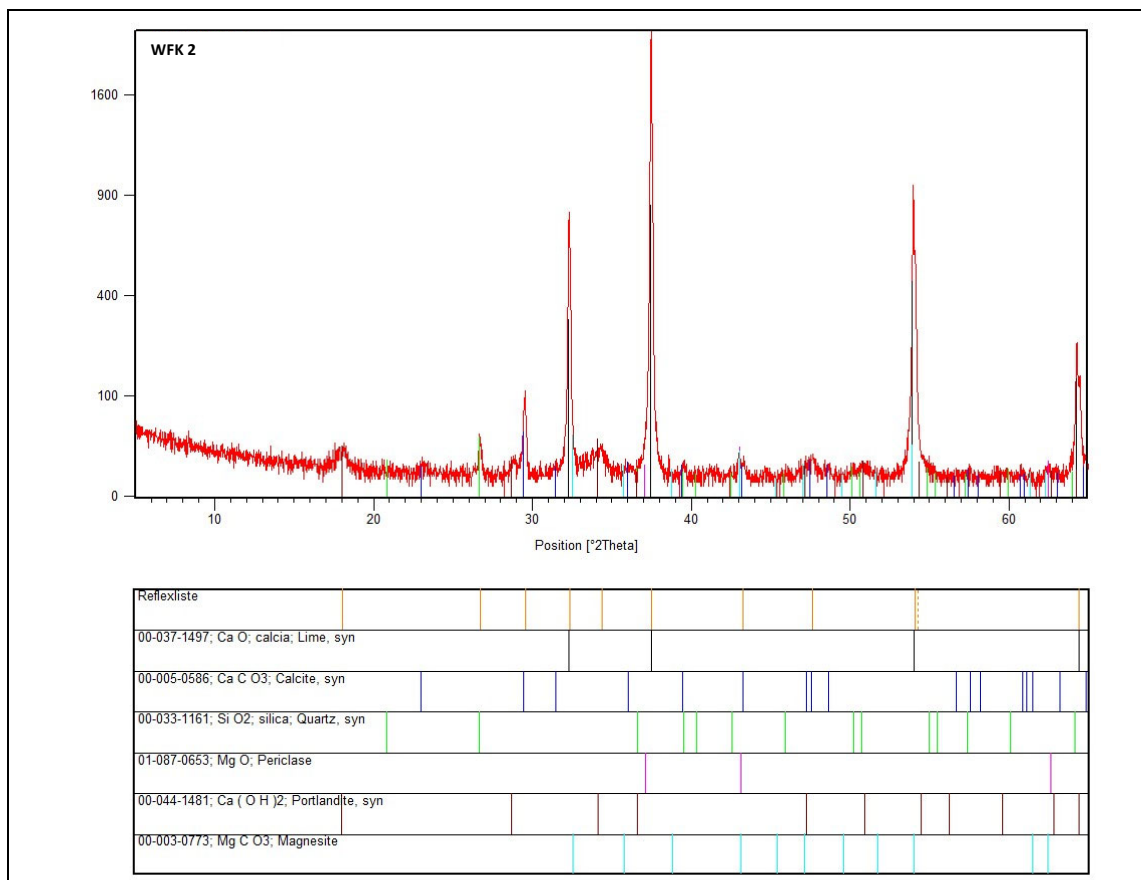


Abb. 8.4: Mineralphasenanalyse von WFK 2

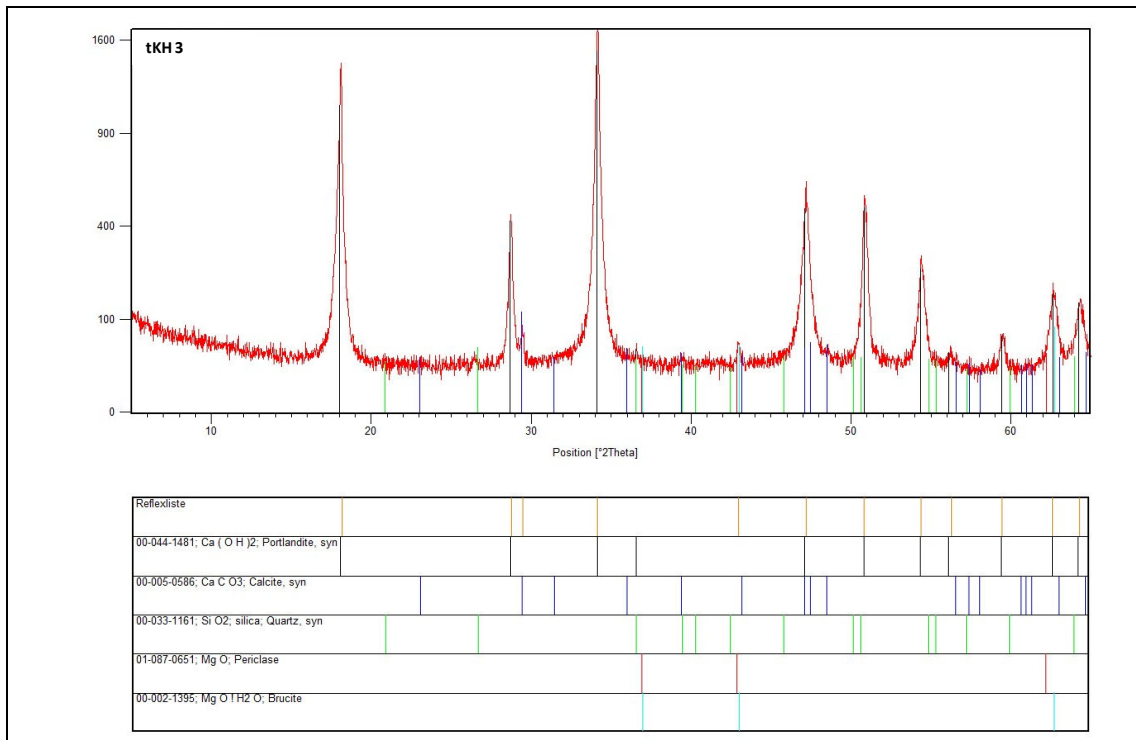


Abb. 8.5: Mineralphasenanalyse von tKH 3

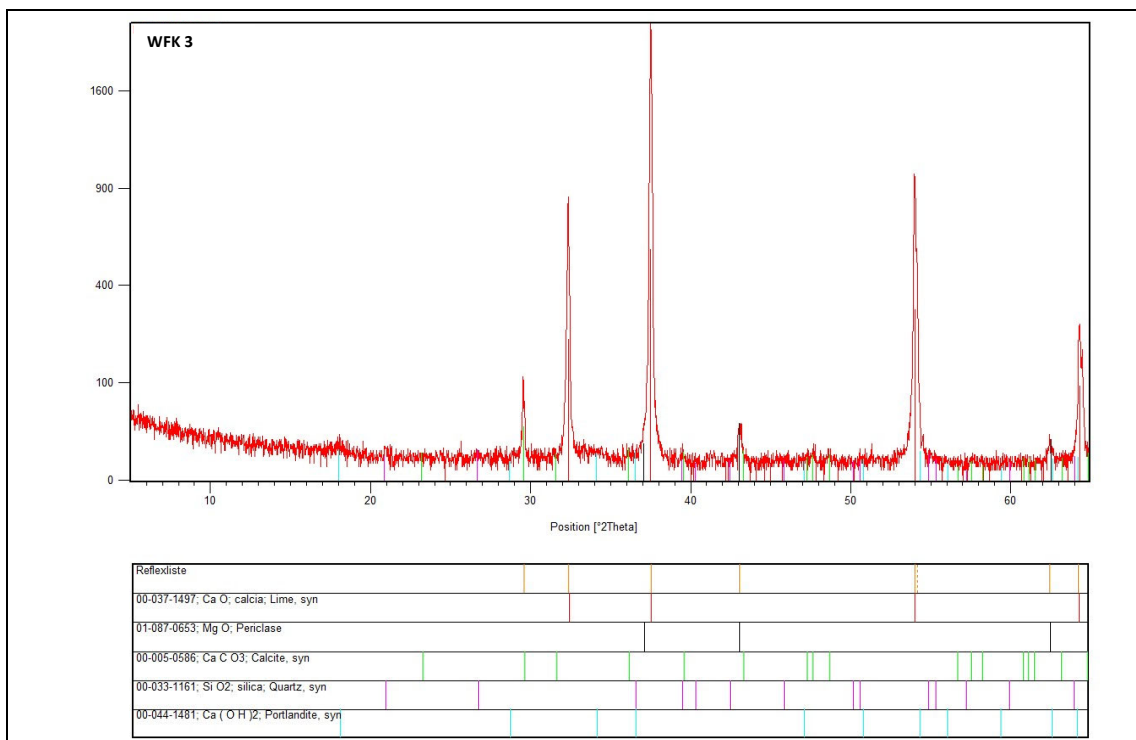


Abb. 8.6: Mineralphasenanalyse von WFK 3

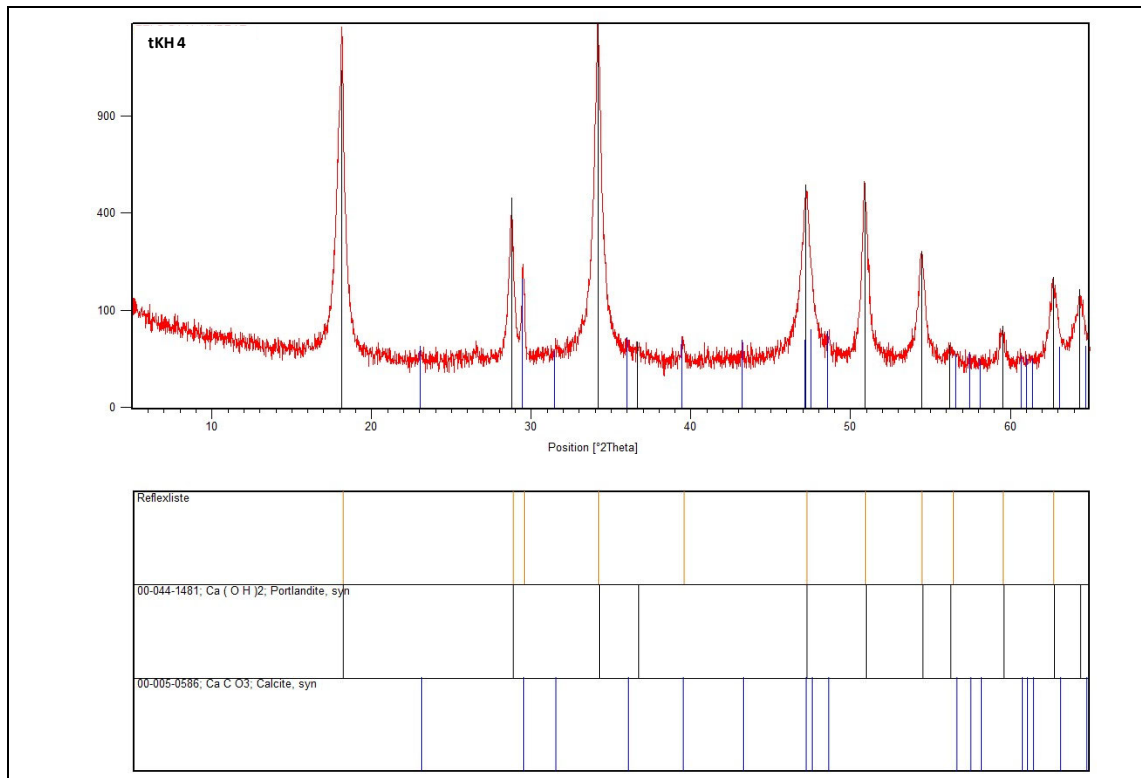


Abb. 8.7: Mineralphasenanalyse von tKH 4

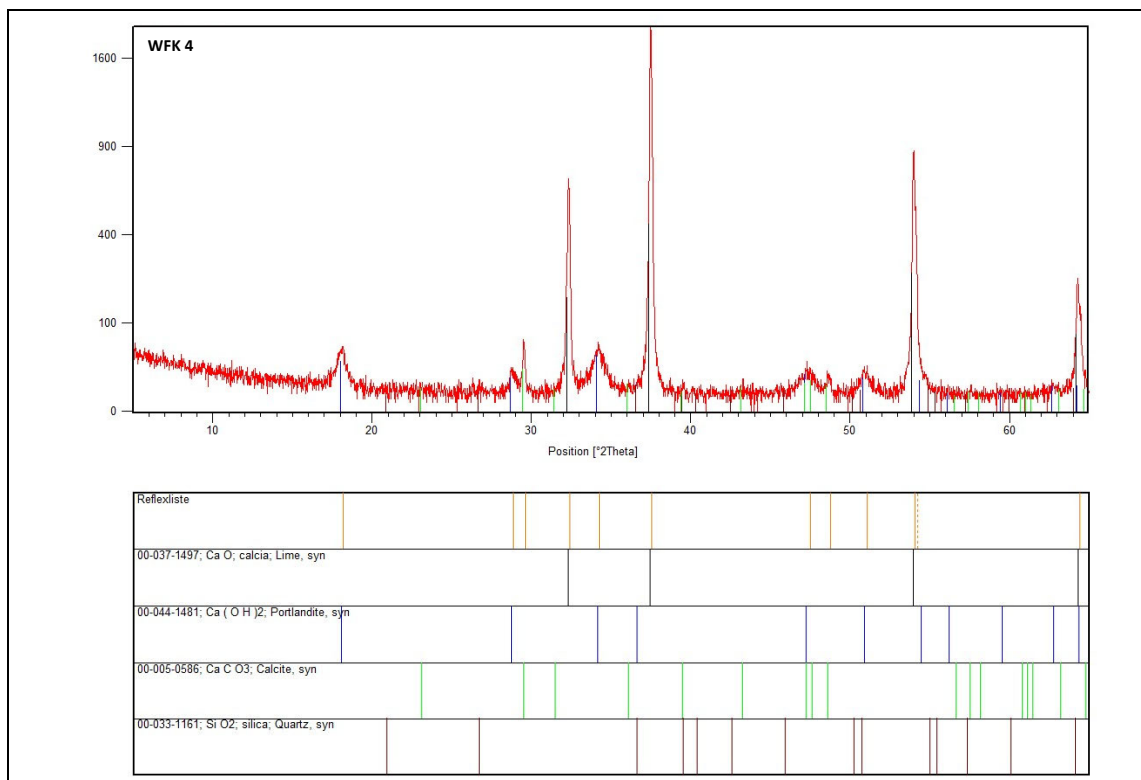


Abb. 8.8: Mineralphasenanalyse von WFK 4

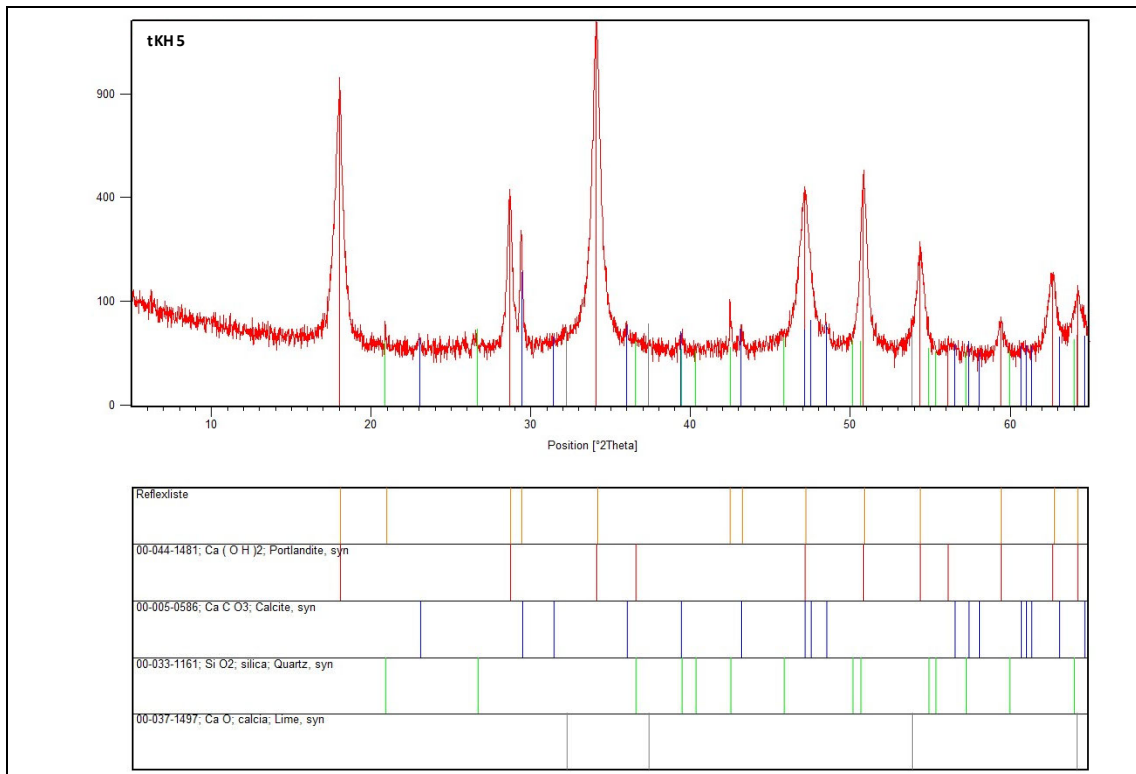


Abb. 8.9: Mineralphasenanalyse von tKH 5

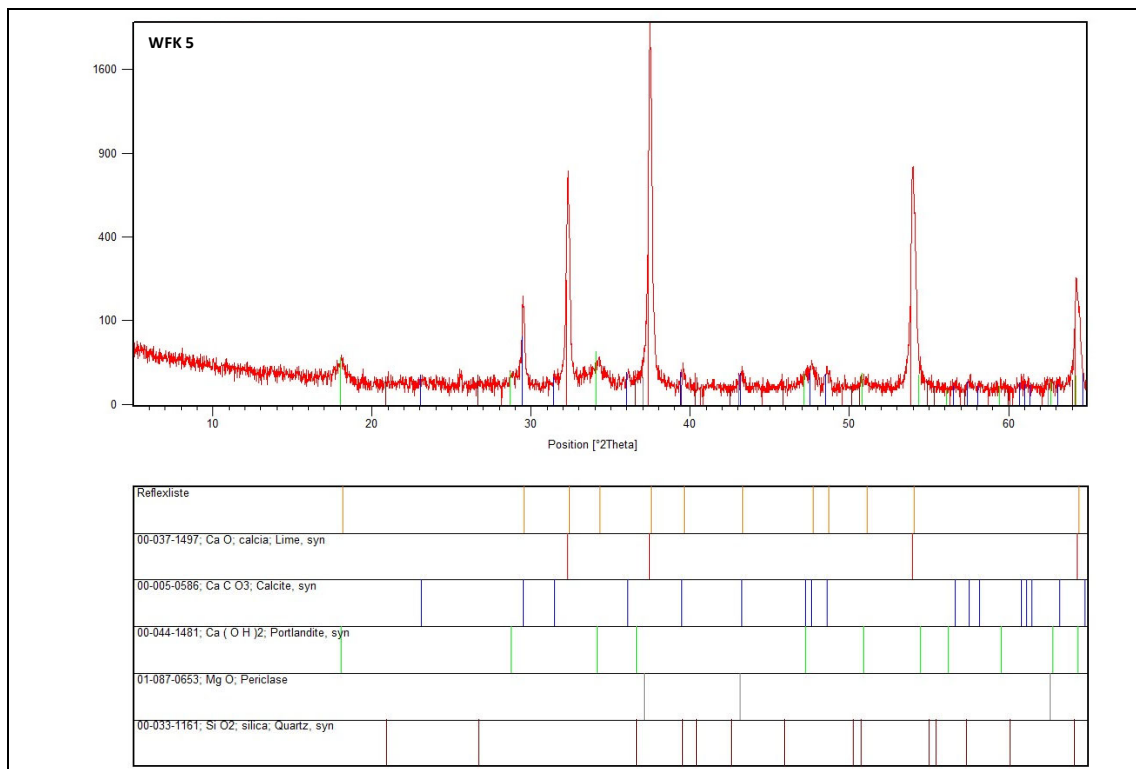


Abb. 8.10: Mineralphasenanalyse von WFK 5

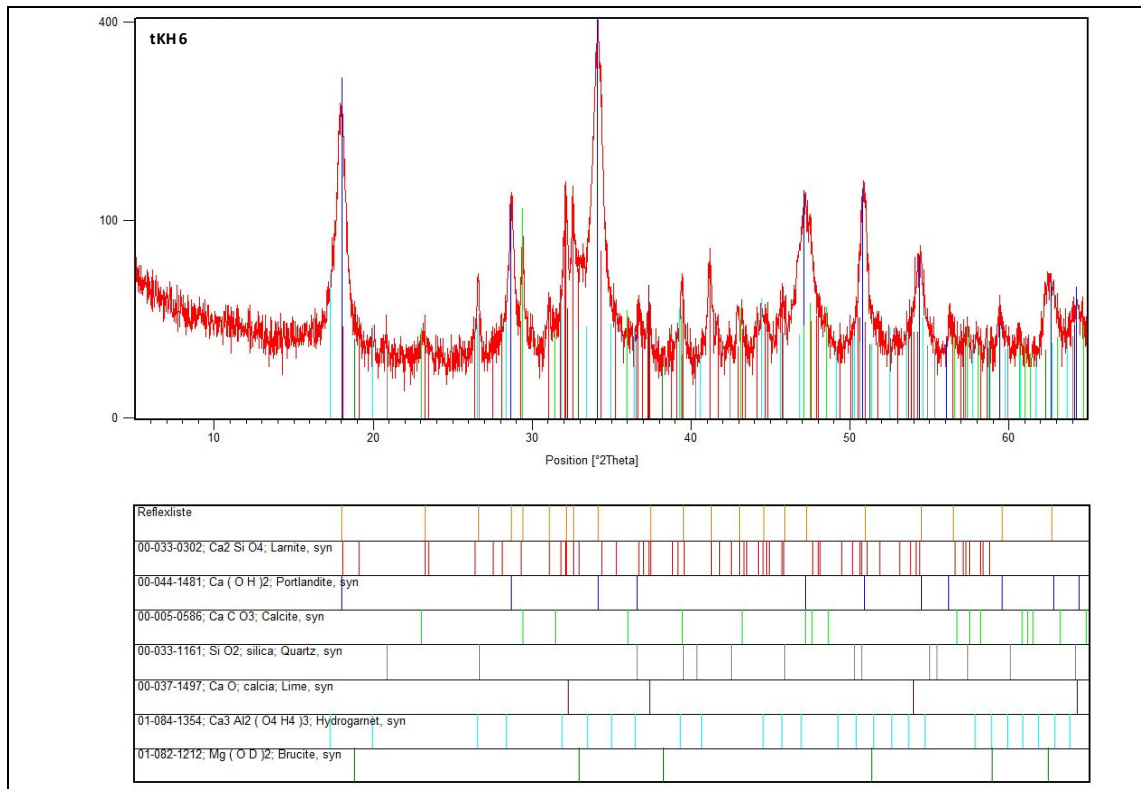


Abb. 8.11: Mineralphasenanalyse von tKH 6

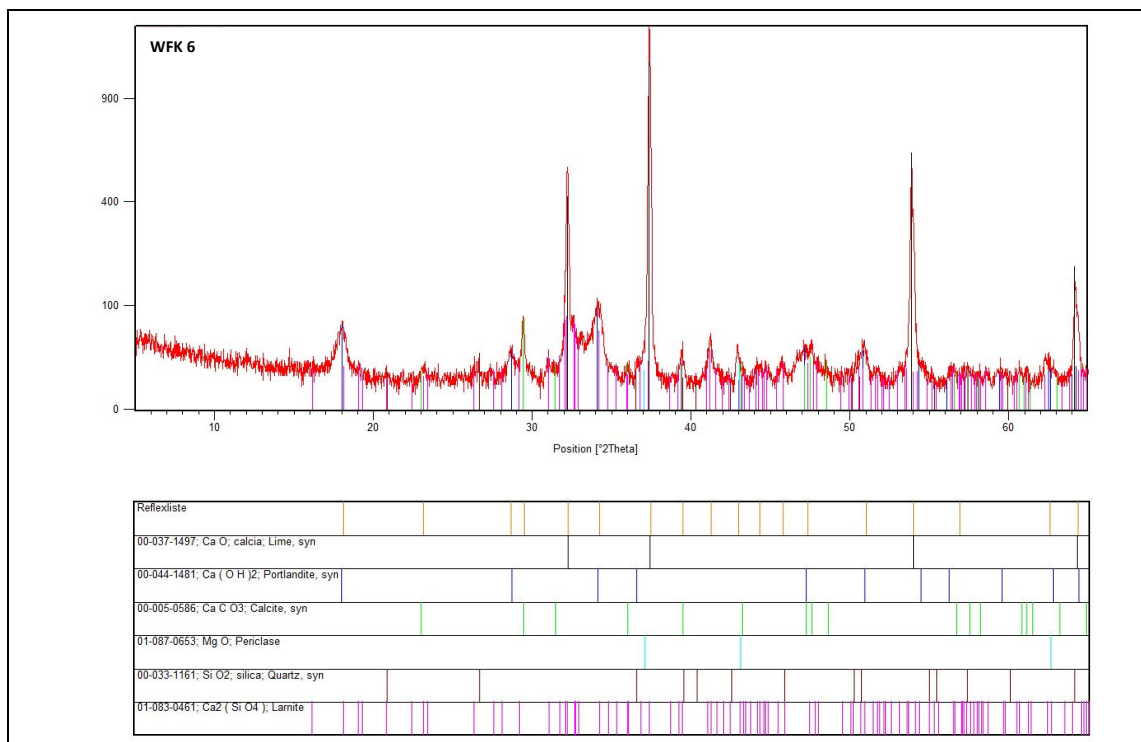


Abb. 8.12: Mineralphasenanalyse von WFK 6

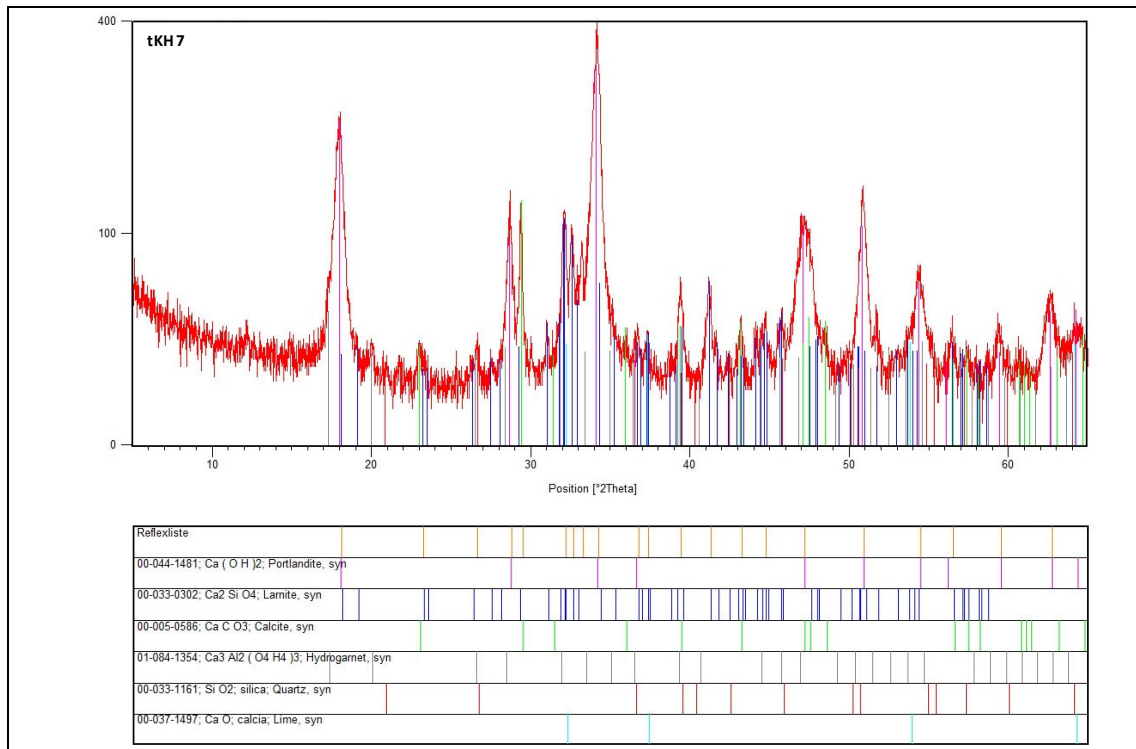


Abb. 8.13: Mineralphasenanalyse von tKH 7

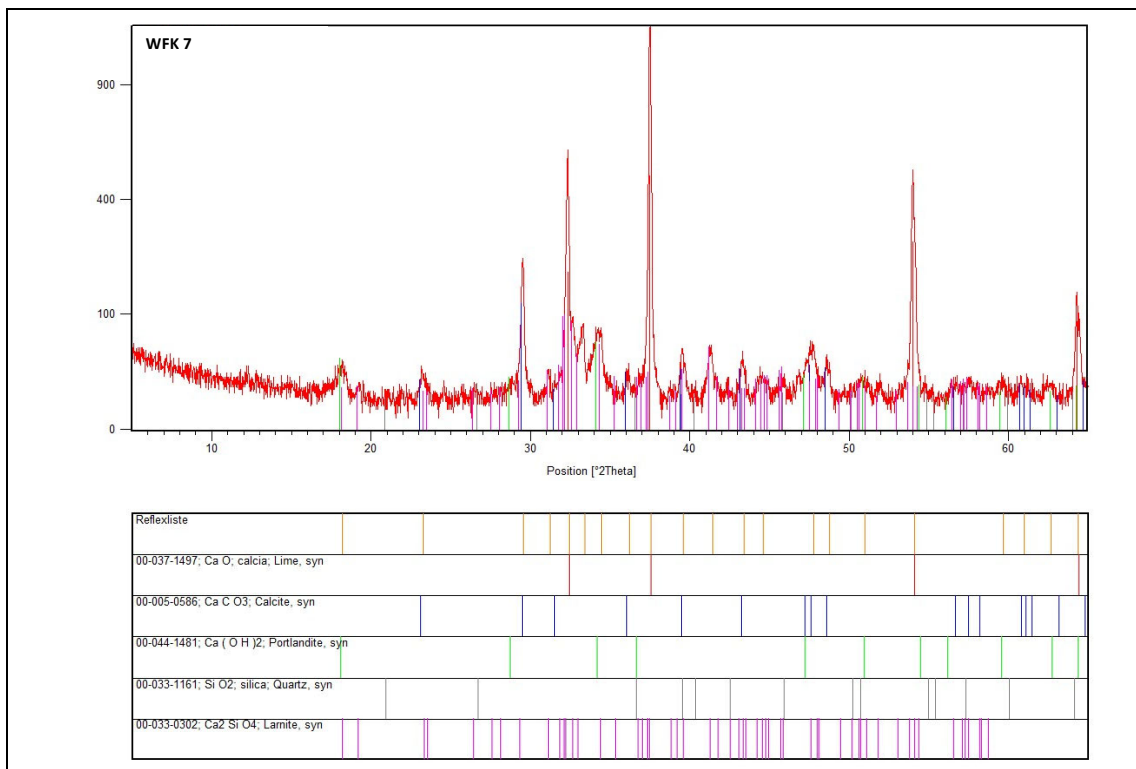


Abb. 8.14: Mineralphasenanalyse von WFK 7

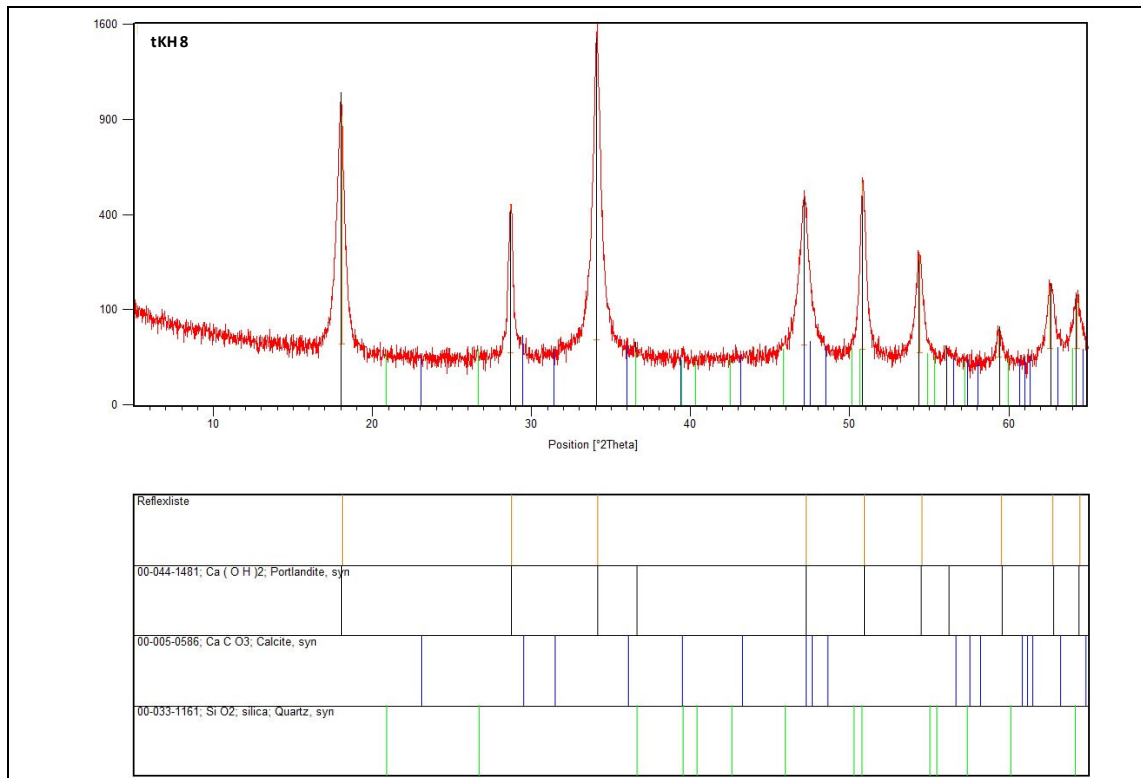


Abb. 8.15: Mineralphasenanalyse von tKH 8

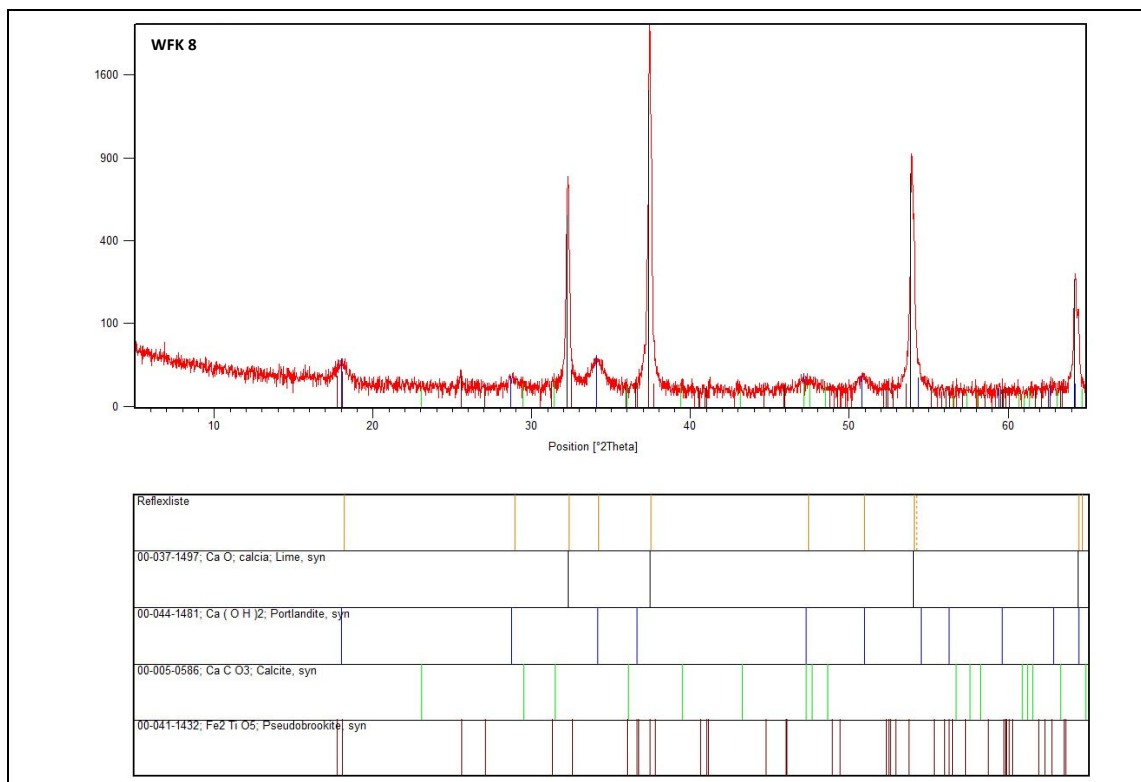


Abb. 8.16: Mineralphasenanalyse von WFK 8

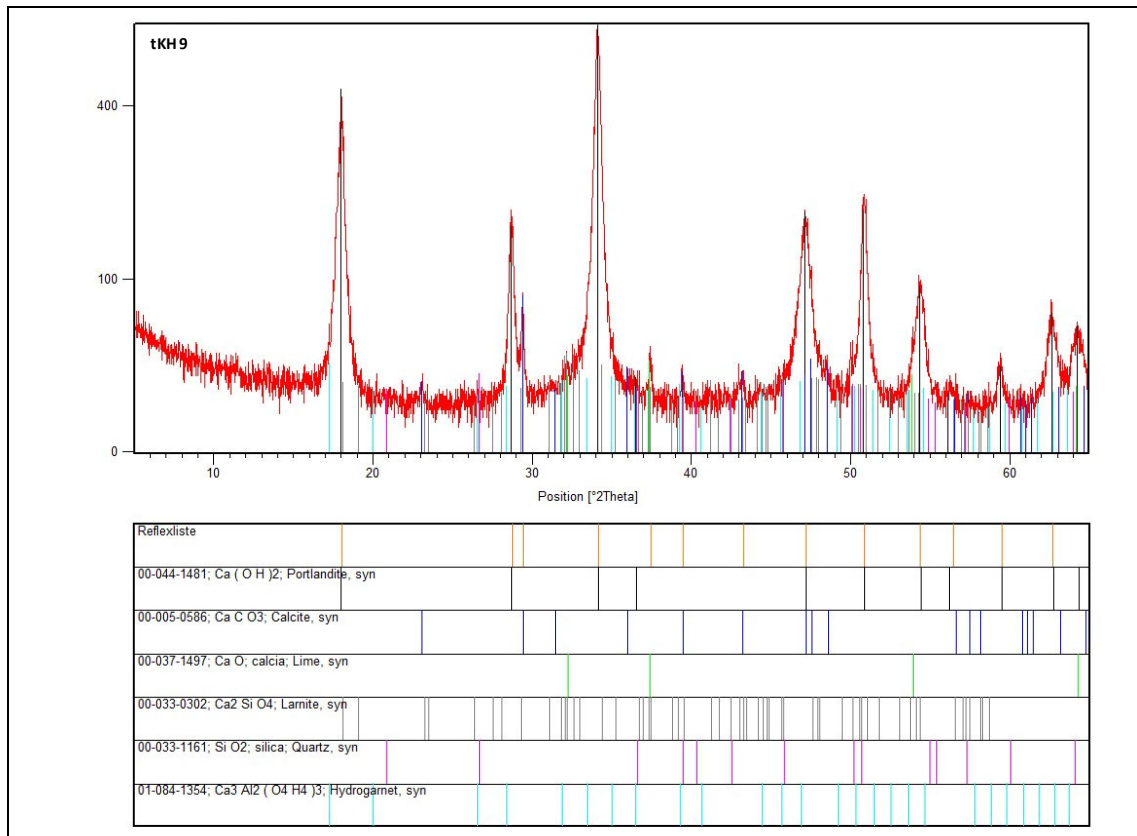


Abb. 8.17: Mineralphasenanalyse von tKH 9

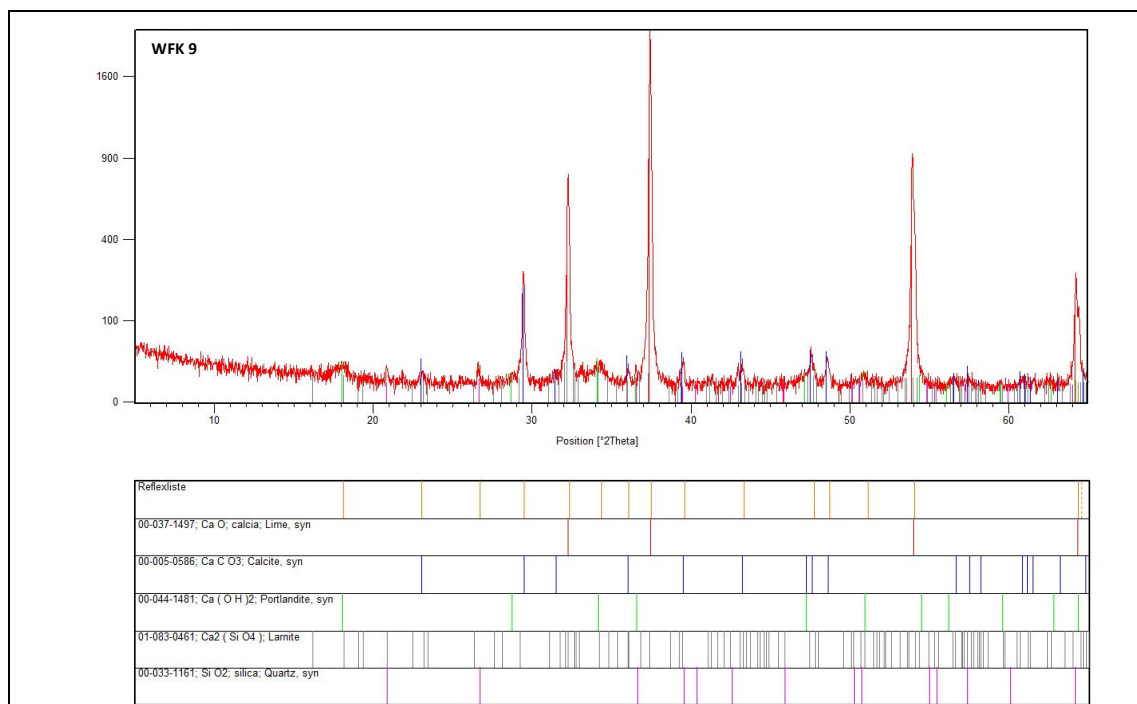


Abb. 8.18: Mineralphasenanalyse von WFK 9

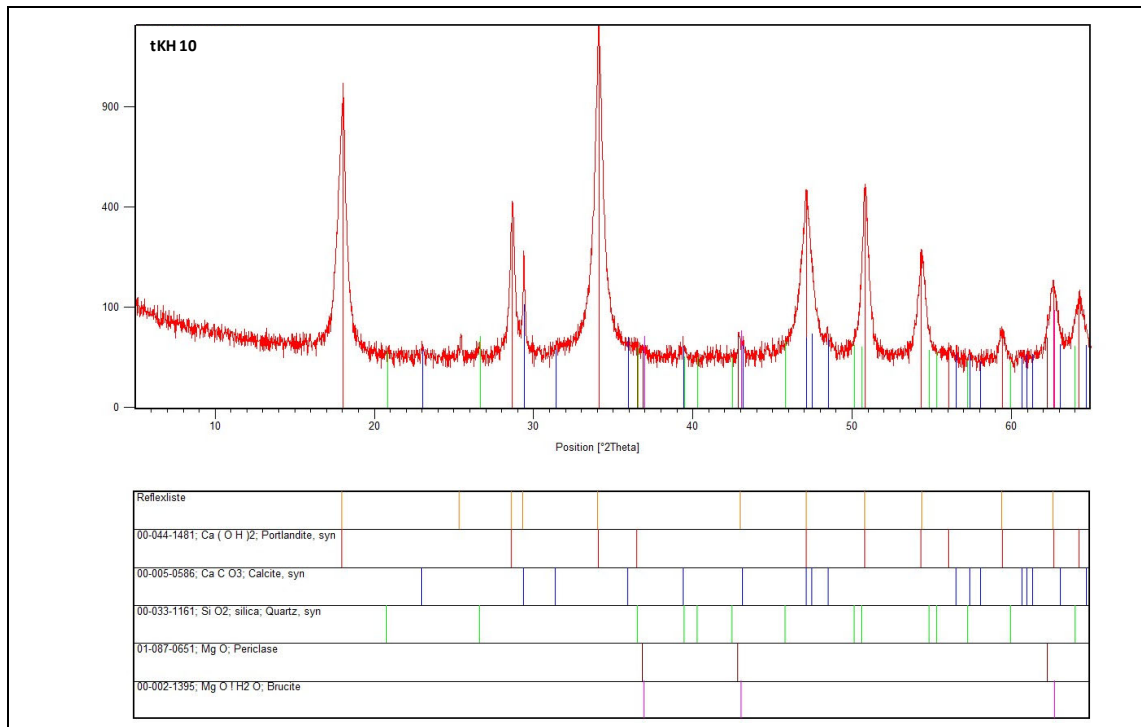


Abb. 8.19: Mineralphasenanalyse von tKH 10

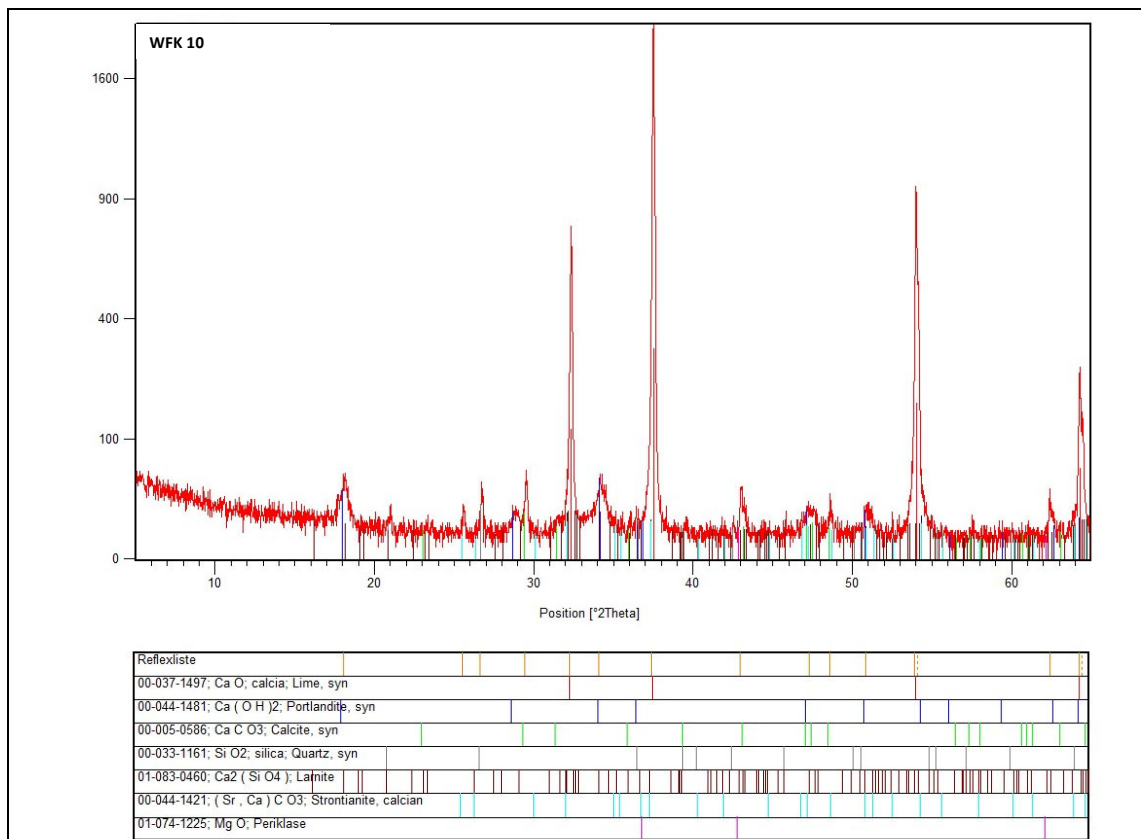


Abb. 8.20: Mineralphasenanalyse von WFK 10

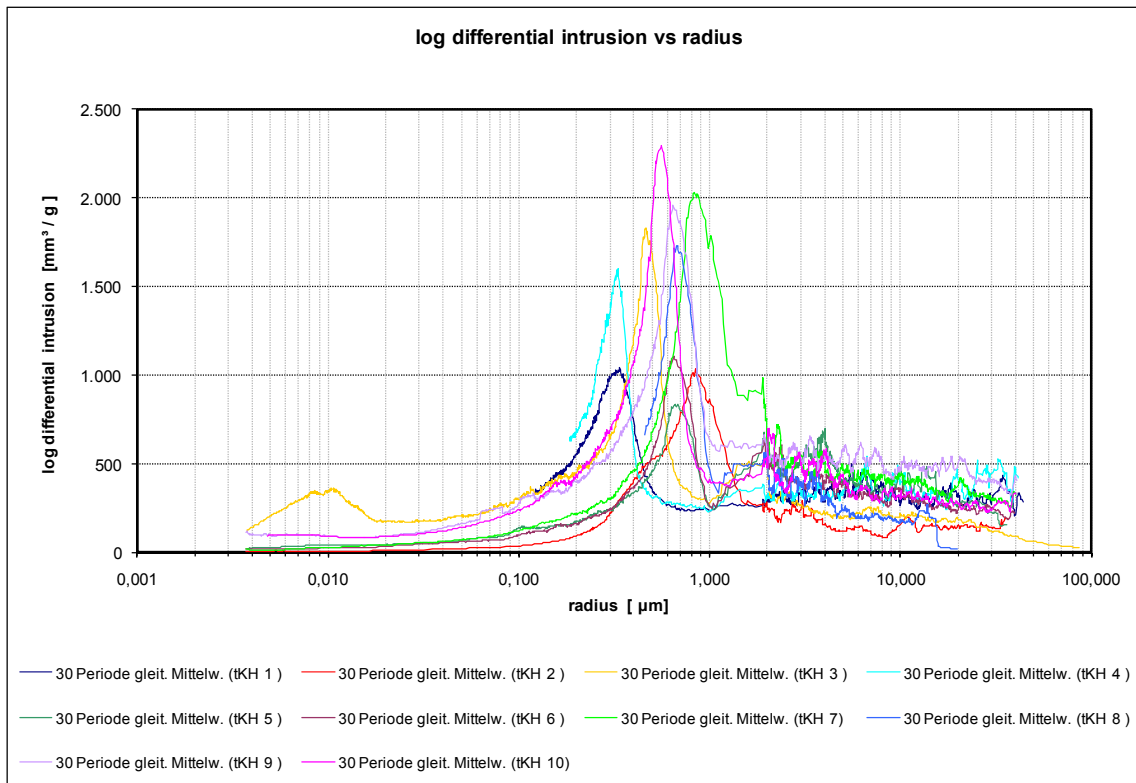


Abb. 8.21: Porenradienverteilung der technisch gelöschten Kalkhydrate

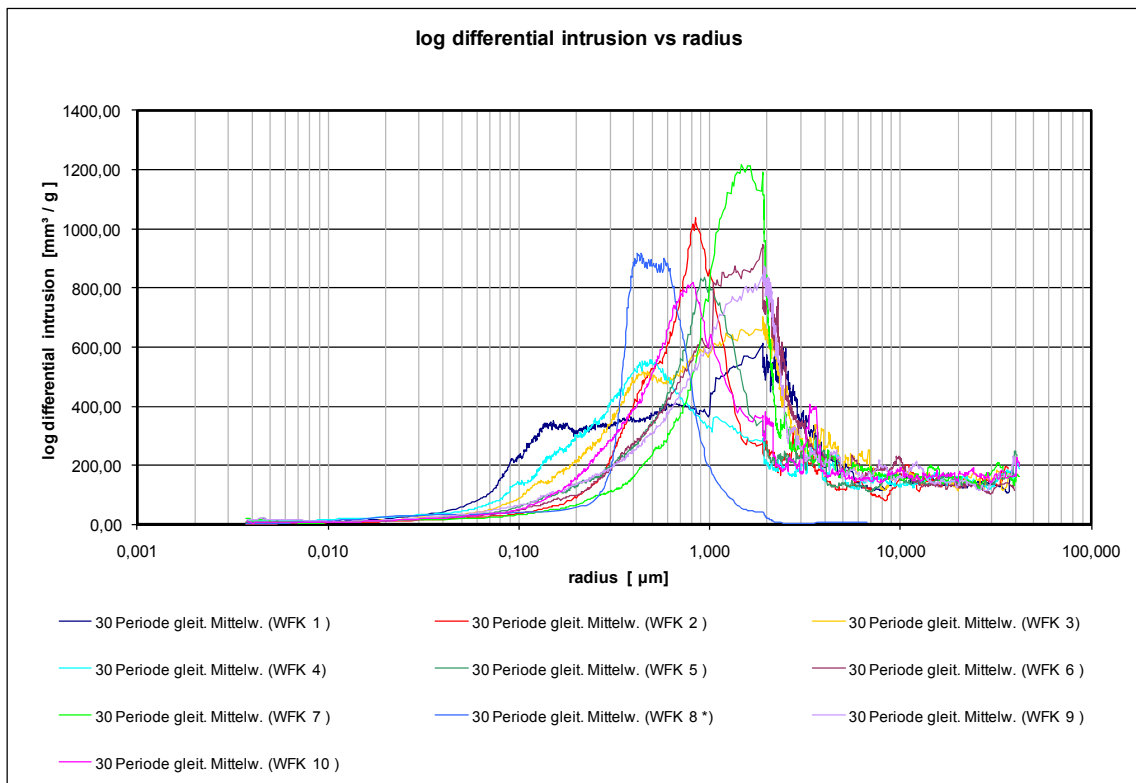


Abb. 8.22: Porenradienverteilung der technisch gelöschten Weißfeinkalke

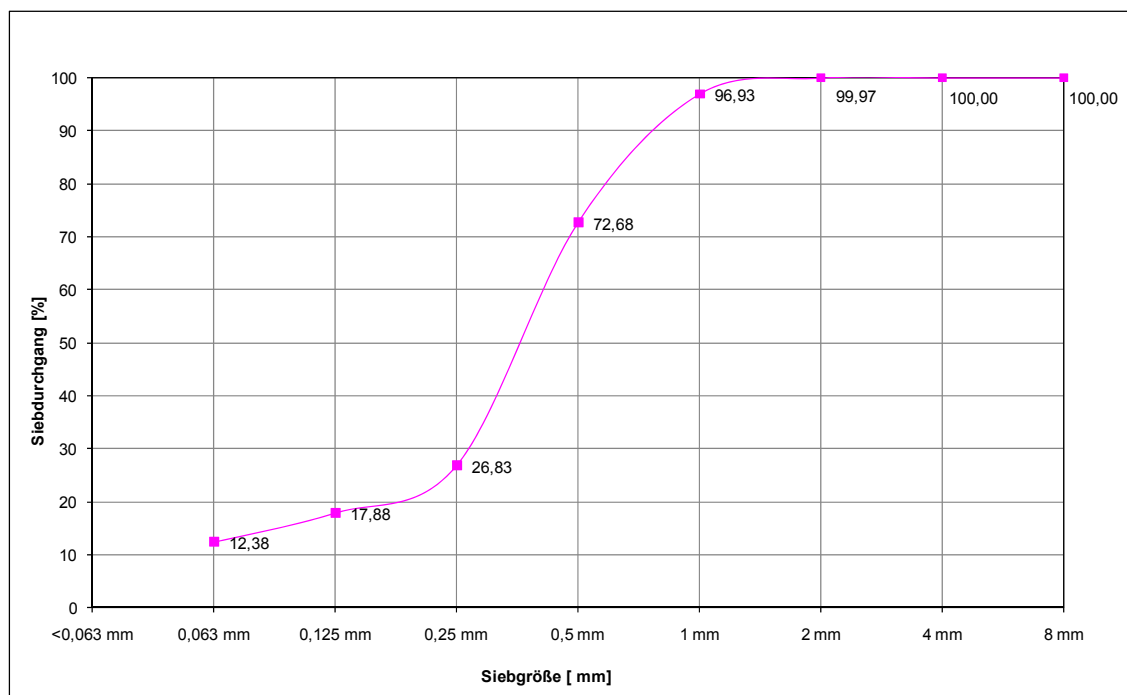


Abb. 8.23: Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung für die Technikumsversuche am Mörtel

### 8.1.5 Abbildungen

Abb. 3.1:	Lösungsweg _____	8
Abb. 4.1:	Emley Plastizimeter _____	12
Abb. 5.1:	Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der tKHs nach 24 h Einsumpfzeit __	18
Abb. 5.2:	Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der tKHs nach 28 Tagen Einsumpfzeit	18
Abb. 5.3:	Durchschnittliche Plastizitätswerte der tKHs im Fall 1 _____	19
Abb. 5.4:	Durchschnittliche Plastizitätswerte der tKHs im Fall 2 _____	20
Abb. 5.5:	Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung bei unterschiedlichen w/b-Verhältnissen _____	21
Abb. 5.6:	Plastizitätswerte mit zugehörigen w/b-Verhältnissen _____	22
Abb. 5.7:	Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der WFK nach 24 h Einsumpfzeit __	23
Abb. 5.8:	Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung der WFK nach 28 d Einsumpfzeit __	23
Abb. 5.9:	Durchschnittliche Plastizitätswerte im Fall 1 _____	24
Abb. 5.10:	Durchschnittliche Plastizitätsentwicklung von WFK 8 _____	25
Abb. 5.11:	Durchschnittliche Plastizitätswerte im Fall 2 _____	25
Abb. 5.12:	Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben tKH 1 bis 5 (CL90)	27
Abb. 5.13:	Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben tKH 8 bis 10 (CL90) und tKH 6 und tKH 9 (CL80) sowie tKH 7 (CL 70) _____	27
Abb. 5.14:	Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben WFK 1 bis 5 (CL90)	28
Abb. 5.15:	Vergleichende Darstellung der Diffraktogramme der Proben WFK 8 bis 10 (CL90) und WFK 6 und WFK 9 (CL80) sowie WFK 7 (CL 70) _____	29
Abb. 5.16:	Glühverlustfreie, chemische Zusammensetzung der Branntkalke, links lineare Darstellung, rechts logarithmische Darstellung zur Hervorhebung der Nebenbestandteile _____	29
Abb. 5.17:	Glühverlustfreie, chemische Zusammensetzung der trockenen Kalkhydrate, links lineare Darstellung, rechts logarithmische Darstellung zur Hervorhebung der Nebenbestandteile _____	30
Abb. 5.18:	Gegenüberstellung der Summe der Nebenbestandteile der Branntkalke und Emley-Werte der nassgelöschten Proben nach 24 h _____	30
Abb. 5.19:	Gegenüberstellung der Summe der Nebenbestandteile der trockenen Hydrate und Emley-Werte der Proben nach 24-stündiger Einsumpfzeit _____	30
Abb. 5.20:	Gesamtenergieeintrag _____	31
Abb. 5.21:	Wärmeflussverlauf _____	32
Abb. 5.22:	Nasslöschkurven der Branntkalke _____	32
Abb. 5.23:	Gegenüberstellung von Reaktivitätsparametern und Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit, links $T_{u80}$ [°C], rechts $t_{u80}$ [min] _____	33

- 
- Abb. 5.24: tKH bzw. gWKH1, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 34
- Abb. 5.25: tKH bzw. gWKH 2, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 34
- Abb. 5.26: tKH bzw. gWKH 3, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 35
- Abb. 5.27: tKH bzw. gWKH 4, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 35
- Abb. 5.28: tKH bzw. gWKH 5, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 35
- Abb. 5.29: tKH bzw. gWKH 6 links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 36
- Abb. 5.30: tKH bzw. gWKH 7, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 36
- Abb. 5.31: tKH bzw. gWKH 8, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 36
- Abb. 5.32: tKH bzw. gWKH 9, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 37
- Abb. 5.33: tKH bzw. gWKH 10, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 37
- Abb. 5.34: WFK bzw. gWFK 1, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 37
- Abb. 5.35: WFK bzw. gWFK 2, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 38
- Abb. 5.36: WFK bzw. gWFK 3, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 38
- Abb. 5.37: WFK bzw. gWFK 4, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h \_\_\_\_\_ 38

---

Abb. 5.38:	WFK bzw. gWFK 5, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h	39
Abb. 5.39:	WFK bzw. gWFK 6 links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h	39
Abb. 5.40:	WFK bzw. gWFK 7, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h	39
Abb. 5.41:	WFK bzw. gWFK 8, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h	40
Abb. 5.42:	WFK bzw. gWFK 9, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h	40
Abb. 5.43:	WFK bzw. gWFK 10, links: Partikelsummen- und Dichteverteilung, rechts: Veränderung der Partikelgrößen-Klassen über die Einsumpfungsdauer, bezogen auf den Kalkteig nach 24 h	40
Abb. 5.44:	Summenverteilungen der trockenen Kalkhydrate	41
Abb. 5.45:	Gegenüberstellung von $U_{90}$ und Emley nach definierter Lagerungsdauer	42
Abb. 5.46:	Gegenüberstellung von $U_{90}$ des trockenen Hydrates und Emley nach definierter Lagerungsdauer	43
Abb. 5.47:	Partikelsummenverteilung der Siebkalke im Vergleich zu den trockenen Hydraten des Untersuchungsprogramms	44
Abb. 5.48:	Änderung der Partikelgrößenverteilung nach längerer Einsumpfzeit	44
Abb. 5.49:	tKH 1, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	46
Abb. 5.50:	tKH 4, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	46
Abb. 5.51:	tKH 3, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	47
Abb. 5.52:	tKH 2, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	47
Abb. 5.53:	tKH 5, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	47
Abb. 5.54:	tKH 7, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	48
Abb. 5.55:	tKH 9, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	48
Abb. 5.56:	WFK 1, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	48
Abb. 5.57:	WFK 2, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	49
Abb. 5.58:	WFK 3, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	49
Abb. 5.59:	WFK 4, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	49
Abb. 5.60:	WFK 5, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	49
Abb. 5.61:	WFK 7, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	50

---

Abb. 5.62:	WFK 9, links Anlieferungszustand, rechts nach Sumpfen	50
Abb. 5.63:	WFK 1 nach Sumpfen, links im ESEM, rechts im REM	50
Abb. 5.64:	WFK 5 nach Sumpfen, links im ESEM, rechts im REM	51
Abb. 5.65:	tKK 1 in Wasser am Tag 0	51
Abb. 5.66:	tKK 10 in Wasser am Tag 0	52
Abb. 5.67:	tKK 1 in Wasser am Tag 7	52
Abb. 5.68:	tKK 10 in Wasser am Tag 7	53
Abb. 5.69:	WFK 1 in Isopropanol	54
Abb. 5.70:	WFK 5 in Isopropanol	54
Abb. 5.71:	WFK 7 in Isopropanol	54
Abb. 5.72:	Porenradienverteilung der technisch gelöschten Kalkhydrate	55
Abb. 5.73:	Porenradienverteilung der technisch gelöschten Kalkhydrate	56
Abb. 5.74:	Porenradienverteilung der Branntkalke	57
Abb. 5.75:	Zusammenhang von Porenradienverteilung und Plastizität	58
Abb. 5.76:	Zusammenhang von Porenradienverteilung und Plastizität bei Plastizitätssteigerung	58
Abb. 5.77:	Rohdichten der trockenen Proben, Pyknometer-Bestimmung	59
Abb. 5.78:	Rohdichten der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit	59
Abb. 5.79:	Gegenüberstellung von Rohdichten der Branntkalke und Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit	59
Abb. 5.80:	Gegenüberstellung von Rohdichten der trockenen Hydrate und Emley-Werten nach 24-stündiger Einsumpfzeit	60
Abb. 5.81:	Gegenüberstellung von Rohdichten und Emley-Werten der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit	60
Abb. 5.82:	Spezifische Oberflächen der trockenen Hydrate	61
Abb. 5.83:	Gegenüberstellung von spezifischen Oberfläche des trockenen Hydrates mit Emley-Werten nach 24 Stunden und 28 Tagen (w/b-Wert 0,9)	61
Abb. 5.84:	Gegenüberstellung von spezifischen Oberfläche des trockenen Hydrates mit Emley-Werten nach 28 (w/b-Wert 1,5) und nach 6 Monaten	61
Abb. 5.85:	Ergiebigkeit der Branntkalke	62
Abb. 5.86:	Gegenüberstellung von Ergiebigkeit der Branntkalke und Emley-Werten nach 24 h	62
Abb. 5.87:	Schüttdichte der Hydrate	63
Abb. 5.88:	Gegenüberstellung von Schüttdichte der Hydrate und Emley-Werten nach 24 h	63
Abb. 5.89:	Wasserrückhaltevermögen der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit	64

---

Abb. 5.90:	Gegenüberstellung von Wasserrückhaltevermögen und Emley-Werten der Hydrate nach 24 h Einsumpfzeit	64
Abb. 5.91:	Ausbreitmaß der Hydrate nach 24 h Einsumpfzeit	64
Abb. 5.92:	Gegenüberstellung von Ausbreitmaß und Emley-Werten der Hydrate nach 24-stündiger Einsumpfzeit	65
Abb. 5.93:	Anmischen, Aufbringen und Abziehen der Mörtelmischungen per Hand	66
Abb. 5.94:	Feuchtigkeitsabgabe an Wand	66
Abb. 5.95:	Fehlende Haftung	66
Abb. 5.96:	Mörtel aus tKH 7 nach Abziehen	67
Abb. 5.97:	Ausfransen der Mörtelränder	67
Abb. 5.98:	Mörtel aus tKH 3 nach Abziehen	68
Abb. 8.1:	Mineralphasenanalyse von tKH 1	86
Abb. 8.2:	Mineralphasenanalyse von WFK 1	86
Abb. 8.3:	Mineralphasenanalyse von tKH 2	87
Abb. 8.4:	Mineralphasenanalyse von WFK 2	87
Abb. 8.5:	Mineralphasenanalyse von tKH 3	88
Abb. 8.6:	Mineralphasenanalyse von WFK 3	88
Abb. 8.7:	Mineralphasenanalyse von tKH 4	89
Abb. 8.8:	Mineralphasenanalyse von WFK 4	89
Abb. 8.9:	Mineralphasenanalyse von tKH 5	90
Abb. 8.10:	Mineralphasenanalyse von WFK 5	90
Abb. 8.11:	Mineralphasenanalyse von tKH 6	91
Abb. 8.12:	Mineralphasenanalyse von WFK 6	91
Abb. 8.13:	Mineralphasenanalyse von tKH 7	92
Abb. 8.14:	Mineralphasenanalyse von WFK 7	92
Abb. 8.15:	Mineralphasenanalyse von tKH 8	93
Abb. 8.16:	Mineralphasenanalyse von WFK 8	93
Abb. 8.17:	Mineralphasenanalyse von tKH 9	94
Abb. 8.18:	Mineralphasenanalyse von WFK 9	94
Abb. 8.19:	Mineralphasenanalyse von tKH 10	95
Abb. 8.20:	Mineralphasenanalyse von WFK 10	95
Abb. 8.21:	Porenradienverteilung der technisch gelöschten Kalkhydrate	96
Abb. 8.22:	Porenradienverteilung der technisch gelöschten Weißfeinkalke	96
Abb. 8.23:	Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung für die Technikumsversuche am Mörtel	97

### 8.1.6 Tabellen

Tab. 4.1:	Bestimmungsparameter und Prüfvorschriften _____	10
Tab. 4.2:	Messparameter der Röntgendiffraktometrie Lasergranulometrie _____	13
Tab. 4.3:	Messparameter der Lasergranulometrie _____	14
Tab. 4.4:	Messparameter der Lasergranulometrie _____	15
Tab. 5.1:	Plastizitätswerte mit zugehörigen w/b-Verhältnissen _____	21
Tab. 5.2:	Enthaltene Mineralphasen (tKH) _____	26
Tab. 5.3:	Enthaltene Mineralphasen (tKH) _____	28
Tab. 5.4:	Medianwerte der anzahlbasierten Durchmesser-Verteilung _____	45
Tab. 5.5:	Medianwerte der Rundheit _____	45
Tab. 5.6:	Messwerte und Vorgaben für untersuchte Mörtel _____	65
Tab. 8.1:	Chemische Parameter der Branntkalke _____	73
Tab. 8.2:	Chemische Parameter der Kalkhydrate _____	74
Tab. 8.3:	Physikalische Parameter der Branntkalke _____	74
Tab. 8.4:	Physikalische Parameter der Kalkhydrate _____	75
Tab. 8.5:	Emley-Werte der Branntkalke _____	75
Tab. 8.6:	Emley-Werte der Kalkhydrate _____	75
Tab. 8.7:	Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate _____	76
Tab. 8.8:	Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate _____	77
Tab. 8.9:	Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate _____	78
Tab. 8.10:	Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate _____	79
Tab. 8.11:	Partikelgrößenverteilungen der Kalkhydrate _____	80
Tab. 8.12:	Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke _____	81
Tab. 8.13:	Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke _____	82
Tab. 8.14:	Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke _____	83
Tab. 8.15:	Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke _____	84
Tab. 8.16:	Partikelgrößenverteilungen der Branntkalke _____	85