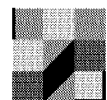


Wolfgang Eden, Bernhard Middendorf

**Entwicklung eines Recycling-
Mauersteins unter Verwendung von
Abbruchmaterial und Baurestmassen
und Anwendung der Kalksandstein-
Technologie**



F 2712

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8008-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

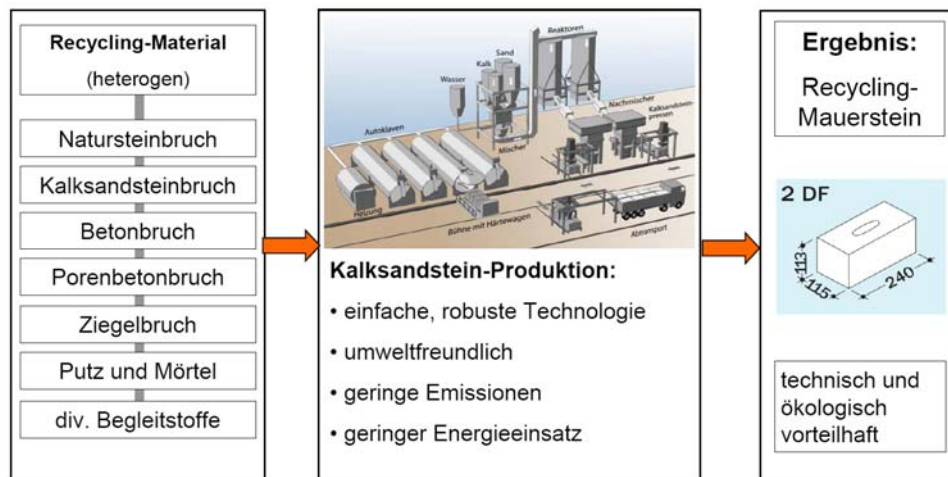
www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND EV

SCHLUSSBERICHT

Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie



Berichtersteller:

Dipl.-Ing. Wolfgang Eden

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf

Technische Universität Dortmund - Fakultät Bauwesen

Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens

unter Mitarbeit von:

Jens Bäsell, Heino Gercke, Sabine Liebehenz und Nadine Stolze

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Dipl.-Ing. André Glaubitt, Technische Universität Dortmund

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG	5
2	EINLEITUNG	6
2.1	Ziele des Forschungsvorhabens	6
2.2	Begründung des Forschungsvorhabens	7
2.3	Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben	8
2.4	Forschungsansatz	9
2.5	Erwarteter Nutzen durch das Forschungsvorhaben	10
2.6	Möglichkeiten für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis	10
3	VERSUCHSPROGRAMM	11
3.1	Aufbau des Untersuchungsprogramms	11
3.2	Untersuchungen an den Rohstoffen	17
3.3	Herstellung der Kalksandstein-Prüfkörper im Labor	18
3.4	Untersuchungen an den Kalksandstein-Prüfkörpern	19
3.4.1	Rohlingsstandfestigkeit	19
3.4.2	Steinrohddichte	19
3.4.3	Steindruckfestigkeit und zentrische Steinzugfestigkeit	19
3.4.4	Steinbiegezugfestigkeit	23
3.4.5	Frostwiderstandsfähigkeit	23
3.4.6	Wasseraufnahme	23
3.4.7	Thermische Analyse (DTA und TG)	23
3.4.8	Schwinddehnung	24
3.4.9	Wärmeleitfähigkeit	24
3.4.10	Bezugsfeuchtegehalt	24
3.4.11	Quecksilberdruckporosimetrie	25
3.4.12	Ausblühungen und Verfärbungen	25
3.4.13	Mineralogische Analyse	25
3.4.14	Umweltanalyse der Recycling-Mauersteine	30
3.5	Werksversuche	32
4	AUSWERTUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	33
4.1	Allgemeines	33
4.2	Eigenschaftswerte der Rohstoffe	33
4.2.1	Physikalische Eigenschaftswerte	33
4.2.1.1	Sande	33
4.2.1.2	Recycling-Zuschläge	34
4.2.2	Mineralogische Ergebnisse	41
4.2.3	Kalk	44
4.2.4	Wasser	44
4.3	Eigenschaftswerte der Kalksandstein-Prüfkörper	45
4.3.1	Basisserien ohne Zugabe von Recycling-Material	45
4.3.2	Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material - sortenrein	47
4.3.3	Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material - verunreinigt	50
4.3.4	Zugabe von Ziegel-Recycling-Material	53
4.3.5	Zugabe von Porenbeton-Recycling-Material	56
4.3.6	Zugabe von Beton-Recycling-Material	58

4.3.7	Zugabe von Naturstein-Recycling-Material	61
4.3.8	Zugabe von Recycling-Material-Mischungen	64
4.4	Ergebnisse der Werksversuche	65
4.5	Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen am iBMB	67
4.6	Ergebnisse der mineralogischen Analyse der Recyclingstein-Prüfkörper	68
4.7	Ergebnisse der Umweltanalyse der Recycling-Mauersteine	72
5	LITERATUR	74
6.	ANHANG	76
	ANHANG A: Tabellen und Bilder	
	ANHANG B. Liste der Veröffentlichung der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV	

Danksagung:

Für die gute Unterstützung bei der Durchführung der Versuche zur Erzeugung des Recycling-Bruchmaterials gilt unser ausdrücklicher Dank:

Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Hartmut Schön,
Brockmann Recycling GmbH, Nützen,

Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski,
TerraTextura Baustoff- und Vegetations-Technologie GmbH, Soest.



Unseren ausdrücklichen Dank sprechen wir an dieser Stelle ebenfalls dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn für die gute Unterstützung dieses Projektes und die finanzielle Förderung über die Forschungsinitiative "ZukunftBau" aus.



Des Weiteren gilt unser Dank den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses:

Frau Ute Rustemeyer, Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Josef-Christian Buhl,
Institut für Mineralogie der Universität Hannover,

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf,
Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens der Technischen Universität Dortmund,

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter,
Institut für Nichtmetallische Werkstoffe an der Technischen Universität Clausthal.

1 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dieser Arbeit wurde ein neuer Recycling-Mauerstein entwickelt, dessen Herstellung unter Verwendung von Original-Mauerwerk-Abbruchmaterial und unter Einsatz der Kalksandstein-Technologie erfolgt. Bei den auf diese Weise hergestellten Mauersteinen handelt es sich nicht um Kalksandsteine, sondern um sogenannte Recycling-Mauersteine. Die wichtigsten Ergebnisse sind im Folgenden zusammengestellt:

- Die Herstellung von Recycling-Mauersteinen unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie ist grundsätzlich möglich.
- Jedes der im Rahmen der hier durchgeführten Versuche verwendete RC-Material verhält sich gemäß seinen spezifischen Eigenschaften (Korngrößenverteilung, Wasseranspruch, chemisch-mineralische Zusammensetzung,...) unterschiedlich bei der Herstellung von Recycling-Mauersteinen und ebenfalls hinsichtlich seines Einflusses auf deren Eigenschaftswerte.
- Bei Zugabe von Recycling-Sanden aus Mauerwerk-Abbruchmaterial treten in den meisten Fällen gegenüber den Nullserien (ohne Recycling-Material) Einbußen bei den Qualitätskennwerten auf. So werden beispielsweise in den allermeisten Fällen geringere Steinrohdichten und geringere Steindruckfestigkeiten erzielt.
- Holz, Tapetenreste und andere organische Materialien sind vorher auszusortieren.
- Die Qualitätseinbußen steigen im Allgemeinen mit zunehmender Zugabemenge an RC-Material an.
- Bei Verwendung der gröberen Fraktion von RC-Materialien (2/4 mm) sind größere Einbußen als bei den feineren RC-Materialien (0/2 mm) zu verzeichnen. In der Folge ist eine Einschränkung auf die feine Fraktion zu empfehlen.
- Die Verwendung von Kalksandstein-, Ziegel-, Beton- und Naturstein-Recycling-Material ist grundsätzlich möglich.
- Die Zugabe von Porenbeton-Recycling-Material kann nicht generell empfohlen werden. Sehr geringe Mengen an Porenbeton mit einer sehr feinen Fraktion (z.B. 0/0,1 mm) können dagegen sogar zu Druckfestigkeitssteigerungen an Recycling-Mauersteinen führen [13].
- Mit verschiedenen produktionstechnischen Maßnahmen kann den Qualitätseinbußen in den meisten Fällen entgegengewirkt werden.
 - Steigerung des Verdichtungsdrucks
 - Erhöhung der CaO-Dosis
 - Verlängerung der Härtezeiten
- Diese unter Verwendung von dem o.g. üblichen Mauerwerk-Recycling-Material hergestellten Mauersteine sind - ebenso wie handelsübliche Kalksandstein-Produkte - hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit erwartungsgemäß als ungefährlich einzustufen. Eine gesundheitliche Gefährdung durch die auf diese Weise hergestellten Recycling-Mauersteine ist aus Sicht der Autoren ausgeschlossen. Weitergehende Umweltanalysen sind nicht erforderlich.

Die Anwendung der im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Grundlagenerkenntnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken ist in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung werksspezifischer Gegebenheiten durch eingehende Voruntersuchungen im Kalksandsteinwerk und im Labor zu überprüfen. Das Prüf- und Forschungsinstitut der Kalksandstein-Dienstleistung GmbH leistet bei dieser Arbeit Unterstützung.

2 EINLEITUNG

2.1 Ziele des Forschungsvorhabens

Die Forschungsaufgabe besteht in der Entwicklung eines Recycling-Mauersteins, der unter Einsatz von mineralischem Abbruchmaterial und Baurestmassen und unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie hergestellt wird.

Die übergeordneten Ziele dieses Forschungsvorhabens sind nachfolgend zusammengestellt:

1. Weiterverwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen auf einem höherwertigem Verwertungsniveau
2. Reduzierung der Deponierung von Bauabfällen
3. Schließung von Materialkreisläufen im Baubereich
4. Nachhaltige, das heißt ökologische und wirtschaftliche Verwendung von Recycling-Materialien

Aus diesen übergeordneten Zielen ergeben sich für die gestellte Forschungsaufgabe folgende Einzelziele:

- a. Entwicklung eines neuen Recycling-Materials für Mauersteine
- b. Anwendung der Kalksandstein-Technologie
- c. Einsatz eines hohen Anteils an Sekundärrohstoffen
- d. Einfache Herstelltechnologie bei geringem Energieeinsatz
- e. Verwendung des Recycling-Mauersteins insbesondere auch im Do-It-Yourself-Bereich

Die Kalksandsteinindustrie konzentriert seit langen Jahren umfangreiche Forschungsaktivitäten auf den Bereich Recycling. So ist beispielsweise die Weiterverwendung von sortenreinem Kalksandstein-Bruchmaterial bei der erneuten Kalksandstein-Produktion oder dessen Verwendung im Beton- sowie Erd-, Straßen- und Wegebau bereits teilweise erkundet worden.

Die produktionstechnischen Grundlagen für die Erzeugung eines Recycling-Mauersteins, der auf der Basis der Kalksandstein-Technologie aus verschiedenen Abbruchmaterialien hergestellt werden kann, sind jedoch noch nicht erforscht worden. Insofern ist das Forschungsprojekt als ein weiterer wichtiger Baustein in der Kalksandstein-Recyclingforschung zu sehen.

2.2 Begründung des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Projektes steht im Einklang mit den gesetzten Forschungsschwerpunkten der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. Im Rahmen des nachhaltigen und gesunden Bauens wird mit der Entwicklung eines Recycling-Mauersteins ein neues und wirtschaftlich effizientes Material auf hohem Qualitätsniveau geschaffen. Vor dem Hintergrund der Lebenszyklusbetrachtung von Baustoffen kann ein wichtiger Recyclingkreislauf geschlossen werden. Darüber hinaus kann eine Schonung wertvoller Rohstoffressourcen erreicht werden. Für eine umweltfreundliche Herstellung von Baumaterialien ist somit die Wiederverwendung von gebrauchten Materialien von großer Bedeutung.

Im Bauwesen fallen in Deutschland jährlich rd. 285 bis 300 Mio. t mineralische Abfälle an. Ca. 70 Mio. t davon sind mineralische Bauabfälle, die zurzeit weitgehend auf niedriger Verwertungsstufe weiterverwendet oder deponiert werden. Ca. 45 Mio. t sind Bauschutt (Beton, Ziegel, Kalksandsteine, Porenbetonsteine, Mörtel, Gips) [1, 2, 3, 4].

Die Recycling-Inputströme sind nicht nur wegen der Rückgänge des Bauvolumens, sondern auch wegen der zunehmend schwieriger werdenden gesetzlichen Regelungen im Umweltbereich rückläufig [1]. Durch die sich momentan abzeichnende das Recycling behindernde Entwicklung im Bereich des Grundwasserschutzes (GAP-Papier und LAWA-Geringfügigkeitsschwellenwerte) ist zu erwarten, dass es zusätzlich zu beträchtlichen Verschiebungen von Bauabfällen von der Verwertung hin zu einer eigentlich politisch unerwünschten Deponierung kommen kann.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz definiert gebrauchte mineralische Baustoffe als Abfälle zur Verwertung. Auch vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, neue Verwertungswege aufzuzeigen.

Bei der Aufbereitung mineralischen Bauschutts durch Zerkleinerung entstehen Splitte und Brechsande mit unterschiedlichen Korndurchmessern, die vollständig wiederverwendet werden können [5]. Aus Brechsanden lassen sich Halbzeuge, wie z. B. Mauersteine mittels einer Autoklavbehandlung herstellen [2]. Insbesondere entstehen in den Aufbereitungsanlagen je nach Brechertyp 20-40 M.-% Brechsand < 2 mm [6].

Die Kalksandstein-Technologie ist durch ihre relative Einfachheit und Robustheit gekennzeichnet und bietet sich für die Herstellung von Recycling-Mauersteinen an. Handelsübliche Kalksandsteine nach EN 772 Teil 1 [7] sind Mauersteine aus den natürlichen Rohstoffen Kalk, Sand und Wasser. Die Herstellung erfolgt durch mechanisches Verpressen erdfeuchter Rohstoffmischungen und deren Härtung in Autoklaven bei Temperaturen von rd. $T = 200\text{ °C}$.

Andere Untersuchungen [8, 9] haben darüber hinaus gezeigt, dass durch die Anwendung der Kalksandstein-Technologie (Autoklavhärtung) bestimmte Elemente in die Calciumsilikathydrat-Bindemittel fest eingebaut werden können.

Aufgrund der in den 90er Jahren entstandenen Überkapazitäten in den derzeit rd 100 deutschen Kalksandstein-Werken ist ein ausreichendes Produktionspotenzial vorhanden. Diese Kapazitäten können mit einer Serienproduktion von Recycling-Mauersteinen ausgenutzt werden und für die anwendenden KS-Werke zu einer höheren und damit wirtschaftlicheren Auslastung der Produktionsanlage führen.

Durch die Produktion und Anwendung eines einfach zu handhabenden und kostengünstigen Recycling-Produktes mit einer hohen ökologischen Qualität kann der deutschen Bauwirtschaft ein nachhaltiger Impuls in Richtung ökologisches Bauen gegeben werden.

2.3 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben

Die nachfolgende Beschreibung des Standes der Technik beim Kalksandstein-Recycling basiert auf einer Literaturanalyse unter Einbeziehung der Literatur der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, aus der Bauforschungsdatenbank des Fraunhofer Informationszentrums RAUM und BAU (IRB) und den Mitteilungsblättern der Arbeitsgemeinschaft für Bauforschung (BBR) sowie dem Forschungsprojekt Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM).

Ausgangsbasis für dieses Forschungsprojekt sind die Erkenntnisse aus den an der TU München und der Ruhruniversität Bochum sowie bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV bislang durchgeführten Projekten zum Themenbereich Kalksandstein-Recycling. Mit diesen Vorhaben wurden bereits grundsätzliche Erkenntnisse über die Recyclingfähigkeit von Kalksandstein-Bruchmaterialien gesammelt. Dabei stellte sich als Hauptergebnis heraus, dass für die erneute Erzeugung von normkonformen Kalksandsteinen nach EN 771-2 [7] für Ingenieurmauerwerk mit hohen Druckfestigkeiten lediglich reines, das heißt von Verunreinigungen quasi freies Kalksandstein-Bruchmaterial, verwendet werden kann [10, 11, 12, 13]. Manche RC-Stoffe (Beton- und Porenbetonmehle) haben sogar positive Einflüsse auf die technische Steinqualität gehabt. Anhaftende Reste anderer Baustoffe und Fremdstoffe (anorganische und organische Stoffe) führen zu einer Reduzierung der Steindruckfestigkeit und zu anderen Einbußen bei den qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerten von Kalksandsteinen.

Einbußen bei den Festigkeiten kann mit Hilfe von gezielten, jedoch teilweise kostspieligen produktionstechnischen und auch ökologisch unvorteilhaften Gegenmaßnahmen (wie z. B. einer Erhöhung der Kalkdosis oder einer Verlängerung der Autoklavierungszeit) entgegengewirkt werden. Hier liegen jedoch betriebswirtschaftliche und ökologische Grenzen vor (höhere Kalkkosten, höherer Primärenergieverbrauch).

Mit einem weiteren Vorhaben [14] wurden neue Ansatzpunkte für die Verwendung von Kalksandstein-Recycling-Materialien aufgezeigt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Ausgangsmaterialien unterschiedlichen Verunreinigungsgrades (sortenreines Material, Kalksandsteine aus dem selektiven Rückbau sowie Material aus dem konventionellen Abbruch) und verschiedene Zerkleinerungsaggregate (Prall-, Hammer-, Walzen- und Backenbrecher) berücksichtigt. Im Ergebnis werden grundsätzlich mehrere neue Recyclingwege für Kalksandstein-Recycling-Materialien aufgezeigt:

1. Verwendung von Kalksandstein-Bruchmaterial für die erneute Kalksandsteinproduktion
2. Verwendung von Kalksandstein-Bruchmaterial für den Betonbau
3. Verwendung von Kalksandstein-Bruchmaterial für den Erd-, Straßen- und Wegebau

Eine interessante Basis für diese Untersuchungen sind ebenfalls die aktuellen Untersuchungen von KROPP und HLAWATSCH et al [15], unter anderem für eine Technologie für bestimmte Abfallstoffe und Feinstanteile, die zeigen, dass die Herstellung von autoklavgehärteten Baustoffen unter Verwendung von Betonbruch mit seinem Gehalt an freiem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ grundsätzlich möglich ist und wirtschaftlich günstig sein kann.

Für die Errichtung von Gebäuden mit vergleichsweise geringeren Anforderungen an die Mauerwerksdruckfestigkeit (z. B. ein- und zweigeschossiger Wohnungsbau) können in manchen Fällen Mauerstein-Produkte mit Festigkeiten unterhalb der des handelsüblichen Kalksandsteinmaterials zur Anwendung kommen.

2.4 Forschungsansatz

Das Forschungsziel soll durch eine systematisch aufgebaute Erkundung der optimalen Herstellparameter von Recycling-Mauersteinen im Technikum und auch in praxi erreicht werden.

Durch die Herstellung und Untersuchung von Mauerstein-Prüfkörpern in einem handelsüblichen Kleinformat (Normalformat) wird insbesondere die Anwendung des Recycling-Mauersteins im Do-It-Yourself-Bereich möglich.

Der Recycling-Mauerstein soll hinsichtlich seiner technischen Eigenschaftswerte für die Anwendung im Wohnungsbau ausgelegt werden. Die Steindruckfestigkeit soll entsprechend in der Größenordnung von $\beta_{D,St} = 5$ bis 10 N/mm^2 liegen. Alle anderen qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerte (Rohdichte, Schwinddehnung, Dauerhaftigkeit, Umweltfreundlichkeit, Freiheit von Ausblühungen und Verfärbungen, ...) müssen den Normanforderungen normkonformer Mauersteine genügen.

Im Technikum der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV und anschließend in einem Kalksandsteinwerk wurden praxisgerechte Rezepturen (Kalkdosis, Zugabemenge an verschiedenen mineralischen Abbruchmaterialien und Baureststoffen) und Herstellparameter (Verpressdruck, Härtedauer und -temperatur) erprobt.

2.5 Erwarteter Nutzen durch das Forschungsvorhaben

Die erwarteten Untersuchungsergebnisse sollen die optimalen Herstellparameter für die Erzeugung von Recycling-Mauersteinen aufzeigen und direkt in der betrieblichen Praxis der Kalksandsteinwerke umsetzbar sein.

Die Unternehmen der Kalksandsteinindustrie werden angeregt, ihre Produktpalette um einen umweltfreundlichen und wirtschaftlich herstellbaren Recycling-Mauerstein zu erweitern.

Darüber hinaus wird dem Do-It-Yourself-Bereich ein einfach zu verwendendes ökologisches und auch kostengünstiges Produkt zur Verfügung gestellt, woraus sich entsprechende Impulse für diesen Sektor ergeben.

2.6 Möglichkeiten für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Eine schnelle Umsetzung in die Praxis ist wünschenswert. Die Forschungsergebnisse werden den rd. 100 deutschen Kalksandsteinwerken neben dem Forschungsbericht direkt in Form einer praxisorientierten Handlungsanleitung zur Verfügung gestellt.

Auf den Kalksandstein-Meisterseminaren (im Abstand von 2 Jahren veranstaltetes Praxisseminar für die Meister und Betriebsleiter aus allen deutschen Kalksandsteinwerken) werden eine spezielle Schulung zu diesem Thema durchgeführt.

Die neu entwickelten Recycling-Mauersteine können über die etablierten Vertriebswege der Kalksandsteinindustrie direkt mitgeliefert werden. Die Forschungsergebnisse werden veröffentlicht und fließen darüber hinaus in die akademische Lehre ein.

3. VERSUCHSPROGRAMM

3.1 Aufbau des Untersuchungsprogramms

Ein allgemeingültiges Entwicklungsmodell für die technologische Erzeugung von Mauerwerksprodukten liegt nicht vor und ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften, den verfahrenstechnischen Herstellparametern und den Eigenschaftswerten von Mauersteinen in absehbarer Zukunft auch nicht zu erwarten. Folglich ist bei der Entwicklung des Recycling-Mauersteins eine stufenweise Vorgehensweise erforderlich, das heißt ein schrittweises Herantasten an die Optimalrezepturen. Der Ablauf wird für jede Art von Abbruchmaterial zwar spezifisch unterschiedlich sein. Der grundsätzliche Ablauf wird jedoch - wie im Folgenden dargestellt - prinzipiell ähnlich bleiben:

1. Den Kalksand-Rohmischungen werden Abbruchmaterialien unterschiedlicher Menge und Beschaffenheit zugegeben.
2. Aus diesen Mischungen werden unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie Prüfkörper erzeugt und nach baustofftechnischen Gesichtspunkten untersucht.
3. Nach Vorliegen der qualitätskennzeichnenden Eigenschaftskennwerte werden die Herstellparameter schrittweise in Richtung der erwarteten Verbesserung der Steineigenschaften verändert.

Folgende Herstellparameter haben einen wesentlichen Einfluss auf die Steinqualität, sind in der betrieblichen Praxis der Kalksandstein-Produktion veränderbar und sind deshalb stufenweise zu variieren:

- a. Kalkdosis ($\text{CaO} = 5 / 7 / 9 \text{ M.-%}$)
- b. Zugabemenge an Abbruchmaterial ($25 / 50 / 75 \text{ M.-%}$)
- c. Kornfraktion des Abbruchmaterials ($0/2 \text{ mm}$ und $2/4 \text{ mm}$)
- d. Pressdruck beim Verdichten der Rohlinge ($\sigma_p = 10 / 15 \text{ N/mm}^2$)
- e. Härtedauer bei Autoklavieren ($t_h = 1-4-1 \text{ h}$ und $1-6-1 \text{ h}$)
- f. Härtetemperatur bzw. -druck ($T_h = 194/203 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $p_e = 14 / 16 \text{ bar}$)

Im Folgenden ist die Aufgliederung der einzelnen Arbeitsschritte detailliert wiedergegeben:

1. Beschaffung von repräsentativen Original-Abbruchmaterialien und Baureststoffen: Mauerziegel, Porenbetonsteine, Betonsteine, Natursteine, Betonbruchmaterial, Kalksandsteine
2. Chemisch-mineralogische Charakterisierung der Ausgangsmaterialien: Quarzsande, Kalke, Abbruchmaterialien und Baureststoffe (Phasenbestand, Sieblinie, Verunreinigungsgrad)
3. Herstellung von Recycling-Mauersteinen im Technikum der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV unter Anwendung der KS-Technologie bei stufenweiser Änderung der Herstellparameter mit dem Ziel der Eigenschaftsoptimierung. Im Einzelnen umfasst die Herstellung zwei Einzelschritte:
 - 3.1 Brechen des Abbruchmaterials auf die Zielkorngrößen
 - 3.2 Erzeugung von Labor-Prüfkörpern (Dosieren, Mischen, Pressen, Härten)
4. Untersuchung der Laborprüfkörper hinsichtlich der Einhaltung der Normanforderungen handelsüblicher Mauersteine für den Wohnungsbau, Bestimmung der Materialkennwerte (Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV und Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig)
 - 4.1 Festigkeit (Druck-, Biegezug-, Zug-, Verbundfestigkeit Stein-Mörtel)
 - 4.2 Gefügeeigenschaften (Rohdichte, Porosität und Porenradienverteilung, Wasseraufnahme)
 - 4.3 Verformungseigenschaften (E-Modul, Schwinddehnung, Quellverhalten, Temperatureausdehnung)
 - 4.4 Chemisch-mineralogische Eigenschaften (röntgenographische Phasenanalyse, Licht- und Rasterelektronenmikroskopie)
5. Praxisversuch in einem Kalksandsteinwerk: Herstellung von Recycling-Mauersteinen unter Ansatz der optimierten Rezepturen. Die im Kalksandsteinwerk erzeugten (technisch und wirtschaftlich) optimierten Prüfkörperserien werden schließlich folgenden Untersuchungen unterzogen:
 - 5.1 Einhaltung der technischen Anforderungen:
 - 5.1.1 Festigkeit, Verformung
Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV,
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
 - 5.1.2 Mineralogische Bemusterung und Gefügebeschreibung
Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens,
Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf

5.2 Bestimmung von Umweltparametern:

5.2.1 VOC-Emissionen nach dem AgBB-Schema
Messungen durch Eurofins A/S, Hamburg

5.2.2 Auslaugung nach dem DEV-S4-Verfahren
Messungen durch das Chemische Labor Dr. E. Wessling, Hannover

5.3 Einhaltung der Gebrauchssicherheit der Produktionsanlagen, Vermeidung von Härtekesselkorrosionen (kontinuierliche laufende chemische Analyse und Begutachtung durch den TÜV Nord e.V.)

Zum Untersuchungsabschnitt A: Rohstoffanalysen

Mit dem ersten Untersuchungsabschnitt wurden die Recycling-Materialien analysiert. Die einzelnen Recycling-Materialien wurden von der Brockmann Recycling GmbH, Nützen, bezogen. Pro Sorte wurde eine Menge von ca. 1 t hergestellt. Vor ihrer Einbeziehung in das Untersuchungsprogramm wurden sie einer physikalischen und chemisch-mineralogischen Analyse unterzogen.

Zum Untersuchungsabschnitt B: Herstellung und Untersuchung der Recycling-Mauersteine

Mit diesem Abschnitt wurde die Wirkung der verschiedenen Recyclingzuschläge auf die Qualitätskennwerte der Kalksandsteine untersucht. Unter Zugabe der einzelnen RC-Zuschläge zur Rohmischung wurden bei Variation der Herstellparameter im Labor und im KS-Werk Prüfkörper hergestellt und einer baustofftechnischen Untersuchung unterzogen. Die Variation der Herstellparameter ist erforderlich, um produktionstechnische Ausgleichsmöglichkeiten auf die jeweiligen eventuellen Negativwirkungen der Recycling-Zuschläge aufzuzeigen. Die zu variierenden produktionstechnischen Herstellparameter werden im Folgenden näher erläutert:

Korngrößenverteilung des Produktionssandes:

Die Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes hat wegen der damit einhergehenden Größe der reaktiven Oberfläche einen entscheidenden Einfluss auf das Reaktionsgeschehen bei der Hydrothermalhärtung und ist deshalb zu variieren. Als Basismaterial ist ein für die herkömmliche Kalksandstein-Produktion repräsentativer Mittelsand ausgewählt worden. Dieser Sand besteht fast ausschließlich aus Quarz und ist bereits ebenfalls im Rahmen anderer abgeschlossener Forschungsvorhaben zum Einsatz gekommen, so dass in der Konsequenz eine vorteilhafte Verknüpfung der angestrebten Untersuchungsergebnisse mit denen älterer Vorhaben im Sinne der geplanten Modellierung einfach möglich ist.

Kalkdosis:

Die Steigerung der Kalkdosis hat aufgrund der daraus resultierenden zunehmenden Alkalität der Rohmischung ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Reaktionsgeschehen bei der Hydrothermalhärtung. Deshalb wurde die Kalkdosis für die Untersuchungen innerhalb folgender Bandbreite variiert:

- CaO = 5 M.-%
- CaO = 7 M.-% (Hauptserien)
- CaO = 9 M.-%

Pressfeuchte:

In den Kalksandsteinwerken ist der Feuchtigkeitsgehalt der Rohmischung aufgrund verschiedener Rohstoffeigenschaften und verfahrenstechnischer Möglichkeiten und Gegebenheiten unterschiedlich einzustellen. Da die Pressfeuchte einen maßgeblichen Einfluss auf alle weiteren Produktionsschritte hat, wurde sie im Rahmen von Vorversuchen innerhalb einer praxisüblichen Bandbreite (sandspezifisch) stufenweise erhöht und dann zwecks größtmöglicher Vergleichbarkeit der Serien untereinander einheitlich für alle verschiedenen Rohmischungen zu 5 M.-% festgelegt und punktuell variiert:

- $U_{p1} = 4$ M.-%
- $U_{p3} = 5$ M.-%
- $U_{p2} = 6$ M.-%
- $U_{p4} = 7$ M.-%

Pressdruck:

Ebenfalls hat der Verdichtungsgrad der Rohlinge einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Schwinddehnung und Festigkeitswerte. Um die damit verbundenen Eigenschaftsänderungen der Kalksandsteine zu erfassen, wurde bei der Herstellung der Prüfkörper der Pressdruck wie folgt variiert:

- $\sigma_{p1} = 10 \text{ N/mm}^2$
- $\sigma_{p2} = 15 \text{ N/mm}^2$ (Hauptserien)

Härteparameter:

Die Dauer der Haltephase hat einen großen Einfluss auf das Reaktionsgeschehen und soll deshalb in zwei Stufen variiert werden. Ansonsten werden für sämtliche Serien die nachfolgend aufgeführten Standardbedingungen angesetzt:

- Dauer der Aufheizphase: $t_a = 1 \text{ h}$
- Dauer der Haltephase: $t_h = 4$ (Hauptserien) bzw. 6 h
- Dauer der Entspannungsphase: $t_e = 1 \text{ h}$
- Härtedruck: $p_e = 16 \text{ bar}$
- Härtetemperatur: $T_h = 203 \text{ }^\circ\text{C}$

Zugabe der Recycling-Zuschläge:

Wie oben erläutert, sind bei der Zugabe der verschiedenen Begleitminerale die im Folgenden beschriebenen Einflussgrößen zu berücksichtigen:

- **Art des Recycling-Zuschlags:**
 - Kalksandstein-Recycling-Material (sortenrein)
 - Kalksandstein-Recycling-Material (mit Verunreinigungen)
 - Ziegel-Recycling-Material
 - Porenbeton-Recycling-Material
 - Beton-Recycling-Material
 - Naturstein-Recycling-Material
- **Korngrößenverteilung der Minerale:**

Die Größe der Oberfläche der am Reaktionsgeschehen teilnehmenden Recycling-Materialien hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Beschaffenheit der Bindemittelphasen [10]. Für die Fraktionierung wurden die Minerale bei der Brockmann Recycling GmbH, Nützen, mit einem Prallbrecher zerkleinert. Folgende zwei abgestufte Fraktionen wurden durchgängig berücksichtigt:

 - Fraktion 0/2 mm
 - Fraktion 2/4 mm

- **Zugabemenge:**
Drei Dosisstufen wurden berücksichtigt.
 - geringe Dosis: ca. 25 M.-%
 - mittlere Dosis: ca. 50 M.-%
 - maximale Dosis: ca. 75 M.-%

Untersuchungsgang:

Die vollständige Kombination aller o.g. Varianten würde zu einer nicht durchführbar hohen Anzahl an Einzelserien führen. Um den experimentellen Umfang auf eine sinnvolle Anzahl an Serien beschränken zu können, werden durch Laborvorversuche die Haupteinflussgrößen herausgearbeitet. Der geplante Untersuchungsgang ist deshalb iterativ aufgebaut. Folgende Herstellparameter werden gezielt punktuell variiert:

- **Stufe 1: Nullserien ohne Zugabe von Recycling-Zuschlägen:**

Für die Nullserien ohne Zugabe von RC-Zuschläge werden ausschließlich die Herstellparameter Kalkdosis, Pressfeuchte, Pressdruck und Dauer der Haltephase variiert.

- **Stufe 2: Zugabe der verschiedenen Recycling-Zuschläge zur Kalksand-Rohmischung:**

Mit diesem Arbeitsschritt werden der Kalksand-Rohmischung die verschiedenen RC-Zuschläge stufenweise einzeln zugegeben und deren Auswirkungen auf die Steineigenenschaftswerte untersucht. Dabei werden für jeden RC-Zuschlag die Fraktion und die Zugabemenge variiert.

- **Stufe 3: Kombination der Recycling-Zuschläge:**

Die Auswirkung der Kombination der einzelnen Recycling-Zuschläge auf die Steineigenschaften ist deshalb ebenfalls zu untersuchen.

- **Stufe 4: Werksversuche:**

Zur Übertragung der Laborergebnisse in die betriebliche Produktionspraxis werden in der vierten Stufe Versuche in einem Kalksandsteinwerk durchgeführt.

3.2 Untersuchungen an den Rohstoffen

Sande und Recycling-Zuschläge:

Am Sand und an den Recycling-Zuschlägen wurden folgenden Untersuchungen durchgeführt:

Physikalische Analyse:

- Ermittlung der Korngrößenverteilung
- Ermittlung der Schüttdichte
- Ermittlung der spezifischen Oberfläche nach FISCHER
- Ermittlung der abschlämmbaren Bestandteile
- NaOH-Auszug zur Abschätzung evtl. vorhandener Huminstoffe nach POST

Mineralogische Analyse (Technische Universität Dortmund):

Materialien:

1. Kalksandstein-Bruchmaterial sortenrein (KSBs)
2. Kalksandstein-Bruchmaterial verunreinigt (KSBv)
3. Porenbeton-Bruchmaterial (PB)
4. Ziegel-Bruchmaterial (ZB)
5. Naturstein-Bruchmaterial (NB)
6. Beton-Bruchmaterial (BB)

Feuchtegehalt:

Die Bestimmung des Feuchtegehalts der Bruchmaterialien erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1097-1. Die Proben wurden bei 40°C (anstatt 105 °C) im Trockenschrank bis zur Massekonstanz getrocknet, wodurch der Gesamtwassergehalt (Oberflächenwasser, Porenwasser) verdunstet. Die Probe wurde vor und nach der Trocknung gewogen und somit der Wassergehalt ermittelt (M.-%, bezogen auf die Trockenmasse).

Korngrößenverteilung:

Die Korngrößenverteilung der Bruchmaterialien wurde nach DIN EN 933-1 bestimmt. Das Bruchmaterial wird durch Siebung in einzelne Kornklassen zerlegt, welche gewogen und in Masseprozent [M.-%] angegeben werden. Für die Sieblinie wird der Siebdurchgang über die Maschenweite der Siebe aufgetragen.

Röntgenpulverdiffraktometrie:

Die jeweilige Gesamtprobe ist für die Untersuchungen bei einer Temperatur von 40 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet worden. Von der jeweiligen getrockneten Gesamtprobe ist eine Siebanalyse nach DIN EN 933-1 durchgeführt worden. Die einzelnen Siebfractionen sind zur Bestimmung des Phasengehalts röntgenographisch mittels Pulverdiffraktometrie analysiert worden. Dazu wurde jeweils eine charakteristische Teilprobe (ca. 5 g) jeder einzelnen Fraktion auf eine Korngröße $\leq 40 \mu\text{m}$ aufgemahlen. Der Phasenbestand ist aus den Peakhöhen und der Peakhalbwertsbreite semiquantitativ abgeschätzt worden. Die röntgenographische Phasenanalyse ist mit den im Folgenden angegebenen Parametern durchgeführt worden:

○ Geräte Typ	Philips PW1710
○ Scan-Achse	Gonio
○ Startposition [°2θ]	5,00
○ Endposition [°2θ]	65,00
○ Schrittweite [°2θ]	0,02
○ Schrittzeit [s]	1,0
○ Scan Modus	kontinuierlich
○ Anodenmaterial	Cu
○ K-Alpha1 [Å]	1,54060
○ K-Alpha2 [Å]	1,54443
○ K-Beta [Å]	1,39225
○ Generatoreinstellung	30 mA, 40 kV

Kalk:

Die chemische Zusammensetzung des verwendeten Kalkes CL 90 wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Die Reaktionsfähigkeit des Kalkes wurde mittels Nasslöschkurvenverfahren nach DIN EN 459-2 ermittelt.

3.3 Herstellung der Kalksandstein-Prüfkörper im Labor

Um den Einfluss der Recycling-Zuschläge auf die Recycling-Mauersteine möglichst vollständig und praxisnah zu erfassen, wurden KS-Laborprüfkörper des Formates NF mit den Abmessungen $l \times b \times h = 240 \times 115 \times 71 \text{ mm}^3$ hergestellt und deren physikalisch-mechanischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften untersucht.

Für die Herstellung der Prüfkörper wurden die Rohstoffkomponenten mit einem Labormischer intensiv vermengt (Mischzeit: 5 Minuten). Aus den Mischungen wurden unter Verwendung einer zweiseitig verdichtenden Hydraulik-Kalksandsteinpresse pro Serie jeweils 25 Prüfkörper (Hauptserien) bzw. 5 Prüfkörper (Nebenserien) des oben genannten Formates hergestellt.

3.4 Untersuchungen an den Kalksandstein-Prüfkörpern:

An den Recyclingstein-Prüfkörpern wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

3.4.1 Rohlingsstandfestigkeit

Die Ermittlung der Rohlingsstandfestigkeit erfolgte mit einem Druckversuch an 3 Prüfkörpern unter Einsatz einer Druckprüfpresse, deren Druckplatten mit den in der Kalksandstein-Herstellpraxis verwendeten Moosgummiprofilen belegt waren.

3.4.2 Steinrohddichte

Die Ermittlung der Steinrohddichte erfolgte für jede Serie nach DIN EN 772-13 an 3 bis 6 Prüfkörpern.

3.4.3 Steindruckfestigkeit und zentrische Steinzugfestigkeit sowie E-Moduli

Untersuchungen bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV:

Die Ermittlung der Steindruckfestigkeit erfolgte für jede Serie nach DIN EN 772-1 an 3 bis 6 Prüfkörpern.

Untersuchungen am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz an der Technischen Universität Braunschweig (iBMB):

Es wurden insgesamt 3 Serien à 5 Steine im Normalformat 240 x 115 x 71 mm³ beim iBMB angeliefert (siehe **Bild 1**). 2 Serien wurden mit Zugabe von Abbruchmaterial bestehend aus Kalksandstein-, Ziegel-, Beton- und Natursteinbruchmaterial hergestellt. Die Serien REC 81 und REC 83 aus Abbruchmaterial unterscheiden sich lediglich in der Zusammensetzung des zugegebenen Abbruchmaterials. Zur Verifikation der erzielten Versuchsergebnisse der Kalksandsteine aus Abbruchmaterial wurde zusätzlich eine Serie von fünf konventionellen Kalksandsteinen (Nullserie) RC 3 angeliefert, die äquivalent zu den Serien REC 81 und REC 83 getestet wurde.

Das Ziel der Untersuchungen war es, die zentrische Druck- und Zugfestigkeit, sowie den Druck- und Zugelastizitätsmodul anhand von Kleinkörpern zu bestimmen. Diese Parameter sind für eine vollständige Beschreibung, Berechnung und Modellierung von Mauersteinen bzw. Mauerwerk notwendig, um das Materialverhalten möglichst genau darzustellen.



Bild 1: Kalksandstein-Proben - Normalformat (NF)

Zunächst wurden aus den angelieferten 15 Normalformatsteinen Probekörper hergestellt. Die Steine stammten aus drei verschiedenen Serien, deren stoffliche Zusammensetzung in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Serie:	Anzahl:	Beschreibung:
RC 3	5	Konventioneller Kalksandstein NF (Kalk + Sand + Wasser)
REC 81	5	Kalksandstein NF (50 % Recyclinganteil)
REC 83	5	Kalksandstein NF (50 % Recyclinganteil)

Tabelle 1: Übersicht über die am iBMB untersuchten Serien

Die Serie REC 81 und REC 83 unterscheiden sich in der Zusammensetzung der einzelnen verwendeten Rohstoffe des Abbruchmaterials (Kalksandstein-, Ziegel-, Beton- und Natursteinbruchmaterial). Für jede Serie wurden jeweils 12 Probekörper mit den Abmessungen $b \times d \times h = \text{ca. } 55 \times 55 \times 120 \text{ mm}^3$ hergestellt (siehe **Bild 2**). Hierfür wurden die Normalformatsteine mit einer Nasssäge geschnitten und die Lasteinleitungsflächen anschließend planparallel geschliffen. Nach dem Schleifvorgang wurden die 36 Prüfkörper in einem Klimaraum mit einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % für 14 Tage bis zum Erreichen des lufttrockenen Zustands eingelagert (vgl. z.B. DIN EN 772-1).

Das Verhältnis der Probenhöhe zu Probenbreite bzw. -länge (h/d) wurde größer als 2 gewählt, um eine Minimierung der Behinderung durch Querdehnung zu erreichen. Aus der Probenkonditionierung ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,0 bei der Umrechnung der Druckfestigkeit von Mauersteinen in die normierte Druckfestigkeit (nach Anhang A aus DIN EN 772-1). Ferner gilt der Formfaktor δ zur Berücksichtigung der geprüften Maße der Prüfkörper. Aus der linearen Interpolation in Tabelle A.1 in DIN EN 772-1 ergibt sich für die gewählten Prüfkörperabmessungen ein Formfaktor δ von 1,20.

Druckfestigkeit:

Die Prüfrichtung entspricht bei den gewonnenen Probekörpern nicht der tatsächlichen Einbau- und Belastungsrichtung im Mauerwerk. Bedingt durch den Herstellprozess (Mischen der Rohstoffe, Pressen und Dampfhärten) und durch den ursprünglich vorhandenen Vollsteinquerschnitt kann aber von einem insgesamt isotropen Materialverhalten ausgegangen werden.



Bild 2: Probekörper $l \times b \times h = 120 \times 55 \times 5 \text{ mm}^3$

Die Prüfung der zentrischen Druckfestigkeit erfolgte an fünf hergestellten Probekörpern. Der Versuch wurde kraft geregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,5 \text{ (N/mm}^2\text{)/s}$ gefahren. Die Prüfung erfolgte in Kombination mit der Ermittlung des Druckelastizitätsmoduls. Zur Prüfung wurde eine Druckprüfmaschine der Firma TONI TECHNIK mit einer maximalen Prüflast von 600 kN verwendet.

Zentrische Zugfestigkeit:

Zur Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit wurde an fünf Probekörpern pro Serie jeweils eine obere und untere Lasteinleitung geklebt (siehe **Bild 3**). Die Lasteinleitung besteht aus Stahlplatten mit einem Durchmesser von 80 mm mit einer Aufnahme für einen Kugelzapfen mit dem die Probe in die Prüfmaschine eingehängt werden kann. Als Kleber wurde ein Epoxydharzkleber StoPox SK41 der Firma StoCretec verwendet. Die Prüfung der Zugfestigkeit wurde an einer Zugprüfmaschine vom Typ Zwick Z020 mit einer Maximallast von 20 kN durchgeführt. Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min gefahren. Bei nahezu allen Proben erfolgte das Versagen im Steinquerschnitt (siehe **Bild 5**).



Bild 3: Proben mit geklebter Lasteinleitung zur Zugfestigkeitsprüfung

Druckelastizitätsmodul

Zur Ermittlung des Druckelastizitätsmoduls wurde zunächst ein Probekörper jeder Serie auf die Druckfestigkeit geprüft, so dass die Ober- und Unterlast für die eigentliche Prüfung festgelegt werden konnten. Gewählt wurde eine Oberlast von 5,0 MPa und eine Unterlast von 0,8 MPa. Die Arbeitslinie wurde durch dreimaliges Be- und Entlasten der Probe ermittelt. Nach dem dritten Durchlauf wurde die Oberlast für 30 Sekunden auf der Probe gehalten und der Versuch anschließend bis zum Bruch weitergefahren. Die Messung der Dehnungen erfolgte mit einem Verformungsaufnehmer von TONI TECHNIK (Bauform 0721) und zwei DMS Gebern von HBM (Typ DD1) mit einer Messbasis von 1 mm (siehe Bild 4).

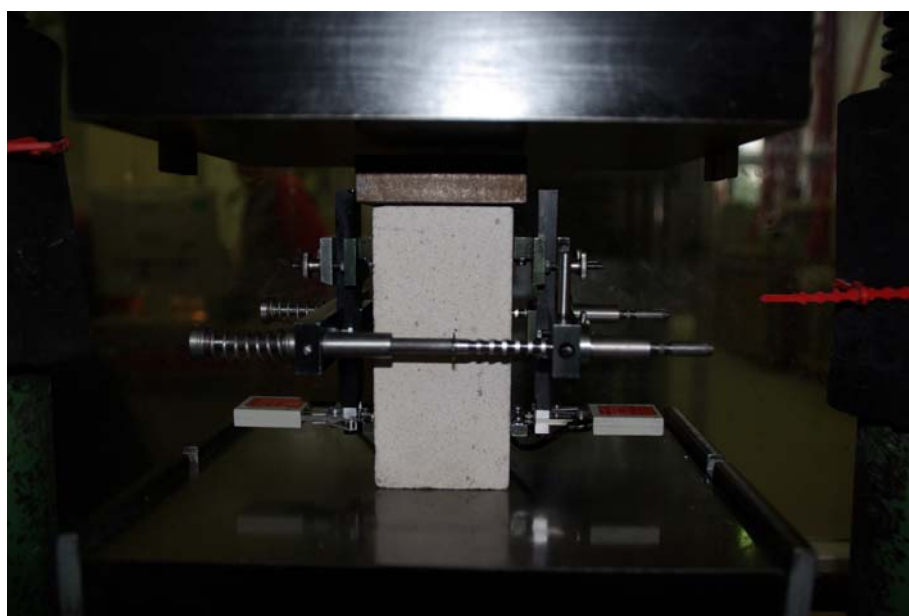


Bild 4: Prüfkörper mit Instrumentierung

Zugelastizitätsmodul

Die Prüfung des Zugelastizitätsmoduls erfolgte in Kombination mit der Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit. Die Dehnungsmessung erfolgte über zwei an gegenüberliegenden Seiten positionierten Dehnmessstreifen. Die Dehnmessstreifen (Hersteller TMLS) haben eine Messlänge von 60 mm und wurden mit X60 Kleber der Firma HBM appliziert (siehe **Bild 5**).

Der Zugelastizitätsmodul wurde durch kontinuierliches Belasten der Probe mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/s ermittelt. Die Berechnung des Elastizitätsmoduls erfolgte als Sekantenmodul bei ca. 1/3 der maximal ertragbaren zentrischen Zugkraft.



Bild 5: Prüfung des Zugelastizitätsmoduls

3.4.4 Steinbiegezugfestigkeit

Die Ermittlung der Steinbiegezugfestigkeit erfolgte durch einen Dreipunkt-Biegezugversuch an 3 Prüfkörpern. Die Stützweite betrug $l_s = 120$ mm.

3.4.5 Frostwiderstandsfähigkeit

Die Ermittlung der Frostwiderstandsfähigkeit erfolgte in Anlehnung an DIN EN 772-18 an 3 Prüfkörpern. Es wurde eine Maximum von 50 Frost-Tau-Wechseln angesetzt.

3.4.6 Wasseraufnahme

Die Ermittlung der Wasseraufnahme dient der Ermittlung der wasserfüllbaren Porosität. Sie wurde gemäß DIN 52617 an 3 Prüfkörpern ermittelt.

3.4.7 Thermische Analyse

An allen Serien wurde mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse (DTA) der Gehalt an nicht umgesetztem Kalk (Portlandit) in den gehärteten Prüfkörpern abgeschätzt. Die Entwässerung des Ca(OH)_2 im Mineralgemisch eines handelsüblichen Kalksandsteinmaterials verläuft im Allgemeinen in einem Temperaturbereich von $T = 400$ bis 600 °C. Die Quantifizierung der Menge an Ca(OH)_2 wurde unter Verwendung von Kalibrierkurven vorgenommen. Ein Gehalt an nicht umgesetztem Ca(OH)_2 (Freikalk) liegt in Kalksandsteinen dann vor,

1. wenn die Kalkdosis zu hoch angesetzt ist,
2. wenn die Härtetemperatur nicht ausreichend hoch angesetzt ist,
3. wenn die Hydrothermalhärtung nicht ausreichend lang bemessen ist bzw.
4. wenn die Hydrothermalhärtung (z. B. durch Fremdionen) gestört ist.

Ein Ca(OH)_2 -Gehalt von 0,1 bis 0,2 M.-% (bezogen auf die Steinmasse) kann als gering bis mäßig angesehen werden. Gehalte von 0,5 M.-% und höher gelten z. B. als deutlicher Hinweis auf eine nicht ausreichende Hydrothermalhärtung bzw. eine für die verwendete Sandmischung zu hohe Kalkdosis.

3.4.8 Schwinddehnung

Bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV wurden an ausgewählten Serien (Rohstoffe aus Deutschland) die Schwinddehnung der Prüfkörper in Anlehnung an DIN 52450 an jeweils 3 Prismen-Prüfkörpern ($l \times b \times h = 160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) bestimmt. Die Prüfkörper wurden dazu für einen Zeitraum von zwei Tagen unter Wasser und anschließend für 90 Tage im Klima $T = 20$ °C und $rF = 65$ % gelagert. Die Messung der Längenänderung erfolgte mittels mechanischer Messuhren bzw. induktiver Wegaufnehmer. Die Messdauer beträgt in jedem Falle 90 Tage. (Vorzeichenregel: Schwinddehnungen erhalten ein positives Vorzeichen).

3.4.9 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit der Prüfkörper wurde mit einem Einplattengerät an jeweils einem ausgesägten Prüfkörpern mit den Abmessungen $l \times b \times h = 100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ gemäß DIN 52616 gemessen.

3.4.10 Bezugsfeuchtegehalt

Der Bezugsfeuchtegehalt wurde gemäß DIN 52620 an ausgesägten jeweils 5 Prüfkörpern mit den Abmessungen $l \times b \times h = 100 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ gemessen.

3.4.11 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Bestimmung der Porenradienverteilung und der quecksilberfüllbaren Porosität erfolgte mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Firma Carlo Erba, Italien, Modell „Porosimetro AG 65“. Das Gerät arbeitet mit einem Betriebsdruck von bis zu $p = 1000$ bar. Diese Methode zur Bestimmung des Porenanteils am Gesamtvolumen mittels Durchdringung von Quecksilber beruht auf dem Verhalten nichtbenetzender Flüssigkeiten in Kapillaren. Gemessen wird das Quecksilbervolumen, das in Abhängigkeit vom jeweiligen Porenradius bei steigendem Druck in die Probe eindringt. Auf diese Weise kann die Porenradienverteilung im für Kalksandsteine relevanten Bereich von $d = 10^{-9}$ bis 10^{-4} m ermittelt werden. Als Ergebnis wird die quecksilberfüllbare Porosität V_{Hg} [cm^3/g] ausgewiesen.

3.4.12 Ausblühungen und Verfärbungen

Zur Ermittlung des eventuellen Auftretens von Verfärbungen und Ausblühungen wurden die Prüfkörper für einen Zeitraum von 24 h mit den Stoßflächen ($b \times h = 115 \times 71 \text{ mm}^2$) in einem 1 cm tiefen Wasserbad gestellt und an der Luft ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $rF = 65 \%$) ausgetrocknet. Auftretende Verfärbungen und Ausblühungen wurden visuell beurteilt.

Entsprechend der Eigenfarbe der Zuschläge (Kalksandstein und Porenbeton: weiß, Ziegel: rot, Beton: grau, Naturstein: beige-braun) weisen die Recycling-Mauersteine entsprechende Farbtöne auf.

An verschiedenen Serien traten je nach Art und Menge der zugegebenen Recycling-Zuschläge weiße, gelbliche bzw braune Ausblühungen auf.

3.4.13 Mineralogische Analyse

Probenentnahme und -präparation aus NF-Kalksandsteinen zur Dünnschliffherstellung für lichtmikroskopische Untersuchungen:

Für die Herstellung der Dünnschliffe wird jeweils eine Teilprobe aus der Mitte des KS-Prüfkörpers entnommen. Wie in Bild 6 dargestellt, wird der KS-Stein jeweils um ca. 106 mm gekürzt (orange Linien), so dass ein Streifen aus der Mitte des Steins von 28 mm übrig bleibt. Dieser wird an den beiden zuvor nicht gesägten Seiten um jeweils 32,5 mm gekürzt, so dass ein Quader mit den Maßen $48 \times 28 \times 71 \text{ mm}^3$ ($B \times T \times H$) entsteht. Der Quader wird auf halber Höhe geteilt; einer der an den beiden Schnittflächen entstehenden Bereiche wird als Dünnschliff präpariert, der im Anschluss lichtmikroskopisch untersucht wird.

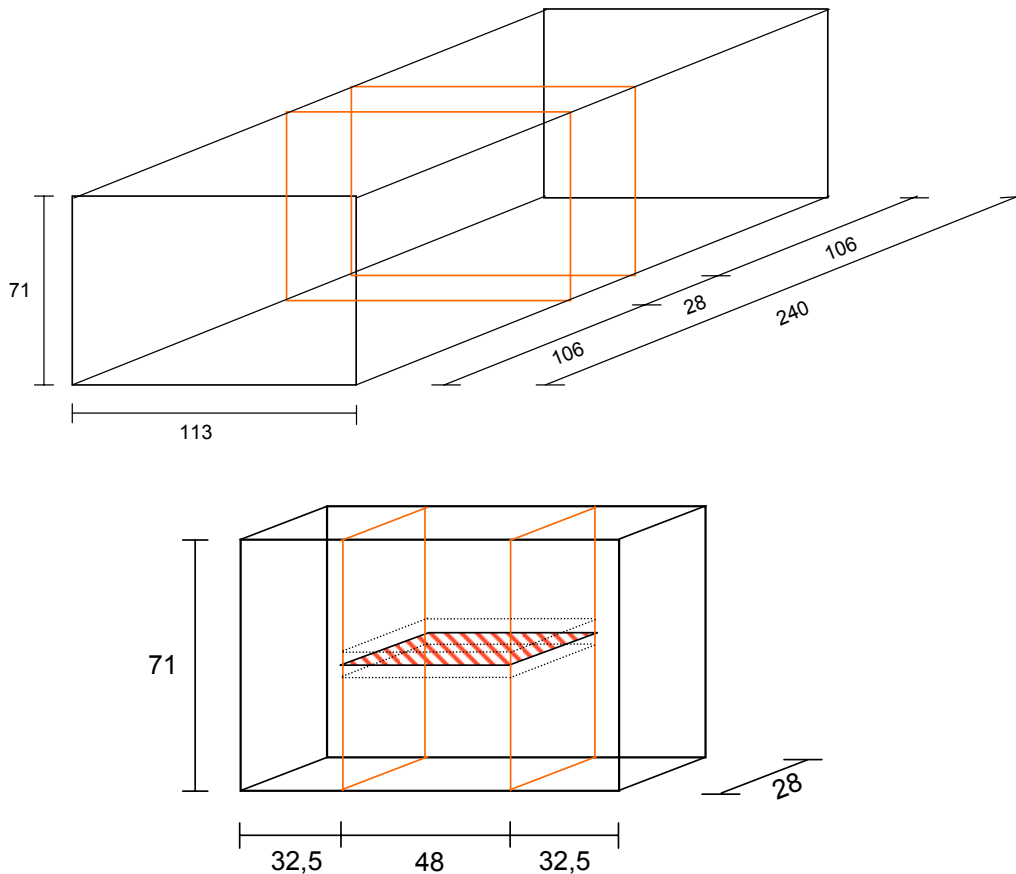


Bild 6: Schematische Darstellung der jeweiligen Probenentnahmestelle für die Herstellung von Dünnschliffen

Die nass gesägten Teile des KS-Steins sind nach dem Sägen unter fließendem Wasser gründlich gereinigt worden. Die für die Dünnschliffe verwendeten Teilstücke wurden vor der Präparation bei $T = 105\text{ °C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet. Anschließend werden die Proben, welche eine hohe Porosität aufweisen, unter Vakuum mit farbigem Epoxydharz (gelb) vergossen, plan geschliffen und im Ultraschallbad von eventuellen Rückständen gereinigt. Nach der Trocknung werden die Proben auf ein Objektträgerglas ($48 \times 28\text{ mm}^2$) geklebt und auf eine Dicke von ca. $20\text{ }\mu\text{m}$ planparallel zum Objektträger geschliffen. Nach einer erneuten Reinigung im Ultraschallbad und anschließender Trocknung wird der Dünnschliff mit einem Deckgläschen ($40 \times 24\text{ mm}^2$) abgedeckt.

Probenentnahme und -präparation aus NF-Kalksandsteinen für die Raster-elektronenmikroskopie (REM)

Aus den zuvor gesägten Steinen werden Proben aus der der Mitte des Steins zugewandten Seite entnommen. Hierzu werden die bereits bei den ersten beiden Schnitten entstehenden Quader ($113 \times 106 \times 71\text{ mm}^3$) herangezogen. In Bild 7 ist die Entnahmestelle grau eingezeichnet. Die Größe der Probe entspricht ca. 1 cm^3 .

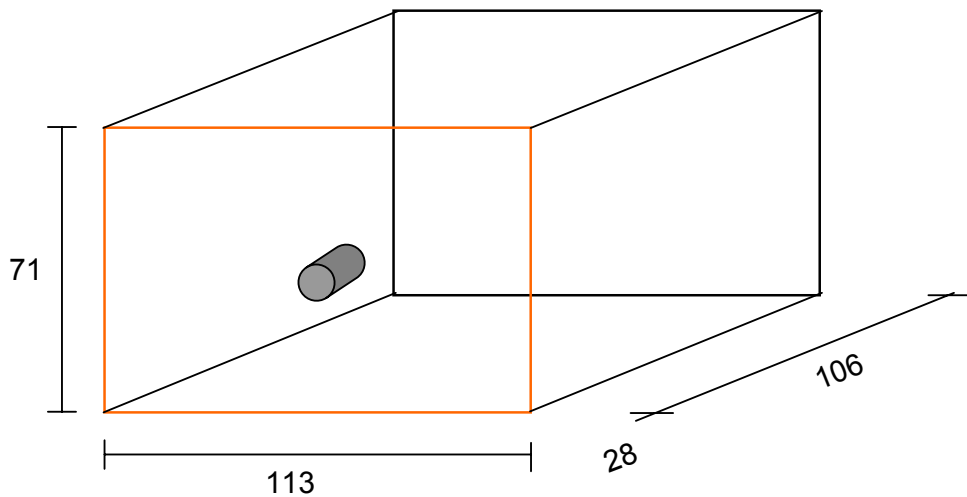


Bild 7: Schematische Darstellung der jeweiligen Probenentnahmestelle für die Präparation der REM-Proben

Die KS-Steinproben werden mit einem vakuumtauglichen Spezialkleber 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.

Probenentnahme und -präparation aus NF-Kalksandsteinen für die Quecksilberdruckporosimetrie (MIP).

Aus den zuvor gesägten Steinen werden Proben aus der Mitte des Steins zugewandten Seite entnommen. Hierzu wird einer der bereits bestehenden Quader ($32,5 \times 28 \times 71 \text{ mm}^3$) aus dem Mittelstreifen herangezogen. In Bild 8 ist die Entnahmestelle grau eingezeichnet.

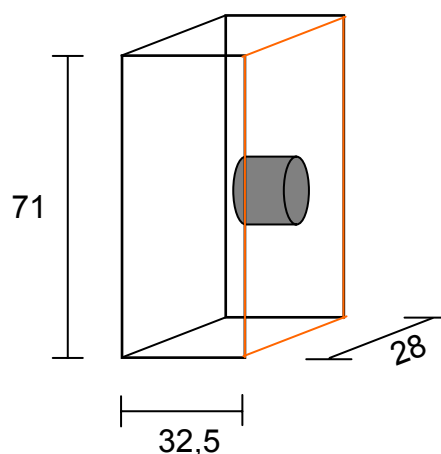


Bild 8: Schematische Darstellung der jeweiligen Probenentnahmestelle für die Präparation der MIP-Proben

Die KS-Steinproben werden bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Massekonstanz getrocknet. Mit einer Beißzange werden sie so gebrochen, dass ein Granulat mit der Körnung 2 - 4 mm entsteht, welches, nach erneuter Trocknung bei 105 °C bis zur Massekonstanz, mittels Quecksilberdruckporosimeter zur Bestimmung der Trockenrohddichte, des kumulierten Porenvolumens und der Porenradienverteilung untersucht wird.

Probenentnahme und –präparation aus NF-Kalksandsteinen für Messung der kapillaren Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN 52 617

Für die Messung der kapillaren Wasseraufnahme werden die bereits bei den ersten beiden Schnitten entstehenden Quader (113 x 106 x 71 mm³) herangezogen. Diese werden mit der Schnittfläche ca. 10 mm tief in ein Wasserbad gestellt, wobei die Seitenflächen mit Paraffin abgedichtet werden. So wird sichergestellt, dass die Steine lediglich über die definierte Kopffläche Wasser aufnehmen können und über die flächenbezogene Wasseraufnahme der Wasseraufnahmekoeffizient berechnet werden kann.

Probenentnahme und –präparation aus NF-Kalksandsteinen für die röntgenografische Phasenbestimmung (XRD)

Aus den zweiten Steinen der jeweiligen Serie werden Proben für die XRD entnommen. Hierzu wird ein Bohrkern (Ø 20 mm) gezogen, dessen unterer Bereich für die Analyse mittels XRD aufgemahlen wird. In Bild 9 ist die Entnahmestelle des Bohrkerns grau, der für die XRD verwendete Teil rötlich eingezeichnet (charakteristische Teilprobe).

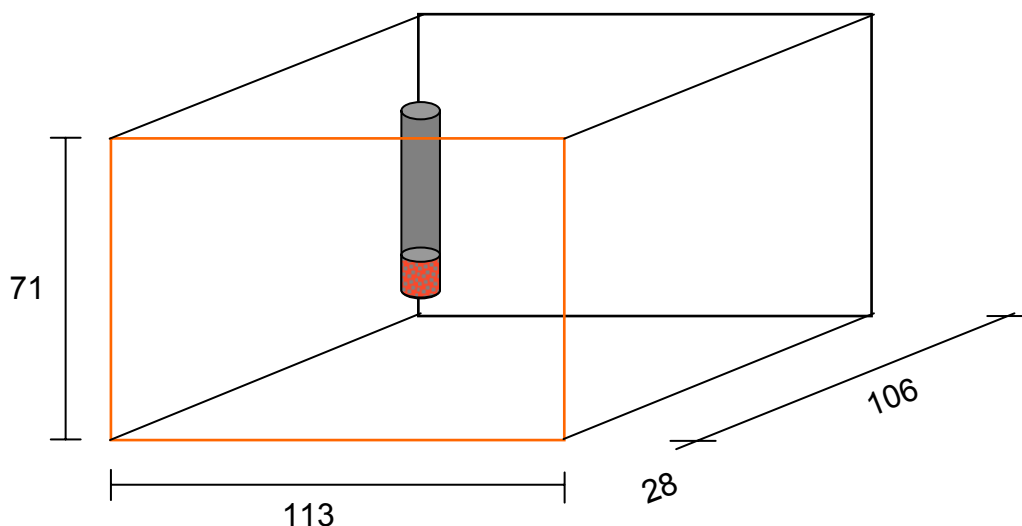


Bild 9: Schematische Darstellung der jeweiligen Probenentnahmestelle für die Präparation der XRD-Proben

Die Probe ist für die Untersuchungen bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet worden. Im Anschluss ist die Probe zur Bestimmung des Phasengehalts röntgenographisch mittels Pulverdiffraktometrie analysiert worden. Dazu wurde die charakteristische Teilprobe (ca. 5 g) auf eine Korngröße $\leq 40 \mu\text{m}$ aufgemahlen.

Folgende Serien wurden berücksichtigt:

1. Serie 3
2. Serie 9
3. Serie 81
4. Serie 82
5. Serie 83

MIP und Trockenrohddichte:

Die entsprechend konditionierten Proben der einzelnen Steine wurden mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Firma ThermoQuest Typ Pascal 140/240 untersucht. Der Druckbereich des Porosimeters reicht von 0 bis 200 MPa, dies bedeutet, dass Poren mit einem Durchmesser von ca. 300 μm bis 4 nm erfasst und quantitativ dargestellt werden können. Die Proben wurden in einem Pulverdilatometer bei mittlerer Geschwindigkeit der Druckerhöhung untersucht. Es wurden sowohl das kumulierte Porenvolumen (mm^3/g) und die Porenradienverteilung, als auch die Trockenrohddichte (g/cm^3) mittels MIP ermittelt.

Kapillare Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN 52 617:

Für die Messung der kapillaren Wasseraufnahme werden die zwei mit Paraffin präparierten Quader ($113 \times 106 \times 71 \text{ mm}^3$) mit der Schnittfläche ca. 10 mm tief in ein Wasserbad gestellt. In festgelegten Zeitabständen wird die Probe dem Wasserbad zur Wägung entnommen. Die flächenbezogene Wasseraufnahme W (kg/m^2) wird über die Quadratwurzel der Zeit \sqrt{t} ($\text{h}^{0,5}$) aufgetragen. Die Steigung der Regressionsgeraden entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizient ω ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$).

Lichtmikroskopie:

Die zu jedem Stein erstellten Dünnschliffe wurden zuerst gesamtflächig gescannt und mit einem Lichtmikroskop mit angeschlossener Bildanalyseeinheit im Durchlicht und teilweise mit kreuzpolarisiertem Licht untersucht. Hierbei wurden besonders die Ausbildung der CSH-Reaktionssäume und die Packungsdichte und Form der Zuschläge untersucht.

Rasterelektronenmikroskopie:

Die entsprechend präparierten Proben der einzelnen Steine wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop der Firma Philips Typ XL30i untersucht. Neben dem großen Vergrößerungsbereich ist insbesondere die hohe Tiefenschärfe im REM vorteilhaft. Hierbei wurden, wie auch bei der Lichtmikroskopie, besonders die Ausbildung der CSH-Reaktionssäume und die Packungsdichte der Bestandteile untersucht.

Röntgenpulverdiffraktometrie:

Die entsprechend präparierten Proben der einzelnen Steine sind zur Bestimmung des Phasengehalts röntgenographisch mittels Pulverdiffraktometrie analysiert worden. Dazu wurde jeweils eine charakteristische Teilprobe (ca. 5 g) auf eine Korngröße $\leq 40 \mu\text{m}$ aufgemahlen. Der Phasenbestand kann aus den Peakhöhen und der Peakhalbwertsbreite semiquantitativ abgeschätzt werden. Die röntgenographische Phasenanalyse ist mit den im Kapitel 3.2 angegebenen Parametern durchgeführt worden:

3.4.14 Umweltanalyse der Recycling-Mauersteine

Die nachfolgende Tabelle 2 enthält die mengenbezogene Zusammensetzung der Zuschläge für die hinsichtlich ihrer Umwelteigenschaften ausgewählten 4 Prüfkörperserien. Bei allen 3 Serien lag die CaO-Dosis bei 7 M.-%. Als Zuschlagfraktionen wurde ausschließlich 0/2 mm gewählt.

Serie	Mittel-sand	Kalksand-stein-Bruch-Material	Ziegel-Bruch-Material	Beton-Bruch-Material	Poren-beton-Bruch-Material	Natur-stein-Bruch-Material
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
3 Nullserie ohne RC-Material	100	0	0	0	0	0
9 Serie mit KS-RC-Material	50	50	0	0	0	0
81 Zugabe von RC-Material	50	15	15	5	10	5
83 Zugabe von RC-Material	50	20	27	0	3	0

Tabelle 2: Rezeptur der 4 für die Umweltanalytik ausgewählten Serien

Chemische Untersuchung bei den Wessling Laboratorien GmbH, Hannover:

Zum einen wurden Prüfkörper mittels Königswasseraufschluss hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht und ebenfalls nach der DEV-S4-Methode eluiert. Die Zusammensetzung des Steinmaterials und das Eluat wurden hinsichtlich folgender Parameter mittels ICP-MS und anderer Methoden nach ISO 11885, 17294-2, DIN 4030-2, E DIN ISO 11262, DIN 51084, EN ISO 10304-1, DIN 38405, DIN 38407, DIN 38409, EN ISO 10301, ISO 22155, EN ISO 6468, E DIN ISO 16703, EN ISO 9377-2, E DIN ISO 14154, EN 12673, EN 14207 analysiert:

- Schwermetalle: Sb, As, Ba, Pb, B, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Hg, Ni, Se, Ti, V, Zn
- Kationen, Anionen: Cl, CN_{ges}, F, SO₄
- Organik: PCB, PAK, BTEX, Chlorbenzole und-phenole, LHKW,

Untersuchungen zum Ausgasungsverhalten bei der Eurofins Environment A/S in Galten (Dänemark)

Des Weiteren wurden an diesen 3 Serien Messungen zum Ausgasungsverhalten durchgeführt. Die dort verwendeten Methoden entsprechen den Anforderungen des Bewertungsschemas des AgBB "Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten" in der Fassung vom September 2005 (mit Aktualisierung der NIK-Werte-Liste).

Dabei wurden folgende Prüfnormen in der jeweils aktuellen Fassung angewandt: ISO 16000-3, ISO 16000-6, ISO 16000-9, ISO 16000-11, ISO 16017-1, interne Methodenbezeichnungen: 9810, 9811, 9812, 2804, 8400.

Das Muster bestand aus jeweils 5 Mauersteinen pro Serie und wurde luftdicht verpackt an das Labor von Eurofins Environment A/S gesandt. Sofort nach Entnahme aus der Verpackung wurden die Kanten der Mauersteine mit Aluminiumfolie und VOC-freiem Aluminiumtape bedeckt. Der Prüfling wurde unverzüglich in die Prüfkammer gelegt. Die Prüfkammer besteht aus Edelstahl und hat ein Volumen von 119 dm³. Die Luftreinigung erfolgte über mehrere Stufen, und vor Beginn der Prüfung wurde eine Blindwertkontrolle durchgeführt. Die Prüfbedingungen lagen bei 23 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit (in der Zuluft) mit einem Luftwechsel von 0,5/h. Die Beladung betrug 1,4 m² Probe je m³ Luftraum, entsprechend einer flächenspezifischen Luftaustauschrate von 0,357 m³/m²h.

Folgende Parameter wurden geprüft:

- Emissionsprüfung auf Kanzerogene nach 3 Tagen (Analyse mittels GC-MS)
- TVOC-Prüfung nach 3 Tagen (Analyse mittels GC-MS)
- Berechnung des R-Wertes nach 3 Tagen anhand der NIK-Liste

$$R = \sum_{i,n} (C_i / \text{NIK}_i + \dots + C_n / \text{NIK}_n)$$

- Aldehyd-Prüfung nach 3 Tagen (Analysemittels HPLC/Dioden-Array-Detektor)

Die jeweiligen Untersuchungsergebnisse wurden mit den Anforderungen nach 28 Tagen gemäß AgBB-Leitfaden verglichen.

3.5 Werksversuche

Zur Überprüfung der großtechnischen Umsetzbarkeit der Laborerkenntnisse in die betriebliche Produktionspraxis wurde ein Versuch in einem Kalksandsteinwerk durchgeführt. Die drei Ausgangsmaterialien (Kalksandstein, Ziegel und Beton) wurden auf dem Gelände der Brockmann Recycling GmbH in Nützen unter Einsatz eines Backenbrechers jeweils einzeln auf die Zielfraktion (0/5 mm) zerkleinert und anschließend auf einer planen Asphaltfläche unter Verwendung von Radladern manuell vorgemischt. Danach wurde das Recycling-Mischmaterial zu einem Kalksandsteinwerk transportiert und für die Herstellung von Recycling-Mauersteinen eingesetzt. Das Recycling-Material (Masse: ca. 5 t der Fraktion 0/5 mm) hatte folgende mengenmäßige Zusammensetzung:

- 1/3 Kalksandstein-Bruchmaterial
- 1/3 Ziegel-Bruchmaterial
- 1/3 Beton-Bruchmaterial

Bei den Werksversuchen wurde auf der Grundlage einer produktionsüblichen Kalksandstein-Rohmischung für mittelformatige Kalksandsteine in drei Stufen die Sandmischung (Eigensand und Lehm Kies) gegen das Recycling-Material ausgetauscht. Folgende Sorte wurde produziert:

KS-R P 12-1,8 248x175x248 (6DF-Vollstein)

Serie	Sand	RC-Material	CaO-Dosis	Pressfeuchte	Pressdruck	Härte-dauer	Härte-temperatur
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	σ_p kN	t_h h	T_h °C
W0	100	0	5,8	3,8	3500	3,5-4,5-1,5	197
W1	ca. 89	ca. 11	5,8	3,8	3500	3,5-4,5-1,5	197
W2	ca. 78	ca. 22	5,8	3,8	3500	3,5-4,5-1,6	197
W3	ca. 67	ca. 33	5,8	3,8	3500	3,5-4,5-1,6	197

Tabelle 3: Herstellparameter der Recyclingsteine der Werksversuche

An den hergestellten Probesteinen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der Steindruckfestigkeit
- Bestimmung der Steinrohddichte
- Bestimmung der Frostwiderstandsfähigkeit
- Bestimmung des Freikalkgehaltes mittels Differenzialthermo-Analyse

Die Herstellung der Mauerwerk-Recycling-Splitte ist Im Anhang in den Bildern N1 bis N9 wiedergegeben.

4. Auswertung der Untersuchungsergebnisse

4.1 Allgemeines

Aufgrund der vergleichsweise geringen Streuungen der einzelnen Messwerte innerhalb der verschiedenen Serien sind im Folgenden durchgehend Mittelwerte wiedergegeben. Die Ergebnisse zur chemischen und mineralischen Zusammensetzung sowie zu den Steineigenschaftswerten sind im Anhang A aufgeführt.

4.2 Eigenschaftswerte der Rohstoffe

4.2.1 Physikalische Eigenschaftswerte

4.2.1.1 Sande

Die physikalischen Eigenschaften der Basissande sind in der nachfolgenden Tabellen 4 und in Bild 10 wiedergegeben.

Sandsorte		Mittelsand 0/2 mm Norddeutsche Tiefebene		Theoretisches Optimum		Linke Einhüllende		Rechte Einhüllende	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,46							
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,59							
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,13							
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	141							
Abschlammbares	Vol.-%	5							
Huminstoffe		farblos							
Siebanalyse	X-Daten	Rückstand	Summe D	Rückstand	Summe R	Rückstand	Summe R	Rückstand	Summe R
< 0,036 mm	0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 0,036 mm	0,036	0,9	0,2	2,5	2,5	2,5	2,5	1,0	1,0
> 0,063 mm	0,063	5,3	1,1	2,5	5,0	3,5	6,0	3,0	4,0
> 0,112 mm	0,112	33,2	6,4	5,0	10,0	11,0	17,0	5,0	9,0
> 0,2 mm	0,2	38,1	39,6	24,0	34,0	33,0	50,0	12,0	21,0
> 0,355 mm	0,355	17,2	77,7	21,0	55,0	43,0	93,0	20,0	41,0
> 0,63 mm	0,63	3,3	94,9	25,0	80,0	7,0	100,0	32,0	73,0
> 1,12 mm	1,12	0,8	98,2	16,0	96,0	0,0	100,0	22,0	95,0
> 2 mm	2	0,6	99,0	4,0	100,0	0,0	100,0	5,0	100,0
> 3,55 mm	3,55	0,4	99,6	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
> 6,3 mm	6,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe		100,0		100,0		100,0		100,0	

Tabelle 4: Eigenschaftswerte des Basissandes (Mittelsand 0/2 mm)

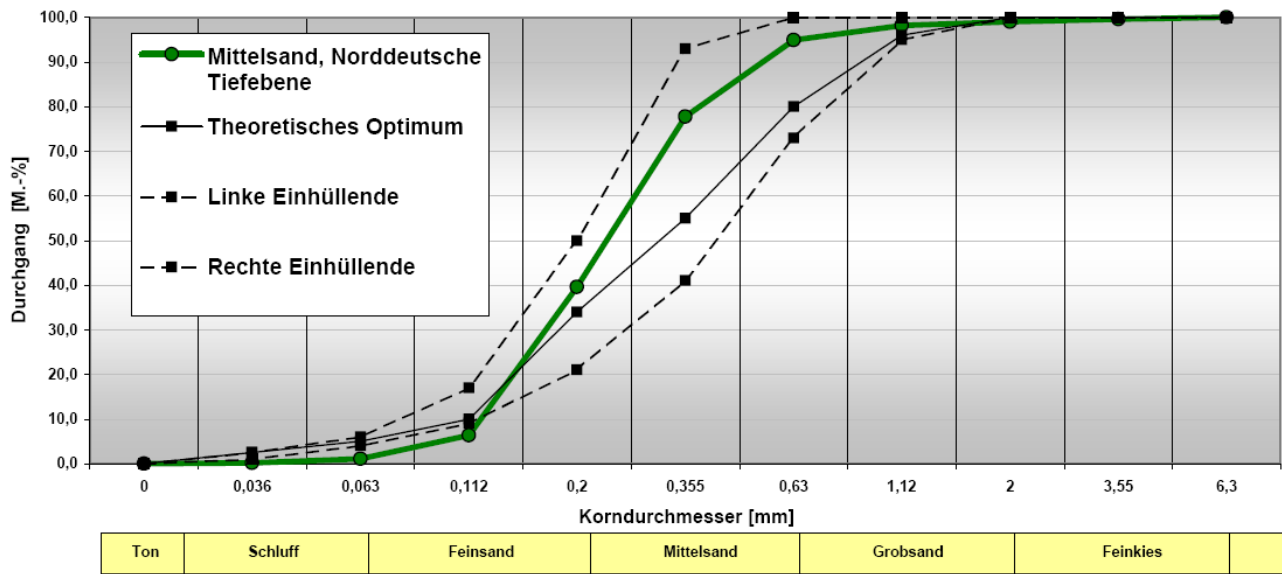


Bild 10: Korngrößenverteilungen des Basissandes (Mittelsand 0/2 mm)

4.2.1.2 Recycling-Zuschläge

Die nachfolgende Tabelle 5 enthält die an den Recycling-Materialien gemessenen Wassergehalte.

Material	Kalksandstein-Recycling-Material sortenrein	Kalksandstein-Recycling-Material mit Verunreinigungen	Porenbeton-Recycling-Material	Ziegel-Recycling-Material	Beton-Recycling-Material	Naturstein-Recycling-Material
Masse feucht [g]	1000	1000	500	1000	1000	1000
Masse trocken [g]	883,4	890,8	483,8	896,3	959,2	917,2
Wassergehalt [M.-%]	11,7	10,9	3,2	10,4	4,1	8,3

Tabelle 5: Wassergehalte der Recycling-Materialien

Die nachfolgenden Bilder 11 bis 28 zeigen die Eigenschaftswerte der Recycling-Ausgangsmaterialien. Zunächst ist jeweils ein Foto des Materials aufgeführt, an das sich die jeweilige Korngrößenverteilung und die Sortierung nach den einzelnen Siebfractionen anschließt.

Im Folgenden sind die verschiedenen Recycling-Materialien dargestellt:



Bild 11: Kalksandstein-Recycling-Material - sortenrein (KSBs)

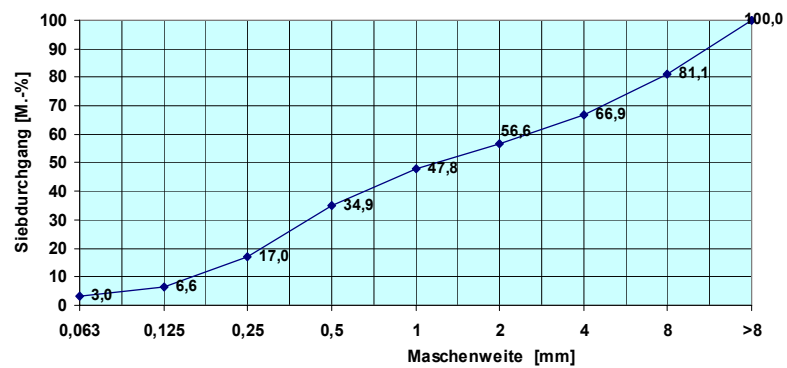


Bild 12: Korngrößenverteilung des Kalksandstein-Recycling-Materials - sortenrein (KSBs)



Bild 13: Fraktionen des Kalksandstein-Recycling-Materials - sortenrein (KSBs)



Bild 14: Kalksandstein-Recycling-Material - mit Verunreinigungen (KSBv)

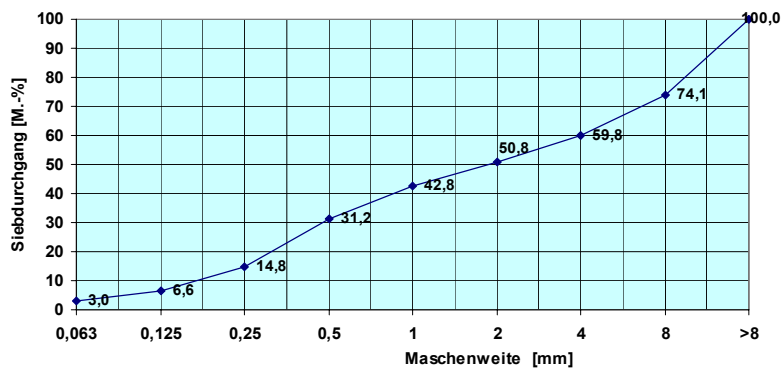


Bild 15: Korngrößenverteilung des Kalksandstein-Recycling-Materials - mit Verunreinigungen (KSBv)



Bild 16: Fraktionen des Kalksandstein-Recycling-Materials - mit Verunreinigungen (KSBv)



Bild 17: Porenbeton-Recycling-Material (PB)

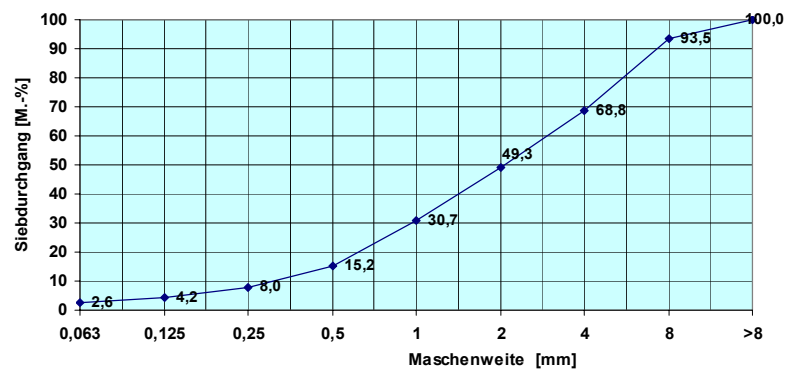


Bild 18: Korngrößenverteilung des Porenbeton-Recycling-Materials (PB)



Bild 19: Fraktionen des Porenbeton-Recycling-Materials (PB)



Bild 20: Ziegel-Recycling-Material (Z)

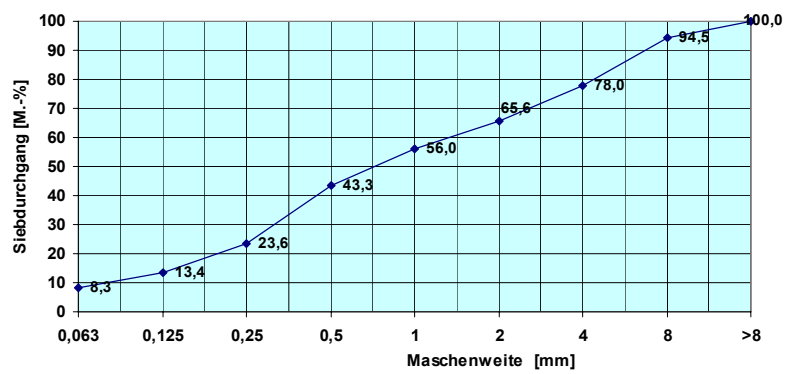


Bild 21: Korngrößenverteilung des Ziegel-Recycling-Materials (Z)



Bild 22: Fraktionen des Ziegel-Recycling-Materials (Z)



Bild 23: Beton-Recycling-Material (BB)

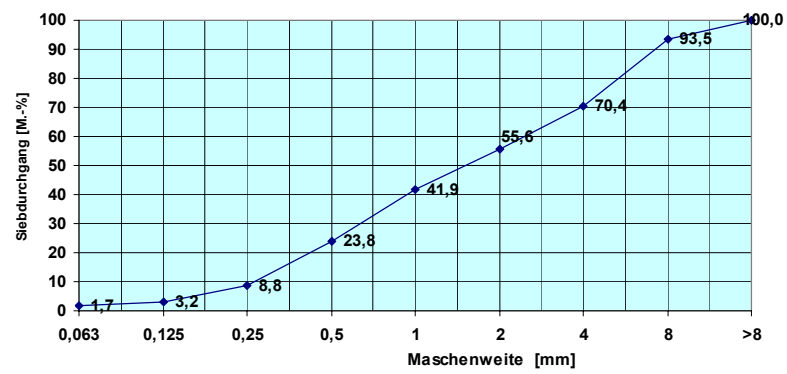


Bild 24: Korngrößenverteilung des Beton-Recycling-Materials (BB)



Bild 25: Fraktionen des Beton-Recycling-Materials (BB)



Bild 26: Naturstein-Recycling-Material (NB)

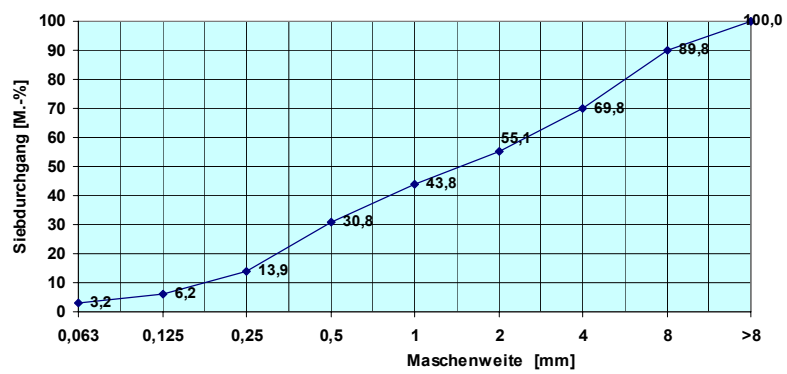


Bild 27: Korngrößenverteilung des Naturstein-Recycling-Materials (NB)



Bild 28: Fraktionen des Naturstein-Recycling-Materials (NB)

4.2.2 Mineralogische Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der phasenanalytischen Rohstoffuntersuchung mittels Röntgenpulverdiffraktometrie sind im Folgenden wiedergegeben. Die zugehörigen Bilder R1 bis R45 finden sich im Anhang A.

Kalksandstein-Bruchmaterial sortenrein (KSBs)

Im Bild R1 ist eine vergleichende Übersicht der einzelnen Fraktionen des KSBs Materials wiedergegeben. In Bild R2 sind die identifizierten Phasen der im Bild R1 wiedergegebenen Röntgendiffraktogramme angegeben.

Im Wesentlichen besteht das sortenreine Kalksandstein-Bruchmaterial aus den Phasen Quarz und Feldspäten (Qz, Fsp). Auffällig ist, dass in den feineren Fraktionen ($< 0,063$ und $0,063$ mm) die Phasen Tobermorit und Phlogopit sowie Calcit angereichert sind. Dies lässt sich aufgrund der besseren Spaltbarkeit dieser Mineralien begründen, was insbesondere für die Phase Calcit gilt.

In den Fraktionen $> 0,125$ mm ist der Gehalt an Tobermorit, Phlogopit und Calcit marginal, dort liegt eine Anreicherung der härteren Phasen Quarz und Feldspat vor.

In den Bildern R3, R4 und R5 ist eine dreidimensionale Übersicht der Röntgenphasen der einzelnen Fraktionen im Bereich $5 - 65^\circ$ 2θ dargestellt. In den Bildern R7 und R8 ist der Winkelbereich $5 - 20^\circ$ 2θ (Winkelbereich vor den dominierenden Quarzpeaks) herausgezoomt, da in diesem Winkelbereich die Unterschiede in den Phasen am deutlichsten sind. Auffällig ist, dass in den feinen Fraktionen das Schichtgittersilikat Phlogopit angereichert ist (Bild R8) und in der gröberen Fraktion auch der Chlorit. Die Phasen Tobermorit und Phillipsit sowie die Feldspäte sind in diesem Winkelbereich in allen Fraktionen mit gleicher Intensität verteilt.

Kalksandstein-Bruchmaterial verunreinigt (KSBv)

Im Bild R9 ist vergleichend eine 2D-Übersicht der Fraktionen $< 0,063$ bis 8 mm des Materials KSBv dargestellt. Im Bild R10 sind die dazugehörigen identifizierten Phasen wiedergegeben. Wie ebenfalls bei der Probe KSBs sind die weichen Phasen Tobermorit, Phlogopit und Calcit in den feineren Fraktionen stärker angereichert als in den gröberen Fraktionen. Auch bei diesem KS-Material dominieren die Phasen Quarz und die Feldspäte.

Auf den Bildern R11, R12 und R13 sind die einzelnen Fraktionen des Materials KSBv vergleichend im 3D-Modus über einen Winkelbereich von $5 - 65^\circ$ 2θ dargestellt. Das Bild R14 zeigt die Isolinien in dem Bereich $5 - 20^\circ$ 2θ . Man erkennt dort, dass das eben angesprochene Mineral Tobermorit in der feinen Fraktion stärker angereichert ist als in den gröberen Fraktionen. Ansonsten sind die Röntgendiffraktogramme der einzelnen Fraktionen von ihrer Phasenzusammensetzung her nahezu identisch. Die geringen Unterschiede in den Quarz- und Feldspatgehalten (Bild R13) lassen sich durch die leichten Schwankungen in der Probenpräparation begründen. In Bild R15 und R16 ist der Winkelbereich $5 - 20^\circ$ 2θ noch einmal zur besseren Darstellung explizit herausgezoomt worden.

Porenbeton-Bruchmaterial (PB)

Analog zu den vorgenannten Materialien KSBs und KSBv ist auch das Porenbeton-Bruchmaterial in einzelne Fraktionen unterteilt worden, welche dann im Einzelnen röntgenographisch untersucht worden sind. Bild R17 zeigt eine vergleichende 2D-Ansicht der Diffraktogramme der einzelnen Phasen im Winkelbereich $5 - 65^\circ$ 2θ . Bild R18 zeigt die identifizierten Phasen der aufgenommenen einzelnen Diffraktogramme aus Bild R17. Bei Betrachtung des Bildes R17 fällt auf, dass die Intensität der Fraktion $< 0,063$ mm geringer ist als die der gröberen Fraktion, was auf einen geringeren kristallinen Anteil hindeutet. Ferner lässt sich aus R17 entnehmen, dass die dominierende Phase des Porenbetons Quarz (SiO_2) ist und sich deutliche Gehalte von Calciumsulfat (CaSO_4 -Phasen, Gips, Anhydrit) nachweisen lassen. Neben diesen Hauptphasen lassen sich Feldspäte und der gebildete Tobermorit sowie Schichtgittersilikate (Phlogopit) nachweisen. Die Bilder R19, R20 und R21 zeigen eine vergleichende 3D-Übersicht der Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen im Winkelbereich $5 - 65^\circ$ 2θ . Die Bilder R22, R23 und R24 zeigen 3D-Vergleiche im Winkelbereich $5 - 20^\circ$ 2θ . Auffallend ist, dass die Phase Tobermorit in den feineren Fraktionen leicht angereicherter vorkommt als in den gröberen Fraktionen. Die Phase Gips (im Winkelbereich von ca. $11,5^\circ$ 2θ) ist über alle Fraktionen nahezu gleichmäßig verteilt, wobei in der Fraktion 2 mm ein leichtes Maximum zu erkennen ist.

Ziegel-Bruchmaterial (ZB)

Bild R25 zeigt die vergleichende 2D-Ansicht der Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen im Winkelbereich $5 - 65^\circ$ 2θ ; im Bild R26 sind die identifizierten Phasen der Diffraktogramme aus Bild R 25 dargestellt. Hauptphasen aller Fraktionen sind Quarz und Feldspäte. In den feineren Fraktionen sind Schichtgittersilikate (Illit) sowie Calcit aufgrund seiner guten Spaltbarkeit angereichert. Ebenfalls findet man in den feineren Fraktionen Spuren von Gips. Typisch für Ziegel-Bruchmaterial ist auch das Vorhandensein der Phase Hämatit (Fe_2O_3). In den Bildern R27, R28 und R29 ist eine vergleichende 3D-Ansicht der einzelnen Diffraktogramme im Winkelbereich $5 - 65^\circ$ 2θ dargestellt. Bei der Betrachtung dieser vorgenannten Abbildungen fällt auf, dass neben den vorgenannten Phasen Illit und Gips keine nennenswerten Anreicherungen in einzelnen Fraktionen zu beobachten sind, was die Bilder R30, R31 und R32 (Winkelbereich $5 - 20^\circ$ 2θ) belegen.

Naturstein-Bruchmaterial (NB)

Das Naturstein-Bruchmaterial besteht im Wesentlichen aus Quarz und Feldspäten, wie in Bild R33 und den dazugehörigen Karten (Bild R34) zu erkennen ist. Neben den vorgenannten Phasen lassen sich noch die Schichtgittersilikate Phlogopit, Muskovit und Chlorit identifizieren, welche im Wesentlichen in den feineren Fraktionen angereichert sind. Neben den Schichtgittersilikaten lässt sich noch die Mineralphase Cordierit (Ringsilikat) röntgenographisch identifizieren. Cordierit ist ein gesteinsbildendes Mineral und entsteht durch Metamorphose in Magmatiten, Gneisen oder Pegmatiten; kann aber auch magmatisch in Granit entstehen. Bei Wasseraufnahme kann sich Cordierit in Muskovit und Chlorit umwandeln. Die Umwandlungsprodukte Muskovit und Clinochlor sind hier in dem vorhandenen Naturstein-Bruchmaterial ebenfalls vorhanden.

Aus der hier ermittelten Paragenese lässt sich allerdings nicht der Gesteinstyp identifizieren, dazu wären petrografische Untersuchungen an Dünnschliffen notwendig, die allerdings hier nicht Gegenstand des Auftrags waren. In den Bildern R35, R36 und R37 ist auch hier eine vergleichende 3D-Übersicht des NB-Materials im Winkelbereich $5 - 65^\circ$ 2θ wiedergegeben. Wie schon an anderer Stelle beschrieben, sind die Schichtgittersilikate Chlorit, Muskovit und Phlogopit in den feineren Fraktionen angereichert, was auch in den Bildern R37, R38 und R39 und R40 eindeutig zu erkennen ist.

Beton-Bruchmaterial (BB)

Bild R41 zeigt die vergleichende 2D-Ansicht im Winkelbereich $5-65^\circ$ 2θ . Röntgenographisch lassen sich die hier dargestellten Phasen im Bild R42 in dem Beton-Bruchmaterial identifizieren. Hauptbestandteile sind Gesteinskörnungen, insbesondere bestehend aus den Phasen Quarz und Feldspäte sowie untergeordnet aus Schichtgittersilikaten (Muskovit) und sehr untergeordnet Olivin und Pyroxen. Restklinkerphasen aus dem eingesetzten Zement sind röntgenographisch nicht nachweisbar, allerdings die gebildeten Calciumsilikathydratphasen und das bei der Zementhydratation entstehende Portlandit. Neben den Vorgenannten sind ferner noch Calcit (vermutlich Karbonatisierungsprodukt aus Calciumhydroxid) und Ettringit in Spuren nachweisbar.

Die vergleichenden 3D-Ansichten sind in den Bildern R43, R44 und R45 für den Winkelbereich $5 - 62^\circ$ 2θ angegeben. Beim Herauszoomen des Winkelbereichs $5 - 20^\circ$ 2θ erkennt man, dass in den größeren Fraktionen eine deutliche Anreicherung von Calciumhydroxid zu erkennen ist. Calciumhydroxid hat die Mohshärte 2,5 bis 3 (ritzbar mit Fingernagel) und zeichnet sich durch eine vollkommene Spaltbarkeit nach $\{0001\}$ aus, so dass eine deutliche Anreicherung in der feinen Fraktion vorkommen müsste. Der Grund für die stärkere Anreicherung in den groben Fraktionen kann hier nicht eindeutig geklärt werden.

4.2.3 Kalk

Die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelten chemischen Kennwerte des verwendeten Brantkalkes CL 90 sind in der nachfolgenden Tabelle 6 zusammengestellt.

Parameter	Einheit	Durchschnitt
CaO	M.-%	95,0
MgO	M.-%	0,55
SiO ₂	M.-%	0,90
Al ₂ O ₃	M.-%	0,41
Fe ₂ O ₃	M.-%	0,22
Mn ₃ O ₄	M.-%	0,06
SO ₃	M.-%	0,12
CO ₂	M.-%	1,65
t 60-Wert	min	3,2
Tmax	°C	72,6

Tabelle 6: Kennwerte des verwendeten Kalkes

4.2.4 Wasser

Als Wasser wurde für die Untersuchungen demineralisiertes Wasser verwendet. Die Demineralisierung erfolgte mittels Natriumpermutit.

4.3 Eigenschaftswerte der Kalksandstein-Prüfkörper

Die physikalischen Untersuchungsergebnisse werden in erster Linie bezüglich der Steindruckfestigkeit im Zusammenhang mit der Steinrohddichte ausgewertet und näher erläutert. Mit der Variation der Herstellparameter wird bei den mit Recycling-Material beaufschlagten Serien erkundet, inwieweit Einbußen bei den qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerten durch die Anpassung von verfahrenstechnischen Produktionsparametern ausgeglichen werden können. Aufgrund der relativ geringen Streuungen werden ausschließlich Mittelwerte angegeben.

4.3.1 Basisserien ohne Zugabe von RC-Materialien

Festigkeiten und Rohdichte:

Die Ergebnisse sind in der Übersichtstabelle 12 im Anhang auf der Seite 76 aufgeführt. Die Basiswerte der Steindruckfestigkeit und Biegezugfestigkeit sind für die unter Verwendung des Mittelsandes 0/2 mm mit den Basis-Herstellparametern erzeugten Recyclingstein-Prüfkörper im Folgenden aufgeführt:

- **Basis-Herstellparameter**
 - CaO-Dosis = 7 M.-%
 - Pressfeuchte $F_p = 5$ M.-%
 - Pressdruck $\sigma_p = 15$ N/mm²
 - Haltezeit $t_h = 4$ h

- **Mittelsand 0/2 mm - Basisserie 4:**
 - Steindruckfestigkeit: $\beta_{D,St} = 21,6$ N/mm²
 - Steinbiegezugfestigkeit: $\beta_{D,St} = 2,90$ N/mm²
 - Steinrohddichte: $\rho_{tr} = 1,803$ kg/dm³.

Die Variation der Herstellparameter der Basisserien führt zu folgenden Änderungen bezüglich der Festigkeit und Rohdichte der Kalksandstein-Prüfkörper:

Mit der Absenkung der CaO-Dosis von 7 M.-% auf 5 M.-% reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6$ N/mm² auf $\beta_{D,St} = 11,6$ N/mm². Wird die CaO-Dosis auf 9 M.-% angehoben, steigt die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6$ N/mm² auf $\beta_{D,St} = 29,8$ N/mm² an. Mit der Steigerung der CaO-Dosis von 5 M.-% über 7 M.-% auf 9 M.-% steigt die Steinrohddichte von $\rho_{tr} = 1,778$ kg/dm³ über $\rho_{tr} = 1,803$ kg/dm³ auf $\rho_{tr} = 1,812$ kg/dm³ an. Siehe Bild 21. Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15$ N/mm² auf $\sigma_p = 10$ N/mm² führt zu einer relativ geringen Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6$ N/mm² auf $\beta_{D,St} = 19,4$ N/mm².

Die übrigen Kennwerte (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung. Bei der Haftscherfestigkeit wird unter Verwendung eines Mörtels der Mörtelgruppe IIa ein Wert von $\beta_{HZ} = 0,20$ N/mm² erreicht. 25 Frost-Tau-Wechsel werden schadenfrei überstanden. Die Schwinddehnung beträgt nach 90 Messtagen 0,20 mm/m. Mittels Differenzial-Thermoanalyse wird ein Gehalt an nicht umgesetztem CaO in Höhe von 0,19 M.-% ermittelt.

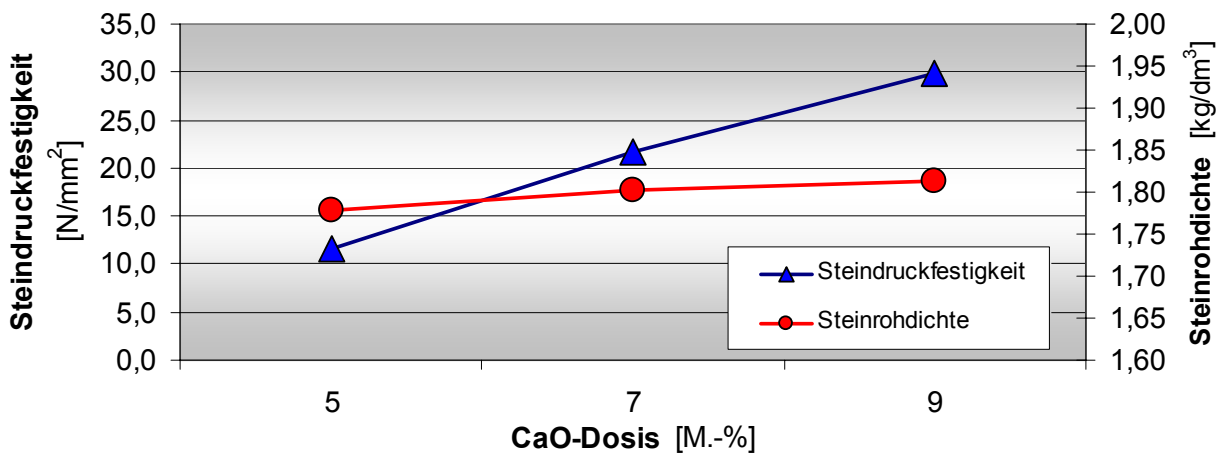


Bild 29: Einfluss der CaO-Dosis auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte



Bild 30: Prüfkörper der Basisserie 3 - ohne Zugabe von Recycling-Material

4.3.2 Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material - sortenrein

A) Zugabe der Fraktion 0/2 mm - sortenrein

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung von sortenreinem Kalksandstein-Recycling-Material der Körnung 0/2 mm gegenüber der Nullserie auf einem niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Kalksandstein-Bruchmaterial der Körnung 0/2 mm reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 16,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 9).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer weiteren Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 16,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 9) auf $\beta_{D,St} = 13,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 8).

Die übrigen Kennwerte (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung.

B) Zugabe der Fraktion 2/4 mm - sortenrein

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung von sortenreinem Kalksandstein-Recycling-Material der Körnung 2/4 mm auf einem deutlich niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Kalksandstein-Bruchmaterial der Körnung 2/4 mm reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 8,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 16).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer weiteren Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 8,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 16) auf $\beta_{D,St} = 5,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 15).

Die Steinzugfestigkeit und die Steinbiegezugfestigkeit werden ebenfalls deutlich reduziert. Die übrigen Kennwerte (Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung. Bei den unter Verwendung des groben RC-Materials hergestellten Prüfkörpern werden Aufrauungen an den Steinecken und Steinkanten festgestellt. Siehe Bilder 31 bis 34.

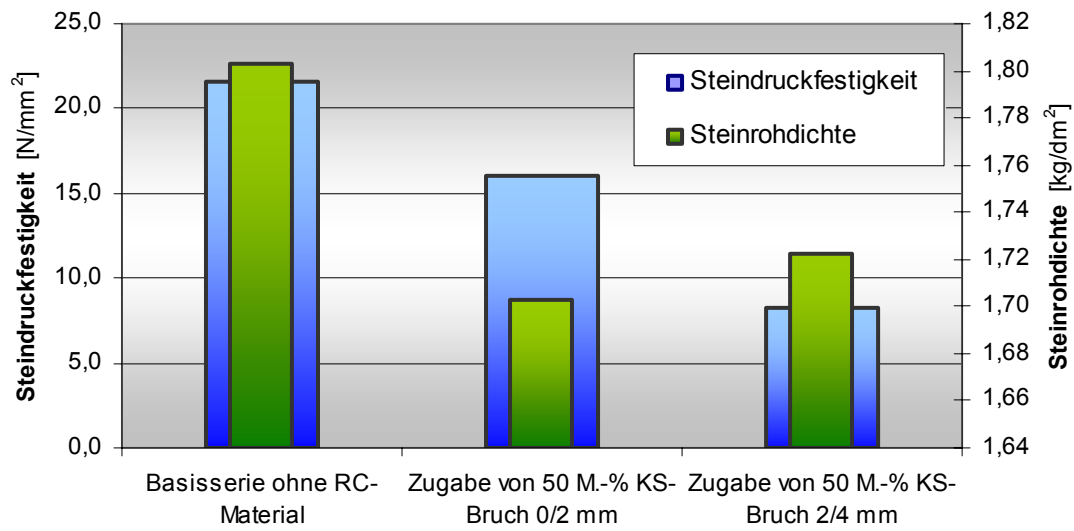


Bild 31: Einfluss der Zugabe von sortenreinem Kalksandstein-Recycling-Material auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte



Bild 32: Prüfkörper der Serie 9 - Zugabe von 50 M.-% Kalksandstein-Recycling-Material der feinen Fraktion 0/2 mm



Bild 33: Prüfkörper der Serie 15: - Zugabe von 50 M.-% sortenreinem Kalksandstein-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm - Reduzierung des Pressdrucks - deutlicher Aufraueffekt



Bild 34: Prüfkörper der Serie 16: - Zugabe von 50 M.-% sortenreinem Kalksandstein-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm - Aufraueffekt

4.3.3 Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material - verunreinigt

A) Zugabe der Fraktion 0/2 mm - verunreinigt

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des mit Beton- und Mörtelresten verunreinigten Kalksandstein-Recycling-Materials der Körnung 0/2 mm auf einem niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Kalksandstein-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 17,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 23).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer weiteren Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 17,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 23) auf $\beta_{D,St} = 15,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 22).

Die übrigen Kennwerte (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung.

B) Zugabe der Fraktion 2/4 mm - verunreinigt

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des mit Beton- und Mörtelresten verunreinigten Kalksandstein-Recycling-Materials der Körnung 2/4 mm auf einem deutlich niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Kalksandstein-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 7,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 30).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer weiteren Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 7,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 30) auf $\beta_{D,St} = 4,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 29).

Die Steinzugfestigkeit und die Steinbiegezugfestigkeit werden ebenfalls deutlich reduziert. Die übrigen Kennwerte (Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung. Bei den unter Verwendung des groben RC-Materials hergestellten Prüfkörpern werden Aufrauungen an den Steinecken und Steinkanten festgestellt. Siehe Bilder 35 bis 38.

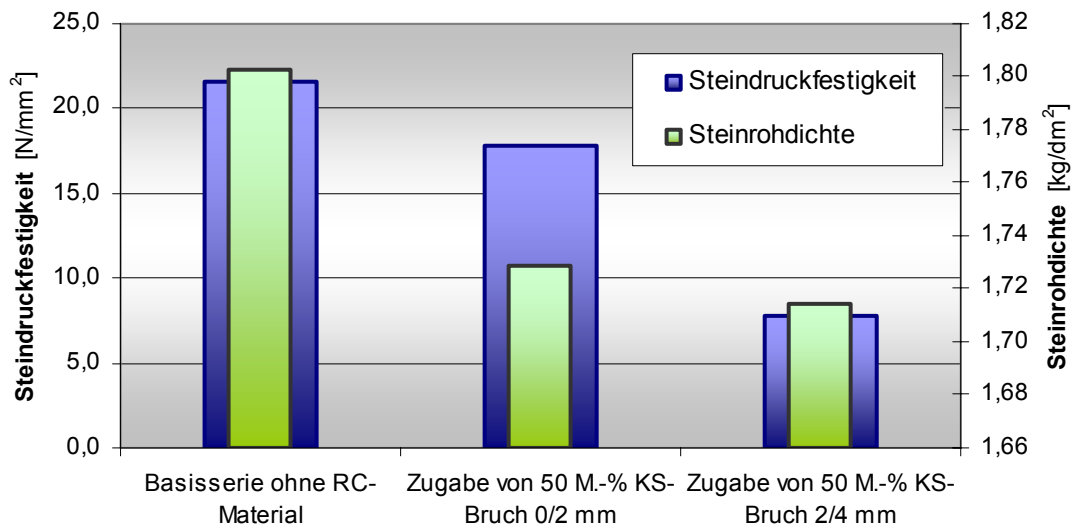


Bild 35: Einfluss der Zugabe von verunreinigtem Kalksandstein-Recycling-Material auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte

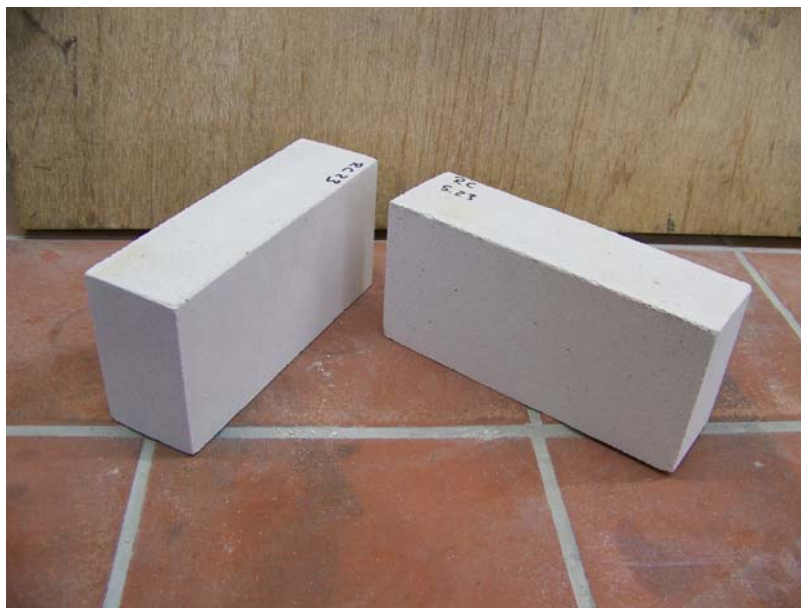


Bild 36: Prüfkörper der Serie 23 - Zugabe von 50 M.-% verunreinigtem Kalksandstein-Recycling-Material der feinen Fraktion 0/2 mm

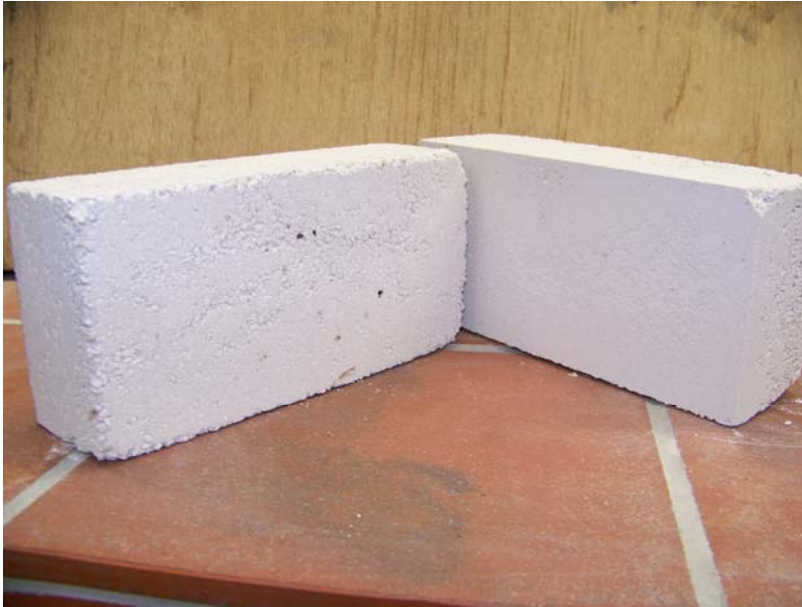


Bild 37: Prüfkörper der Serie 29: - Zugabe von 50 M.-% verunreinigtem Kalksandstein-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm - Reduzierung des Pressdrucks - deutlicher Aufraueffekt



Bild 38: Prüfkörper der Serie 30: - Zugabe von 50 M.-% verunreinigtem Kalksandstein-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm - Aufraueffekt

4.3.4 Zugabe von Ziegel-Recycling-Material

A) Zugabe der Fraktion 0/2 mm

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des Ziegel-Recycling-Materials der Körnung 0/2 mm insgesamt auf einem niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 25 M.-% des Mittelsandes durch dieses Ziegel-Bruchmaterial verändert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) nicht wesentlich: $\beta_{D,St} = 22,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 34).

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Ziegel-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 12,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 35 - Hauptserie Ziegel-Recycling-Material).

Durch den Austausch von 75 M.-% des Mittelsandes durch dieses Ziegel-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 10,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 39).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer leichten Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 12,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 35) auf $\beta_{D,St} = 10,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 37).

Eine Erhöhung der CaO-Dosis von 7 M.-% auf 9 M.-% führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 12,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 35) auf $\beta_{D,St} = 17,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 36).

Eine Verlängerung der Haltezeit von $t_h = 4 \text{ h}$ auf $t_h = 6 \text{ h}$ führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 12,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 35) auf $\beta_{D,St} = 17,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 38).

Die übrigen Kennwerte (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung.

B) Zugabe der Fraktion 2/4 mm -

Die Verwendung des groben Ziegel-Recycling-Materials der Körnung 2/4 mm führt bei einer Zugabemenge von 50 M.-% zu Prüfkörpern mit einer sehr rauen Oberfläche und gravierenden Verfärbungen. Unter Ansatz dieser Herstellparameter sind keine einwandfreien Mauerstein-Prüfkörper herstellbar. Dieser Ansatz wird deshalb nicht weiterverfolgt.

Siehe Bilder 39 bis 42.

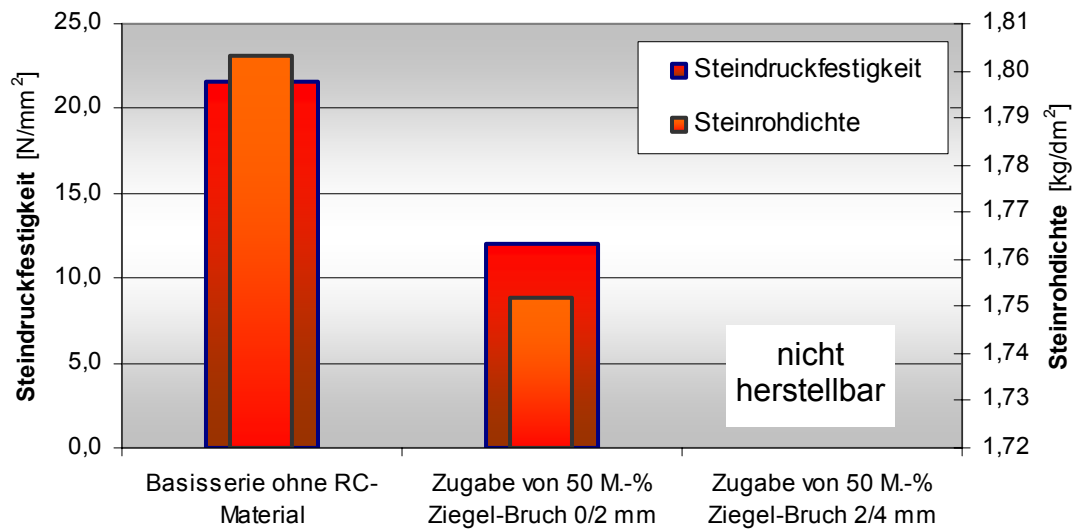


Bild 39: Einfluss der Zugabe von Ziegel-Recycling-Material auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte

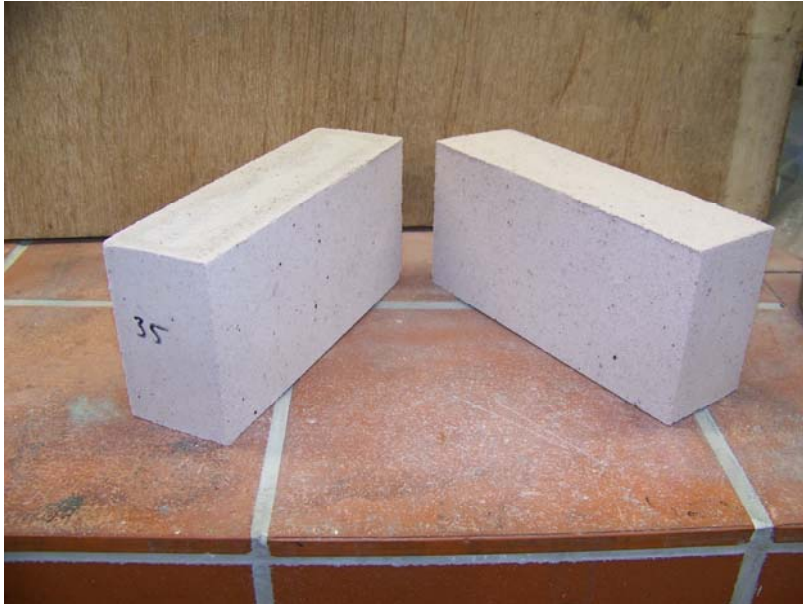


Bild 40: Prüfkörper der Serie 35 - Zugabe von 50 M.-% Ziegel-Recycling-Material der feinen Fraktion 0/2 mm - Pressdruck $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$

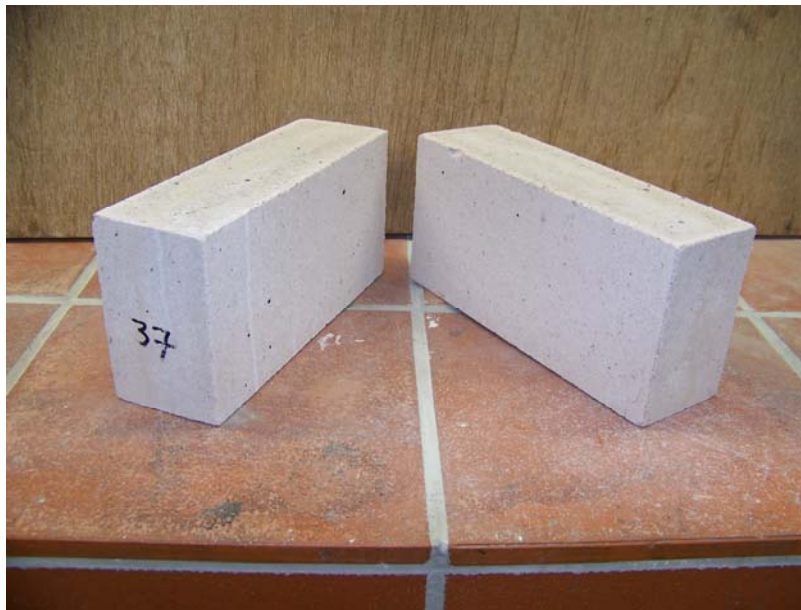


Bild 41: Prüfkörper der Serie 37 - Zugabe von 50 M.-% Ziegel-Recycling-Material der feinen Fraktion 0/2 mm - Pressdruck $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$



Bild 42: Prüfkörper der Serie 41 - Zugabe von 50 M.-% Ziegel-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm - Pressdruck $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ - starke lokale Verfärbungen

4.3.5 Zugabe von Porenbeton-Recycling-Material

A) Zugabe der Fraktion 0/2 mm

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des Porenbeton-Recycling-Materials der Körnung 0/2 mm ebenfalls auf einem niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 25 M.-% des Mittelsandes durch dieses Porenbeton-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 6,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 44).

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Porenbeton-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 5,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 45 - Hauptserie Porenbeton-Recycling-Material).

Eine Erhöhung der CaO-Dosis von 7 M.-% auf 9 M.-% führt nicht zu der erhofften Festigkeitserhöhung, hier ergibt sich eine Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 4,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 46).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer weiteren Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 5,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 45) auf $\beta_{D,St} = 4,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 47).

Eine Verlängerung der Haltezeit von $t_h = 4 \text{ h}$ auf $t_h = 6 \text{ h}$ führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 5,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 45) auf $\beta_{D,St} = 6,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 48).

Die übrigen Kennwerte der Prüfkörper (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung.

B) Zugabe der Fraktion 2/4 mm

Die Verwendung des groben Porenbeton-Recycling-Materials der Körnung 2/4 mm führt bei einer Zugabemenge von 50 M.-% zu Prüfkörpern mit einer sehr rauen Oberfläche und gravierenden Verfärbungen. Unter Ansatz dieser Herstellparameter sind keine einwandfreien Mauerstein-Prüfkörper herstellbar. Dieser Ansatz wird deshalb nicht weiter verfolgt.

Siehe Bild 43.

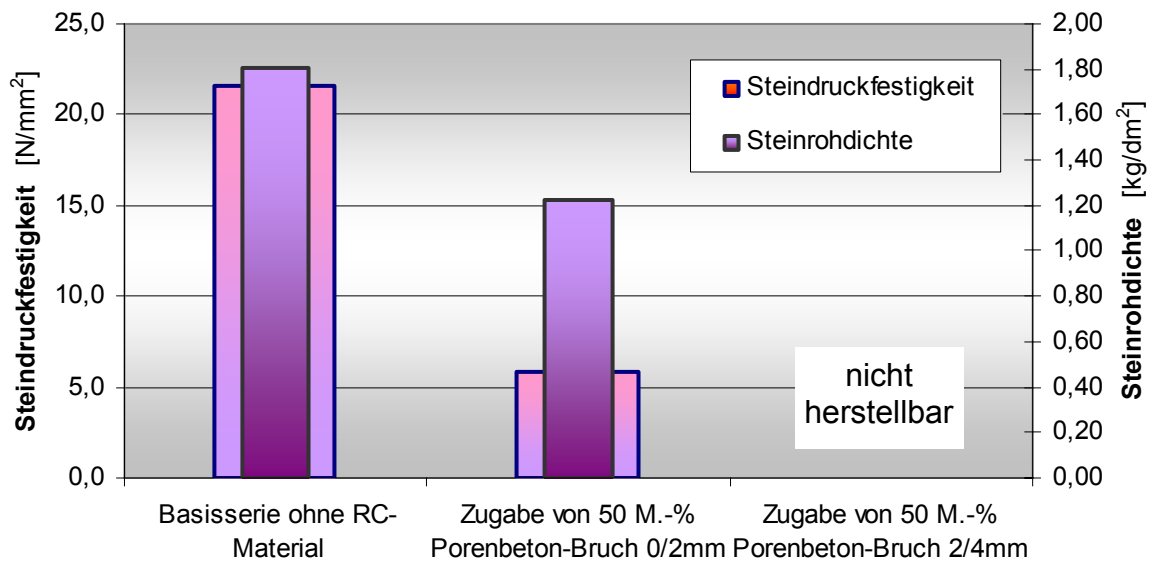


Bild 43: Einfluss der Zugabe von Porenbeton-Recycling-Material auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte

4.3.6 Zugabe von Beton-Recycling-Material

A) Zugabe der Fraktion 0/2 mm

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des Beton-Recycling-Materials der Körnung 0/2 mm insgesamt auf einem niedrigeren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 25 M.-% des Mittelsandes durch dieses Beton-Bruchmaterial verändert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) nicht wesentlich: $\beta_{D,St} = 19,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 54).

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Beton-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 13,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 55 - Hauptserie Beton-Recycling-Material).

Durch den Austausch von 75 M.-% des Mittelsandes durch dieses Beton-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 12,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 59).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer leichten Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 13,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 55) auf $\beta_{D,St} = 10,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 57).

Eine Erhöhung der CaO-Dosis von 7 M.-% auf 9 M.-% führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 13,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 55) auf $\beta_{D,St} = 14,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 56).

Eine Verlängerung der Haltezeit von $t_h = 4 \text{ h}$ auf $t_h = 6 \text{ h}$ führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 13,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 55) auf $\beta_{D,St} = 15,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 58).

Die übrigen Kennwerte (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung.

B) Zugabe der Fraktion 2/4 mm

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des Beton-Recycling-Materials der Körnung 2/4 mm ebenfalls auf einem deutlich niedrigeren Wertenniveau. Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Beton-Bruchmaterial reduziert sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 10,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 61). Die Verwendung des groben Beton-Recycling-Materials der Körnung 2/4 mm führt bei einer Zugabemenge von 50 M.-% zu Prüfkörpern mit einer sehr rauen Oberfläche und gravierenden Verfärbungen. Unter Ansatz dieser Herstellparameter sind keine einwandfreien Mauerstein-Prüfkörper herstellbar. Dieser Ansatz wird deshalb nicht weiter verfolgt. Siehe Bilder 44 bis 46.

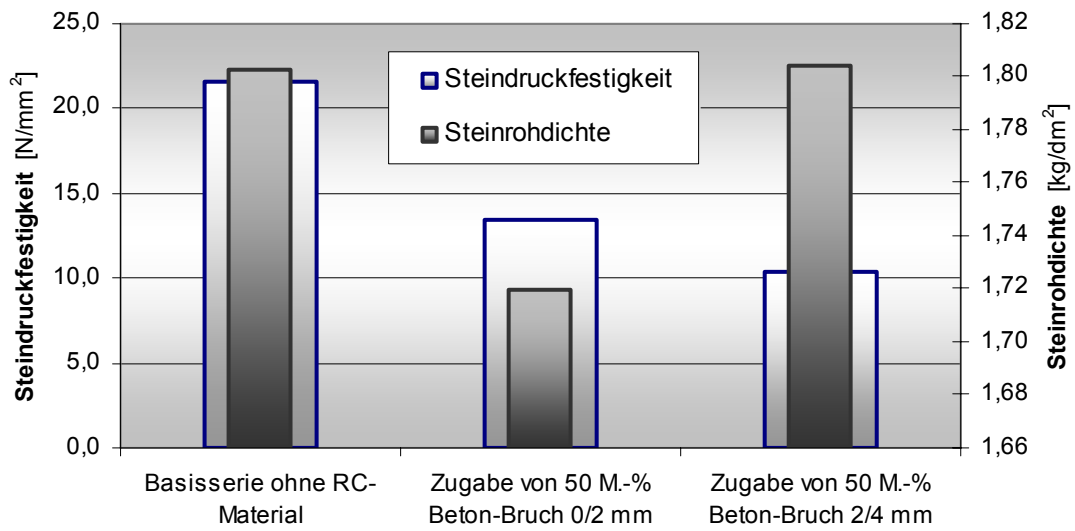


Bild 44: Einfluss der Zugabe von Beton-Recycling-Material auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte



Bild 45: Prüfkörper der Serie 55 - Zugabe von 50 M.-% Beton-Recycling-Material der feinen Fraktion 0/2 mm



Bild 46: Prüfkörper der Serie 61 - Zugabe von 50 M.-% Beton-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm

4.3.7 Zugabe von Naturstein-Recycling-Material

A) Zugabe der Fraktion 0/2 mm

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des Naturstein-Recycling-Materials der Körnung 0/2 mm insgesamt auf einem höheren Wertenniveau.

Durch den Austausch von 25 M.-% des Mittelsandes durch dieses Naturstein-Bruchmaterial erhöht sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 24,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 64).

Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Naturstein-Bruchmaterial erhöht sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 27,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 65 - Hauptserie Naturstein -Recycling-Material).

Durch den Austausch von 75 M.-% des Mittelsandes durch dieses Naturstein-Bruchmaterial erhöht sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 29,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 69).

Die Reduzierung des Pressdrucks von $\sigma_p = 15 \text{ N/mm}^2$ auf $\sigma_p = 10 \text{ N/mm}^2$ führt zu einer leichten Abnahme der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 27,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 65) auf $\beta_{D,St} = 24,4 \text{ N/mm}^2$ (Serie 67).

Eine Erhöhung der CaO-Dosis von 7 M.-% auf 9 M.-% führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 27,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 65) auf $\beta_{D,St} = 33,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 66).

Eine Verlängerung der Haltezeit von $t_h = 4 \text{ h}$ auf $t_h = 6 \text{ h}$ führt zu einer Festigkeitssteigerung von $\beta_{D,St} = 27,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 65) auf $\beta_{D,St} = 28,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 68).

Die übrigen Kennwerte (Steinzugfestigkeit, Frostwiderstandsfähigkeit, Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit, Bezugsfeuchtegehalt, Schwinddehnung und Hg-füllbare Porosität) liegen ebenfalls in der für Kalksandsteine üblichen Größenordnung.

B) Zugabe der Fraktion 2/4 mm - verunreinigt

Die Steindruckfestigkeiten liegen bei Verwendung des Naturstein-Recycling-Materials der Körnung 2/4 mm ebenfalls auf einem hohen Wertenniveau. Durch den Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch dieses Naturstein-Bruchmaterial erhöht sich die Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) deutlich auf $\beta_{D,St} = 33,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 71). Die Steinrohddichte steigt bei Ansatz dieser Herstellparameter von $\rho_{tr} = 1,803 \text{ kg/dm}^3$ (Basisserie 4) auf $\rho_{tr} = 2,000 \text{ kg/dm}^3$ an (Serie 71).

Diese Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf dieses Natursteinmaterial und sind nicht direkt auf anderes Naturstein-Material übertragbar.

Siehe Bilder 47 bis 49.

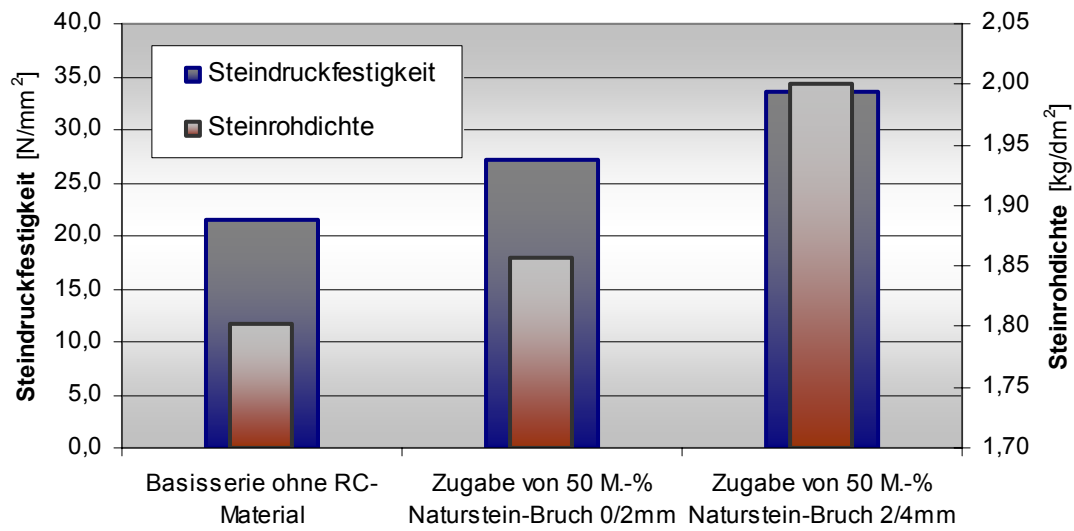


Bild 47: Einfluss der Zugabe von Beton-Recycling-Material auf die Steindruckfestigkeit und die Steinrohdichte



Bild 48: Prüfkörper der Serie 65 - Zugabe von 50 M.-% Naturstein-Recycling-Material der feinen Fraktion 0/2 mm



Bild 49: Prüfkörper der Serie 71 - Zugabe von 50 M.-% Naturstein-Recycling-Material der groben Fraktion 2/4 mm

4.3.8 Zugabe von Recycling-Material-Mischungen

Mischung aus Kalksandstein-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm:

Der Austausch von Mittelsand durch eine Mischung aus jeweils 25 M.-% Kalksandstein-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm führt zu einer Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 11,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 76).

Mischung aus Ziegel-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm:

Der Austausch von Mittelsand durch eine Mischung aus jeweils 25 M.-% Ziegel-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm führt zu einer Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 6,0 \text{ N/mm}^2$ (Serie 77).

Mischung aus Porenbeton-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm:

Der Austausch von Mittelsand durch eine Mischung aus jeweils 25 M.-% Porenbeton-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm führt zu einer Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 4,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 78).

Mischung aus Beton-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm:

Der Austausch von Mittelsand durch eine Mischung aus jeweils 25 M.-% Beton-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm führt zu einer Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 10,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 79).

Mischung aus Naturstein-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm:

Der Austausch von Mittelsand durch eine Mischung aus jeweils 25 M.-% Naturstein-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm und 2/4 mm führt zu einer deutlichen Erhöhung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 29,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 80).

Mischung a) aus 30 M.-% Kalksandstein + 40 M.-% Ziegel + 20 M.-% Porenbeton + 5 M.-% Beton + 5 M.-% Naturstein (Fraktion 0/2 mm):

Der Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch die Mischung a führt zu einer sehr deutlichen Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 12,8 \text{ N/mm}^2$ (Serie 81).

Mischung b) aus 50 M.-% Kalksandstein + 50 M.-% Ziegel (Fraktion 0/2 mm):

Der Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch die Mischung b führt zu einer deutlichen Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 14,6 \text{ N/mm}^2$ (Serie 82).

Mischung c) aus 40 M.-% Kalksandstein + 53 M.-% Ziegel + 7 M.-% Porenbeton (Fraktion 0/2 mm):

Der Austausch von 50 M.-% des Mittelsandes durch die Mischung c führt zu einer sehr deutlichen Reduzierung der Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 21,6 \text{ N/mm}^2$ (Basisserie 4) auf $\beta_{D,St} = 12,2 \text{ N/mm}^2$ (Serie 83).

4.4 Ergebnisse der Werksversuche

Die physikalischen Kennwerte der 2 Werkssande und des Recyclingsplitts sind in der nachfolgenden Tabelle 7 und in Bild 50 wiedergegeben. Die Ergebnisse dieser Werksversuche sind in der nachfolgenden Tabelle 8 zusammengestellt.

Sandsorte / Mischung		Recycling-Material		Eigensand		Lehm Kies		Linke Einhüllende		Rechte Einhüllende	
Schüttdichte, geschüttet	kg/dm ³	1,32		1,60		1,47					
Schüttdichte, gerüttelt	kg/dm ³	1,50		1,80		1,70					
Schüttdichtedifferenz	kg/dm ³	0,18		0,20		0,24					
Spezifische Oberfläche	cm ² /g	264		127		169					
Abschlammbares	Vol.-%	11,0		4,3		19,6					
Huminstoffe		farblos		farblos		mittelgelb					
Siebanalyse	X-Daten	Rückstand	Summe F	Rückstand	Summe R	Rückstand	Summe R	Rückstand	Summe R	Rückstand	Summe R
< 0,036 mm	0	2,4	0,0	0,2	0,0	1,3	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0
> 0,036 mm	0,036	3,5	0,1	0,5	0,2	1,1	1,3	2,5	2,5	1,5	0,0
> 0,063 mm	0,063	4,5	2,6	4,5	0,8	2,0	2,4	12,0	5,0	2,5	1,5
> 0,112 mm	0,112	8,4	4,5	17,9	5,2	7,4	4,4	32,0	17,0	5,0	4,0
> 0,2 mm	0,2	17,2	8,1	37,5	23,2	25,7	11,8	44,0	49,0	11,0	9,0
> 0,355 mm	0,355	16,3	19,8	24,5	60,7	29,9	37,5	7,0	93,0	23,0	20,0
> 0,63 mm	0,63	10,7	41,8	8,9	85,2	17,4	67,4	0,0	100,0	29,0	43,0
> 1,12 mm	1,12	10,3	66,8	3,5	94,0	9,5	84,8	0,0	100,0	23,0	72,0
> 2 mm	2	13,3	87,8	1,4	97,6	4,4	94,3	0,0	100,0	5,0	95,0
> 3,55 mm	3,55	12,7	97,7	1,0	99,0	1,4	98,6	0,0	100,0	0,0	100,0
> 6,3 mm	6,3	0,7	100,0		100,0		100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Summe				100,0		100,0		100,0		100,0	

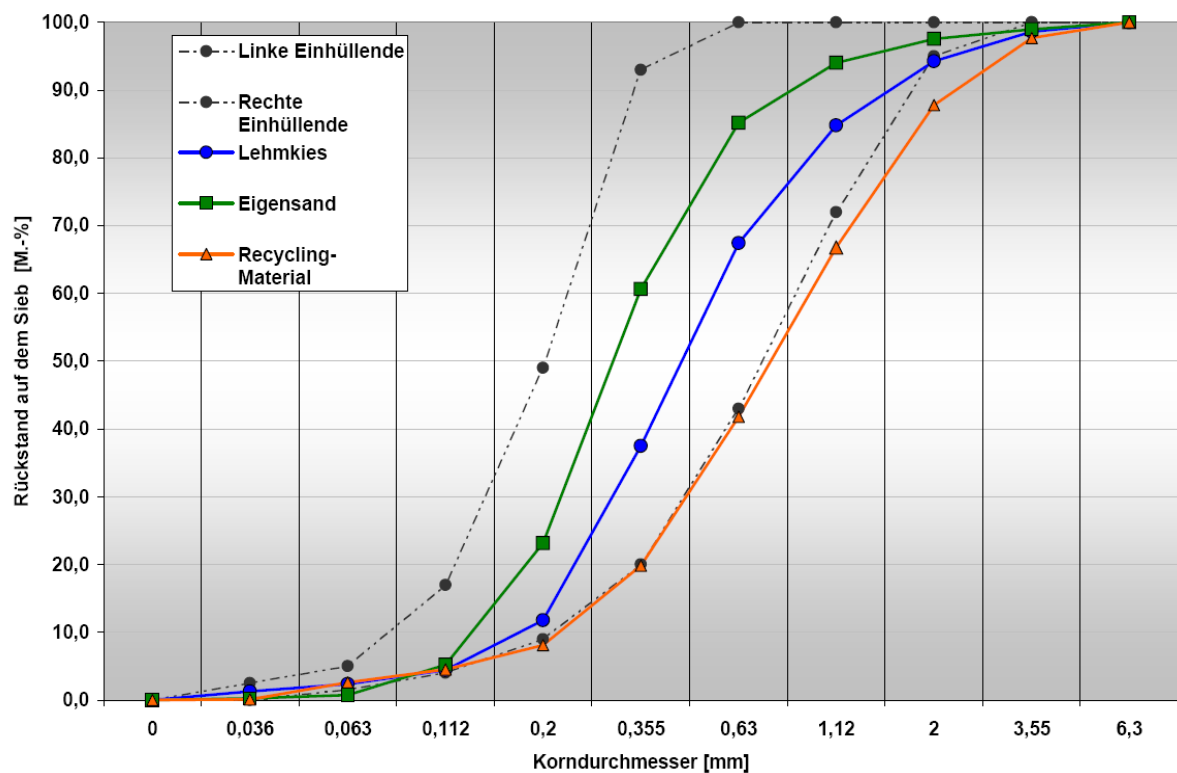


Tabelle 7 und Bild 50: Physikalische Eigenschaftswerte der Werkssande und des Recycling-Materials

Serie	Sand	RC-Material	Pressfeuchte	CaO-Dosis	Pressdruck	Härte-dauer	Härte-temperatur	Stein-druck-festig-keit	Stein-roh-dichte	Schaden-frei über-standene Frost-Tau-Wechsel	Frei-kalk-gehalt (DTA)
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	σ_p kN	t_h h	T_h °C	$\beta_{D,St}$ N/mm ²	ρ_{tr} kg/dm ³	-	M.-%
W0	100	0	3,8	5,8	3500	3,5-4,5-1,5	197	19,7	1,74	21	0,0
W1	ca. 89	ca. 11	3,8	5,8	3500	3,5-4,5-1,5	197	17,9	1,71	18	0,0
W2	ca. 78	ca. 22	3,8	5,8	3500	3,5-4,5-1,6	197	17,6	1,70	18	0,0
W3	ca. 67	ca. 33	3,8	5,8	3500	3,5-4,5-1,6	197	17,3	1,70	12	0,0

Tabelle 8: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse der Werksversuche

Die im Rahmen dieses Werksversuchs hergestellten Kalksandsteine lassen sich der Steindruckfestigkeitsklasse 15 und der Rohdichteklasse 1,8 zuordnen. Es ist erkennbar, dass die Steinroh-dichte und die Steindruckfestigkeit mit zunehmender Menge an Recycling-Material abnimmt. Während die Steine der Nullserie W0 (ohne Recycling-Material) eine Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 19,7 \text{ N/mm}^2$ mit einer Steinroh-dichte von $\rho_{tr} = 1,74 \text{ kg/dm}^3$ aufweisen, nimmt die Steindruckfestigkeit bei einer Zugabemenge von ca. 11 M.-% an Recycling-Material (Serie W1) auf $\beta_{D,St} = 17,9 \text{ N/mm}^2$ ($\rho_{tr} = 1,71 \text{ kg/dm}^3$) ab. Bei einer weiteren Steigerung der Zugabemenge auf ca. 22 M.-% (Serie W2) an Recycling-Material ergibt sich eine Steindruckfestigkeit von $\beta_{D,St} = 17,6 \text{ N/mm}^2$ ($\rho_{tr} = 1,70 \text{ kg/dm}^3$). Schließlich fällt bei einer Zugabemenge von ca. 33 M.-% Recycling-Material (Serie W3) die Steindruckfestigkeit weiter auf einen Wert von $\beta_{D,St} = 17,3 \text{ N/mm}^2$ ($\rho_{tr} = 1,70 \text{ kg/dm}^3$) ab.

Mit zunehmender Menge an Recycling-Material stellt sich ein zunehmender grauer Farbton ein. Ausblühungen wurden nicht festgestellt.

Die erzeugten Recyclingsteine sind bestimmungsgemäß nicht für Verblendmauerwerk gedacht. trotzdem weisen die Steine eine gewisse Frostwiderstandsfähigkeit auf. Bei der Nullserie W0 (ohne Recycling-Material) wurden 21 Frost-Tau-Wechsel schadenfrei überstanden. Die Anzahl der schadenfrei überstandenen Frost-Tau-Wechsel nimmt mit ansteigender Zugabemenge an Recycling-Material über 18 (Serien W1 und W2) auf schließlich 12 (Serie W3) ab.

Gehalte an nicht umgesetztem Kalk (Freikalk) in den Steinen sind nicht erkennbar. Daraus kann geschlossen werden, dass die CaO-Dosis mit 5,8 M.-% und die Härtezeit mit $t_h = 3,5-4,5-1,5 \text{ h}$ bei einer Härtetemperatur von $T = 197 \text{ °C}$ genau aufeinander abgestimmt waren. Es ist davon auszugehen, dass der in Betonbruchmaterial vorhandene Gehalt an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ einen Beitrag zur Festigkeitsentwicklung geleistet hat, siehe [15].

4.5 Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen am iBMB

Druckfestigkeit:

Die Serie 3 erreichte eine mittlere gemessene Druckfestigkeit von $17,5 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $0,47 \text{ N/mm}^2$, die Serie 81 eine Druckfestigkeit von $12,7 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $1,97 \text{ N/mm}^2$ und die Serie 83 eine mittlere Druckfestigkeit von $16,6 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $1,58 \text{ N/mm}^2$. Die Ergebnisse der Einzelprüfungen sind im Anhang dieses Untersuchungsberichtes dargestellt.

Zentrische Zugfestigkeit:

Die Serie 3 erreicht eine mittlere Zugfestigkeit von $1,28 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $0,08 \text{ N/mm}^2$, die Serie 81 eine Zugfestigkeit von $1,52 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $0,28 \text{ N/mm}^2$ und die Serie 83 eine mittlere Zugfestigkeit von $1,72 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $0,25 \text{ N/mm}^2$. Die Ergebnisse der Einzelprüfungen sind im Anhang dieses Untersuchungsberichtes dargestellt.

Druckelastizitätsmodul:

Die Serie 3 erreicht einen mittleren Druckelastizitätsmodul von 7.300 N/mm^2 bei einer Standardabweichung von 158 N/mm^2 , die Serie 81 einen Druckelastizitätsmodul von 7.320 N/mm^2 bei einer Standardabweichung von 890 N/mm^2 und die Serie 83 einen mittleren Druckelastizitätsmodul von 9.720 N/mm^2 bei einer Standardabweichung von 870 N/mm^2 . Die Ergebnisse der Einzelprüfungen sind im Anhang dieses Untersuchungsberichtes dargestellt.

Zugelastizitätsmodul:

Die Serie 3 erreicht einen mittleren Zugelastizitätsmodul von 7.111 N/mm^2 bei einer Standardabweichung von 400 N/mm^2 , die Serie 81 einen Zugelastizitätsmodul von 8.138 N/mm^2 bei einer Standardabweichung von 600 N/mm^2 und die Serie 83 einen mittleren Zugelastizitätsmodul von 10.400 N/mm^2 bei einer Standardabweichung von 1000 N/mm^2 . Die Ergebnisse der Einzelprüfungen sind im Anhang dieses Untersuchungsberichtes dargestellt.

Die Streuungen der Werte für die berechneten Rohdichten und der gemessenen Druckfestigkeiten sind relativ klein. Festzustellen ist allerdings, dass die Streuungen bei den Steinserien 81 und 83 aus Abbruchmaterial insgesamt größer sind als bei der Referenzserie 3. Die Streuungen der im Versuch gemessenen Werte sind auch bei der Zugfestigkeit und beim Druck- und Zugelastizitätsmodul für die beiden Steinserien 81 und 83 aus Abbruchmaterial größer als bei der Referenzserie 3.

Die Tabelle 9 zeigt eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse.

Serie	Mittlere Druckfestigkeit $\beta_{D,St}$	Steinrohddichte ρ_{tr}	Zentrische Zugfestigkeit β_z	Druckelastizitätsmodul E_D	Zugelastizitätsmodul E_z
	N/mm^2	kg/dm^3	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
3	17,5	1,80	1,28	7.300	7.111
81	12,7	1,58	1,52	7.320	8.138
83	16,6	1,68	1,72	9.720	10.400

Tabelle 9: Übersicht über die Untersuchungsergebnisse

4.6 Ergebnisse der mineralogischen Analyse der Recyclingstein-Prüfkörper

Die Ergebnisse aus der mineralogischen Untersuchung sind im Folgenden wiedergegeben. Die zugehörigen Bilder M-M1 bis M-R22 finden sich im Anhang A.

a. Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)

Zur Ermittlung der Trockenrohddichte wurden die Ergebnisse aus der MIP herangezogen (siehe auch Bild M-M3). Die Dichten wurden mit den zuvor ermittelten Druckfestigkeiten der Steine (FVKS) in einem Diagramm aufgetragen (siehe Bild 51).

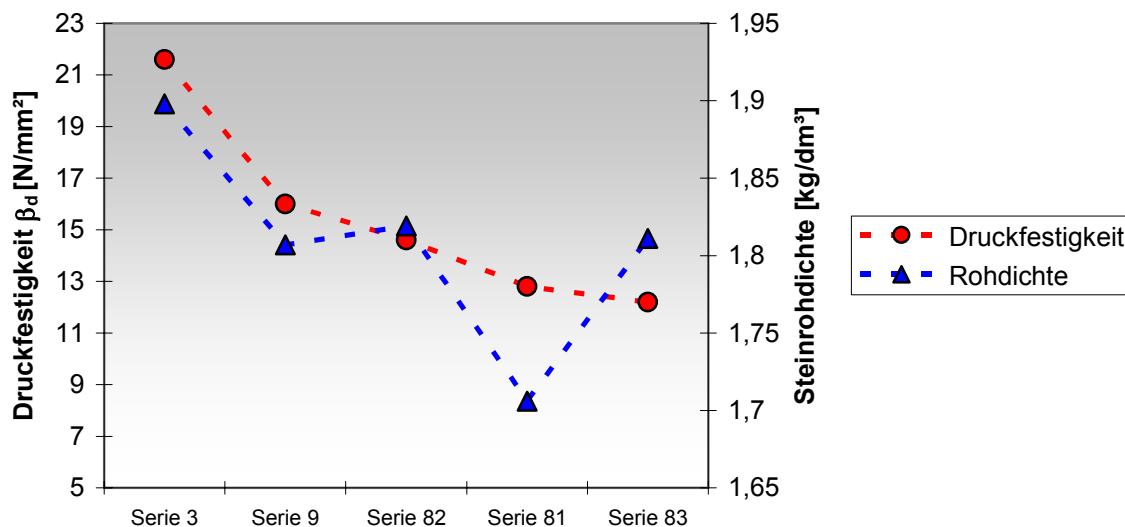


Bild 51: Druckfestigkeiten und Steinrohddichten der untersuchten Mustersteine

Der untersuchte Stein der Serie 3 (100 M.-% Mittelsand MS) hat im Vergleich zu den vier anderen untersuchten Steinen die höchste Druckfestigkeit (21,6 N/mm²) und die höchste Steinrohddichte (1,898 g/cm³). Durch die Reduzierung des Anteils des MS von 100 M.-% auf 50 M.-% und entsprechende Beimengung von Recyclingmaterial sinkt die Druckfestigkeit der Steine. Die Trockenrohddichten sinken dabei nicht deckungsgleich, liegen aber alle unterhalb des Steins 3 mit 100 M.-% MS. Der Stein der Serie 3 hat die geringste ermittelte Porosität (28,4 Vol.-%), die Hauptpeaks der Porenradienverteilung liegen im Bereich zwischen 0,004 - 0,01 μm und 10 - 20 μm . Liegen die Hauptpeaks des Steins 9 (50 M.-% MS, 50 M.-% KSBs) noch bei 0,02 und 5 - 13 μm , nähern sich die jeweiligen Hauptpeaks der übrigen Steine an (weniger kleine und weniger große Poren bei der Porenradienverteilung; siehe Bild M-M2). Stein 81 weist die größte Porosität (35,8 Vol.-%) und geringste Trockenrohddichte auf, die Porositäten der Steine 9, 82 und 83 liegen zwischen 29,9 Vol.-% und 32,1 Vol.-% (vergleiche auch kumuliertes Porenvolumen Bild M-M1).

b. Kapillare Wasseraufnahme

Ein eindeutig korrelierender Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der MIP und der kapillaren Wasseraufnahme kann nicht hergestellt werden. Es fällt jedoch auf, dass je größer der Porengehalt im Bereich von 5-20 μm ist, desto größer ist auch die kapillare Wasseraufnahme (siehe Bild M-M2 auf S. 116). Die Wasseraufnahmekoeffizienten ω der einzelnen Steine weichen erheblich voneinander ab. So hat Serie 3 den größten Wasseraufnahmekoeffizient $\omega = 6,04 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ und Serie 83 den kleinsten Wasseraufnahmekoeffizient $\omega = 2,41 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$. Alle Steine sind als saugend einzustufen, da ω stets größer $2,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ ist (siehe Bild M-W1 und M-W2).

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die REM-Bilder zeigen, dass Serie 3 mit 100% Mittelsand eine ausgeprägtere CSH-Phasenbildung („Verschweißen“ der Quarzkörner) aufweist, als alle anderen Proben. So zeigt z.B. Bild M-R2 das flächige "Verschweißen" der Quarzkörner der Serie 3, Bild M-R6 das eher punktuelle "Verschweißen" der Quarzkörner und der KSBs-Körner. Ein Vergleich der Bilder M-R3 und M-R7 zeigt die unterschiedliche Ausbildung des Reaktionssaumes. Bei Serie 3 umschließen die Säume mantelartig die Körner. Bei Serie 9 hingegen sind die Säume eher knotenartig mit kurzen CSH-Phasen ausgebildet.

Bei den Serien 81 bis 83 tritt ein „Verklumpen“ der Zuschläge mit den Quarzkörnern auf, wodurch sie eher miteinander verklebt als verschweißt wirken. Die Säume um die Quarzkörner sind nicht mehr mantelartig, sondern weitaus knotenartiger als noch bei Probe 9 (vergleiche hierzu Bilder M-R13, M-R17 und M-R22 mit Bild M-R7). Kann durch die Zugabe von Ziegelbruch-Recyclingmaterial die Rohdichte der Serie 82 im Vergleich zur Serie 9 gesteigert werden, nimmt die Steindruckfestigkeit jedoch ab. Ein höherer Anteil von Porenbetonbruch-Recyclingmaterial senkt die Rohdichte und unter Zugabe der Materialien Beton- und Natursteinbruch-Recyclingmaterial sinken die Druckfestigkeiten nochmals ab. Von den Serien 81 bis 83 hat Serie 82 die höchste Dichte und die höchste Druckfestigkeit. In Bild M-R17 ist zu erkennen, dass bei dieser Serie zwar auch knotenartige Säume vorhanden sind, diese aber verwachsener als die der Serien 81 und 83 sind (Bilder M-R13 und M-R22).

Phasenanalytische Untersuchung mittels Röntgendiffraktometrie

Betrachtet man sich die Röntgendiffraktogramme der untersuchten Steine, so fällt auf, dass das Röntgendiffraktogramm des KS-Steins der Serie 3 deutlich höhere Impulse aufweist, als die Röntgendiffraktogramme der anderen vier Recyclingsteine. Daraus lässt sich ableiten, dass der Stein der Serie 3, welcher zu 100 M.-% mit Mittelsand als Zuschlag hergestellt worden ist, eine höhere Kristallinität aufweist als die anderen vier untersuchten Recyclingsteine (vgl. Bild M-X1 mit Bildern M-X2, M-X3, M-X4 und M-X5).

Hauptphase bei allen untersuchten Kalksandsteinen ist, wie nicht anders zu erwarten war, Quarz (SiO_2). Außerdem enthalten alle untersuchten Recyclingsteine deutliche Gehalte an Feldspäten. Exemplarisch sind hier in das Diffraktogramm die Feldspäte Orthoklas, Anorthoklas und zum Teil Albit eingelegt worden. Des Weiteren lässt sich in allen untersuchten Steinen Tobermorit und Phillipsit röntgenographisch nachweisen. Ferner sind in den Proben geringe Mengen an Calcit (CaCO_3) nachweisbar.

In den Steinen der Serien 3 und 9 sind nur die vorgenannten Phasen enthalten, da in Serie 3 ausschließlich Mittelsand als Zuschlag verwendet worden ist und in Probe 9 ein 50/50-Gemisch aus Mittelsand und sortenreinem Kalksandsteinbruch.

In dem Stein der Serie 81 lässt sich zusätzlich zu den Phasen der CSH-Phasen und der Sande (Quarz, Feldspäte) auch noch Cordierit nachweisen, da in dieser Probe 5 M.-% Natursteinbruch verwendet worden ist. Ferner lässt sich ebenfalls in dem Stein der Serie 81 die Phase Hämatit nachweisen, eine Phase die in dem Ziegelbruch, welcher zu 15 M.-% in dem Stein eingesetzt worden ist, vorliegt.

Die vorangegangenen Aussagen zu den Steinen der Serie 81 lassen sich auch auf die Steine der Serien 82 und 83 übertragen. In den Steinen der Serie 82 und 83 ist im Vergleich zum Stein der Serie 81 kein Cordierit enthalten, da in diesen Steinen auch kein Natursteinbruch verwendet worden ist, allerdings lässt sich dort ebenfalls Hämatit aus dem Ziegelbruch identifizieren sowie zusätzlich in Serie 82 ein etwas erhöhter Gehalt an Schichtgittersilikaten, hier als Phase Illit.

Zusammenfassend lässt sich aus den röntgendiffraktometrischen Ergebnissen aufnehmen, dass ein Vorhandensein von Kalksandsteinbruch, Betonbruch und Porenbeton in den untersuchten Steinen röntgenographisch nicht eindeutig nachweisbar ist. Nachweisbar sind jedoch Natursteinbruchmaterialien, die sich durch bestimmten Phasengehalt (hier: Cordierit) auszeichnen, sowie Ziegelmaterial, da diesem die Phase Hämatit (Fe_2O_3) eindeutig zugeordnet werden kann.

Lichtmikroskopische Untersuchungen

Im Scan des Dünnschliffs der Probe aus Serie 3 lässt sich in übersichtlicher Weise die dichte Struktur der Probe erkennen (s. Bild M-L1). Da der Stein als Zuschlag 100 M.-% Mittelsand (gesamter vorhandener Korngrößenbereich) enthält, kann sich eine hohe Packungsdichte einstellen, was sich auch in der Rohdichte des Steins widerspiegelt. Neben der höchsten Dichte besitzt der Stein auch die höchste Druckfestigkeit der untersuchten Steine. In den Bildern M-L2 und M-L3 sind deutlich die ausgeprägten, miteinander verwachsenen CSH-Phasen zu erkennen, die wesentlich zur Druckfestigkeit beitragen. Bild M-L4 zeigt einen Zuschlag der gröberen Fraktion (im Bild unten rechts) und weitere kleine Zuschläge, die sich dicht aneinander orientiert haben (hohe Packungsdichte).

Die Probe der Serie 9 weist ebenfalls eine recht hohe Packungsdichte auf, aus den Bildern M-L5 und M-L6 ist aber zu erkennen, dass die Zuschläge (hier 50 M.-% MS und 50 M.-% KSB) nicht so dicht aneinander liegen wie die der Probe aus Serie 3. Die Zwischenräume der Zuschläge sind mit CSH-Phasen durchwachsen und auch die Zuschläge des KSB sind in die Struktur eingebunden. Bild M-L7 zeigt einen solchen KSB-Zuschlag, der in Bild M-L8 durch die rot gestrichelte Linie noch einmal hervorgehoben ist.

In dem Stein der Serie 81 ist die größte Anzahl an verwendeten Recyclingmaterialien vorhanden. Einige der Materialien lassen sich anhand ihrer Farbe schon im Scan des Dünnschliffs erkennen (Bild M-L9). Die Zuschläge scheinen auch hier gut in die Struktur der Probe eingebunden zu sein, die Zwischenräume sind mit CSH-Phasen durchwachsen (s. Bilder M-L10 und M-L11).

Eine genaue Charakterisierung der Form und inwieweit die CSH-Phasen miteinander verwachsen sind, kann hier -im Gegensatz zu den REM-Untersuchungen- nicht stattfinden. Es können aber die Zuschläge identifiziert werden, so zeigt z.B. Bild M-L11 einen Porenbetonzuschlag in der Mitte des Bildes. Um den Beton- und den Natursteinbruch zu identifizieren wurde der Dünnschliff im polarisierten Licht betrachtet. In Bild M-L12 ist in der rechten Bildhälfte ein Zuschlagkorn mit daran haftendem karbonatisiertem Zementstein aus dem Betonbruch zu erkennen. Bild M-L13 zeigt den Natursteinbruch. Aufgrund der stark inhomogenen Struktur konnte bei dieser Probe der KSB nicht eindeutig erkannt werden.

Serie 82 besteht aus drei Zuschlagskomponenten: 50 M.-% MS, 25 M.-% KSB und 25 M.-% ZB. In Bild M-L14 lässt sich schon in dem Scan des Dünnschliffs deutlich der Anteil an Ziegelbruch erkennen. Durch die Zugabe von ZB konnte die Dichte gegenüber der Probe aus Serie 9 gesteigert werden, die Druckfestigkeit sank jedoch ab. Auf den Bildern M-L15 bis M-L17 sind deutlich die CSH-Phasen zu erkennen, Bild M-L15 und M-L17 zeigen kleine Ziegelbruch-Zuschläge, die in die Struktur der Probe eingebunden sind. Im linken Drittel des Bildes M-L16 ist ein größerer Ziegelbruch-Zuschlag abgebildet, an dem sich kleinere Zuschlagkörner des Mittelsandes gruppieren.

In Serie 83 wurden vier Zuschlagarten verwendet: 50 M.-% MS, 20 M.-% KSB, 27 M.-% ZB und 3 M.-% PB. Die Probe der Serie 83 weist die geringste Druckfestigkeit auf. Die Zwischenräume der Zuschläge sind mit CSH-Phasen durchwachsen, jedoch ist auch hier keine genauere Charakterisierung über die Beschaffenheit der Phasen möglich. In Bild M-L19 ist ein Porenbetonzuschlag zu erkennen, Bild M-L22 zeigt einen Ziegelbruch-Zuschlag. In der Mitte des Bildes M-L83 ist ein Kalksandsteinbruch-Zuschlag zu erkennen. In Bild M-L21 ist dieser zur Verdeutlichung mit einer gestrichelten roten Linie versehen.

Zusammenfassend lassen sich mit Hilfe der lichtmikroskopischen Untersuchungen Aussagen über Form und Art der Zuschläge treffen, über die Packungsdichte und die Ausbildung von CSH-Phasen. Zur genaueren Charakterisierung der CSH-Phasen sind zusätzliche rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen nötig. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen spiegeln die Verhältnisse der ermittelten Druckfestigkeiten und Rohdichten wider.

4.7 Ergebnisse der Umweltanalyse der Recycling-Mauersteine

Allgemeines:

An dieser Stelle werden lediglich globale Untersuchungsergebnisse aus der Umweltanalytik wiedergegeben. Von einer Darstellung aller Einzelergebnisse zur Umweltanalytik (Inhaltsstoffe, Eluate und VOC, TVOC) wird aufgrund der derzeit laufenden politischen Diskussion vor dem Hintergrund teilweise völlig überzogener Anforderungen seitens der Gesetzgebung bewußt verzichtet. Im Falle eines begründeten Interesses ist der Leser jedoch gern aufgerufen, die Einzelergebnisse bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV einzusehen.

Die erzeugten Recycling-Mauersteine sind ohnehin für eine Anwendung im "Hintermauerbereich" gedacht und werden in der Regel verputzt, so dass sie nicht direkt mit der Innenraumluft in Kontakt stehen. Im vorgesehenen Anwendungsfall im Mauerwerk (sogenannter "intended use") können die Recycling-Mauersteine nicht auslaugen, da sie weder mit stehendem noch mit strömendem Wasser in Kontakt kommen.

A) Ergebnisse der chemischen Analyse:

Die Untersuchungsergebnisse der Serien 3, 81 und 82 zeigen, dass sämtliche gemessenen Konzentrationen entweder unterhalb der derzeitigen, sehr niedrigen Messgrenzen liegen oder derart gering sind, dass keinerlei Gefährdung für den Nutzer zu erwarten ist.

B) Ergebnisse der Ausgasungsversuche:

Bewertung der Ergebnisse für die untersuchten Serien 3, 9, 81 und 83:

- Cancerogene wurden nicht nachgewiesen und sind auch nicht zu erwarten.
- Die Summe der VOC ("TVOC") nach 3 Tagen war **unterhalb** der Bewertungsgrenze von 1 mg/m^3 .
- Die Summe der SVOC nach 3 Tagen war **unterhalb** der Bewertungsgrenze von $0,1 \text{ mg/m}^3$.
- Für die nach 3 Tagen ermittelten VOC-Einzelstoffe mit mehr als $5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ergab sich eine Bewertungszahl R **unterhalb** der Obergrenze von 1.
- Die Summe der VOC-Einzelstoffe ohne NIK-Wert nach 3 Tagen war **unterhalb** der Bewertungsgrenze von $0,1 \text{ mg/m}^3$.
- Die Formaldehydkonzentration nach 3 Tagen war **unterhalb** der Bewertungsgrenze von $120 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Die exemplarisch untersuchten 4 Produkte sind in der Konsequenz gemäß der "Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC und SVOC) aus Bauprodukten" des AgBB in der Fassung vom September 2005 für die Verwendung in Innenräumen **geeignet**.

Fazit:

Diese Produkte sind erwartungsgemäß - ebenso wie handelsübliche Kalksandstein-Produkte - als ungefährlich einzustufen. Eine gesundheitliche Gefährdung durch die auf diese Weise hergestellten Recycling-Mauersteine ist aus Sicht der Autoren ausgeschlossen. Weitergehende Umweltanalysen sind nicht erforderlich.

6. Literatur

- [1] HEUSER, BERTHOLD; GUNTRAM KOHLER; ORTLEB HOLGER, PAHL, GERHARD, SCHÄFER BERTHOLD: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: 5. Monitoring-Bericht, Bauabfälle Erhebung, Berlin, 2004
- [2] DORA, B; BUDELMANN, HARALD: Beton mit recyklierten Zuschlag nach DIN 1045, in: Forschungsarbeiten 1995 - 1999, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 144, Seite 7 bis 10, 1999
- [3] KOHLER, GUNTRAM: Recyclingpraxis Baustoffe, 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1997
- [4] EDEN, WOLFGANG: Handbuch zur Herstellung von Kalksandsteinen, 3. Auflage, Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV, Hannover, 2002
- [5] SCHMIDT, MICHAEL.: Technische, ökologische und wirtschaftliche Einflüsse auf die derzeitigen und zukünftigen Mengen an rezyklierten Baustoffen, Gutachten im Auftrag des Bundesverbandes Baustoffe - Steine und Erden eV, Heidelberg, Mai 1999
- [6] MÜLLER, ANETTE; REINHOLD, MATTHIAS: Leichtzuschläge aus Feinstoffen des Mauerwerksabbruchs, Bauhaus-Universität Weimar, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, Weimar 2000
- [7] DIN EN 771-2: Festlegungen für Mauersteine - Kalksandsteine, August 2003
- [8] GARBEV, KASSIMIR: Struktur, Eigenschaften und quantitative Rietveldanalyse von hydrothermalhydratisierten Calciumsilikathydraten, Dissertation, Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6877, Karlsruhe, 2003
- [9] STUMM, ANDREAS: Struktureller Einbau von Zink in Calciumsilikathydrate mit einem C/S-Verhältnis < 1 und unterschiedlichem Kristallisationsgrad, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe 2004
- [10] EDEN, WOLFGANG: Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess; Forschungsbericht Nr. 80 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 1994
- [11] NIEBUHR, BERND; EDEN, WOLFGANG: Recycling von Kalksandsteinen, Veröffentlichung in „Steinbruch und Sandgrube“, Juli 1997
- [12] EDEN, W., NIEBUHR, B.: Recyclingmöglichkeiten für Kalksandsteine. Baumarkt, 12/1998, S. 52-55
- [13] EDEN, W.: Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinmauerwerk mit anhaftenden Resten von Dämmstoffen sowie weiterer Baustoffreste, Forschungsbericht Nr. 86 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 1997

- [14] EDEN, W., FRIEDL, L.; KRASS, K.; KURKOWSKI, H.; MESTERS, K.; SCHIEßL, P.: Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie, Forschungsbericht Nr. 97 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand, Hannover, 2003
- [15] KROPP, JÜRGEN, HLAWATSCH, FRANK, ET AL: Autoklaves Härtungspotenzial und hydrothermale Reaktionsprozesse von Betonbrechsand, Internationale Baustofftagung Ibausil, Vortrag 3.52, Weimar 2006

ANHANG A: Tabellen und Bilder

Bezeichnung	CaO	MgO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	Cl	GLV	SUMME
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Mittelsand	0,14	0,03	89,63	0,00	0,24	1,86	0,02	0,91	0,00	0,30	93,48
Ziegel- Bruchmaterial	6,76	0,85	71,47	0,75	3,22	8,22	0,11	1,67	0,00	5,92	99,43
Naturstein- Bruchmaterial	1,41	0,63	78,00	0,00	2,44	10,86	0,08	3,05	0,00	1,10	98,07
Beton- Bruchmaterial	11,02	0,65	70,30	0,54	1,62	6,25	0,08	1,52	0,00	6,92	99,22
Porenbeton- Bruchmaterial	26,05	0,73	43,32	12,10	0,67	1,97	0,03	0,60	0,00	13,97	99,73
Kalksandstein mit Verunreinigungen	5,74	0,17	85,47	0,01	0,83	3,10	0,04	0,96	0,00	3,15	99,95
Kalksandstein Sortenrein	6,18	0,32	81,78	0,04	1,18	4,45	0,05	1,20	0,00	3,18	98,84

Tabelle 11: Chemische Zusammensetzung der berücksichtigten Recyclingzuschläge (RFA)

Rohstoffuntersuchungen:

In diesem Teil des Anhangs sind die Ergebnisse der XRD grafisch dargestellt. Zu jedem Material sind vergleichende 2D-Ansichten der Fraktionen des Materials und die identifizierten Phasen als Karten aufgeführt. In der 3D-Darstellung werden die Röntgendiffraktogramme der einzelnen Fraktionen hintereinander aufgetragen, wobei mittels Interpolation eine flächige Darstellung als Isolinien entsteht.

1. Kalksandstein-Bruchmaterial sortenrein (KSBs)

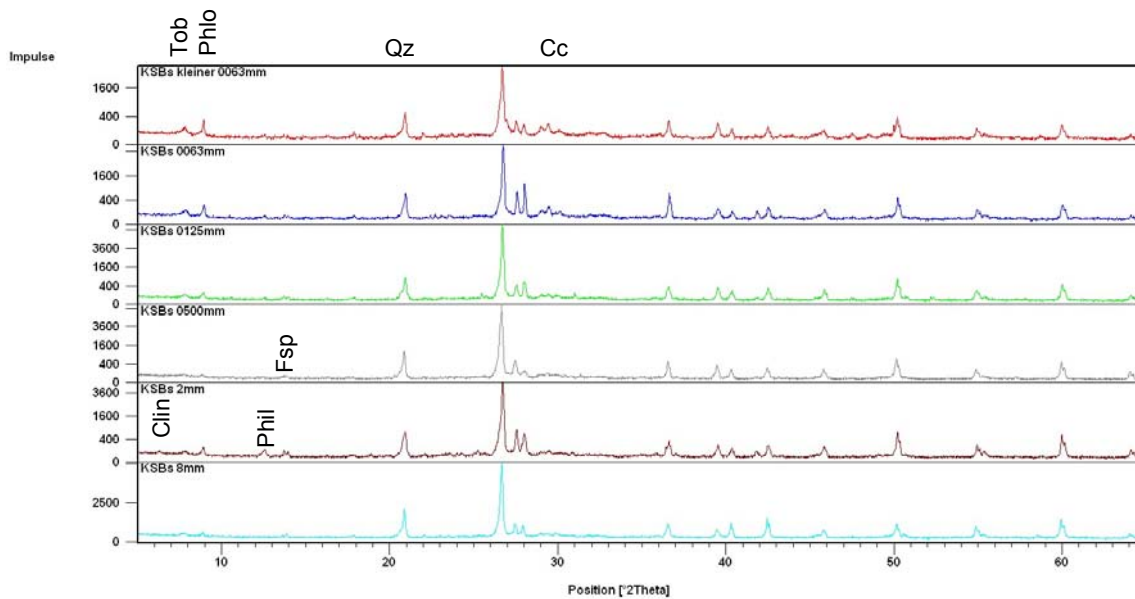


Bild R1: 2D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBs (5 – 65 °2Theta)

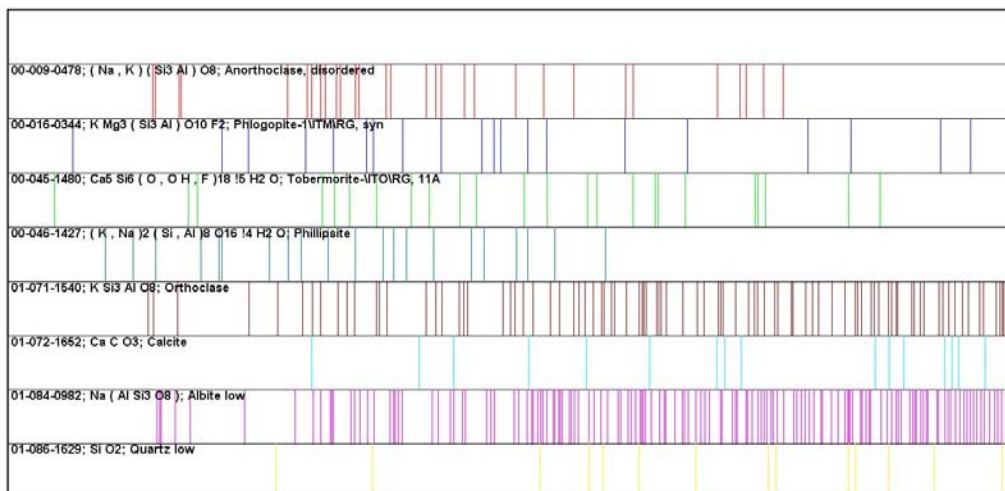


Bild R2: Karten KSBs (5 – 65 °2Theta)

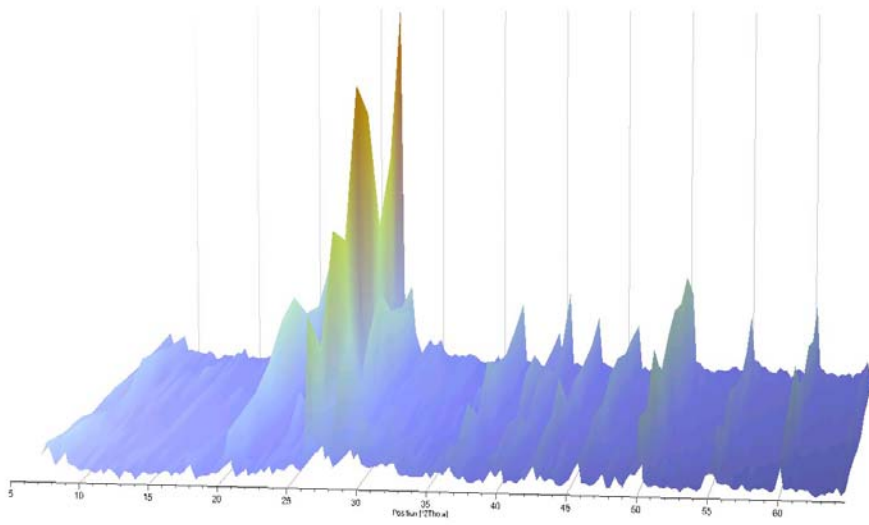


Bild R3: Isolinien Ansicht links KSBs (5 – 65 °2Theta)

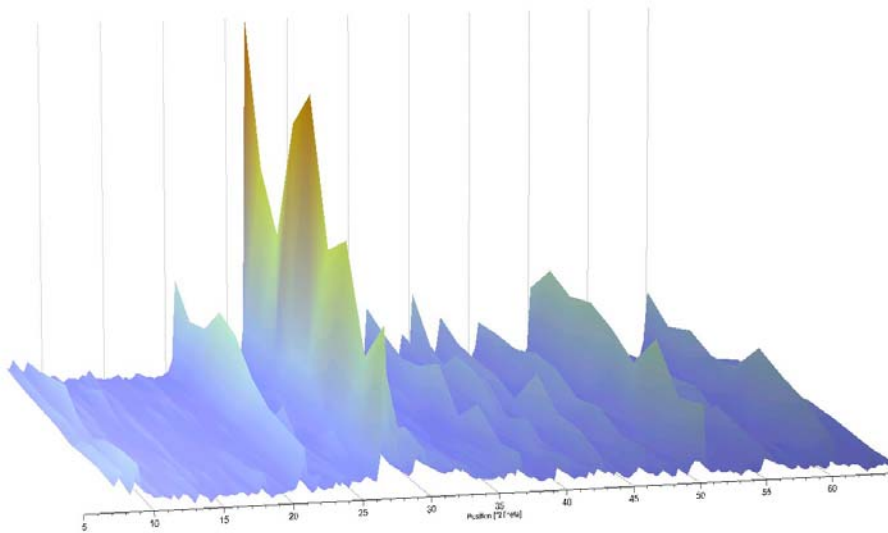


Bild R4: Isolinien Ansicht rechts KSBs (5 – 65 °2Theta)

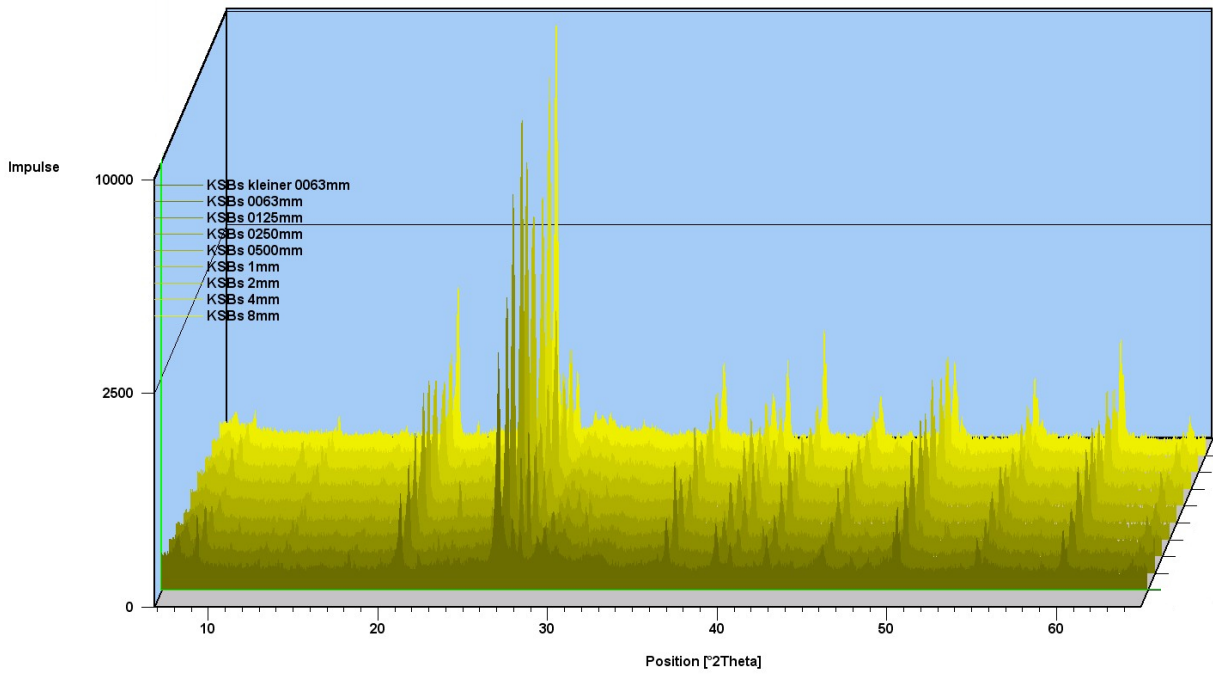


Bild R5: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBs (5 – 65 °2Theta)

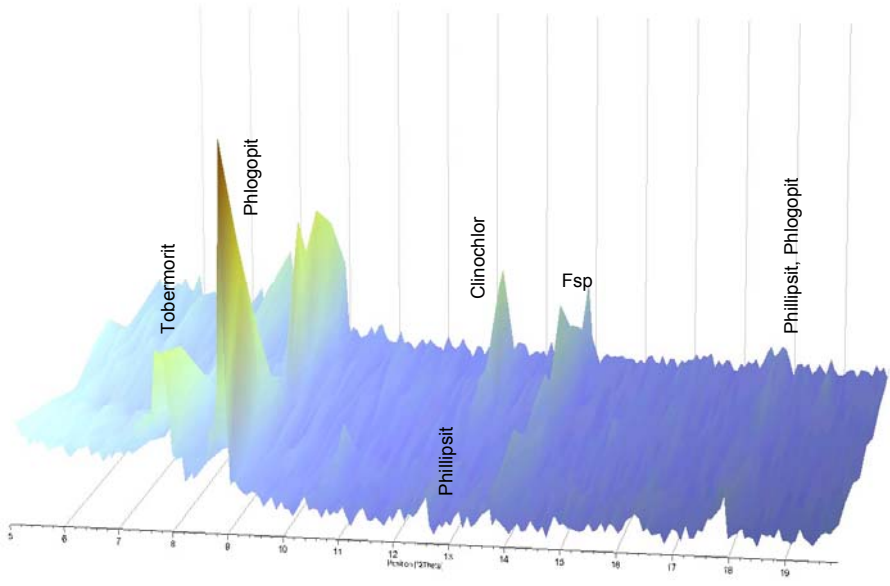


Bild R6: Isolinien Ansicht links KSBs (5 – 20 °2Theta)

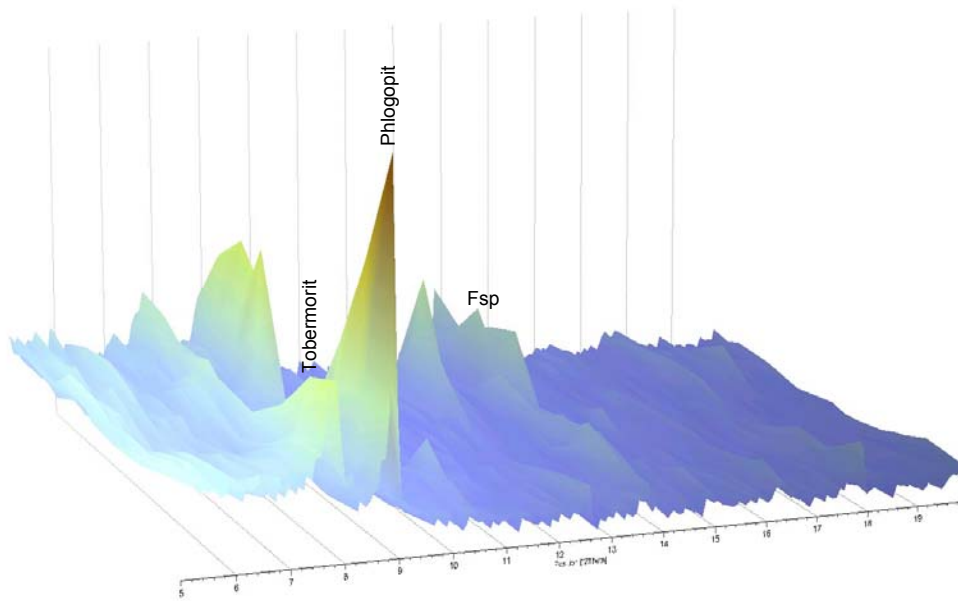


Bild R7: Isolinien Ansicht rechts KSBs (5 – 20 °2Theta)

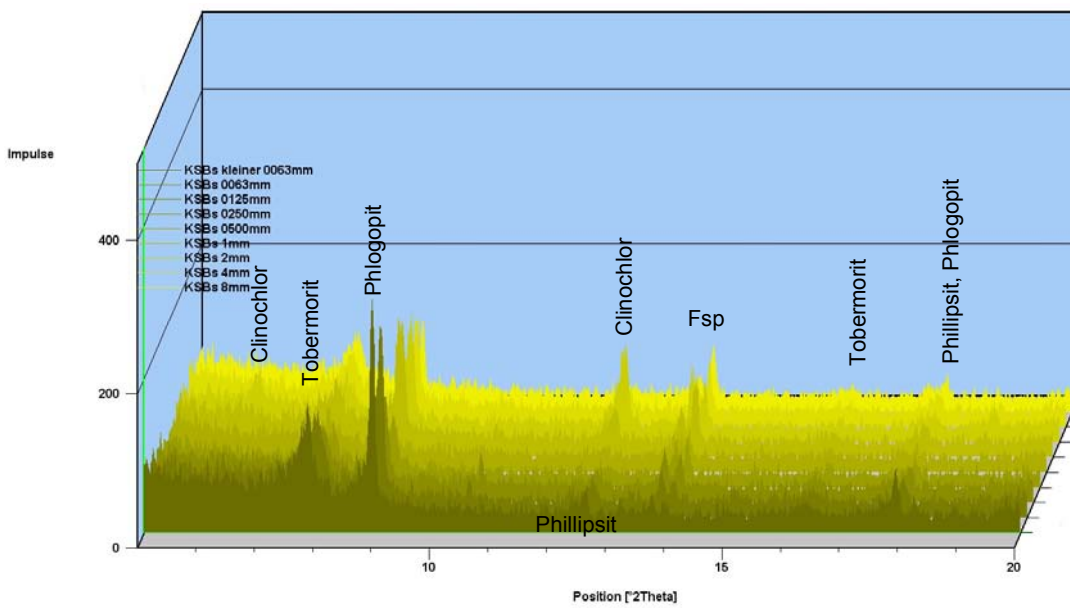


Bild R8: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBs (5 – 20 °2Theta)

2. Kalksandstein-Bruchmaterial verunreinigt (KSBv)

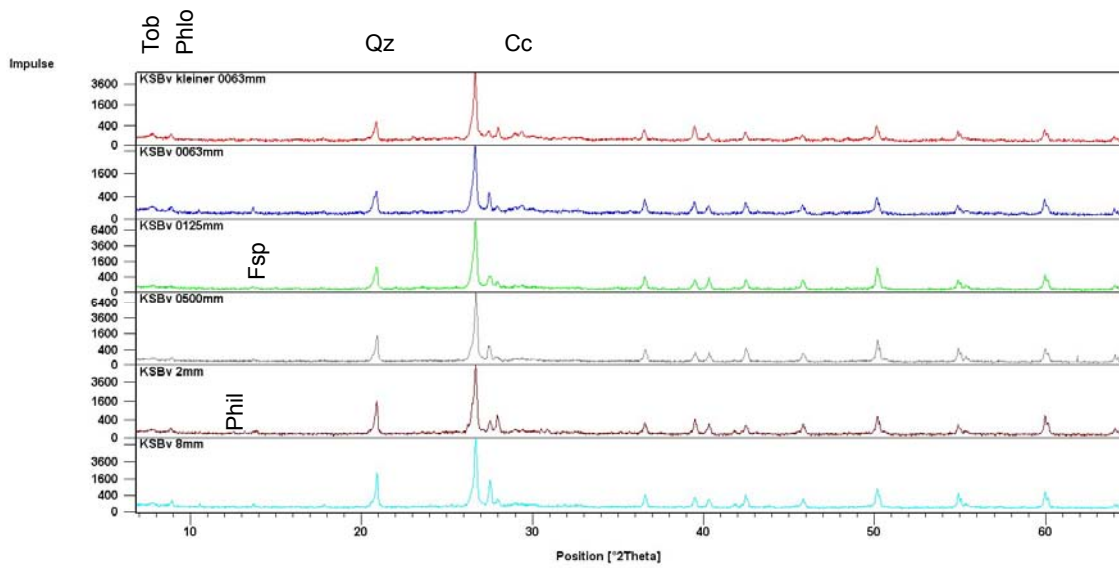


Bild R9: 2D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBv (5 – 65 °2Theta)

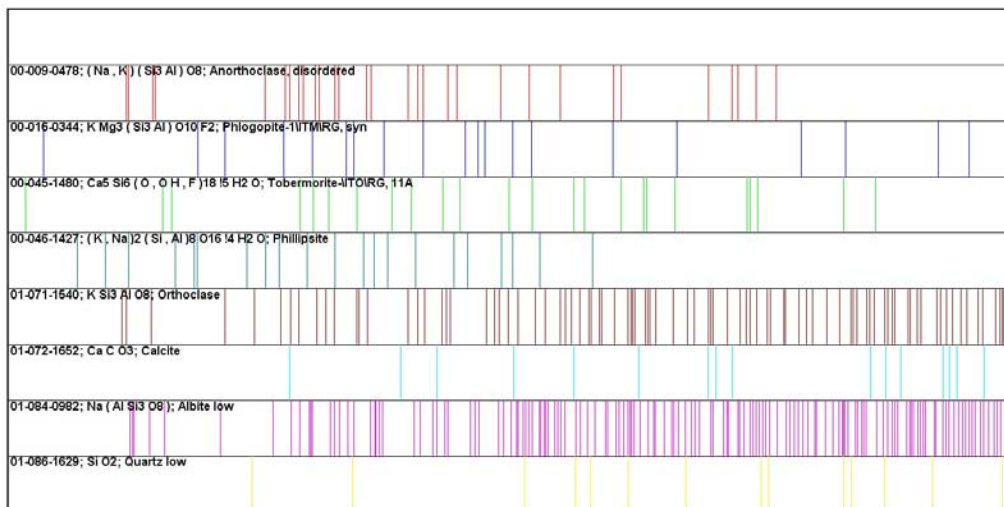


Bild R10: Karten KSBv (5 – 65 °2Theta)

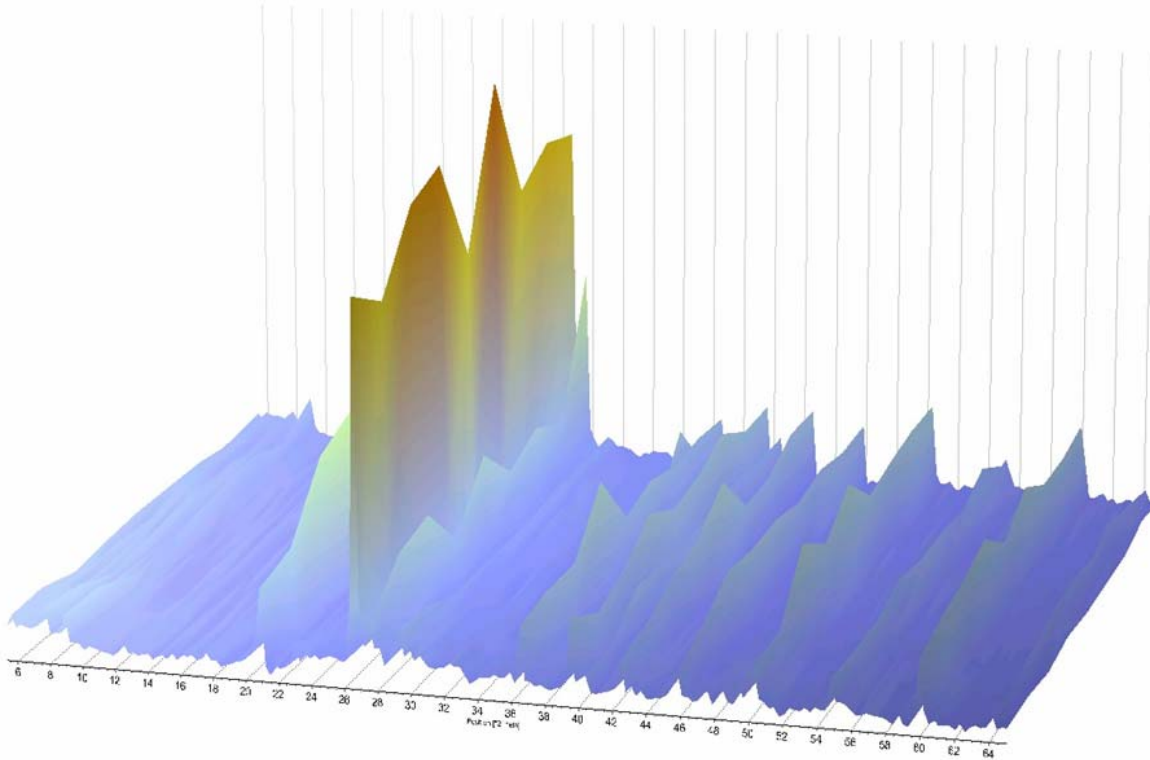


Bild R11: Isolinien Ansicht links KSBv (5 – 65 °2Theta)

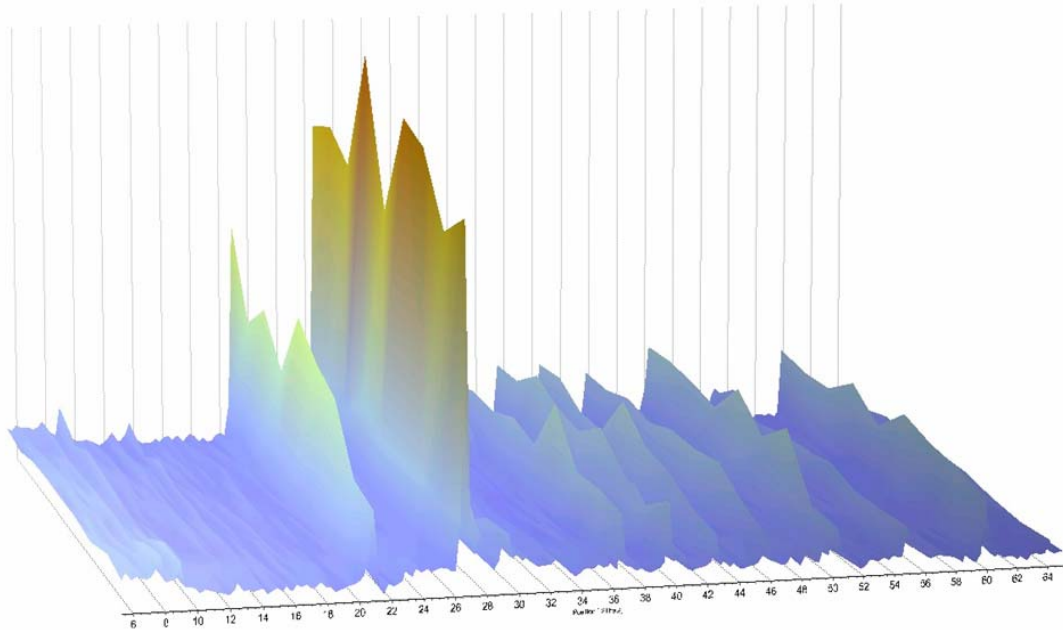


Bild R12: Isolinien Ansicht rechts KSBv (5 – 65 °2Theta)

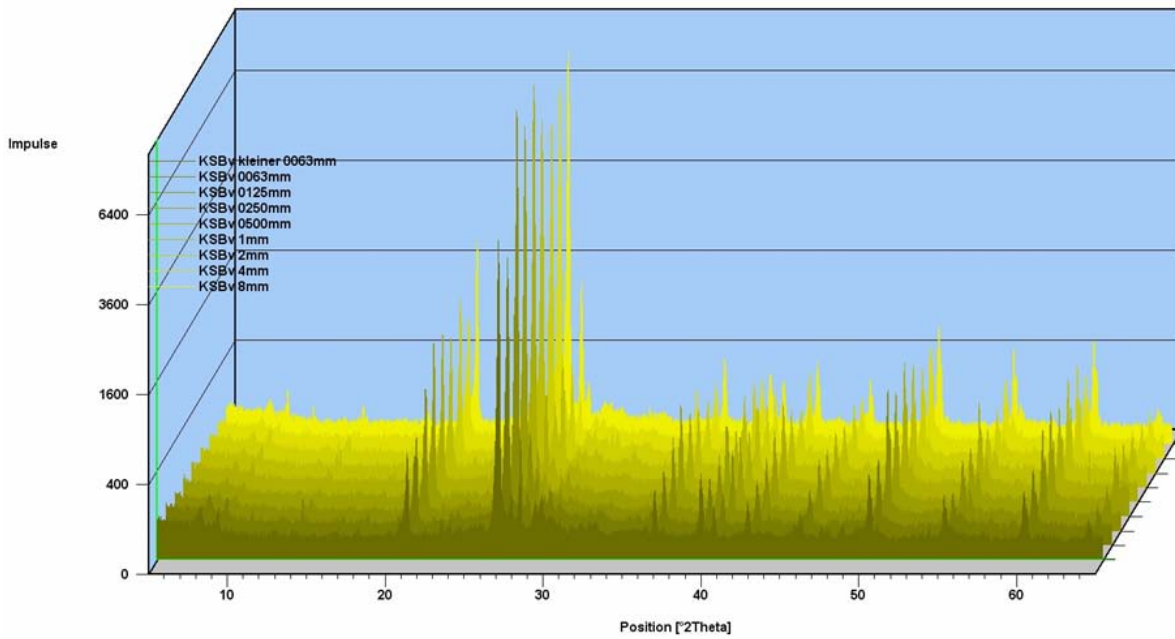


Bild R13: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBv (5 – 65 °2Theta)

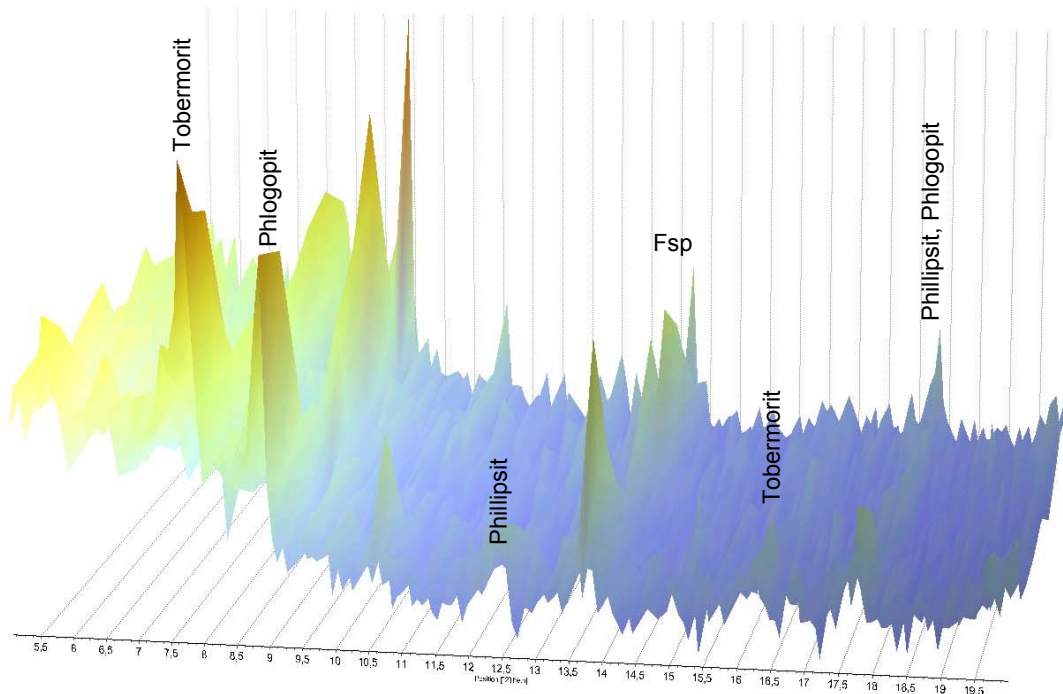


Bild R14: Isolinien Ansicht links KSBv (5 – 20 °2Theta)

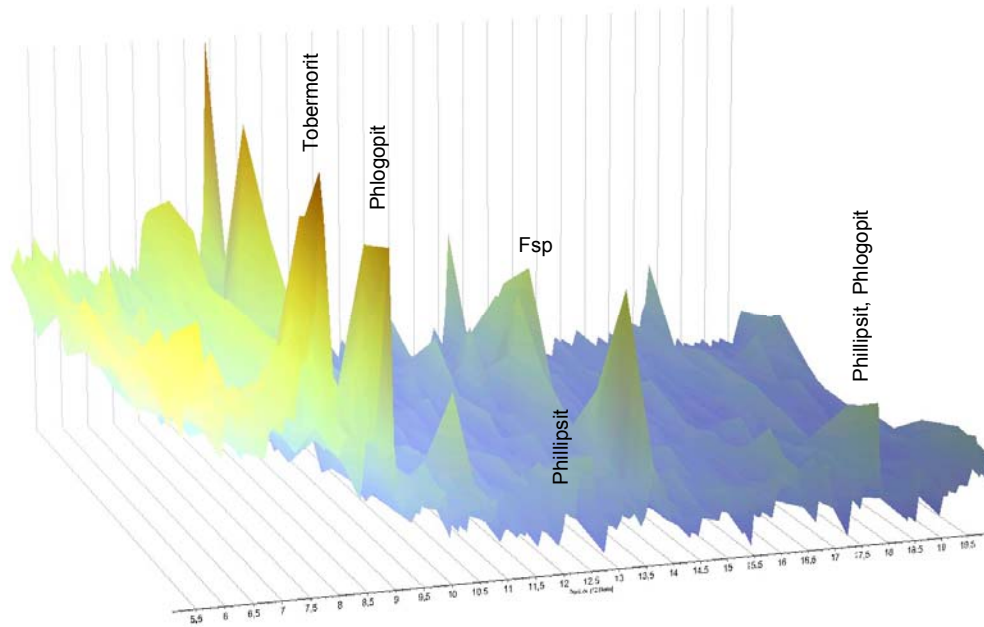


Bild R15: Isolinien Ansicht rechts KSBv (5 – 20 °2Theta)

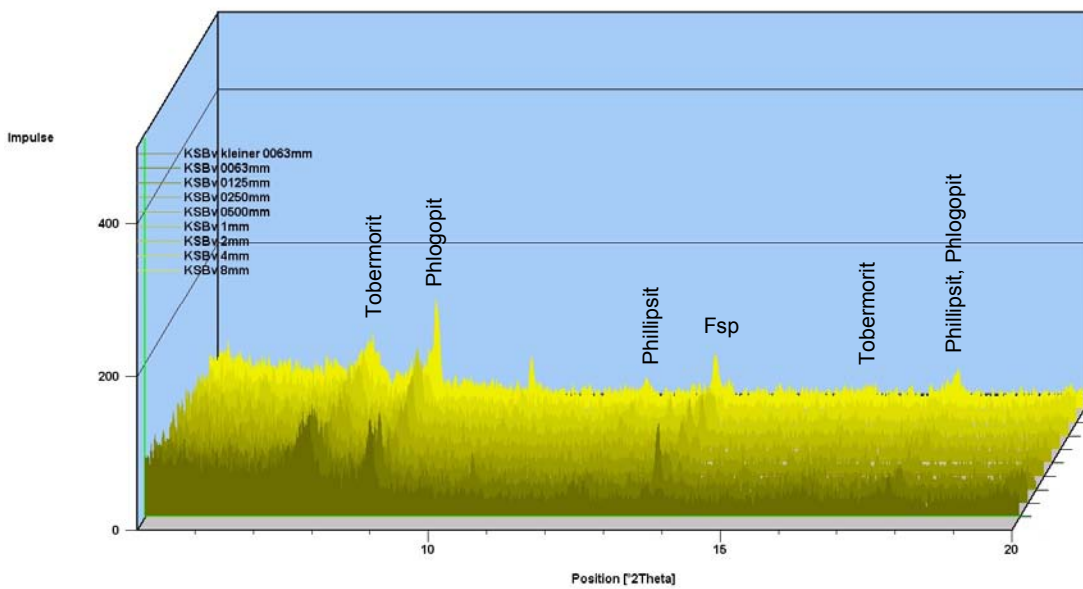


Bild R16: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBv (5 – 20 °2Theta)

3. Porenbeton-Bruchmaterial (PB)

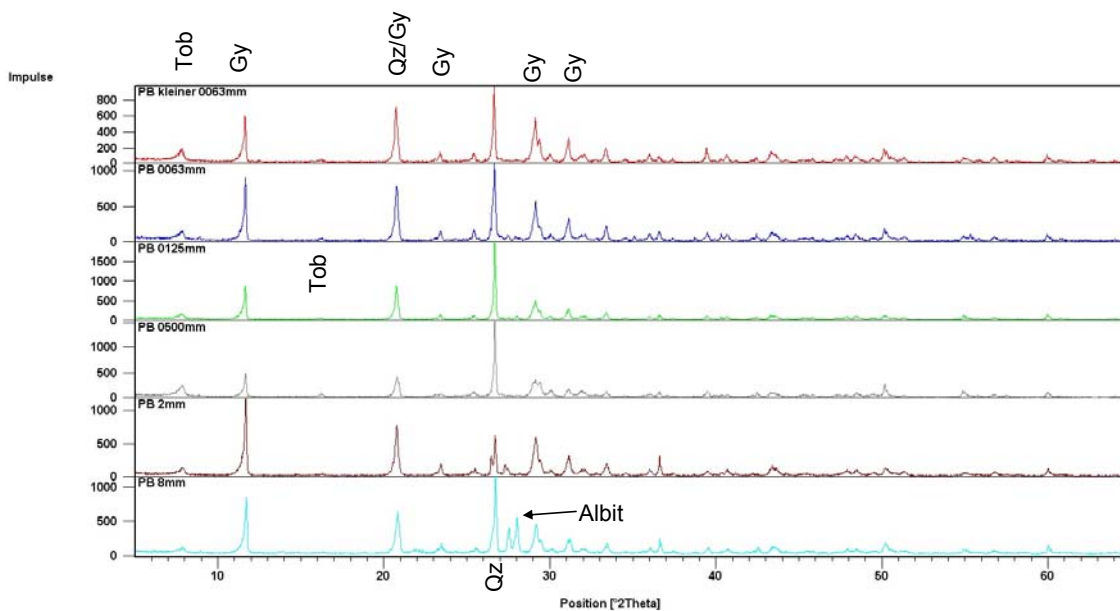


Bild R17: 2D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse PB (5 – 65 °2Theta)

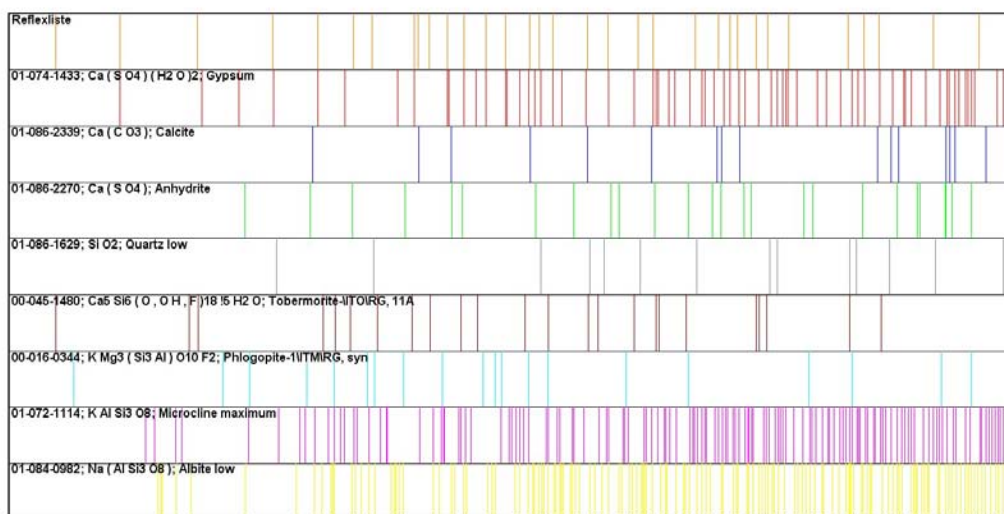


Bild R18: Karten PB (5 – 65 °2Theta)

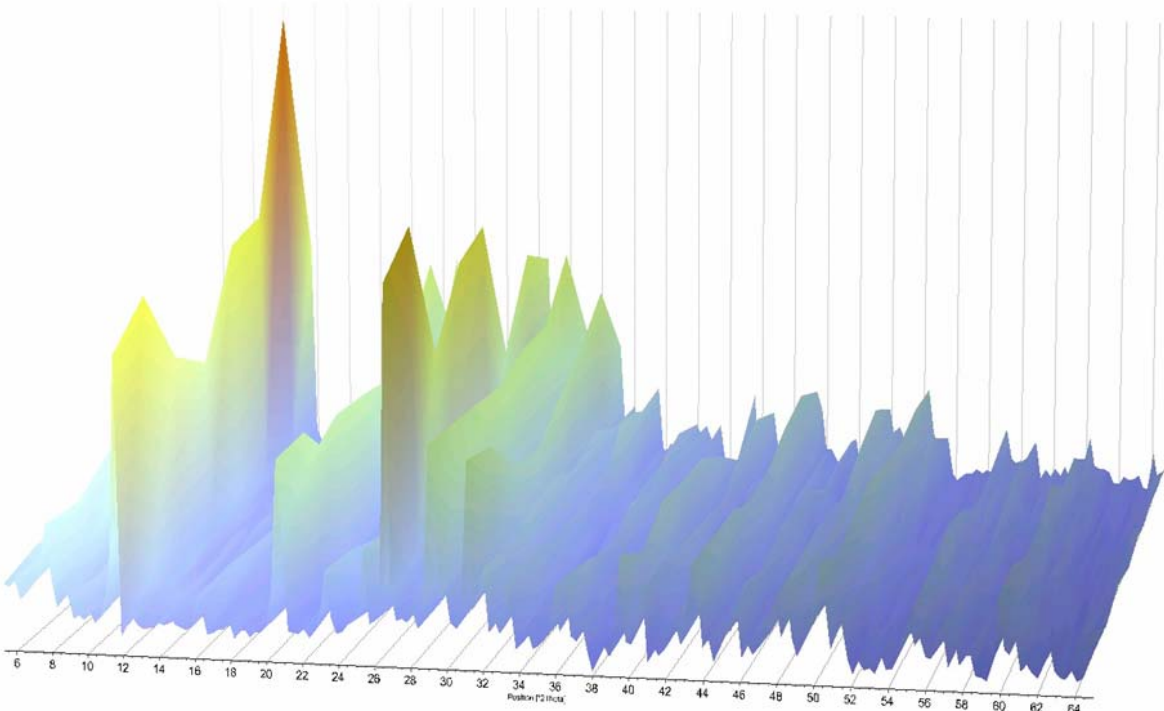


Bild R19: Isolinien Ansicht links PB (5 – 65 °2Theta)

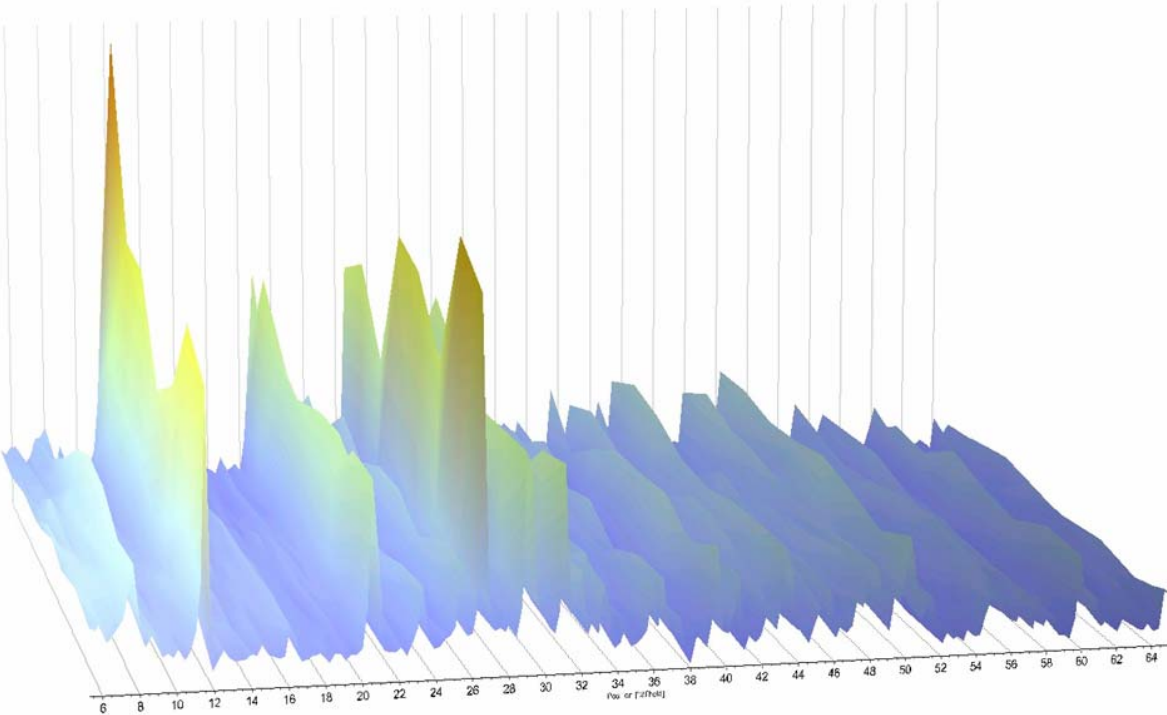


Bild R20: Isolinien Ansicht rechts PB (5 – 65 °2Theta)

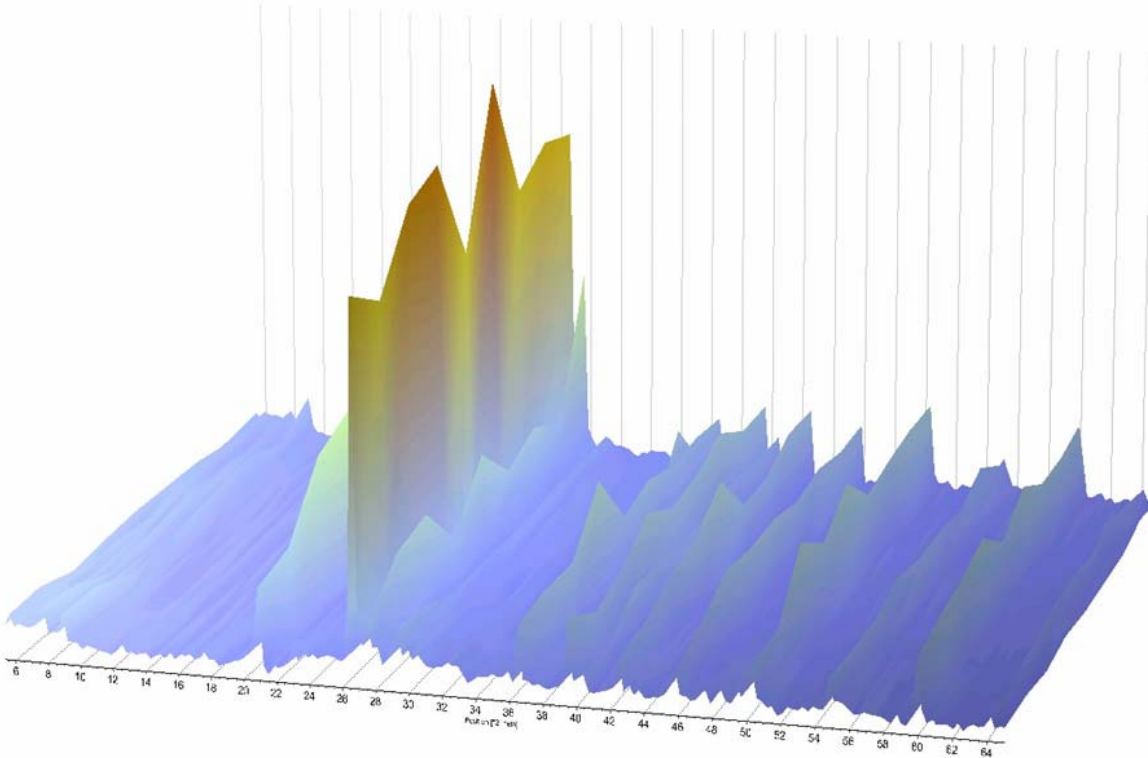


Bild R11:

Isolinien Ansicht links KSBv (5 – 65 °2Theta)

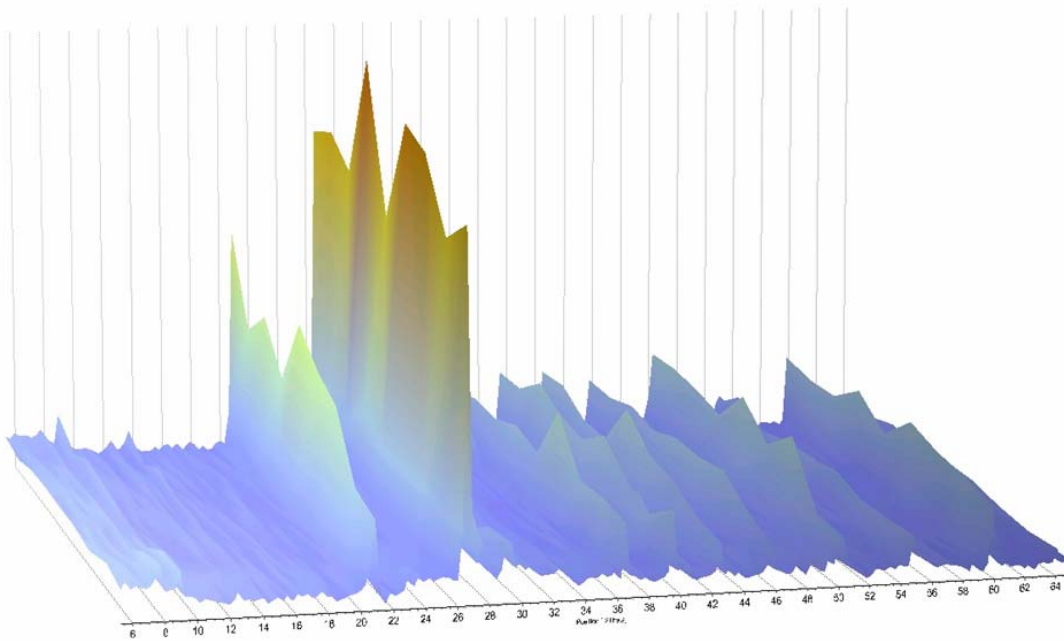


Bild R12: Isolinien Ansicht rechts KSBv (5 – 65 °2Theta)

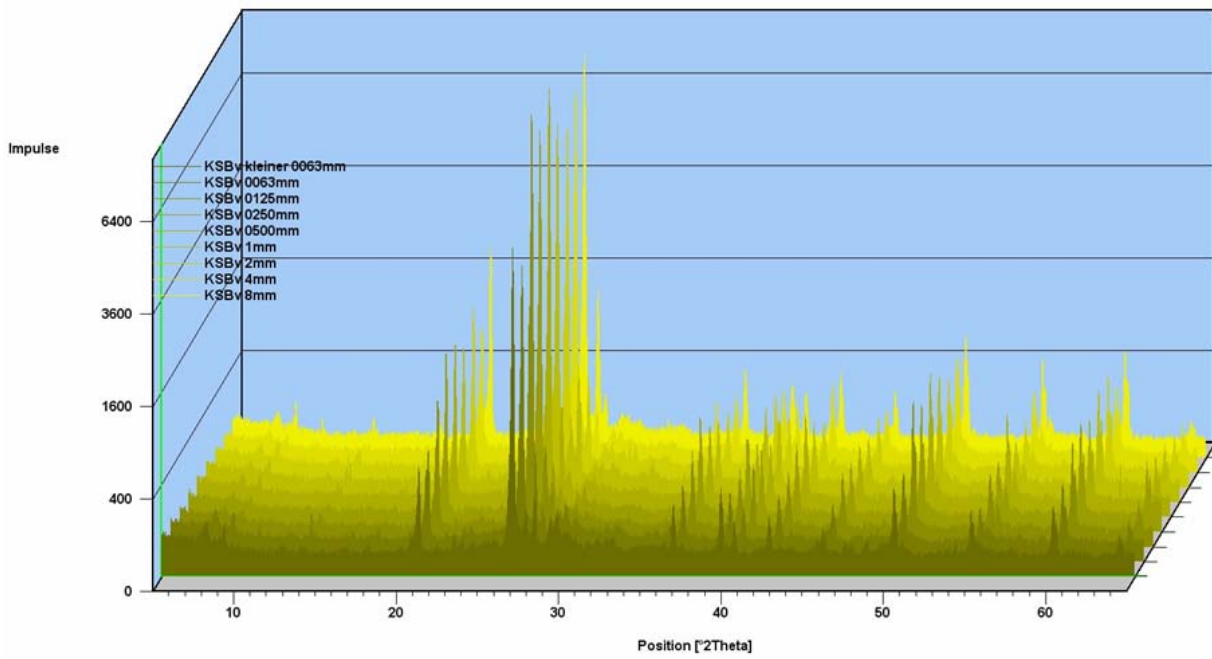


Bild R13: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBv (5 – 65 °2Theta)

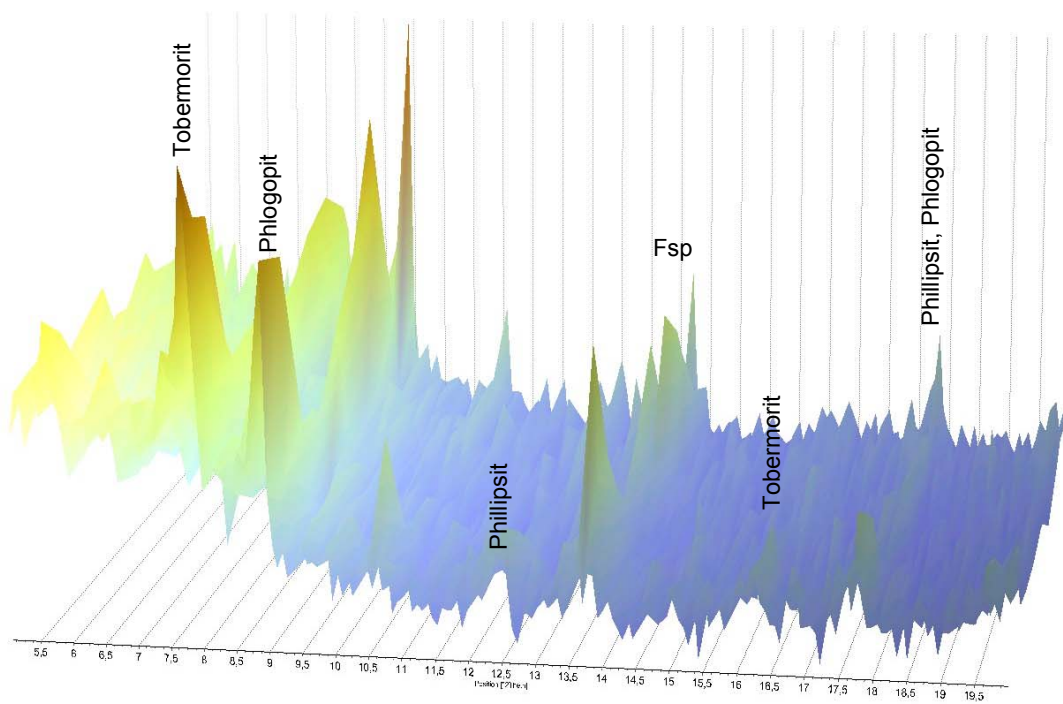


Bild R14: Isolinien Ansicht links KSBv (5 – 20 °2Theta)

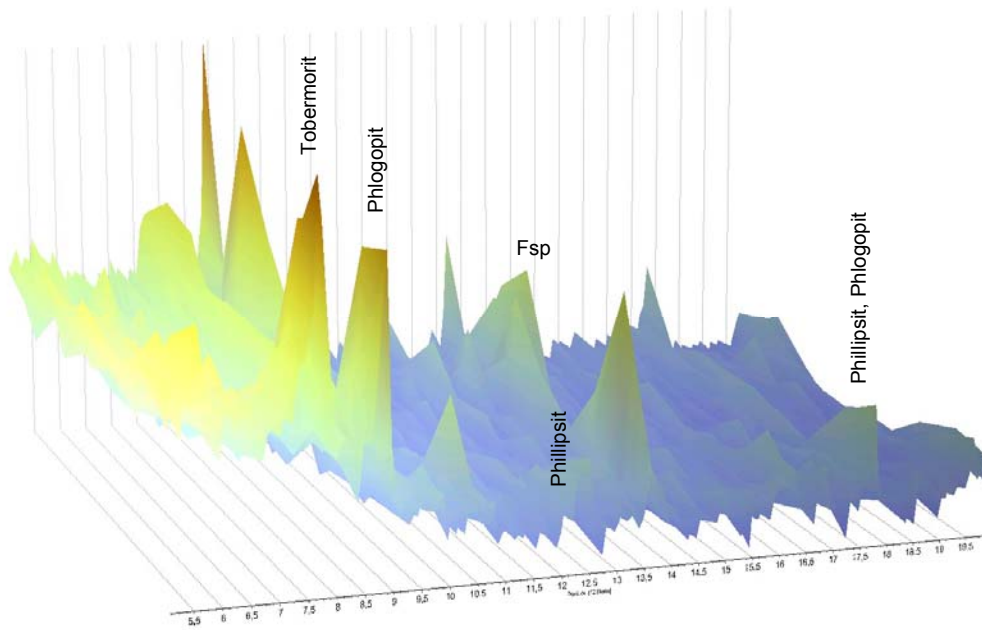


Bild R15: Isolinien Ansicht rechts KSBv (5 – 20 °2Theta)

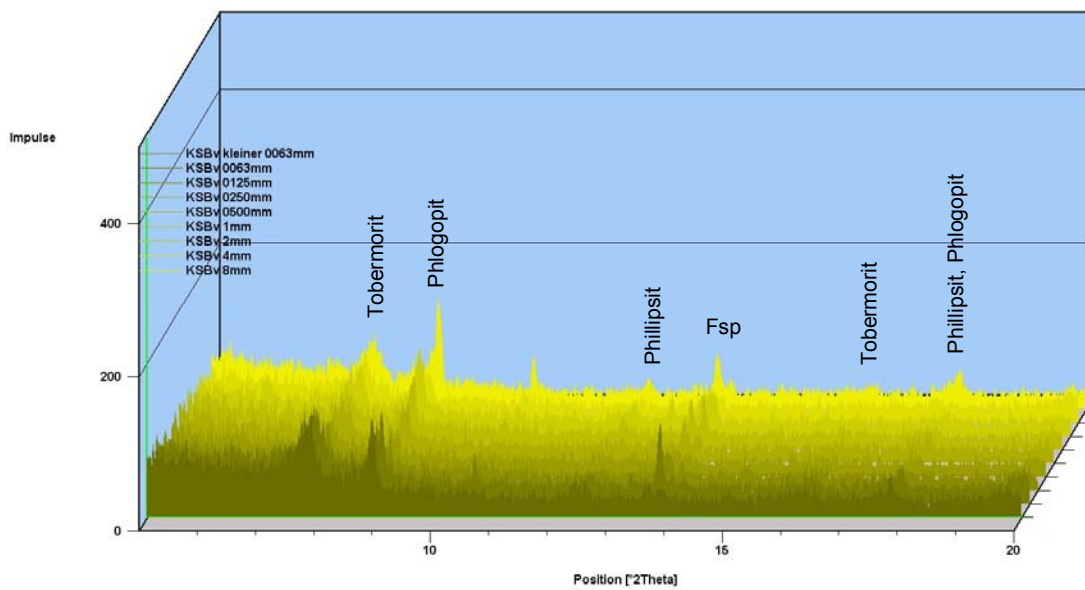


Bild R16: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse KSBv (5 – 20 °2Theta)

3. Porenbeton-Bruchmaterial (PB)

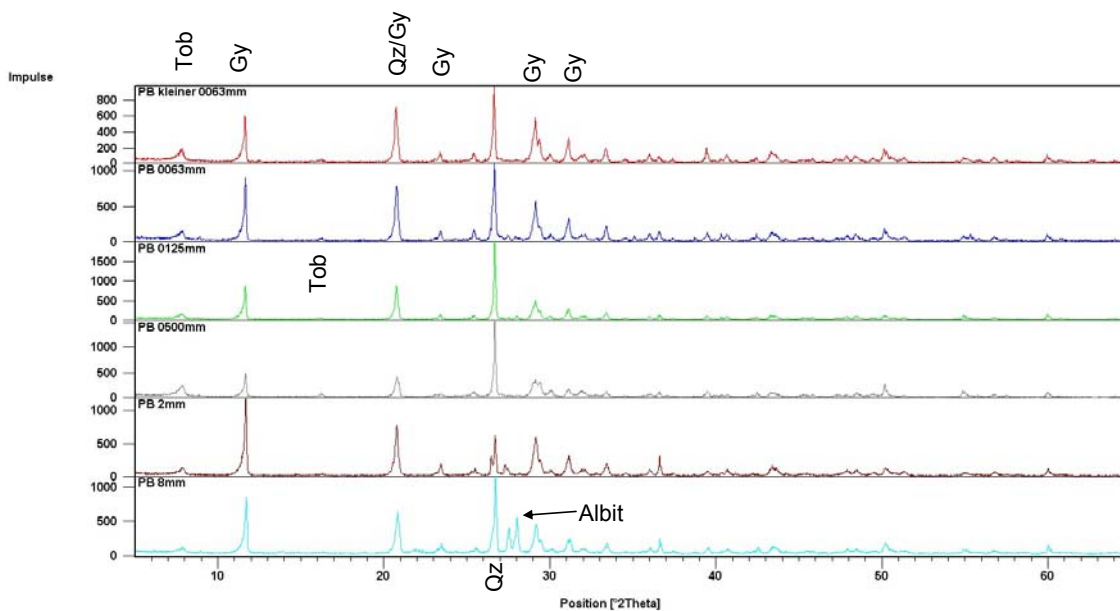


Bild R17: 2D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse PB (5 – 65 °2Theta)

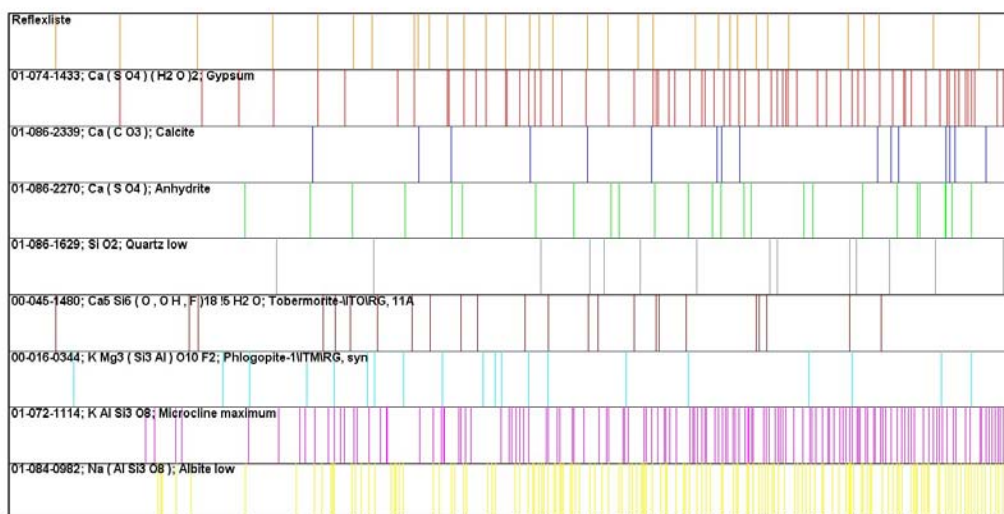


Bild R18: Karten PB (5 – 65 °2Theta)

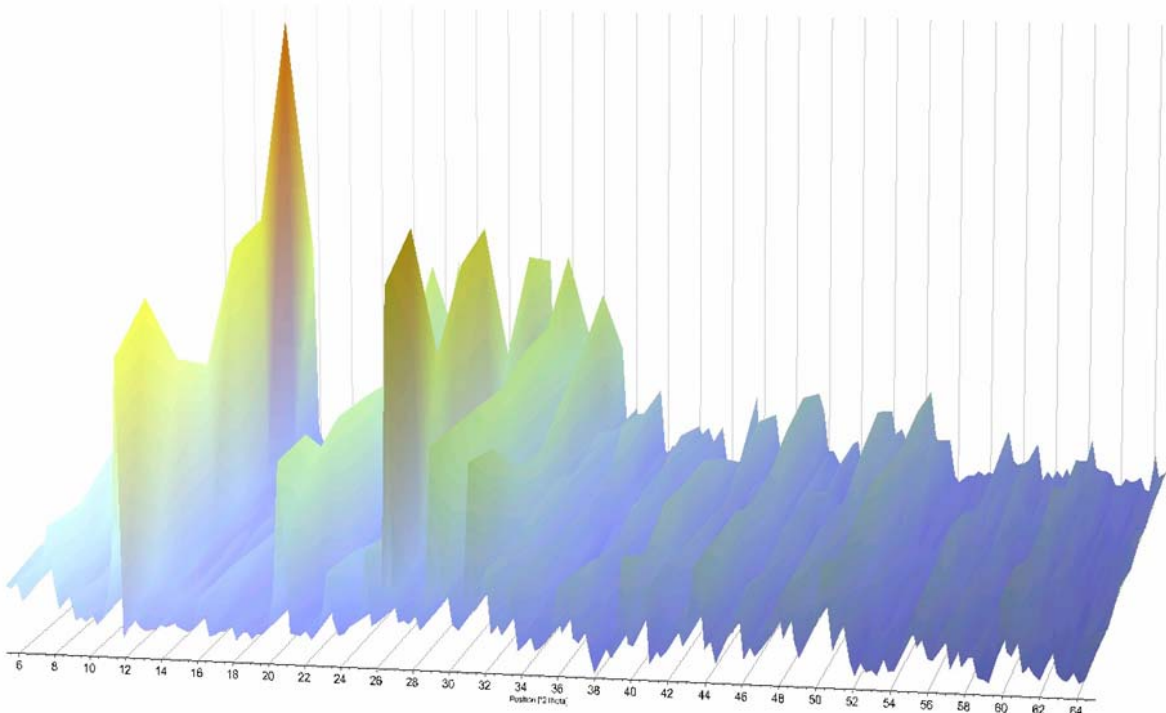


Bild R19: Isolinien Ansicht links PB (5 – 65 °2Theta)

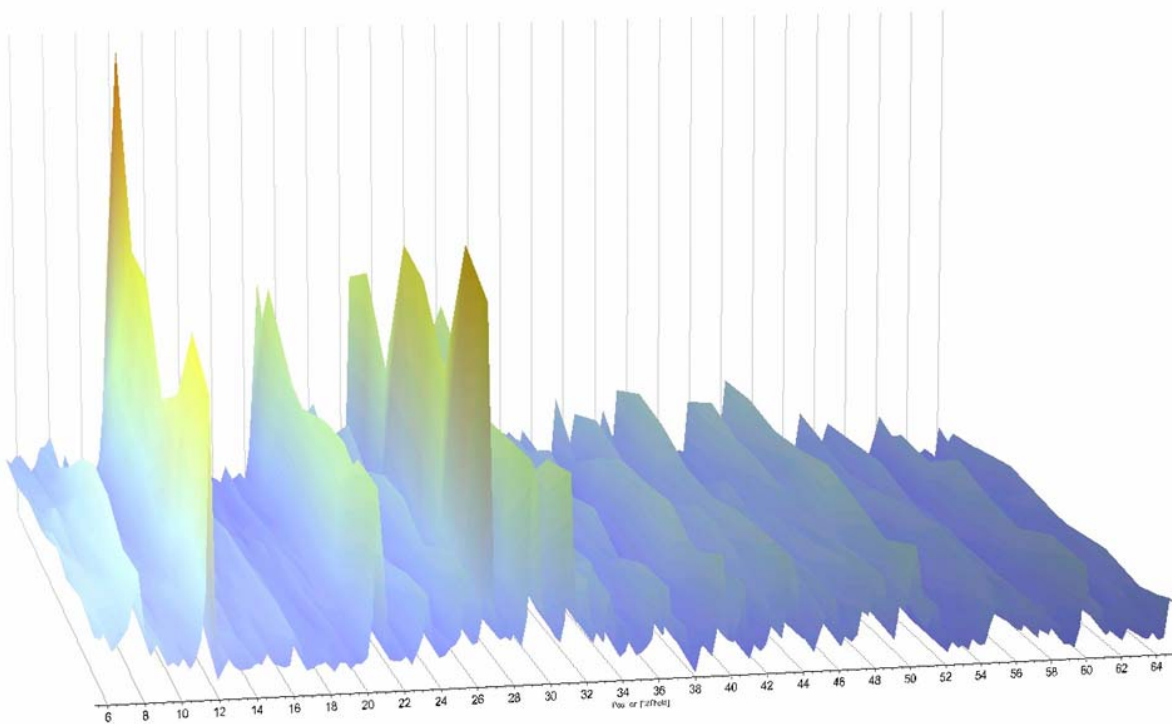


Bild R20: Isolinien Ansicht rechts PB (5 – 65 °2Theta)

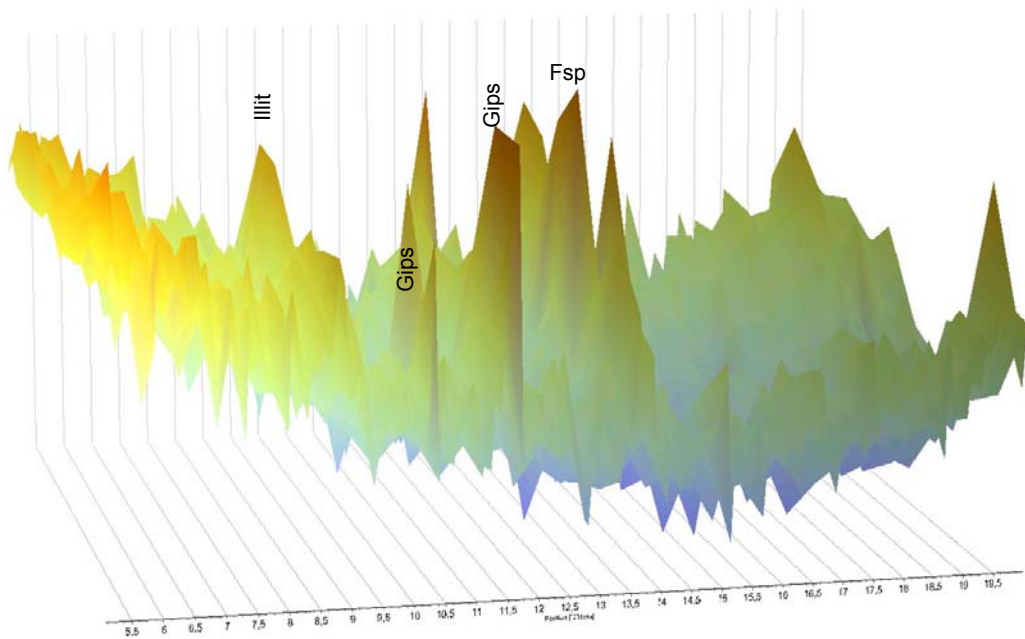


Bild R31: Isolinien Ansicht rechts ZB (5 – 20 °2Theta)

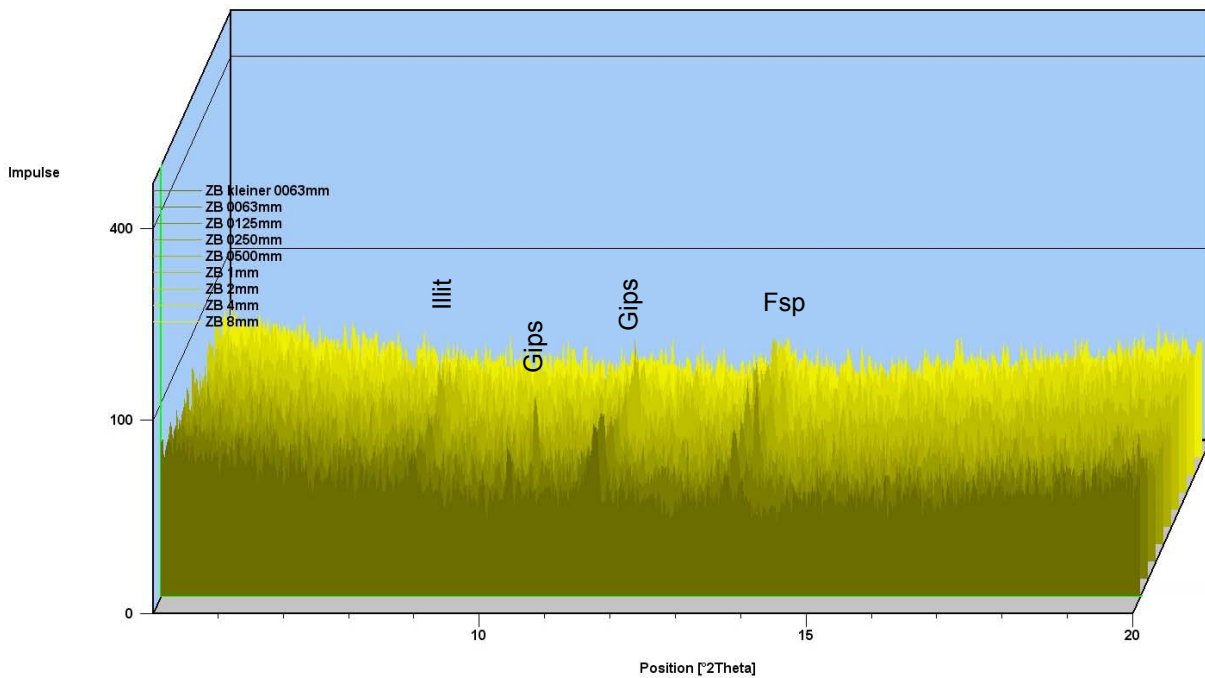


Bild R32: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse ZB (5 – 20 °2Theta)

5. Naturstein-Bruchmaterial (NB)

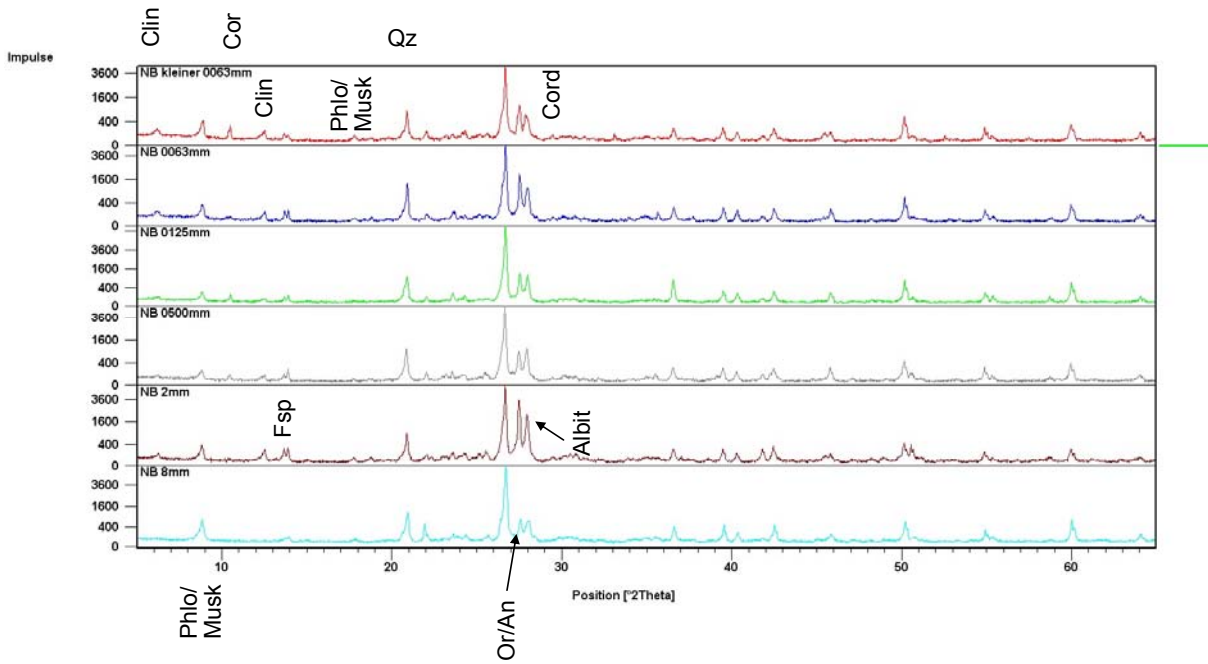


Bild R33: 2D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse NB (5 – 65 °2Theta)

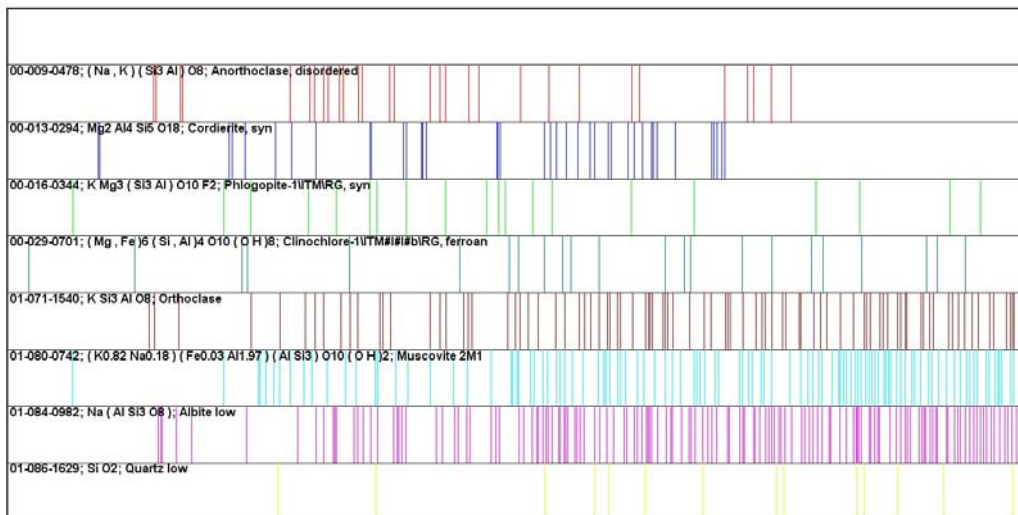


Bild R34: Karten NB (5 – 65 °2Theta)

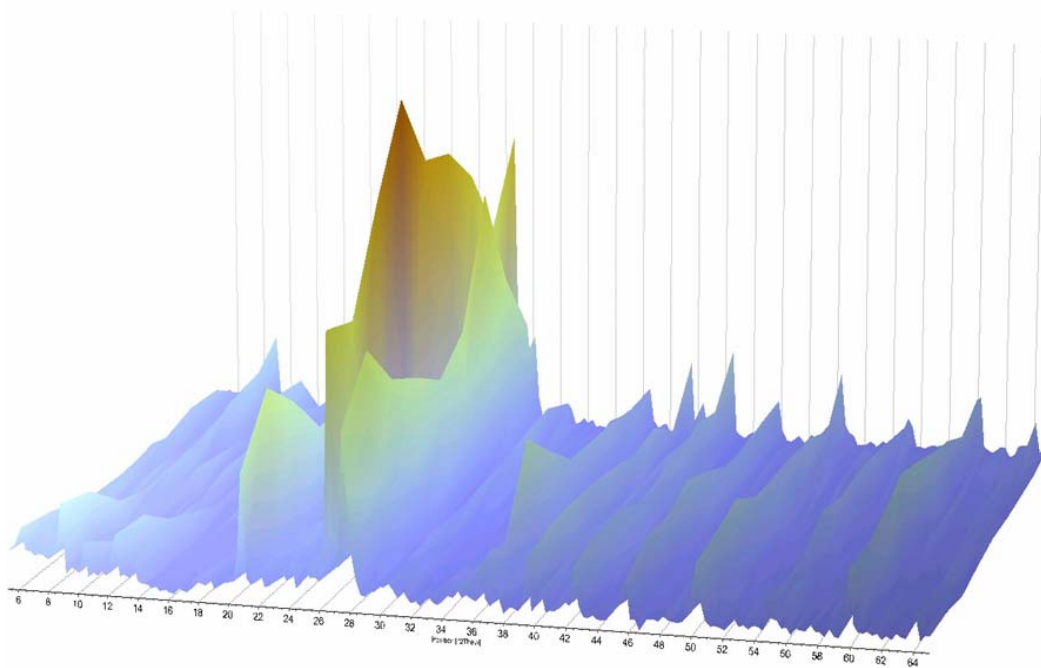


Bild R35: Isolinien links NB (5 – 65 °2Theta)

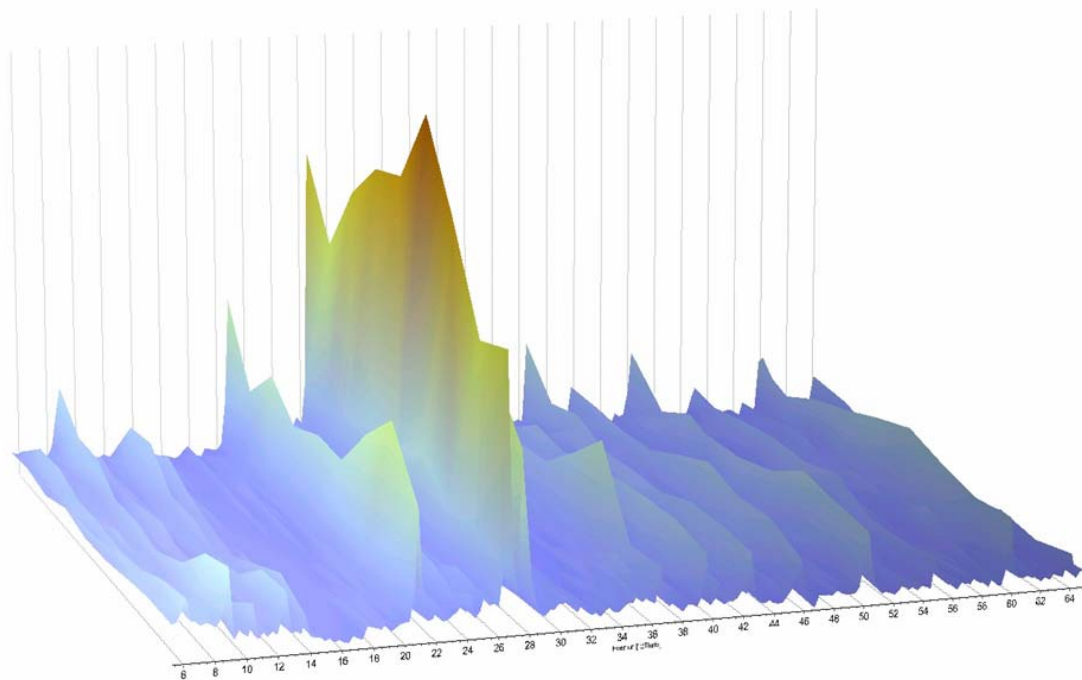


Bild R36: Isolinien rechts NB (5 – 65 °2Theta)

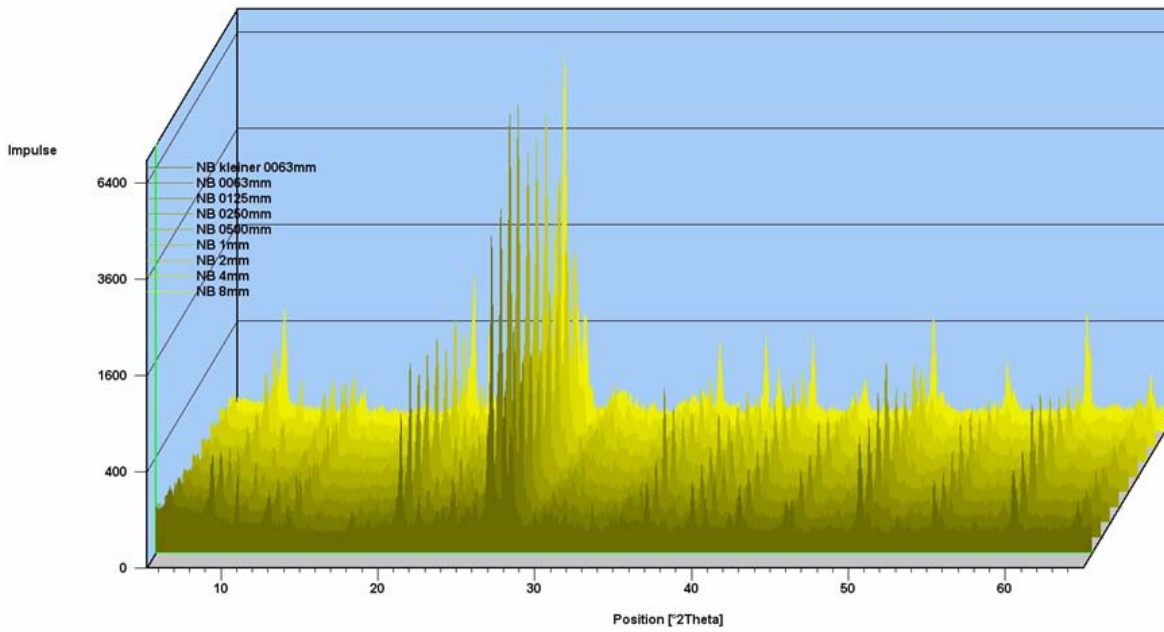


Bild R37: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse NB (5 – 65 °2Theta)

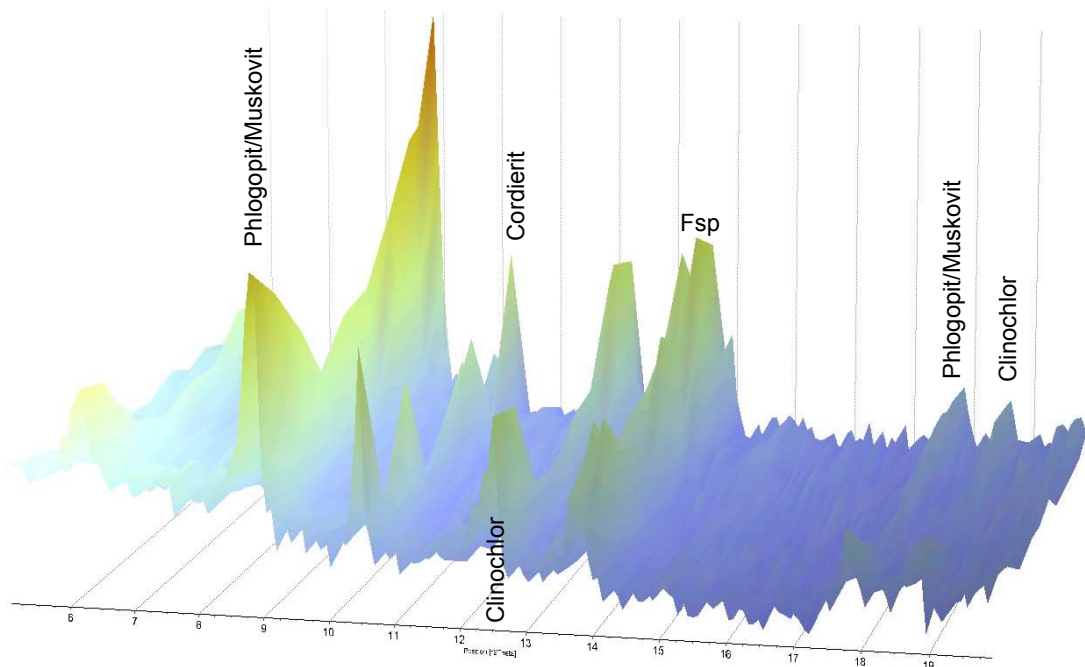


Bild R38: Isolinien Ansicht links NB (5 – 20 °2Theta)

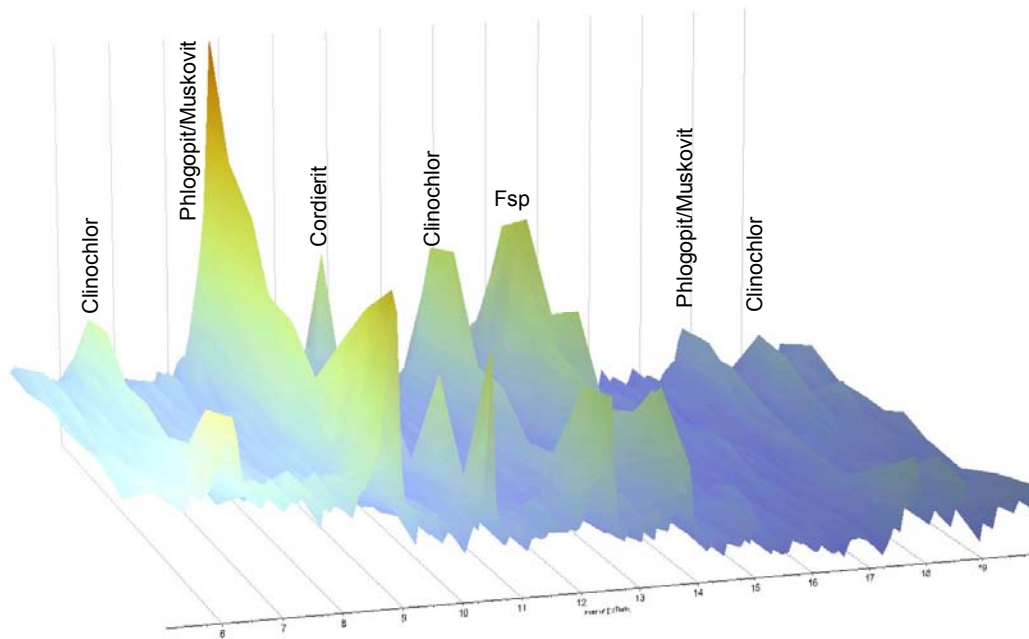


Bild R39: Isolinien Ansicht rechts NB (5 – 20 °2Theta)

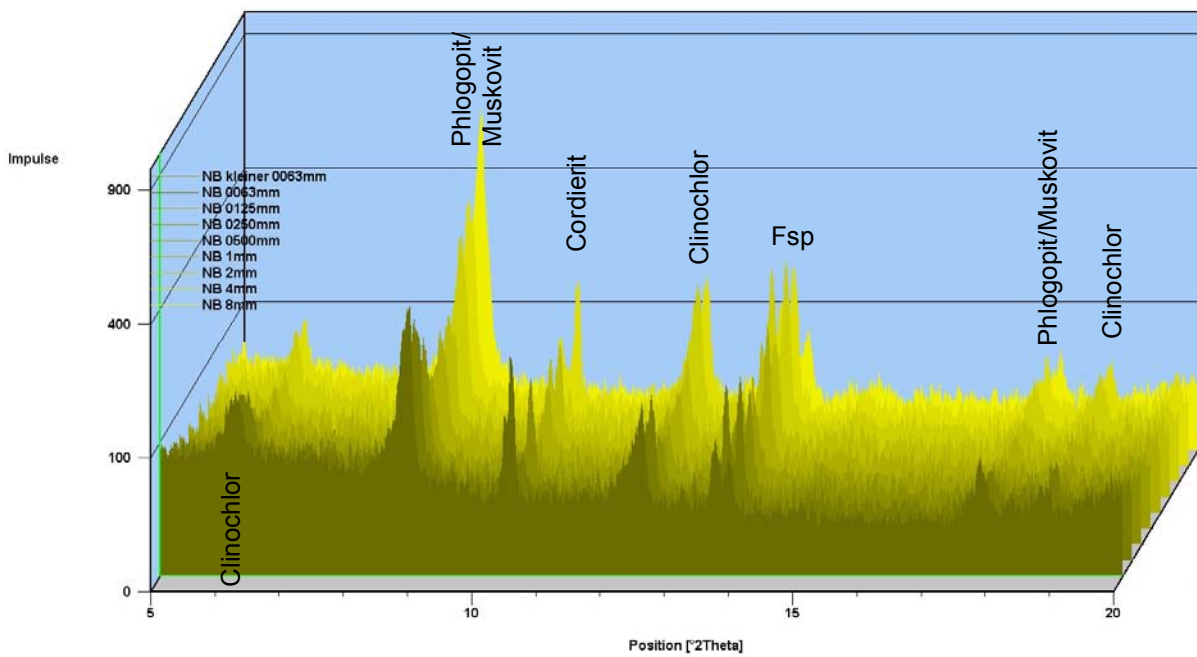


Bild R40: 3D-Ansicht (Vergleich) Phasenanalyse NB (5 – 20 °2Theta)

Ergebnisse der mineralogischen Untersuchung der Recycling-Mauersteine

Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN 52617

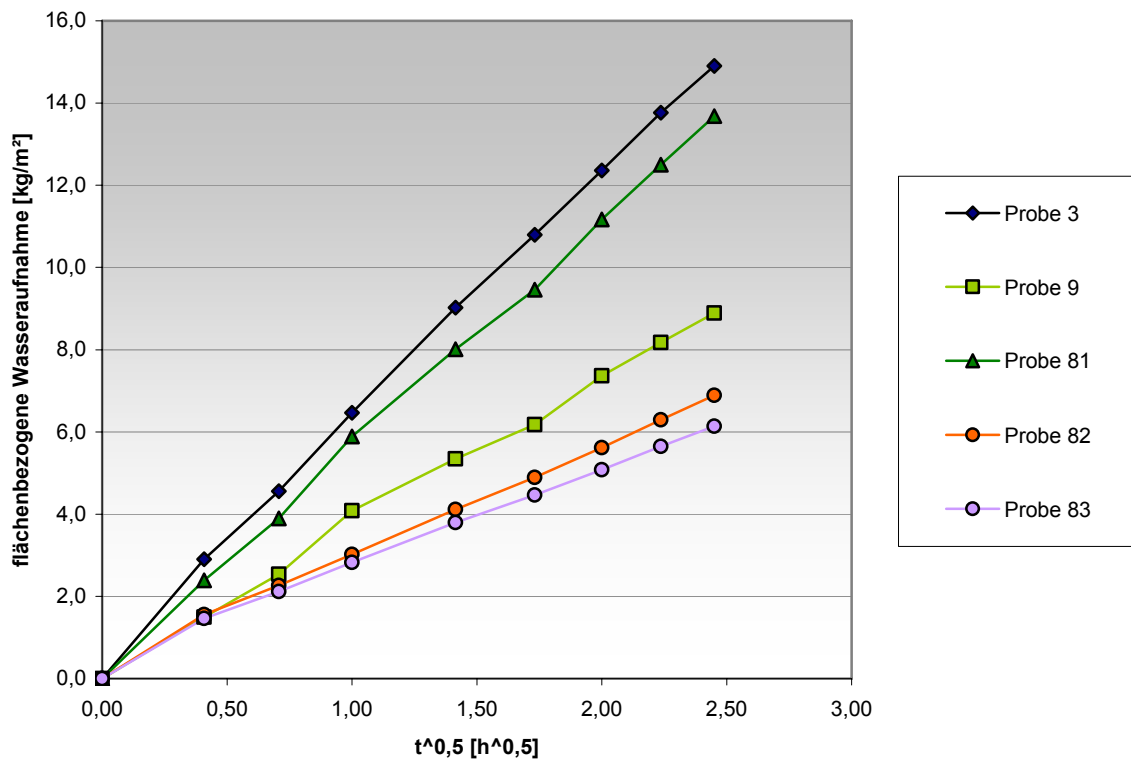


Bild M-W1: Diagramm zur Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten ω [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$]

	Serie 3	Serie 9	Serie 81	Serie 82	Serie 83
ω [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$]	6,04	3,62	5,54	2,71	2,41

Bild M-W2: Tabelle der Wasseraufnahmekoeffizienten ω

Lichtmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen



Bild M-L1: Scan des Dünnschliffs der Probe aus Serie 3 (Bildbreite 4,0 cm)

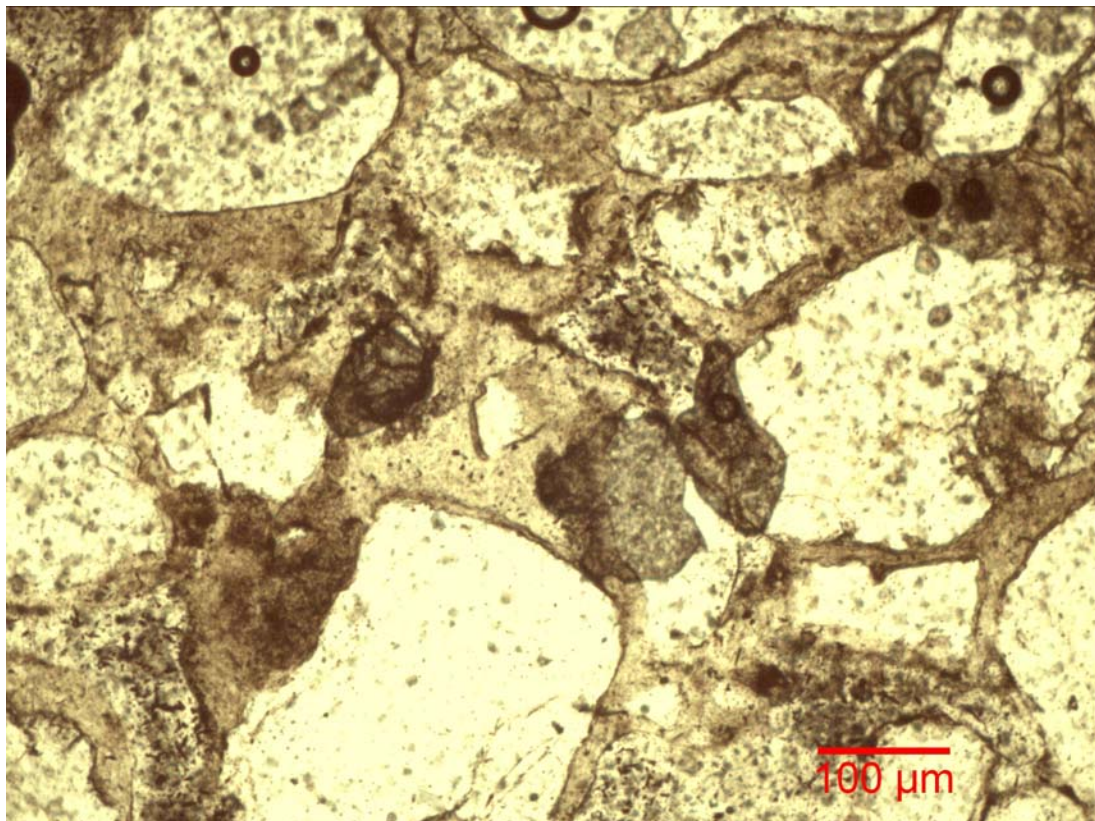


Bild M-L2: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 3

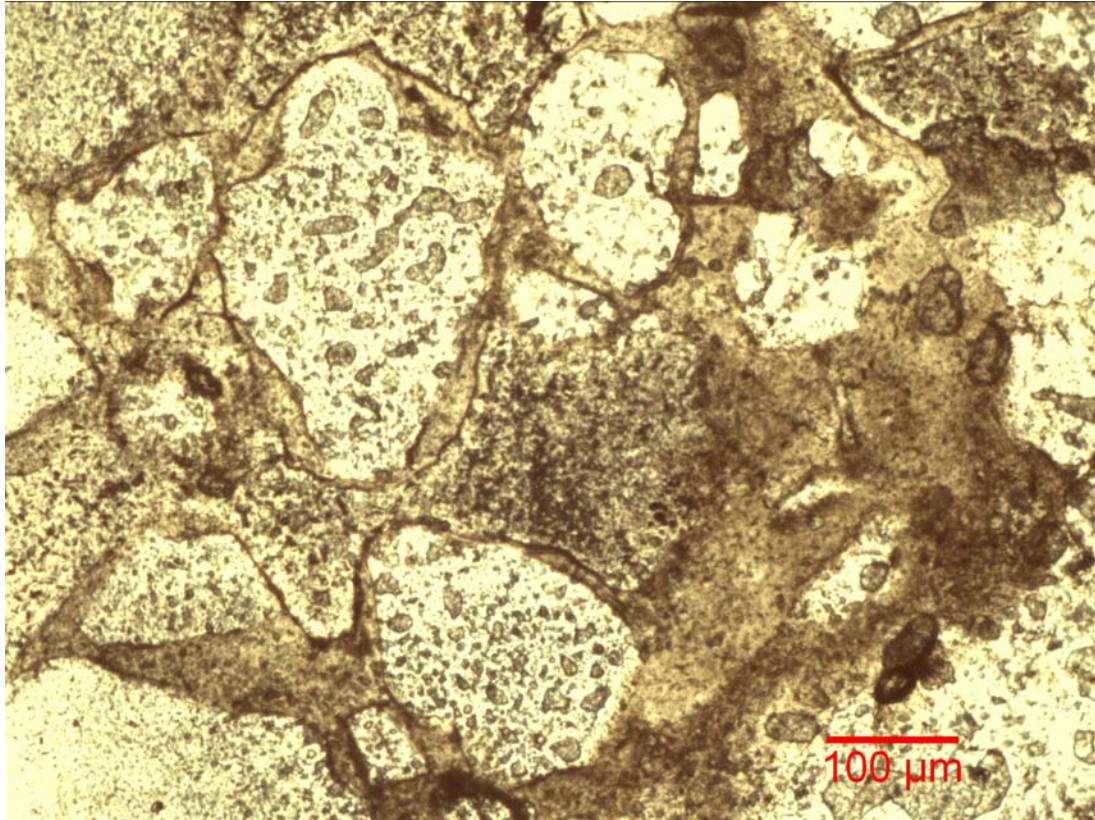


Bild M-L3: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 3

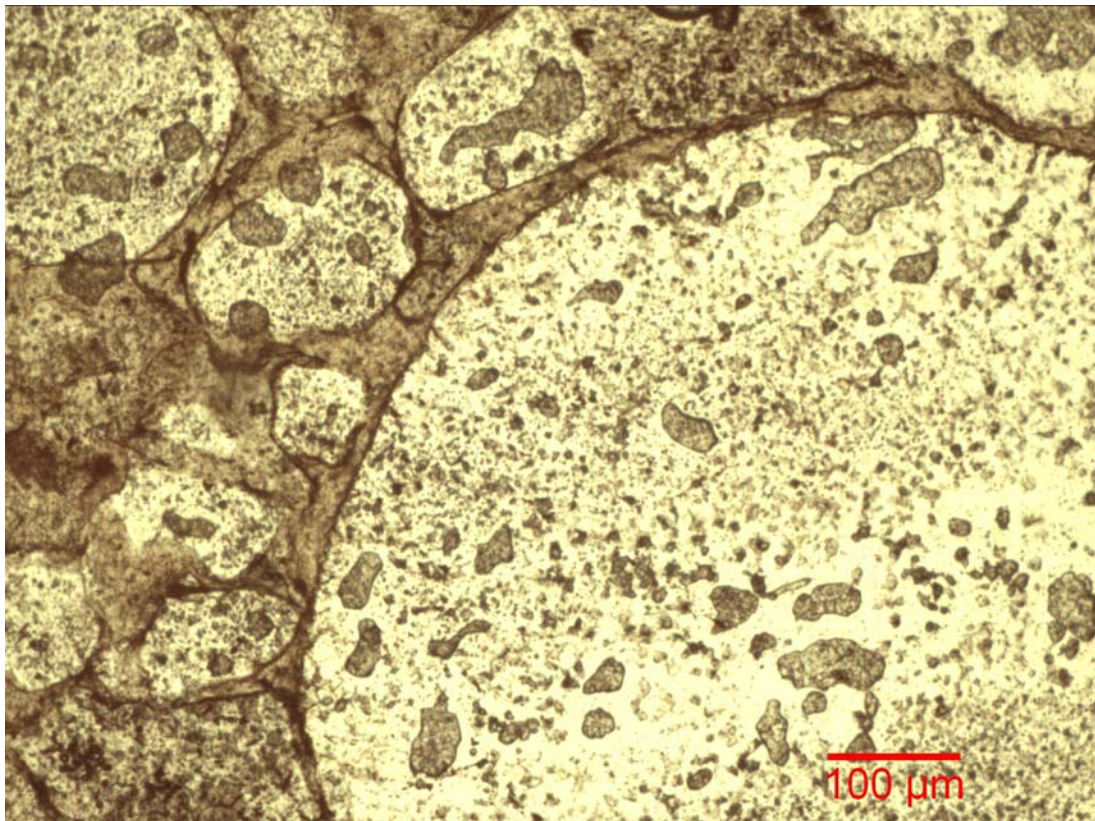


Bild M-L4: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 3



Bild M-L5: Scan des Dünnschliffs der Probe aus Serie 9 (Bildbreite 4,0 cm)

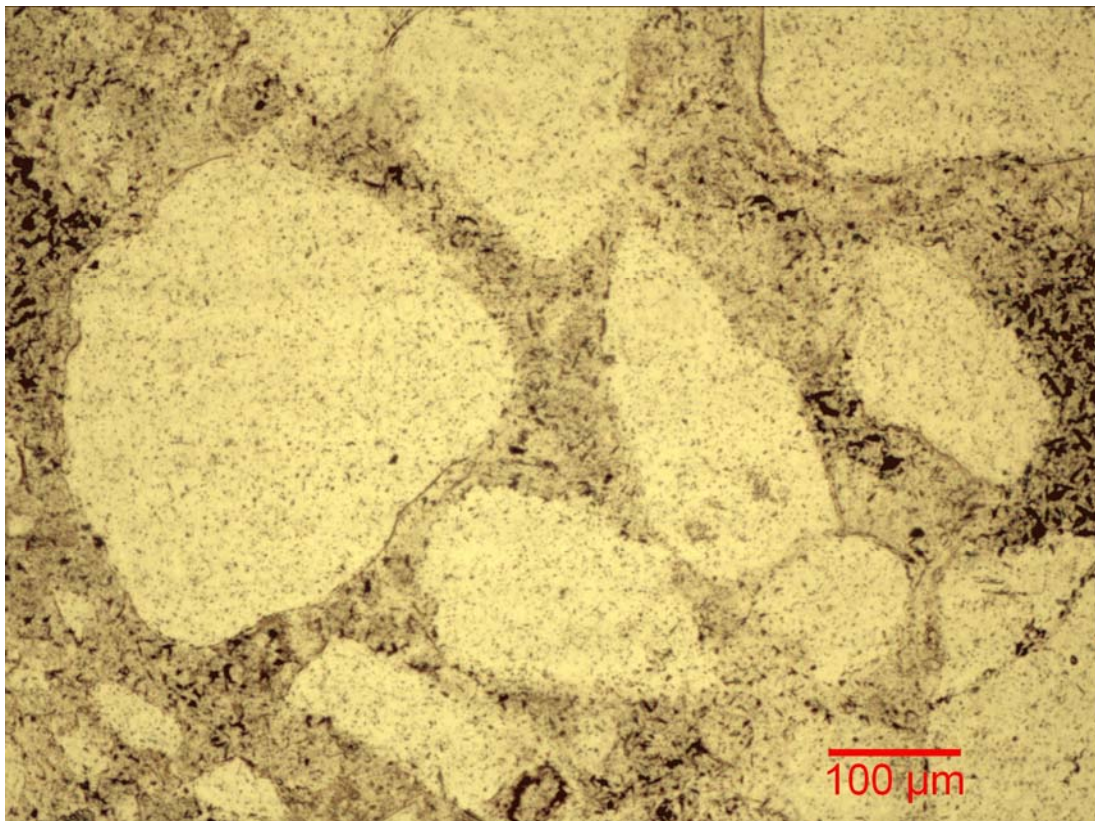


Bild M-L6: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 9

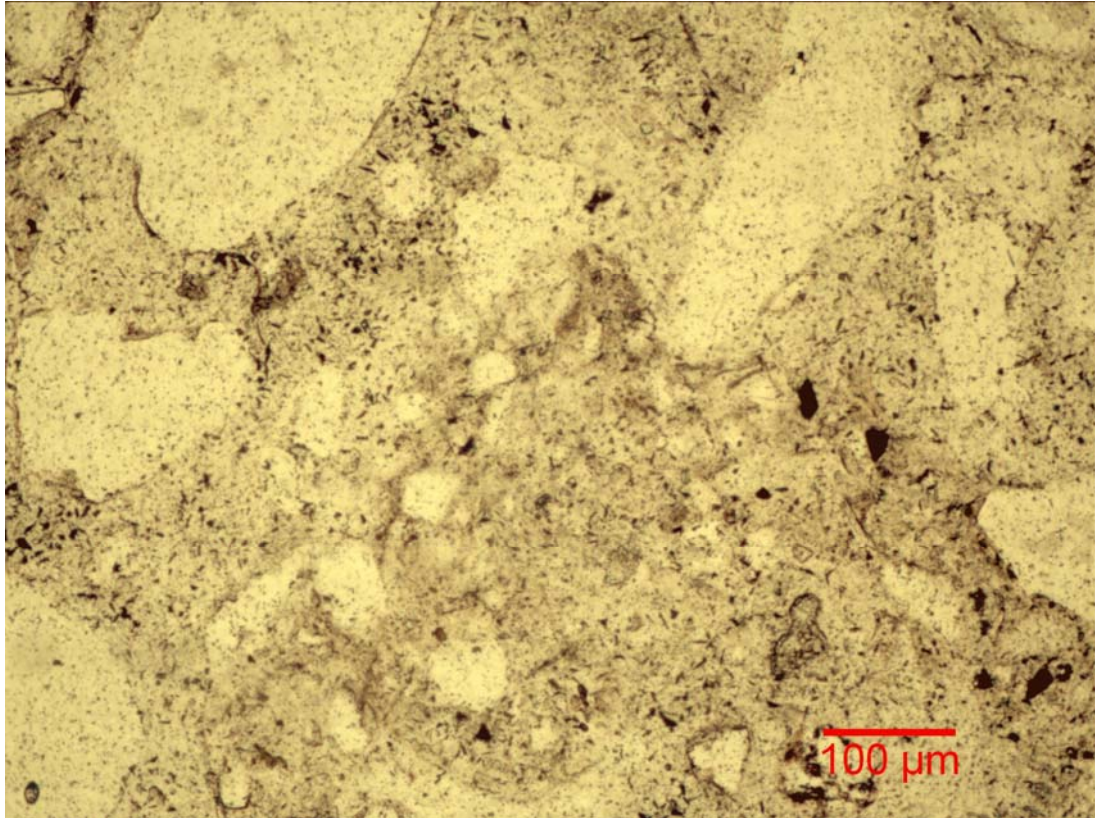


Bild M-L7: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 9

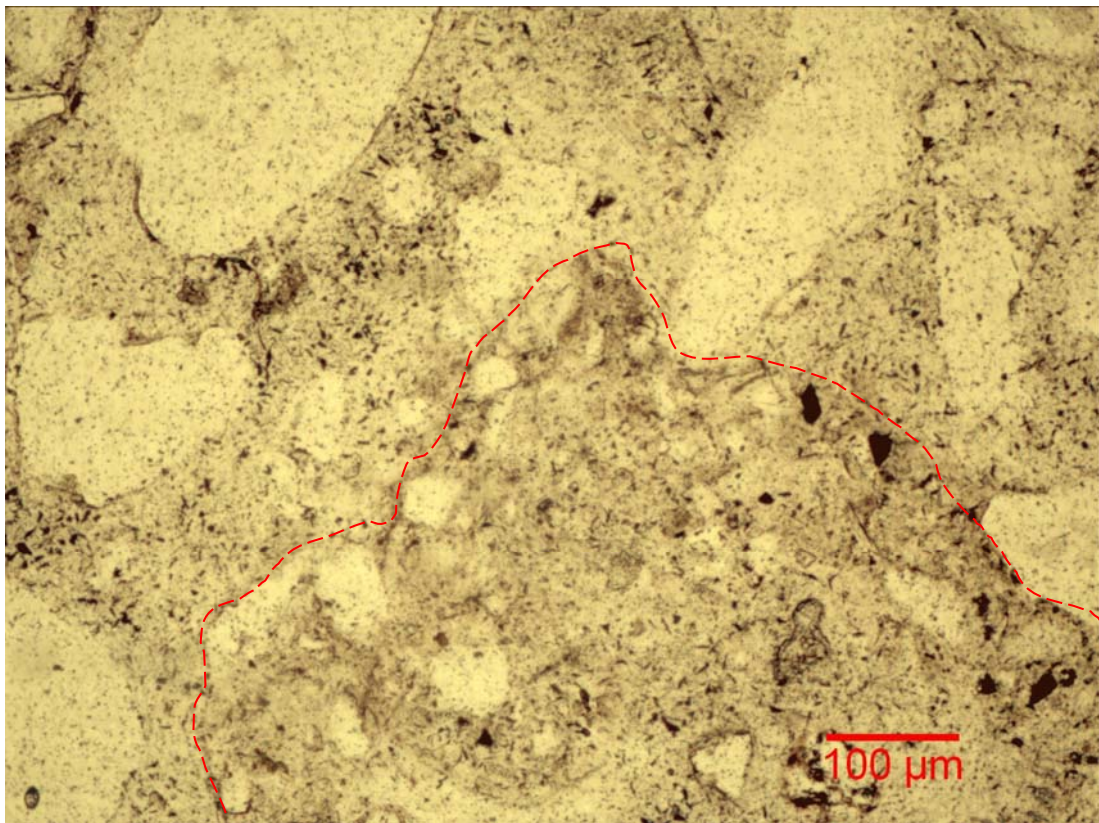


Bild M-L8: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 9



Bild M-L9: Scan des Dünnschliffs der Probe aus Serie 81 (Bildbreite 4,0 cm)

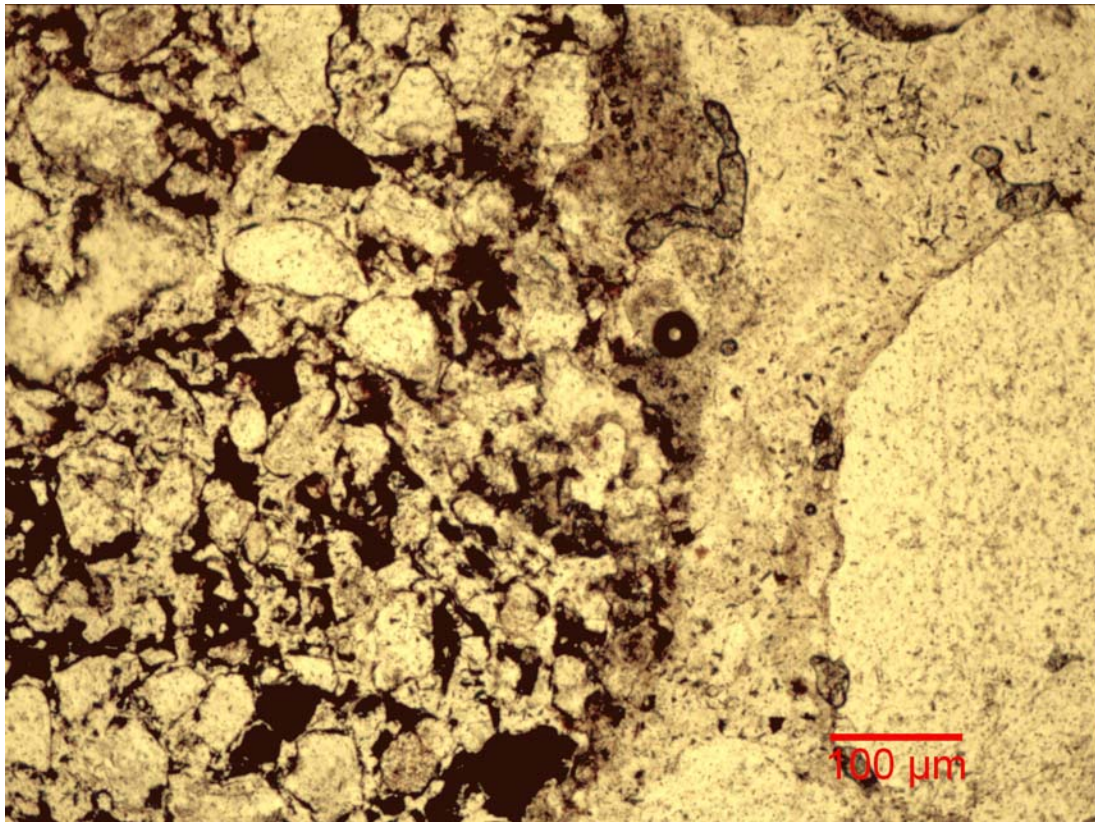


Bild M-L10: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 81

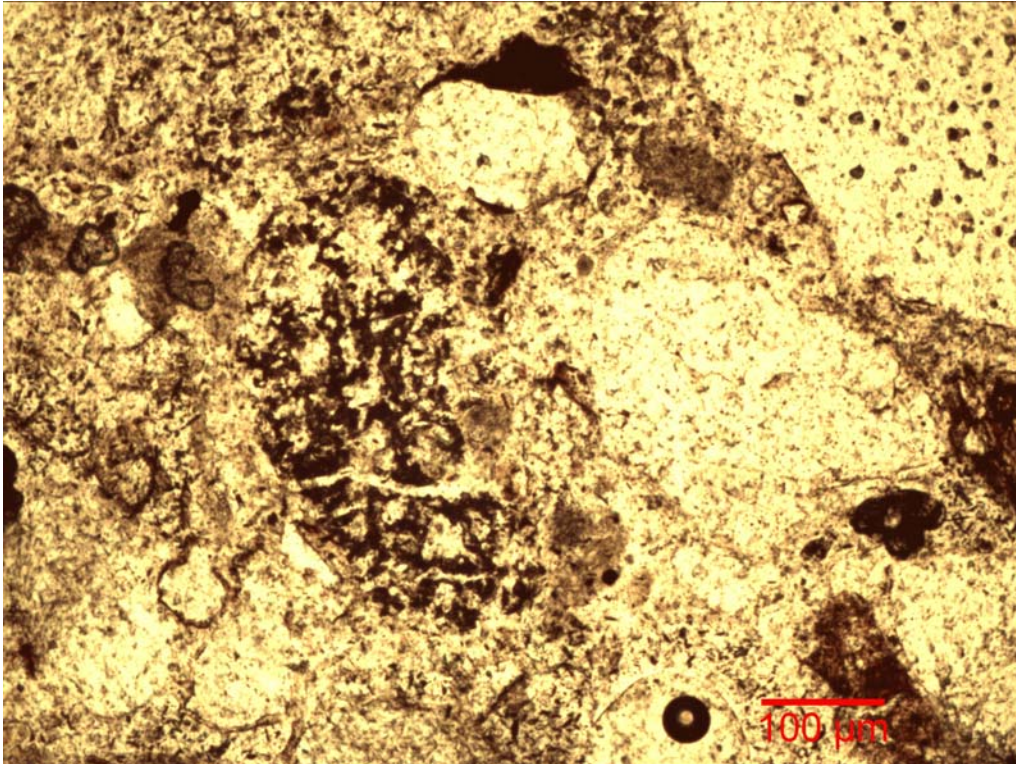


Bild M-L11: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 81

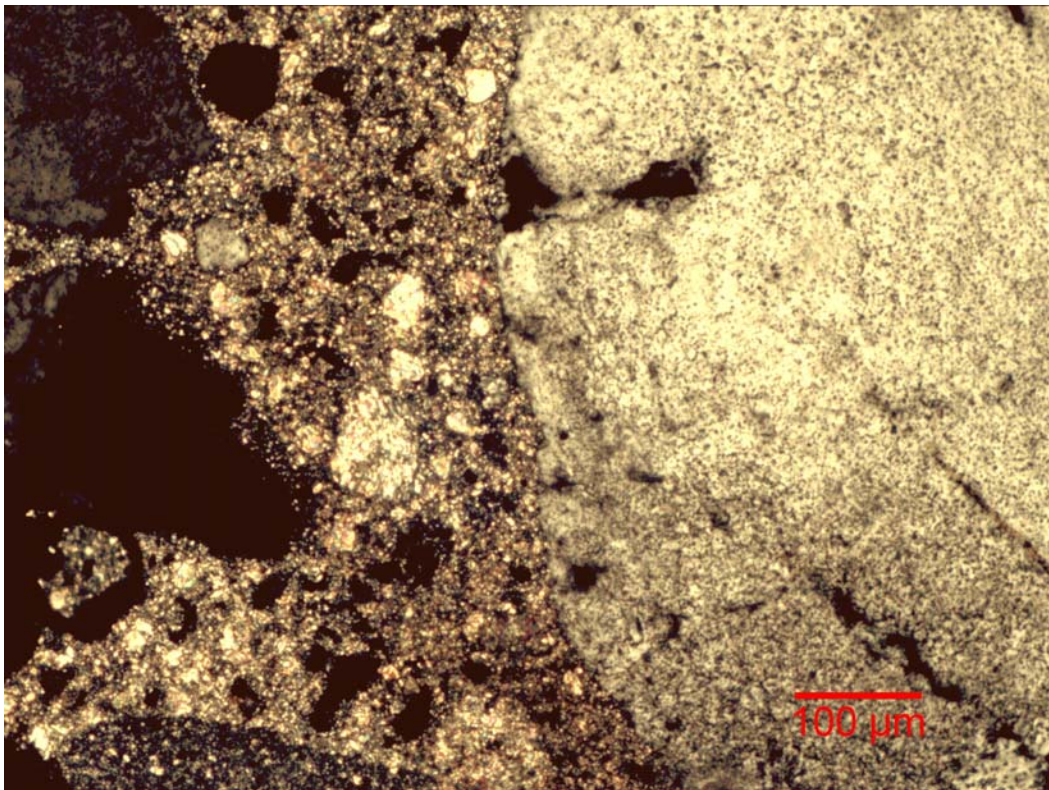


Bild M-L12: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 81 (kreuzpolarisiertes Licht)

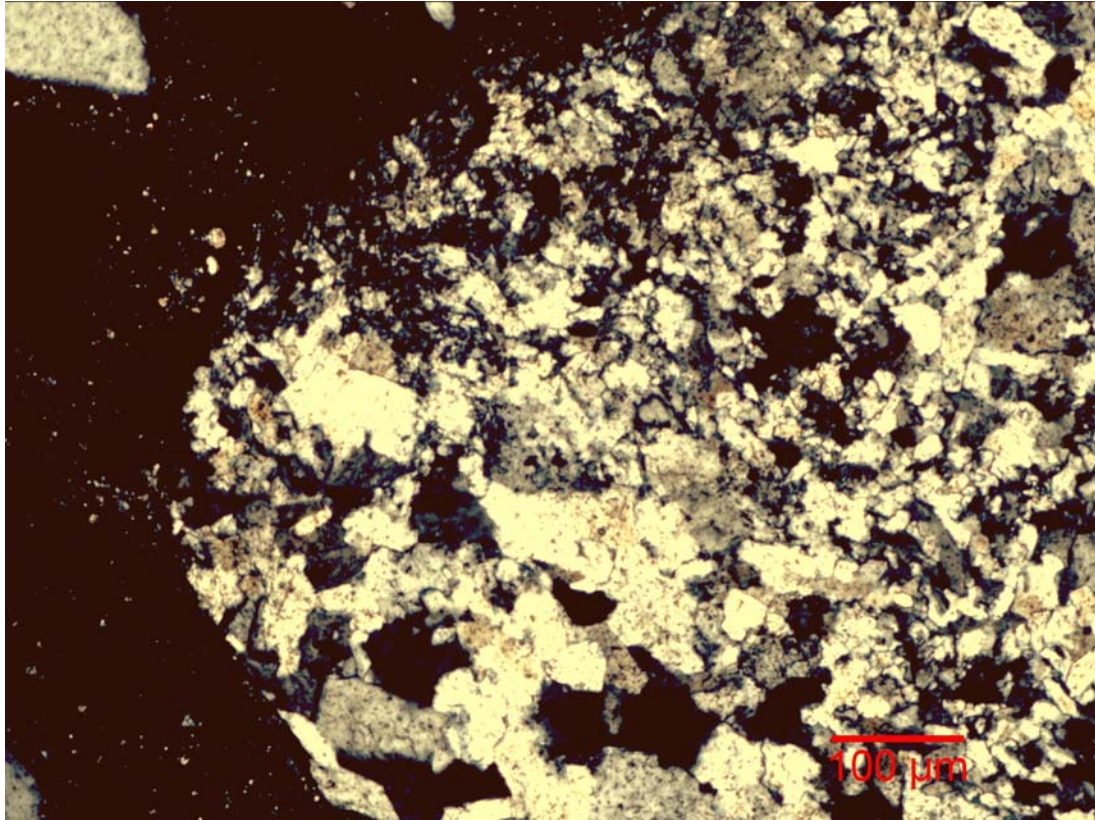


Bild M-L13: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 81 (kreuzpolarisiertes Licht)



Bild M-L14: Scan des Dünnschliffs der Probe aus Serie 82 (Bildbreite 4,0 cm)

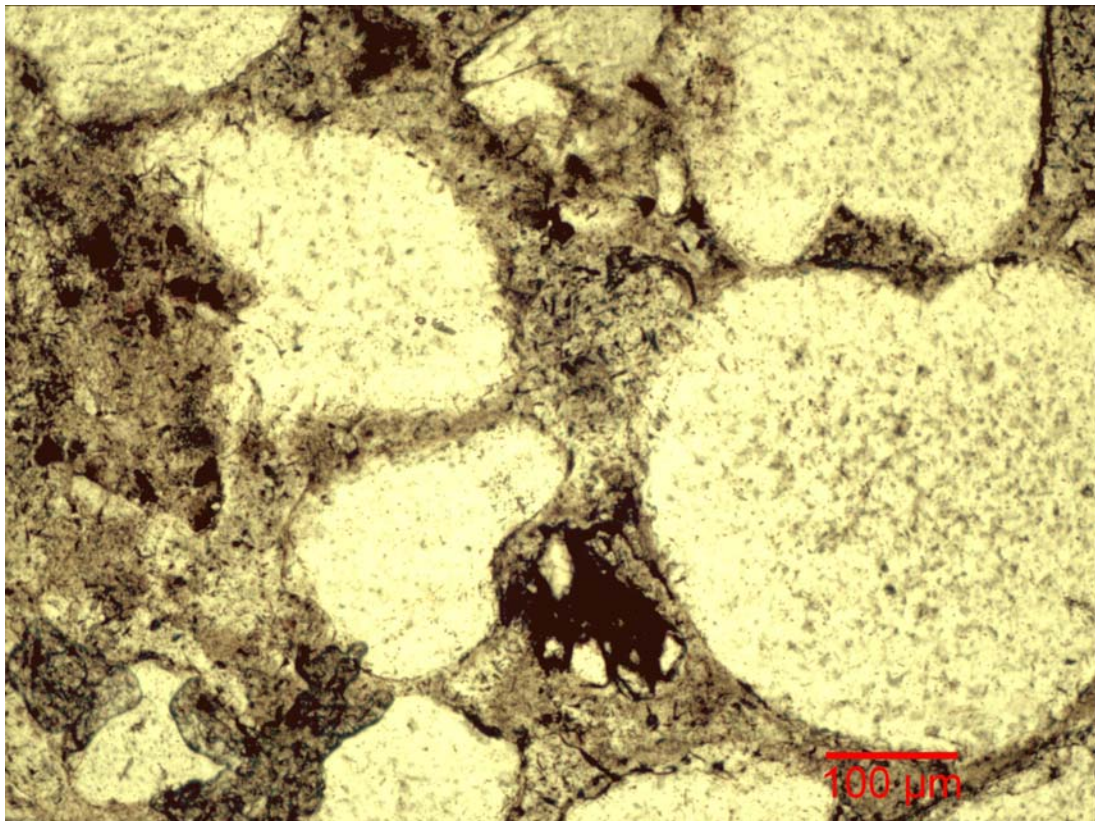


Bild M-L15: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 82

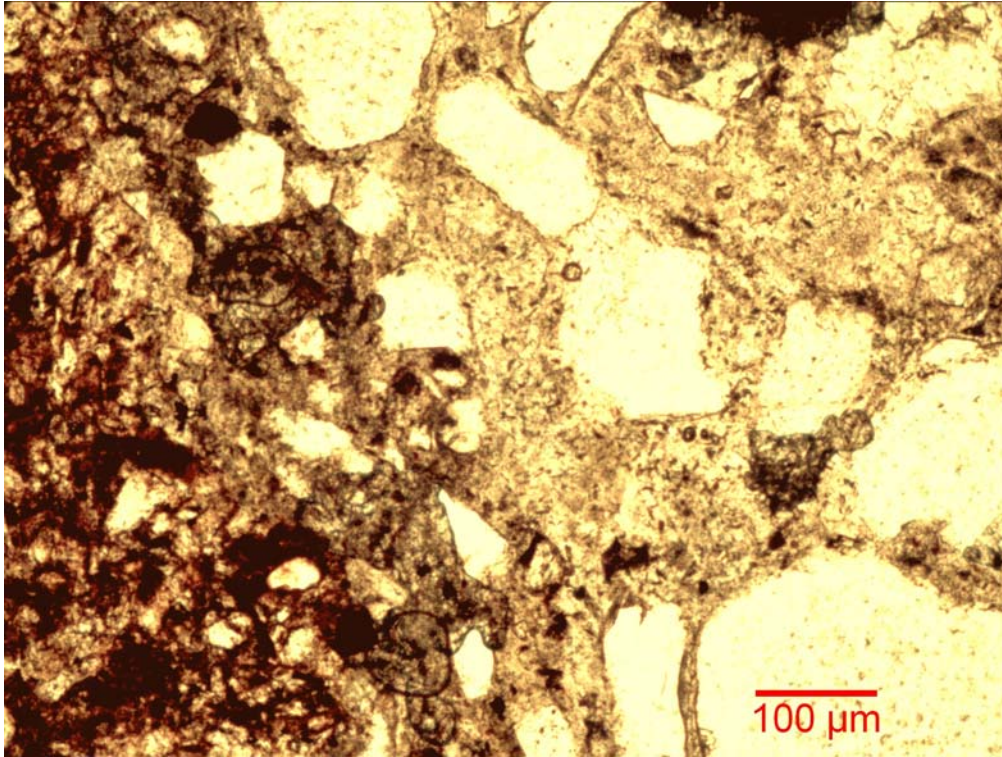


Bild M-L16: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 82

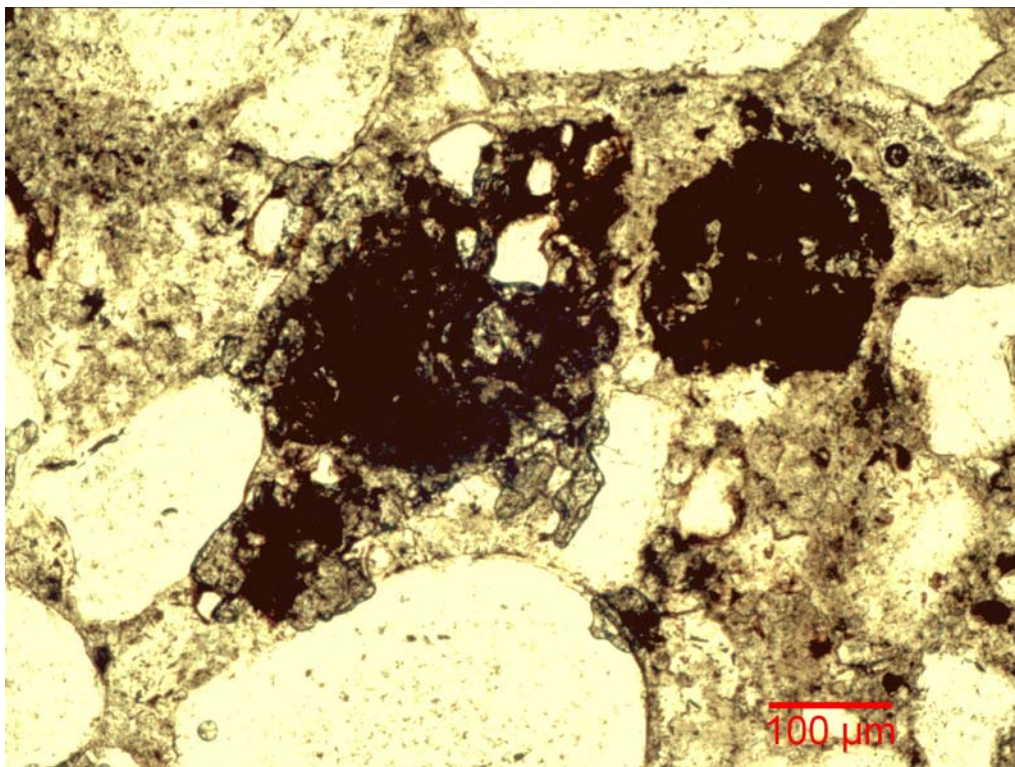


Bild M-L17: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 82



Bild M-L18: Scan des Dünnschliffs der Probe aus Serie 83 (Bildbreite 4,0 cm)

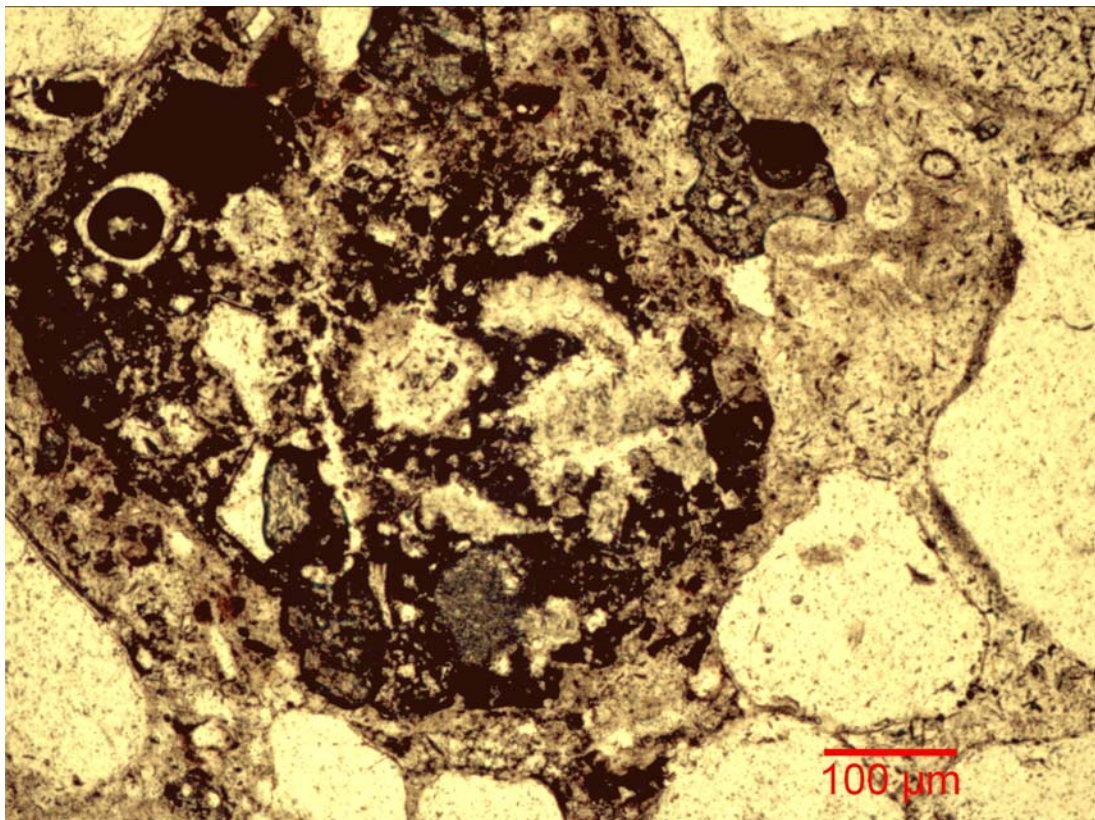


Bild M-L19: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 83

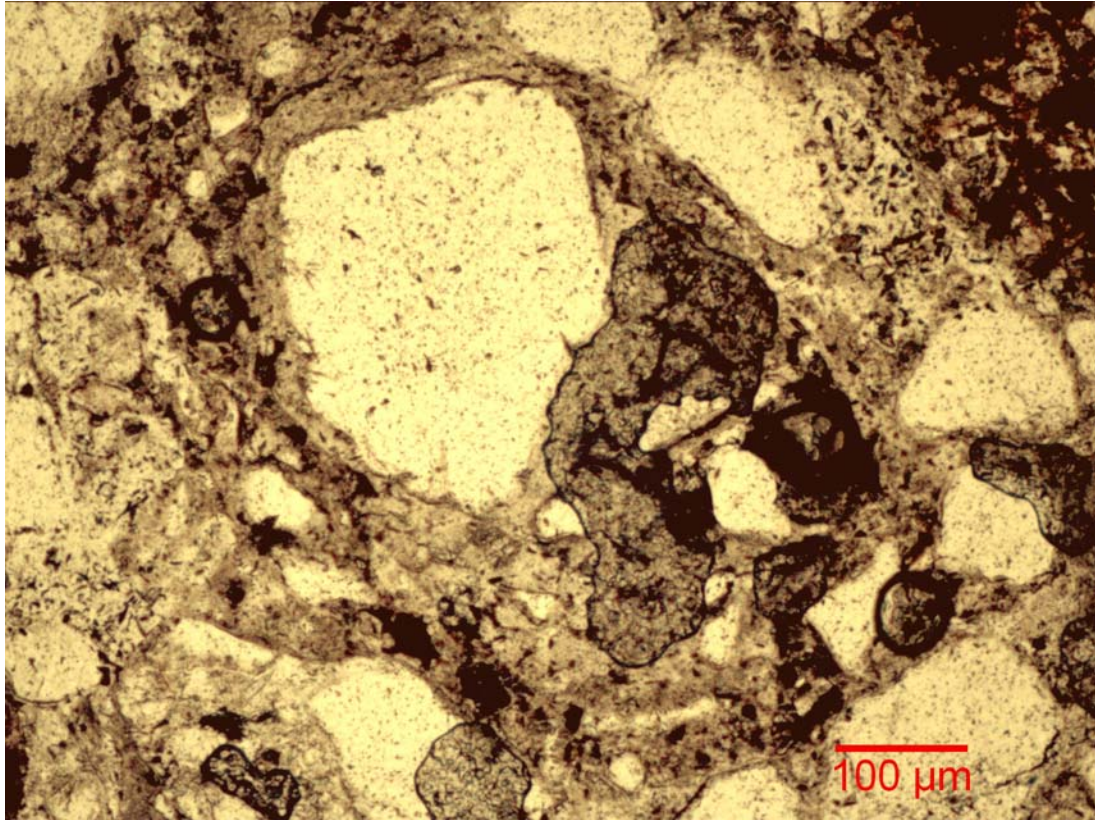


Bild M-L20: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 83

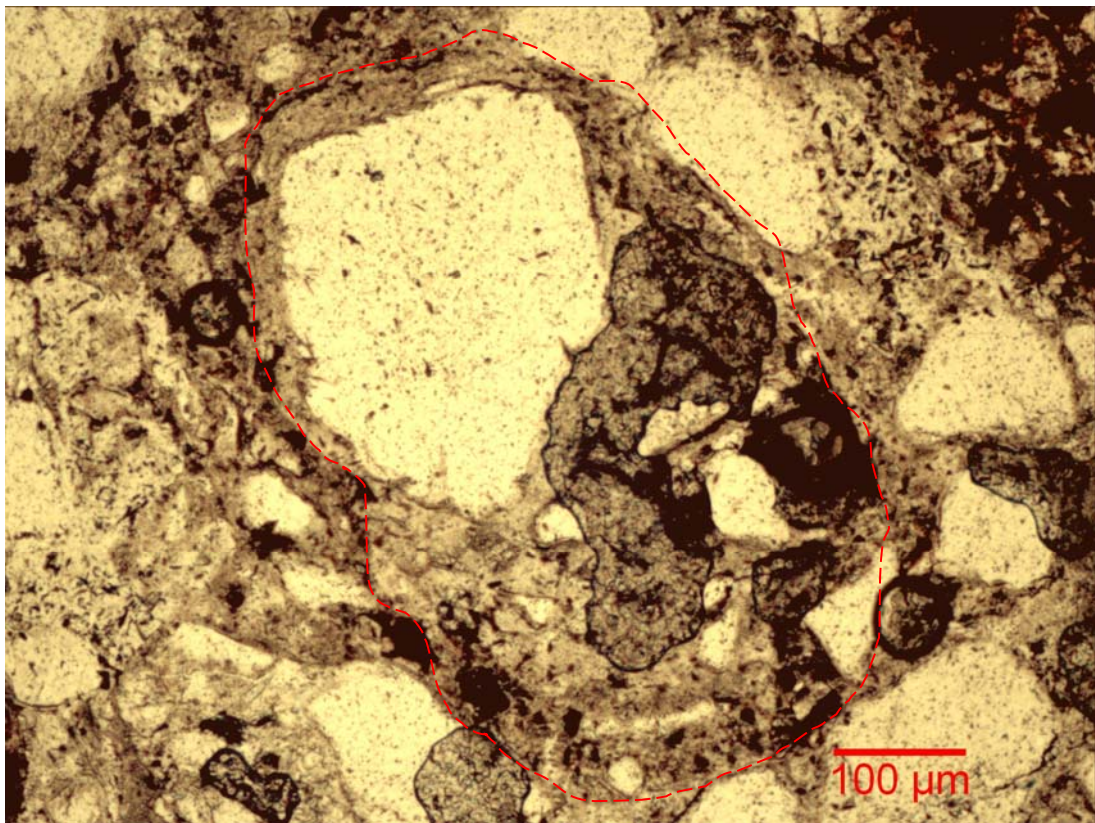


Bild M-L21: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 83

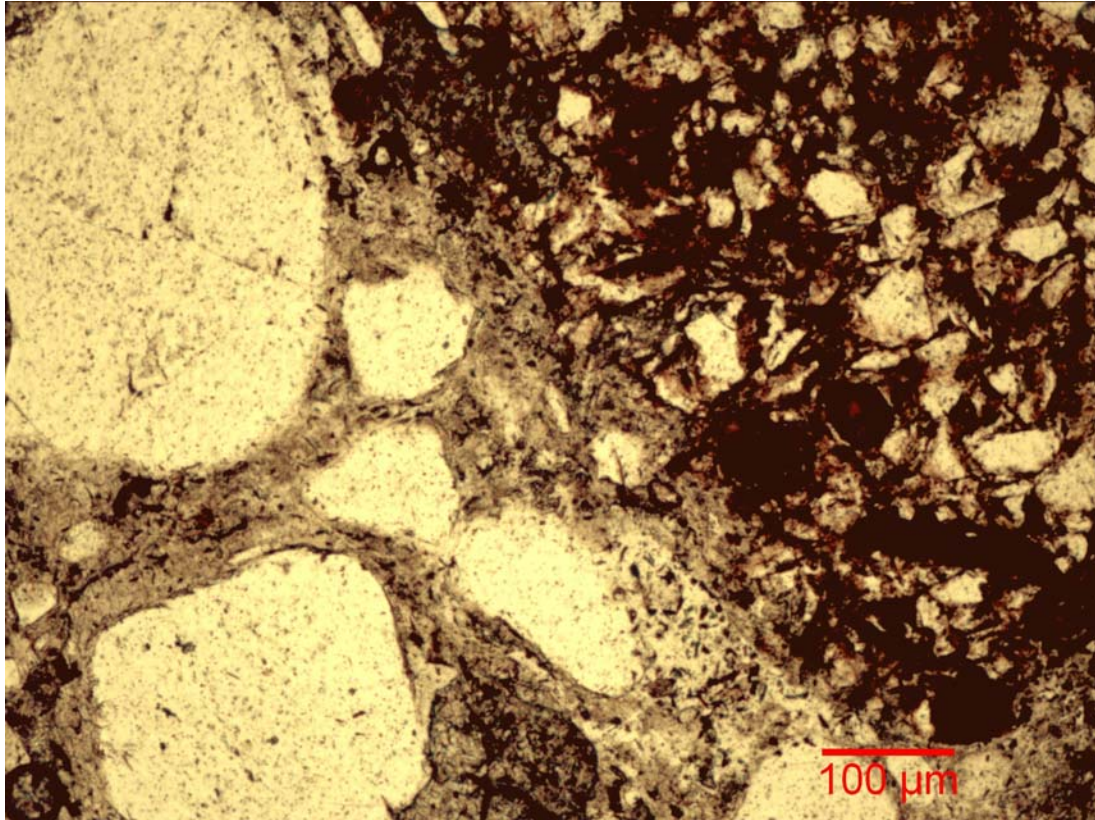
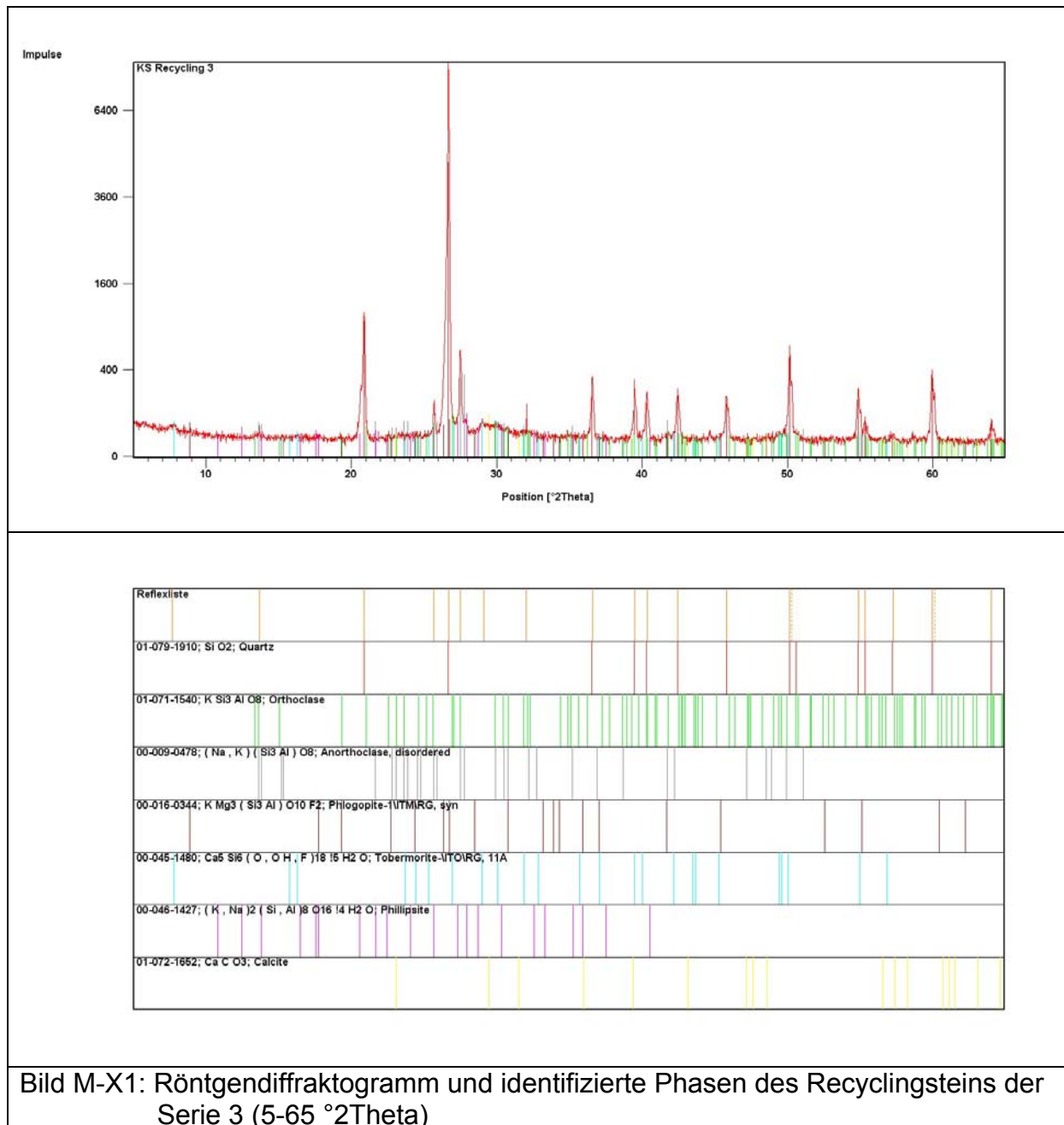


Bild M-L22: Lichtmikroskopische Aufnahme der Probe aus Serie 83

XRD



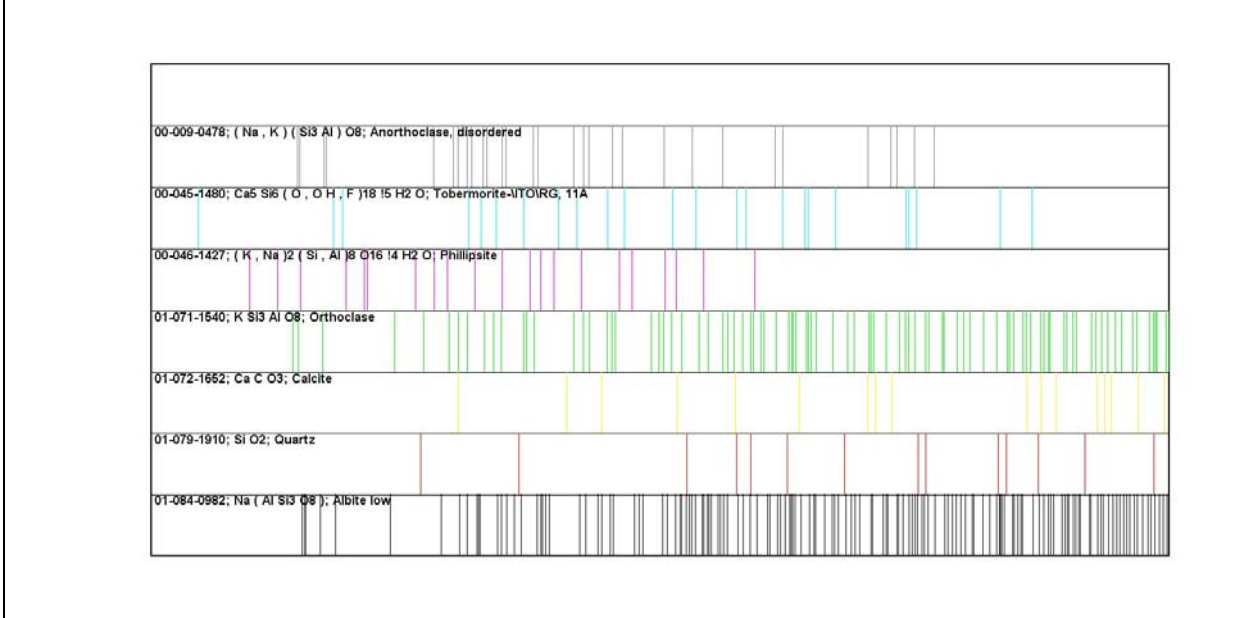
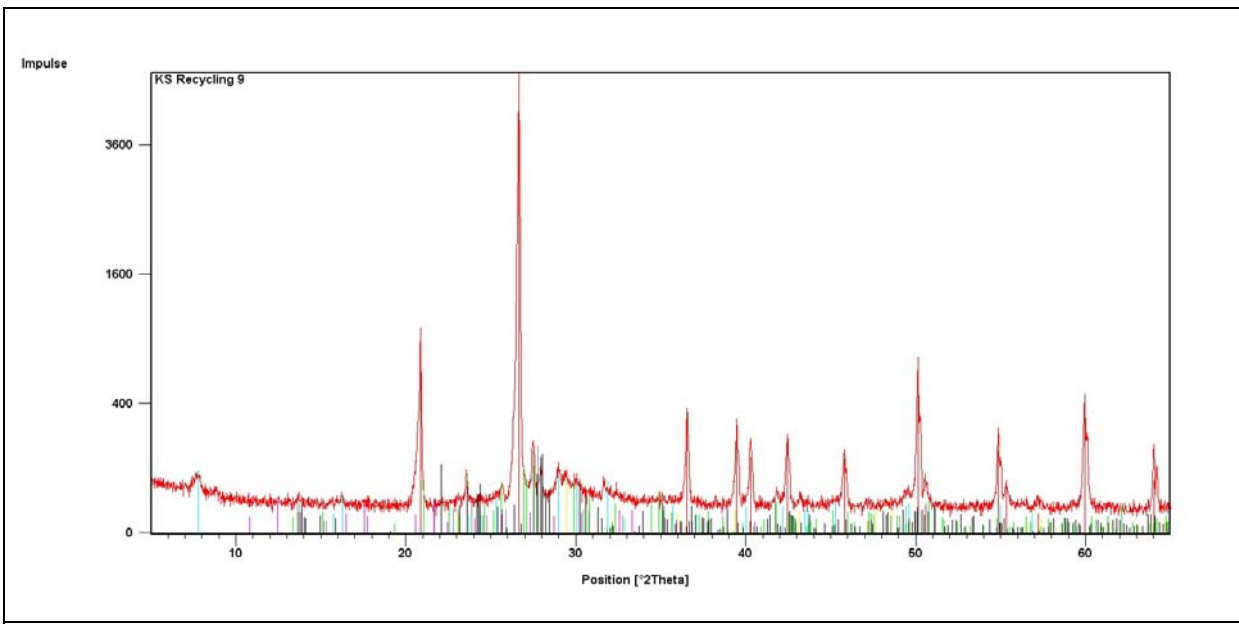


Bild M-X2: Röntgendiffraktogramm und identifizierte Phasen des Recyclingsteins der Serie 9 (5-20 °2Theta)

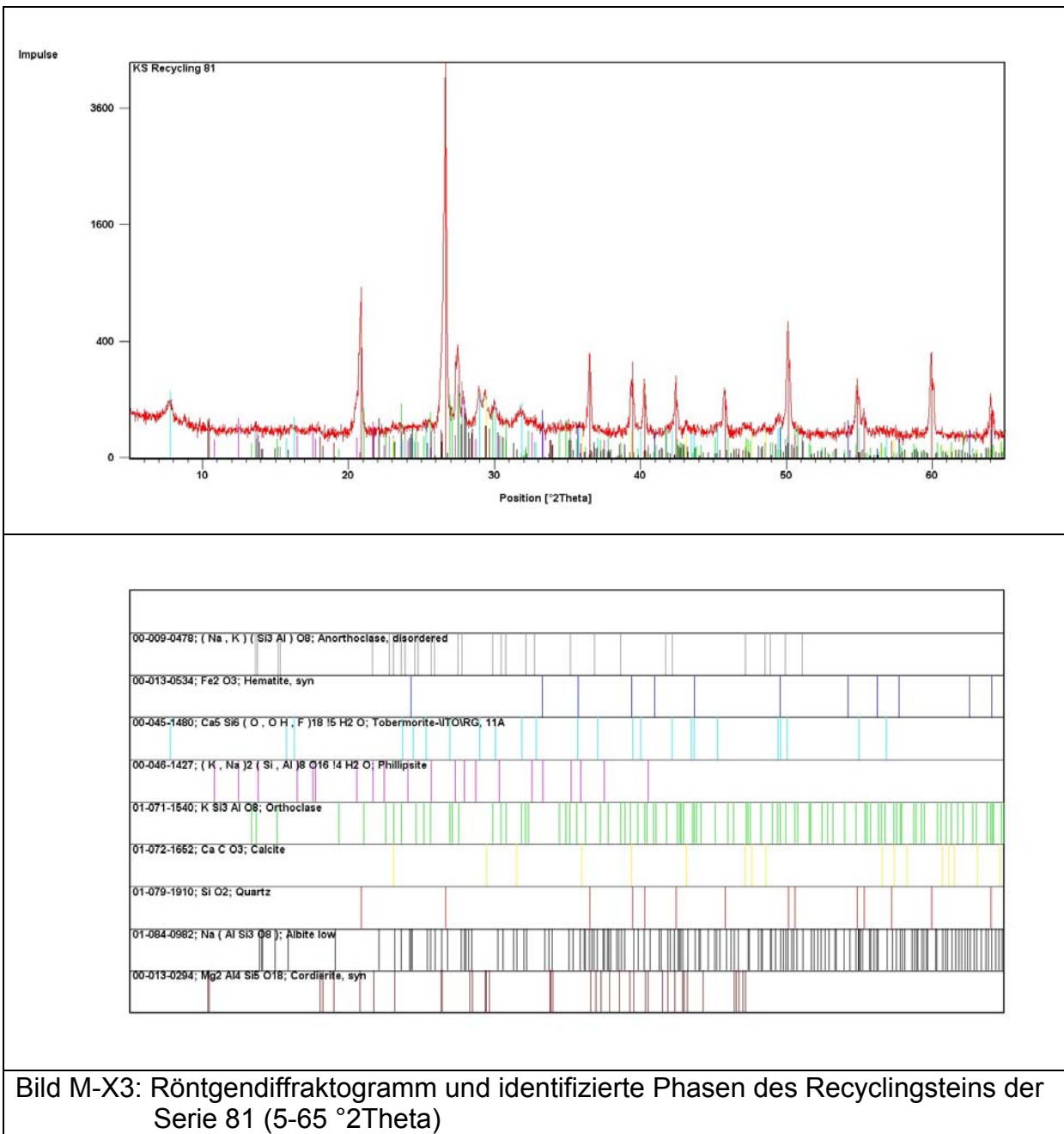
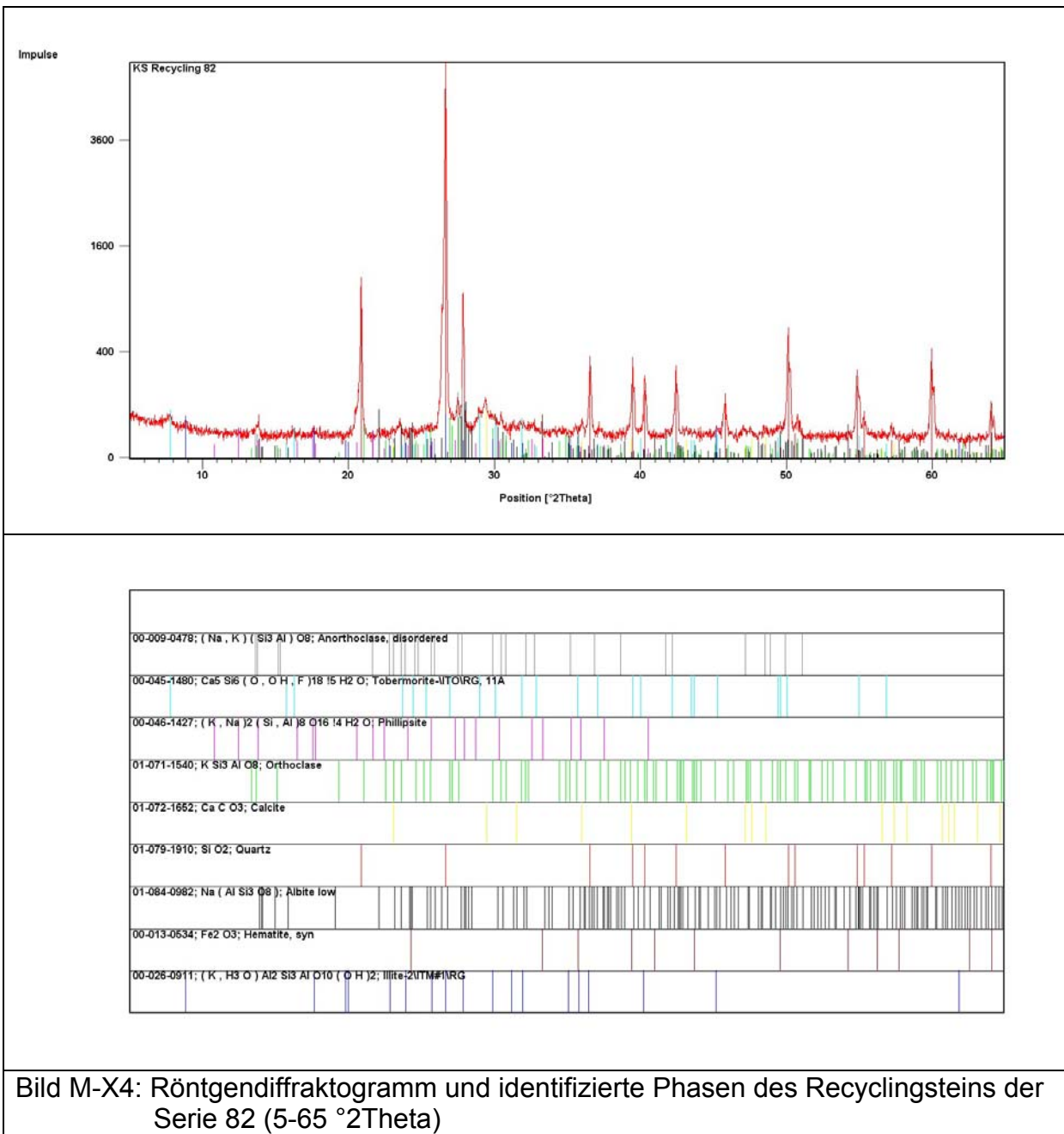
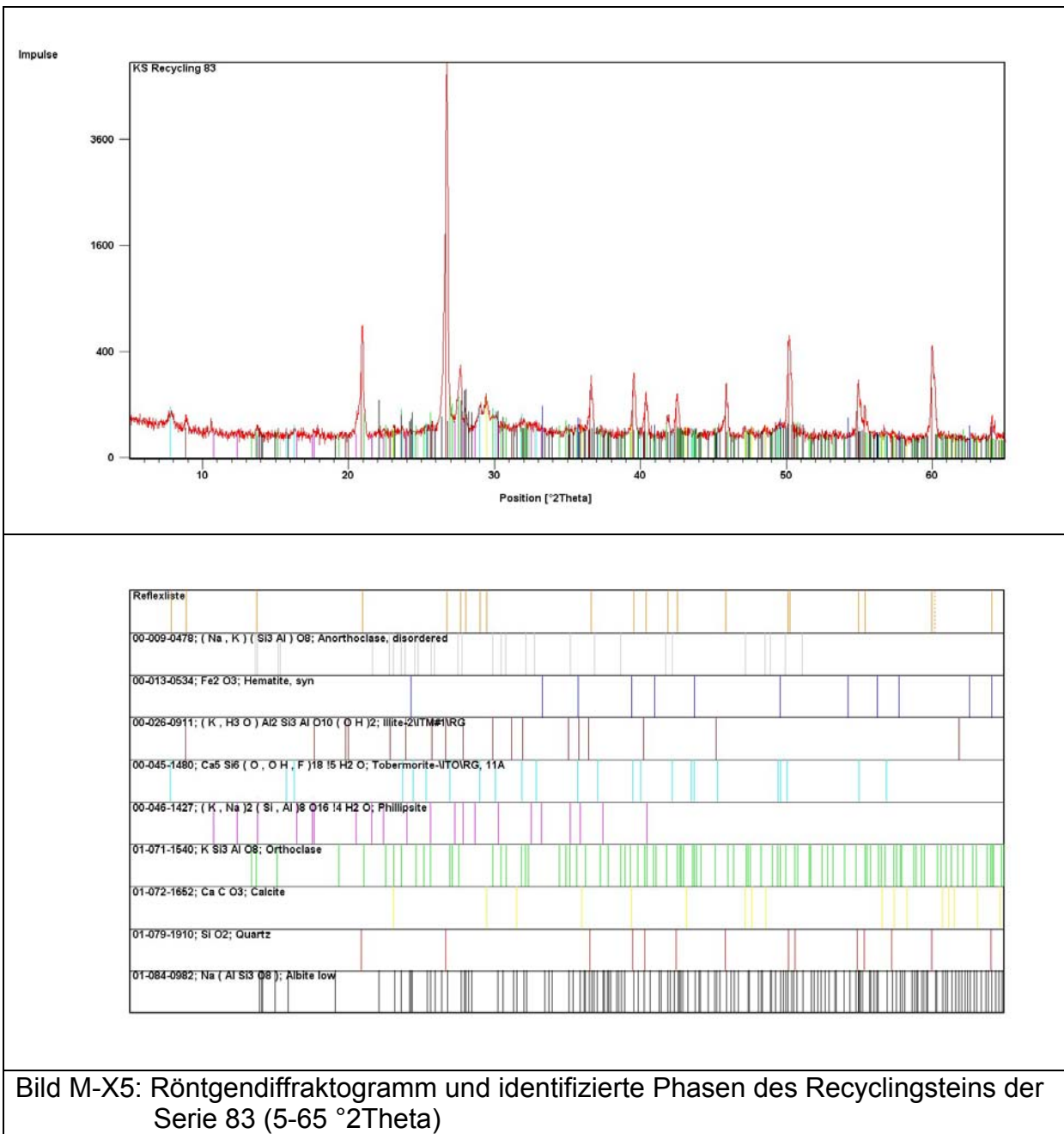


Bild M-X3: Röntgendiffraktogramm und identifizierte Phasen des Recyclingsteins der Serie 81 (5-65 °2Theta)





MIP der untersuchten Mauersteine:

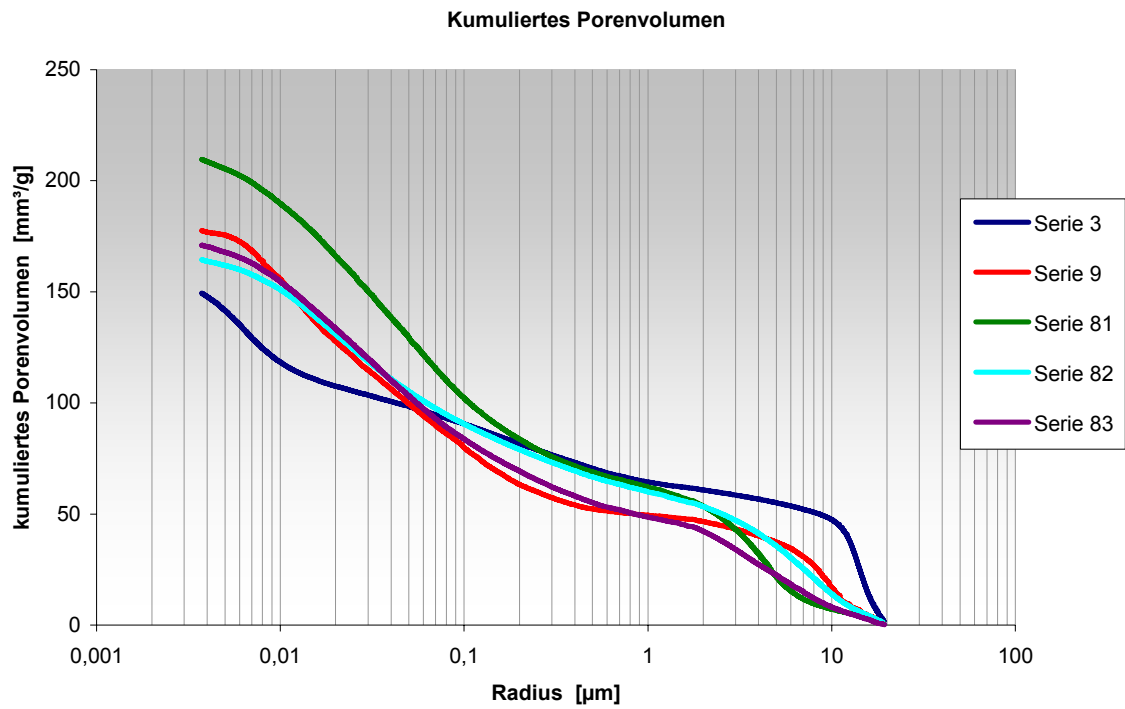


Bild M-M1: Kumuliertes Porenvolumen der untersuchten Mustersteine

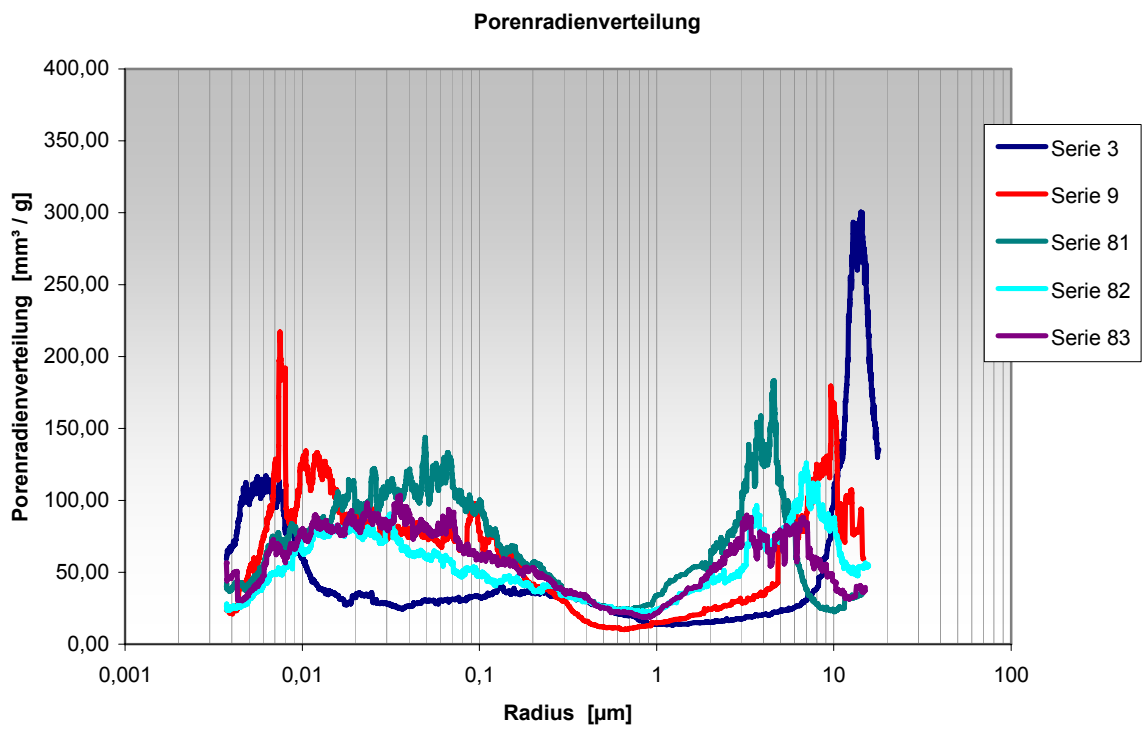


Bild M-M2: Porenradienverteilung der untersuchten Mustersteine

	Serie 3	Serie 9	Serie 81	Serie 82	Serie 83
Porosität MIP [%]	28,35	32,08	35,77	29,93	30,98
Trockenrohddichte MIP [g/cm ³]	1,898	1,807	1,706	1,819	1,811
Trockenrohddichte (FVKS) [g/cm ³]	1,803	1,703	1,653	1,751	1,720
Abweichungen FVKS von MIP [%]	-5,01	-5,76	-3,11	-3,74	-5,02

Bild M-M3: Porosität und Trockenrohddichte untersuchten Mustersteine

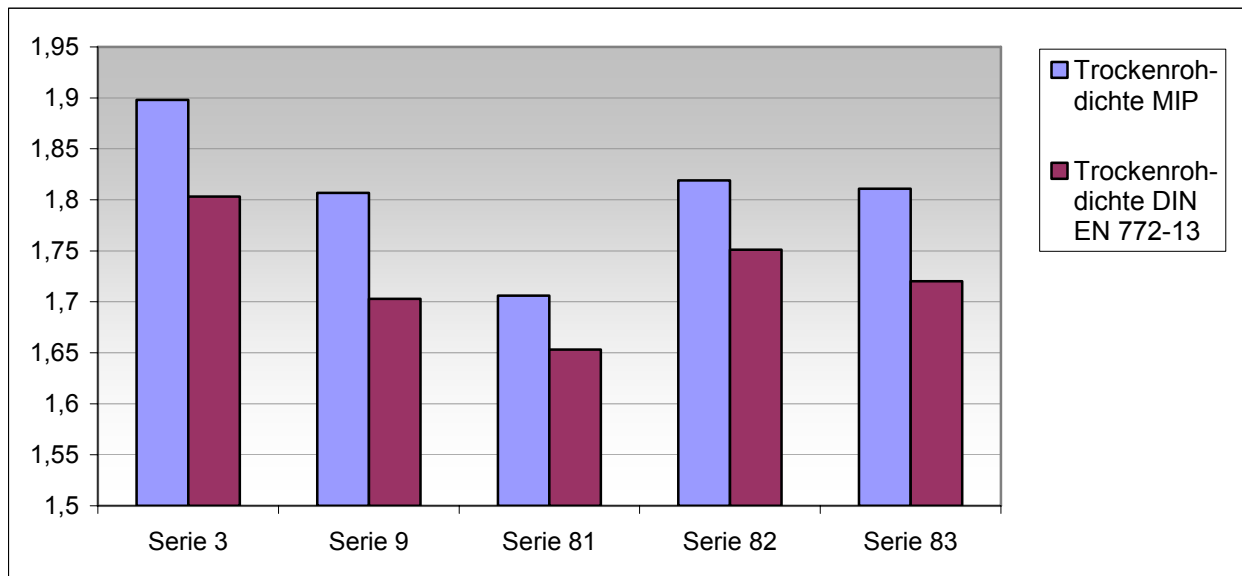


Bild M-M4: Vergleich der ermittelten Trockenrohddichten (MIP und DIN EN 772-13)

REM

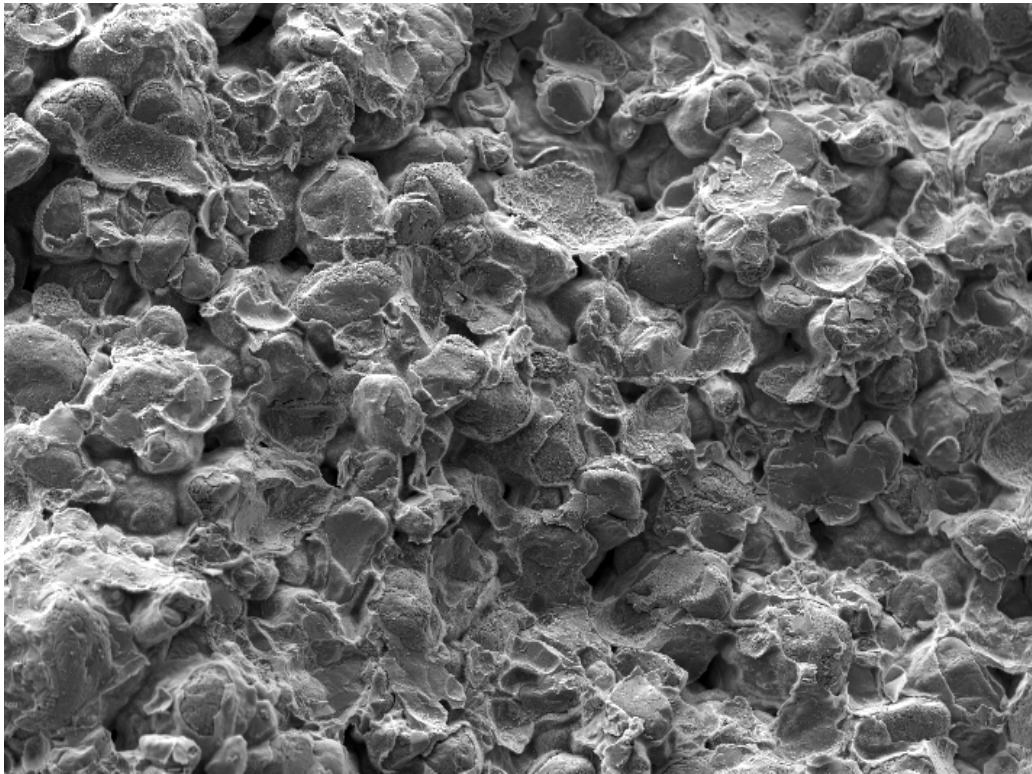


Bild M-R1: REM-Aufnahme der Probe 3, Bildbreite 2,89 mm

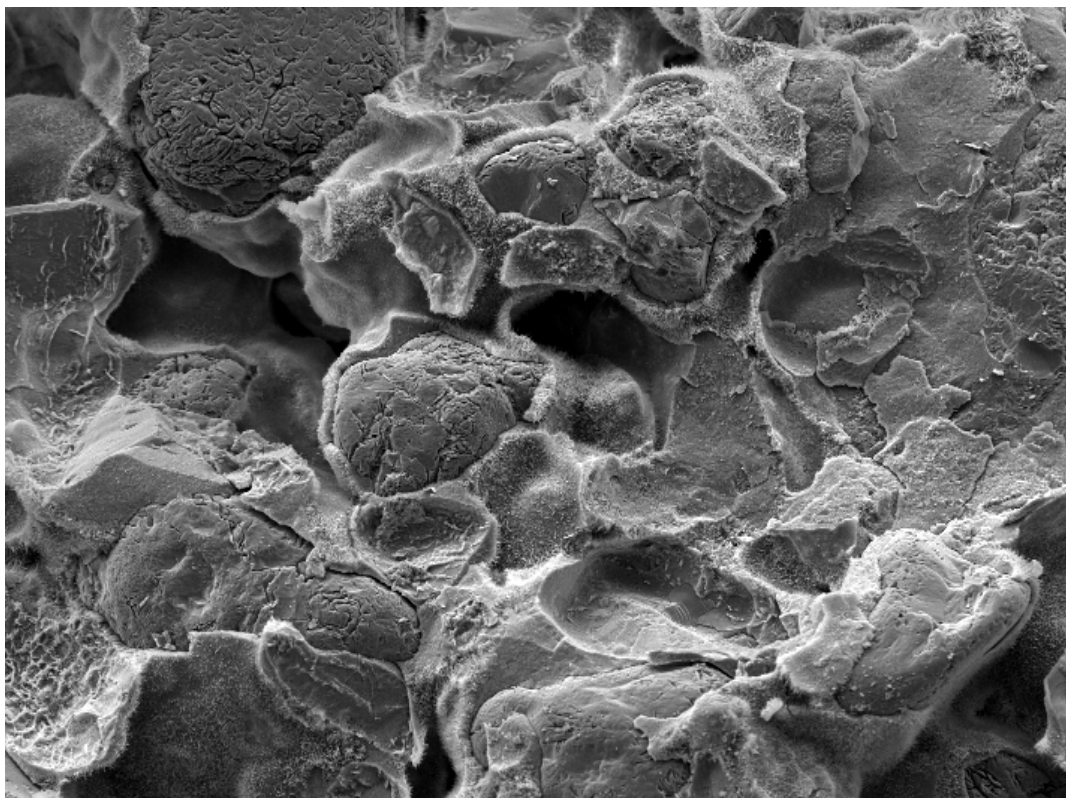


Bild M-R2: REM-Aufnahme der Probe 3, Bildbreite 925 µm

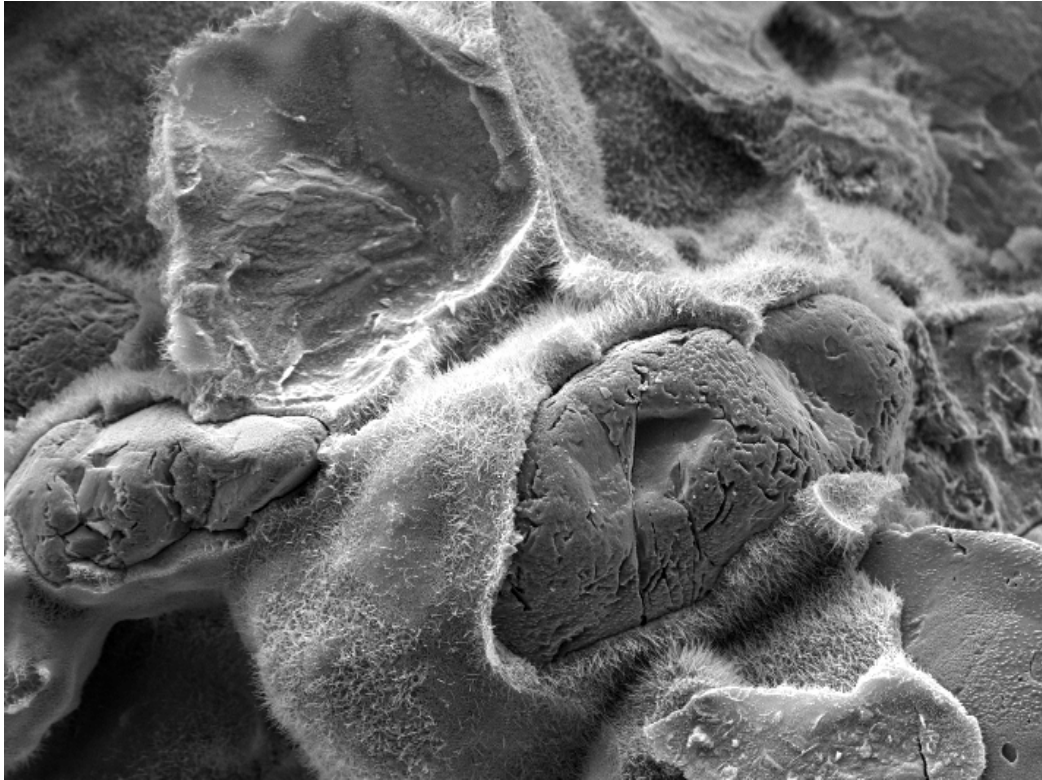


Bild M-R3: REM-Aufnahme der Probe 3, Bildbreite 462 μm

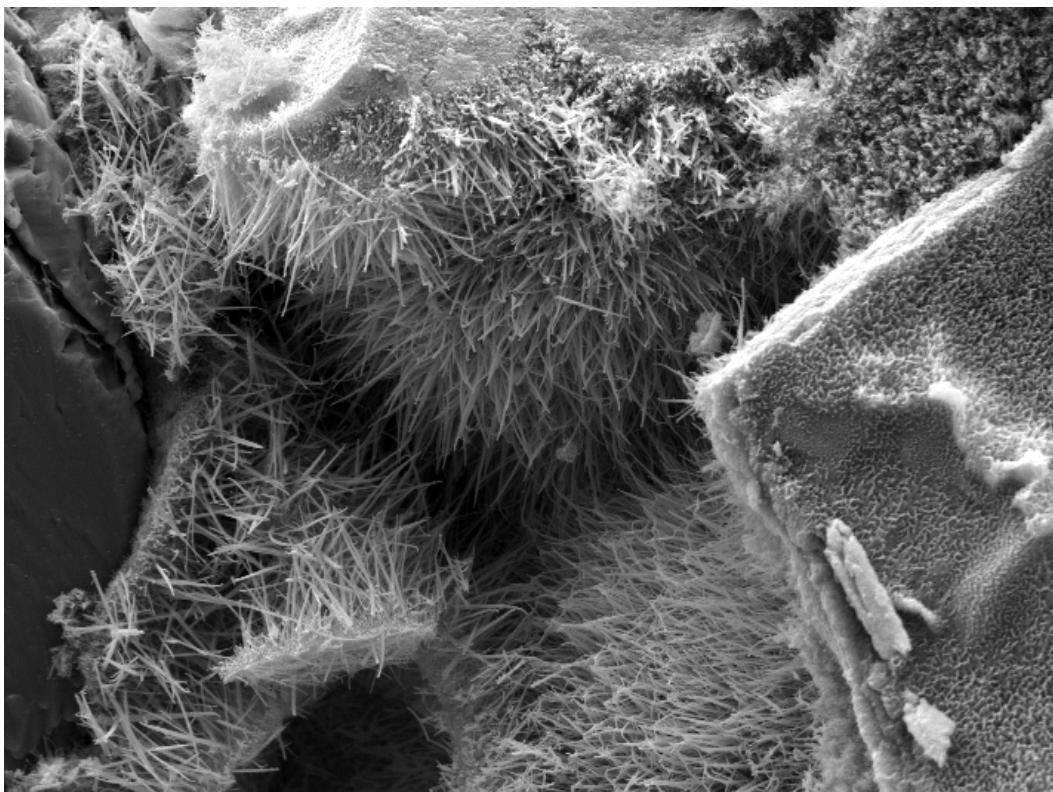


Bild M-R4: REM-Aufnahme der Probe 3, Bildbreite 116 μm

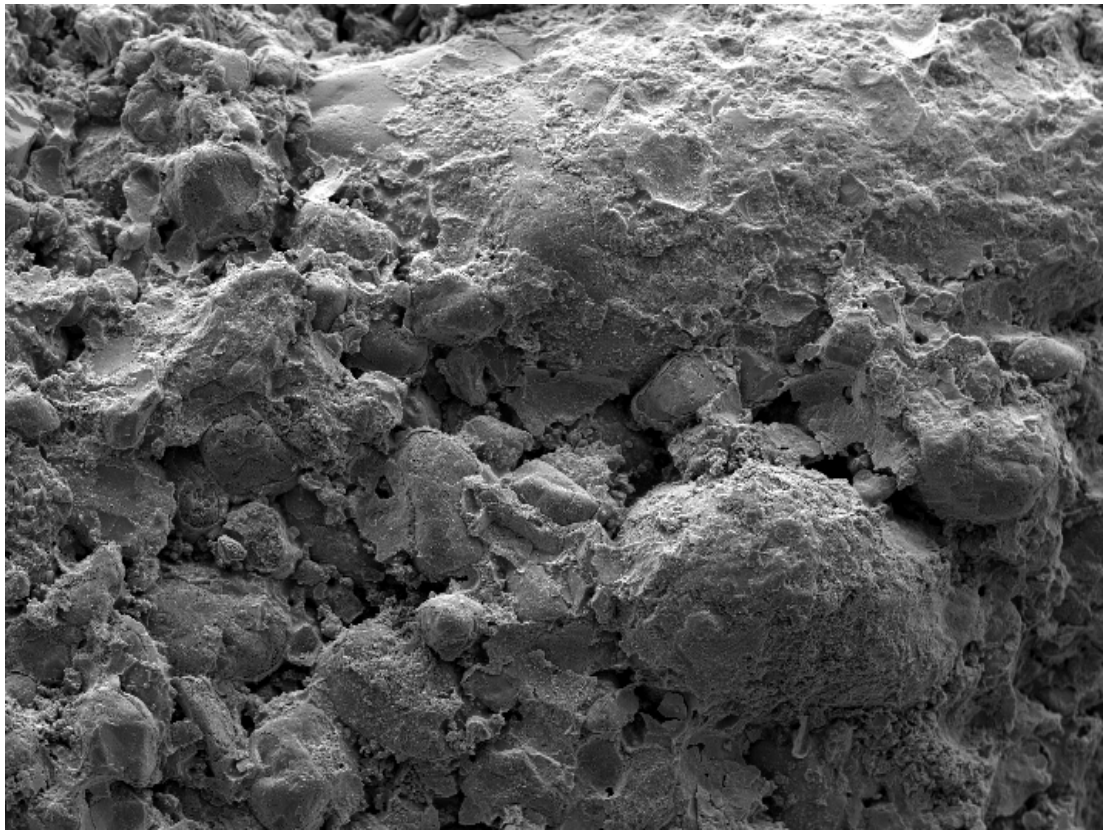


Bild M-R5: REM-Aufnahme der Probe 9, Bildbreite 2,89 mm

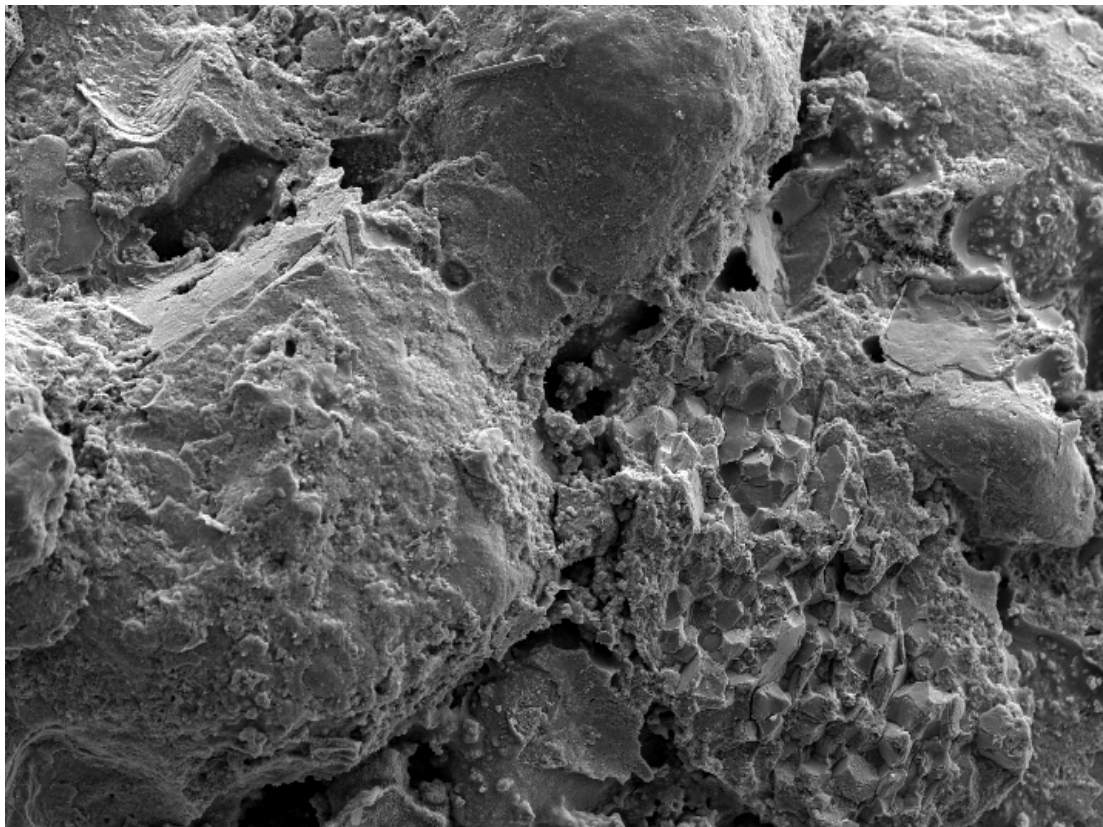


Bild M-R6: REM-Aufnahme der Probe 9, Bildbreite 925 µm

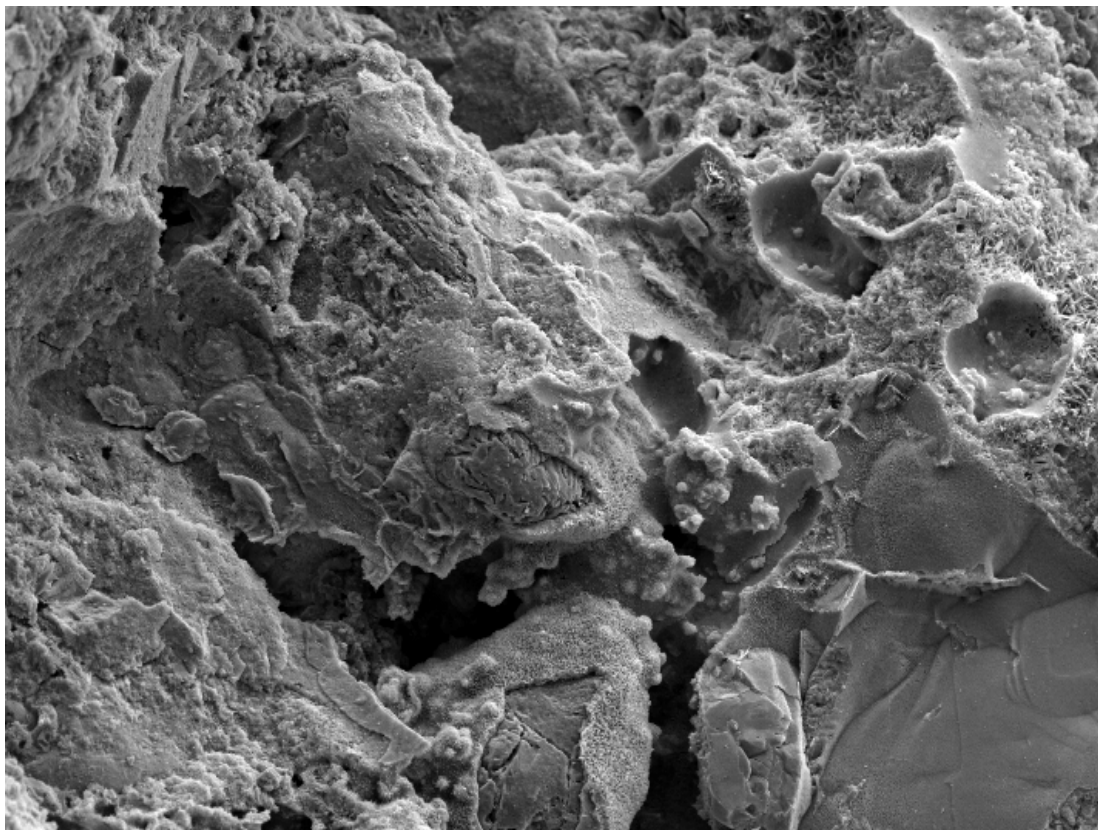


Bild M-R7: REM-Aufnahme der Probe 9, Bildbreite 462 μm

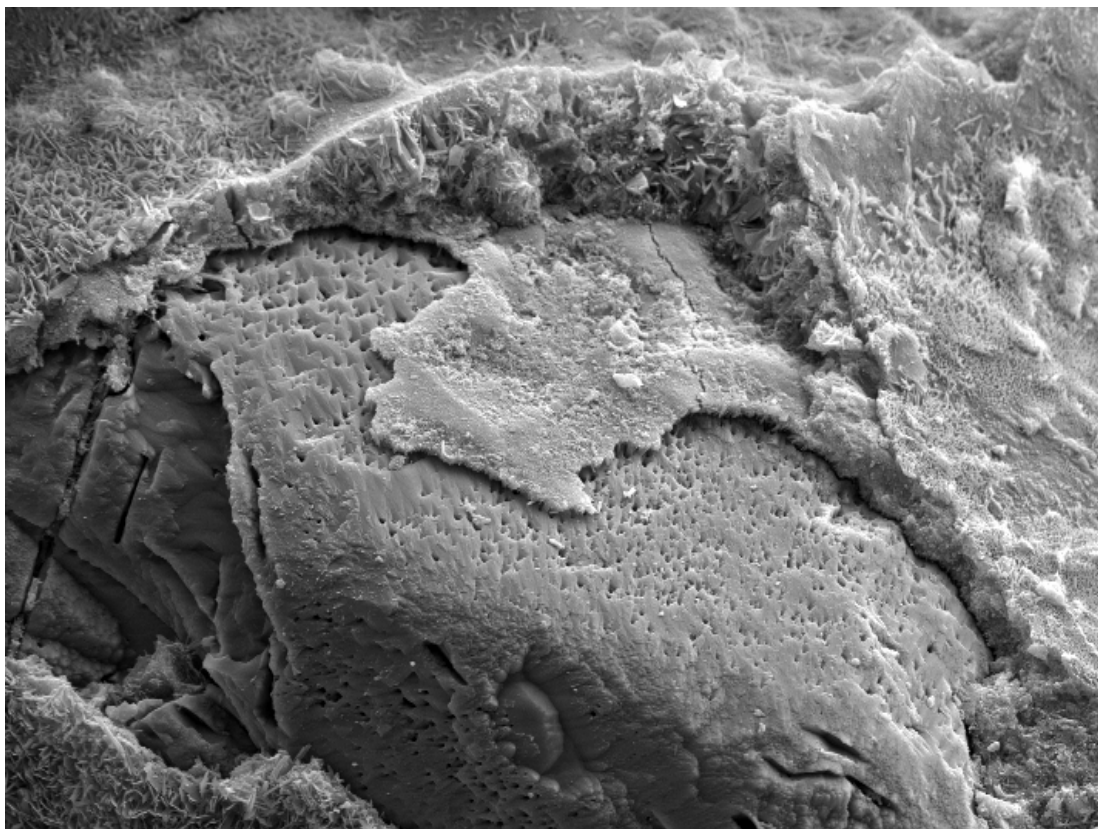


Bild M-R8: REM-Aufnahme der Probe 9, Bildbreite 116 μm

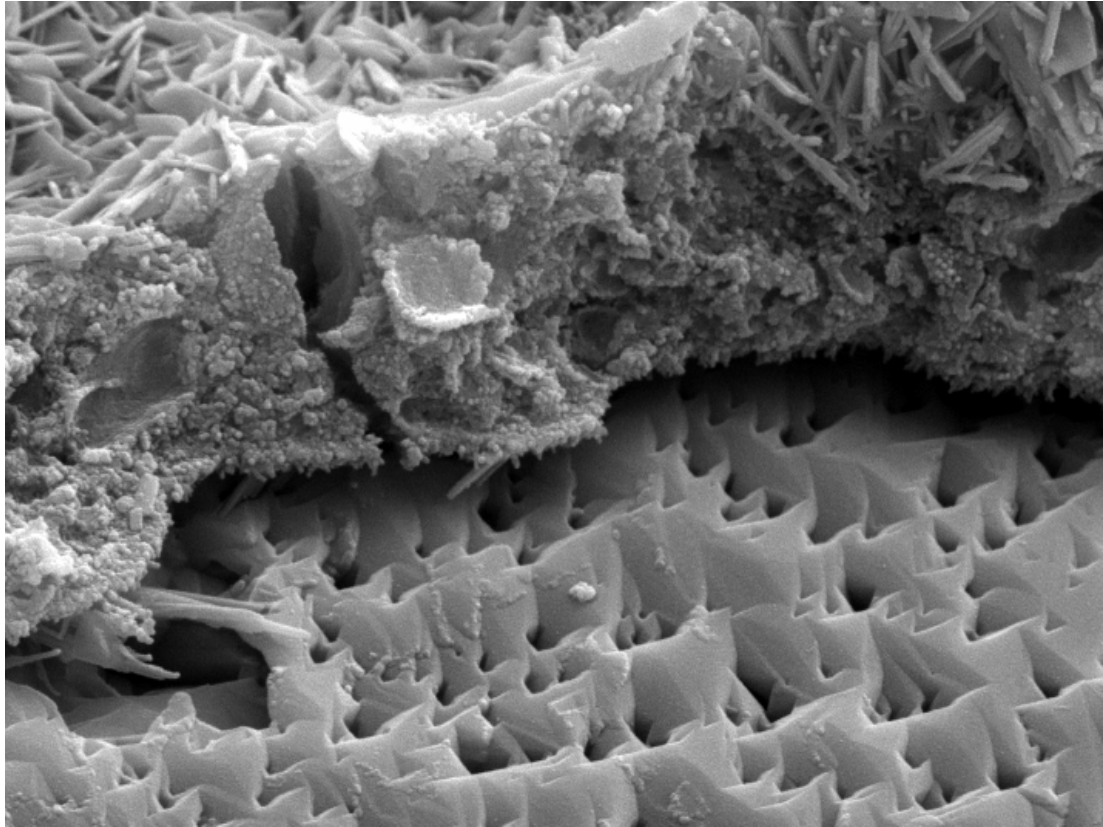


Bild M-R9: REM-Aufnahme der Probe 9, Bildbreite 23 μm

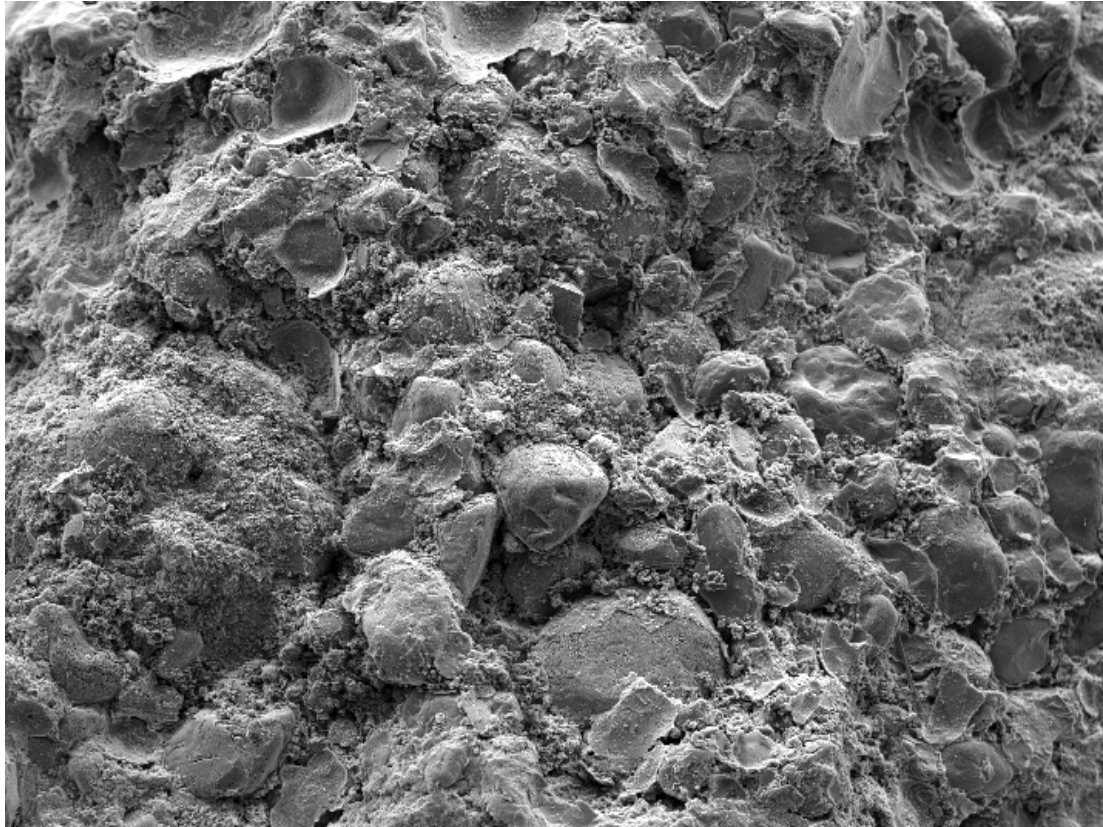


Bild M-R10: REM-Aufnahme der Probe 81, Bildbreite 2,89 mm



Bild M-R11: REM-Aufnahme der Probe 81, Bildbreite 925 µm

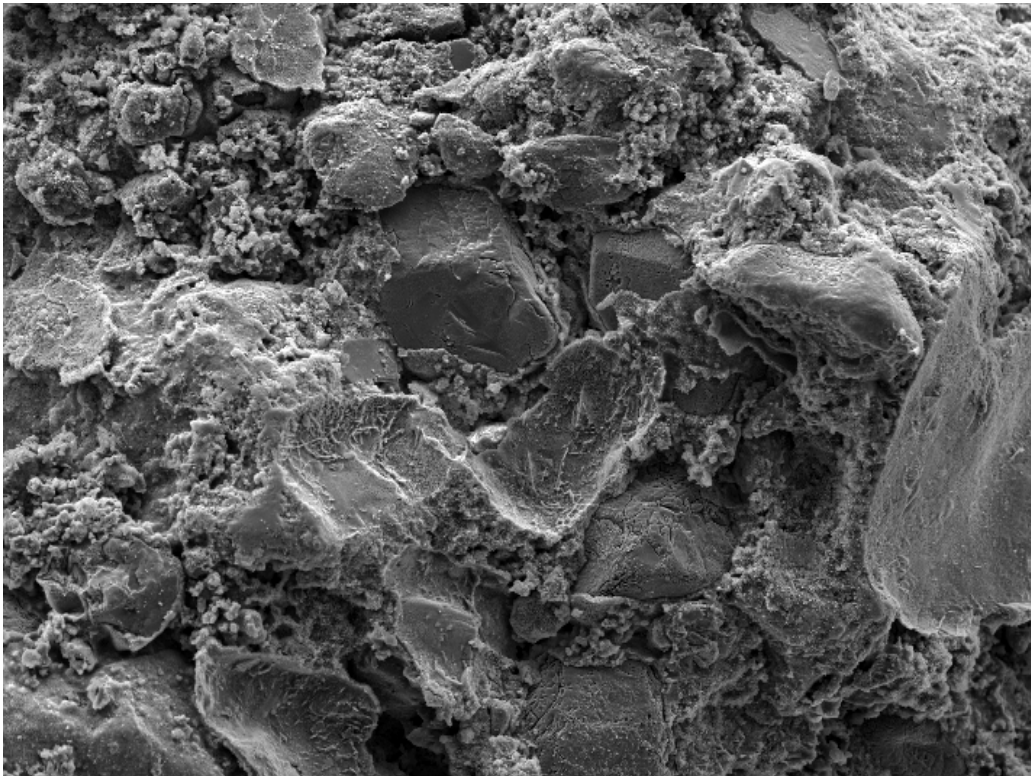


Bild M-R12: REM-Aufnahme der Probe 81, Bildbreite 925 µm

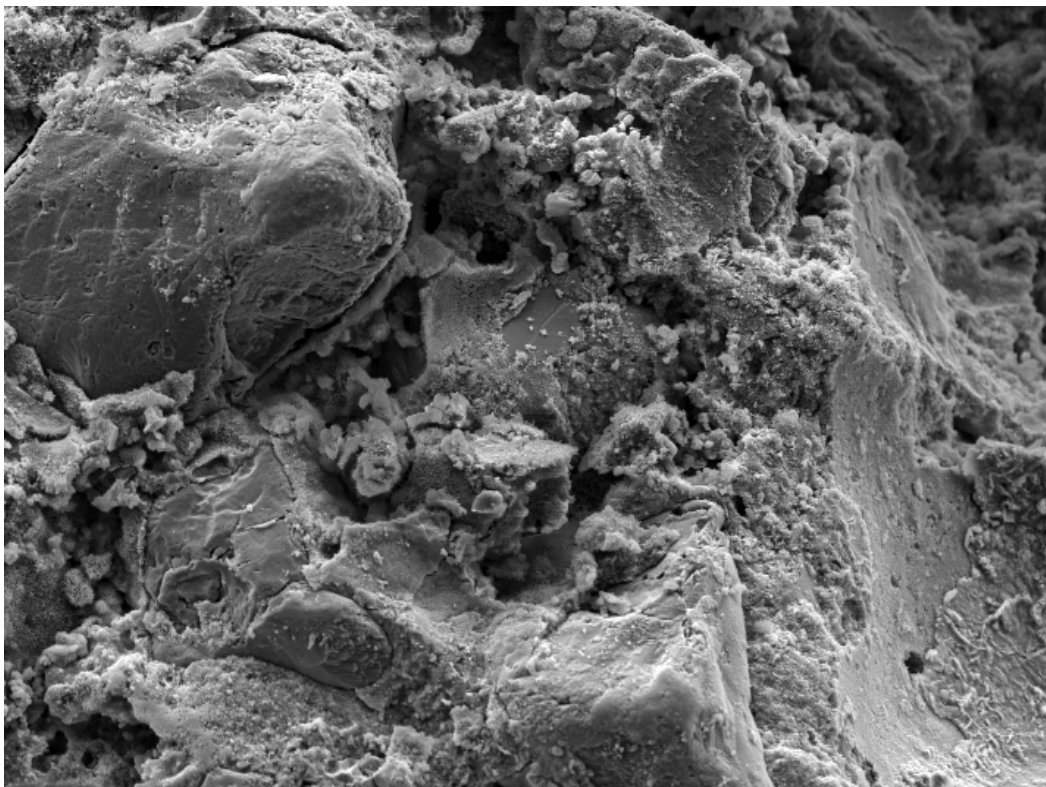


Bild M-R13: REM-Aufnahme der Probe 81, Bildbreite 462 µm

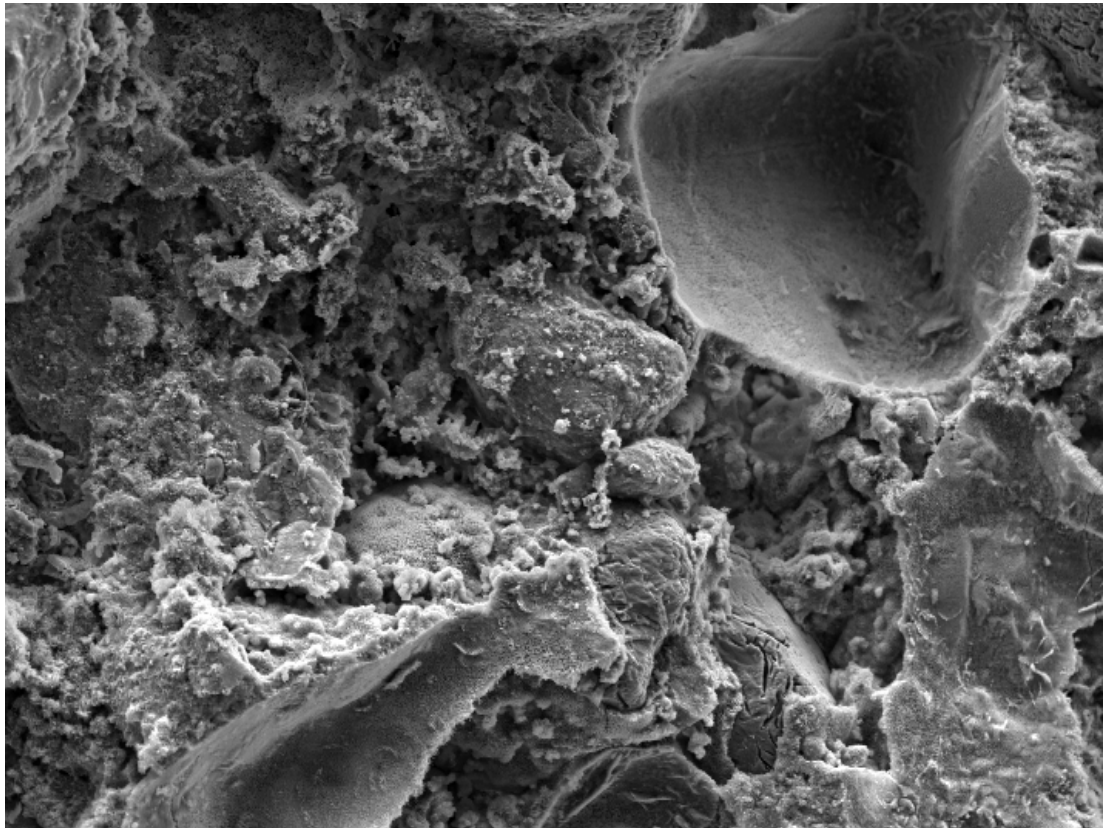


Bild M-R14: REM-Aufnahme der Probe 81, Bildbreite 462 μm

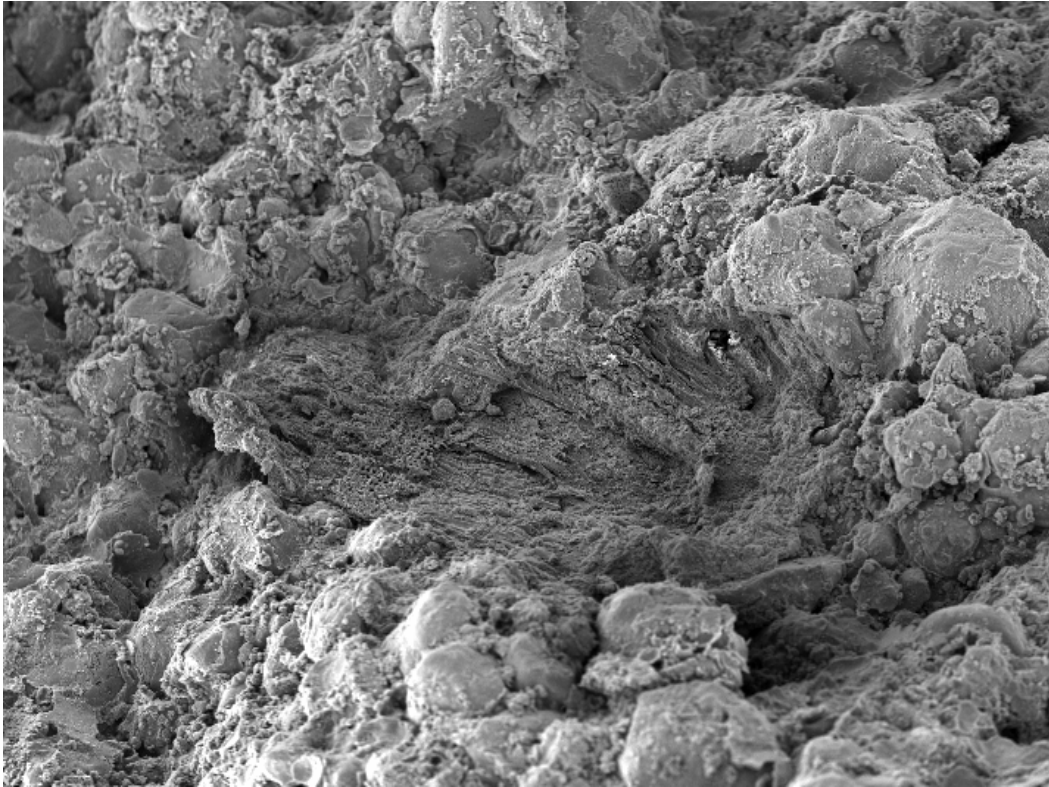


Bild M-R15: REM-Aufnahme der Probe 82, Bildbreite 2,89 mm

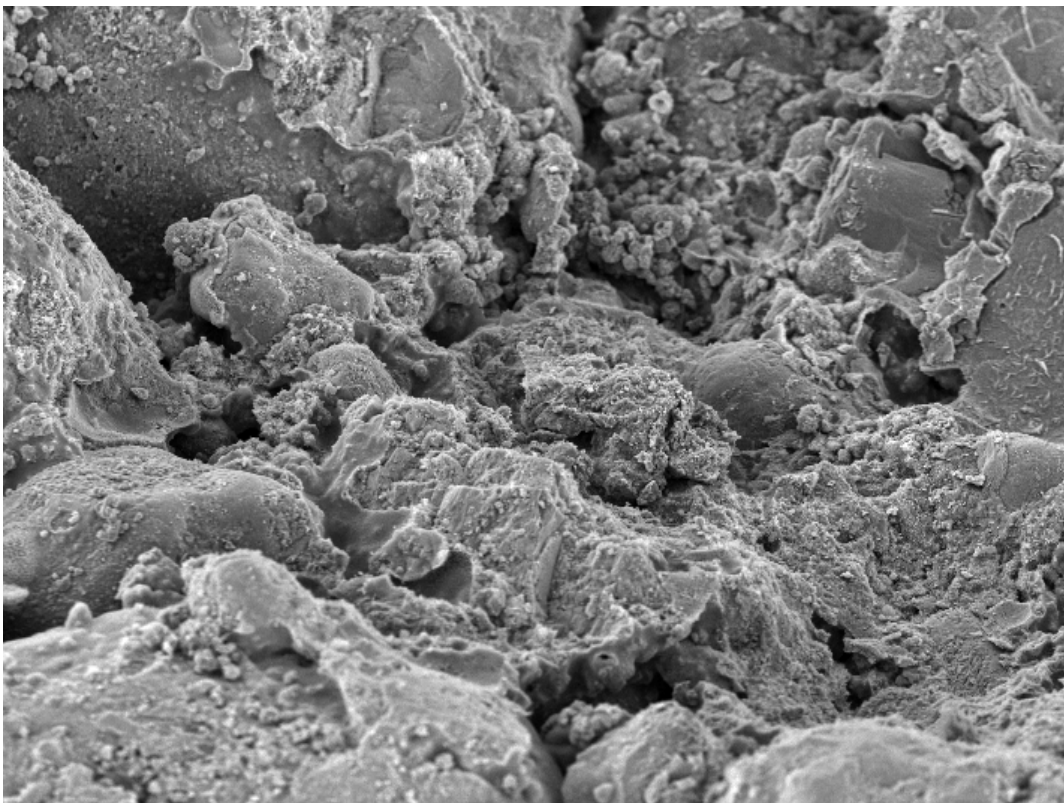


Bild M-R16: REM-Aufnahme der Probe 82, Bildbreite 925 µm

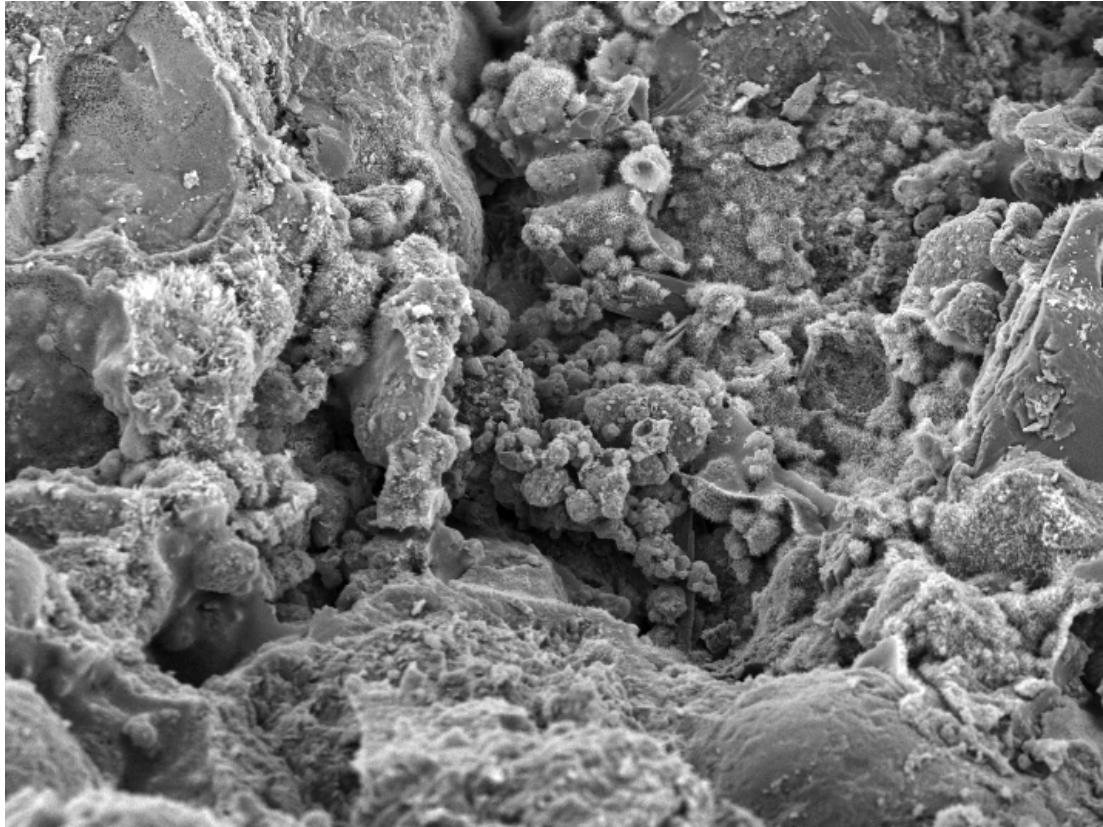


Bild M-R17: REM-Aufnahme der Probe 82, Bildbreite 462 μm

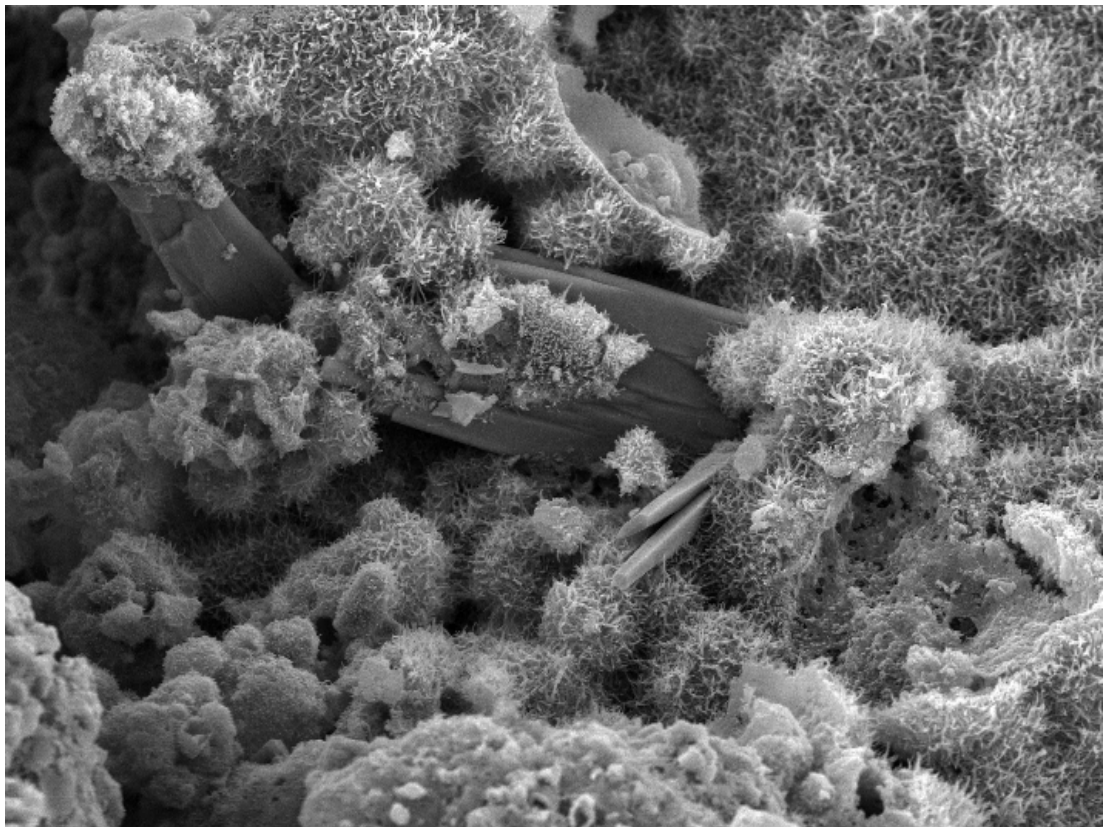


Bild M-R18: REM-Aufnahme der Probe 82, Bildbreite 116 μm

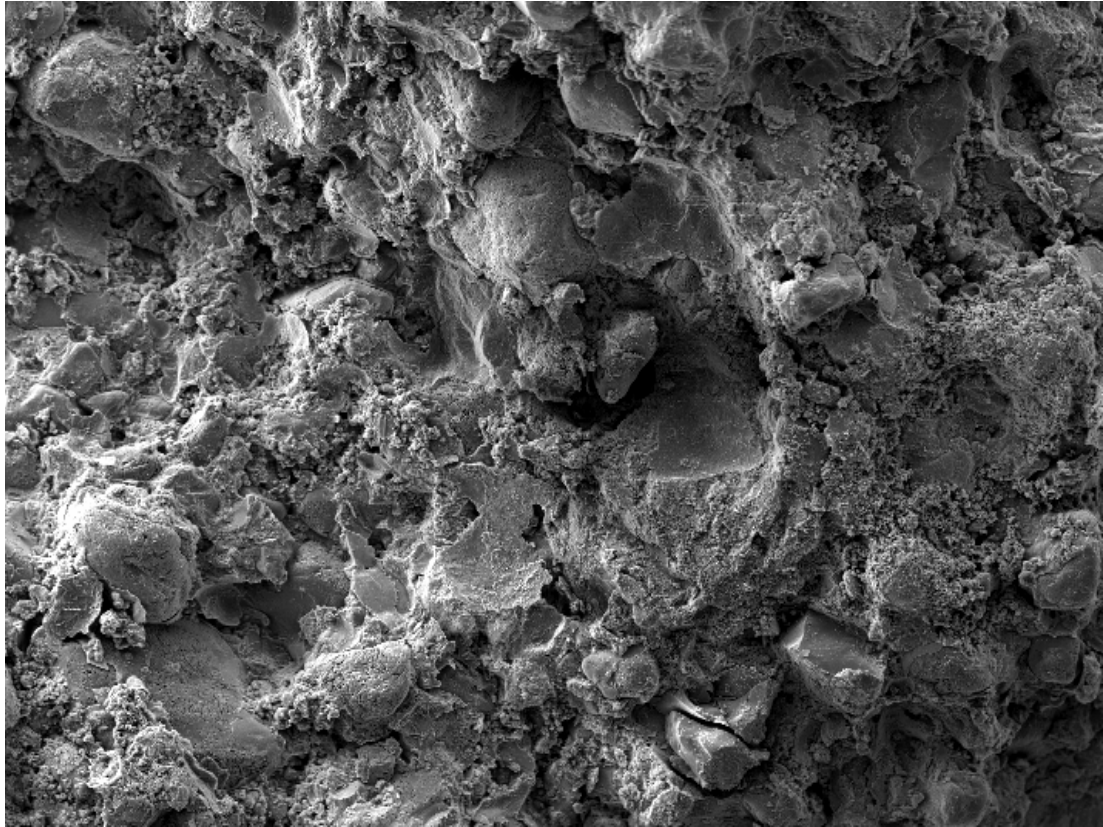


Bild M-R19: REM-Aufnahme der Probe 83, Bildbreite 2,89 mm

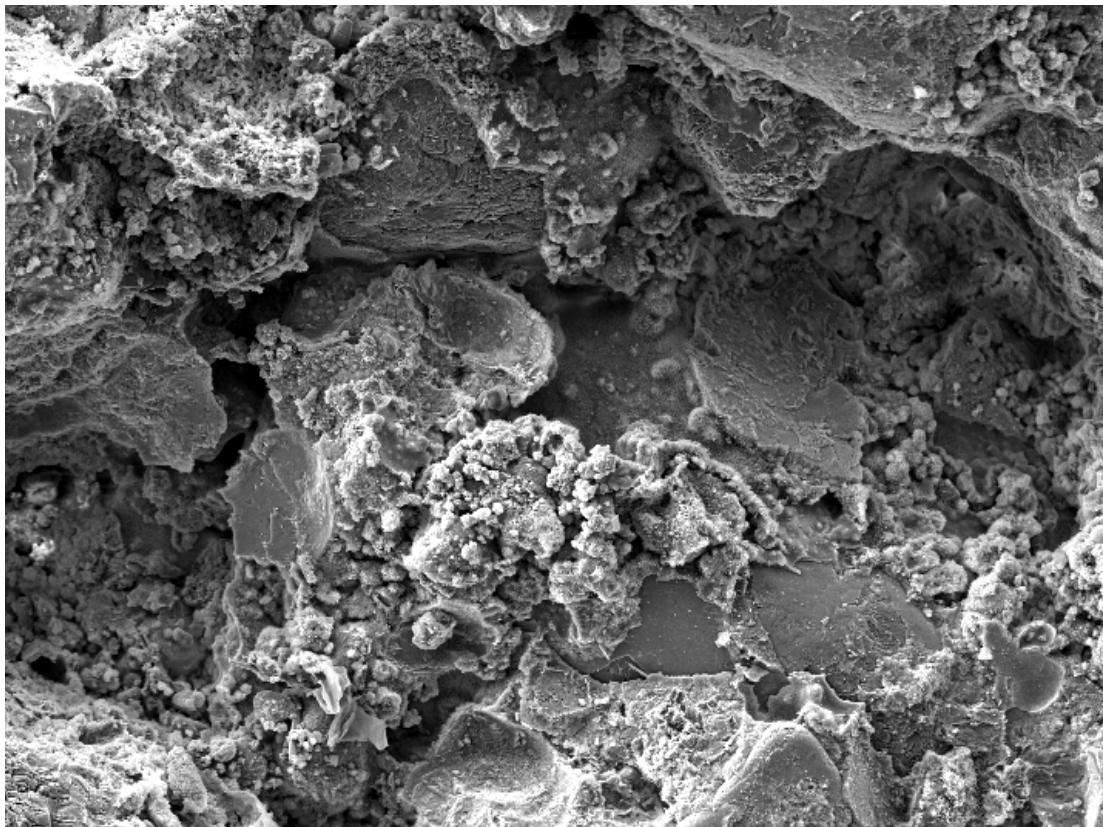


Bild M-R20: REM-Aufnahme der Probe 83, Bildbreite 925 µm

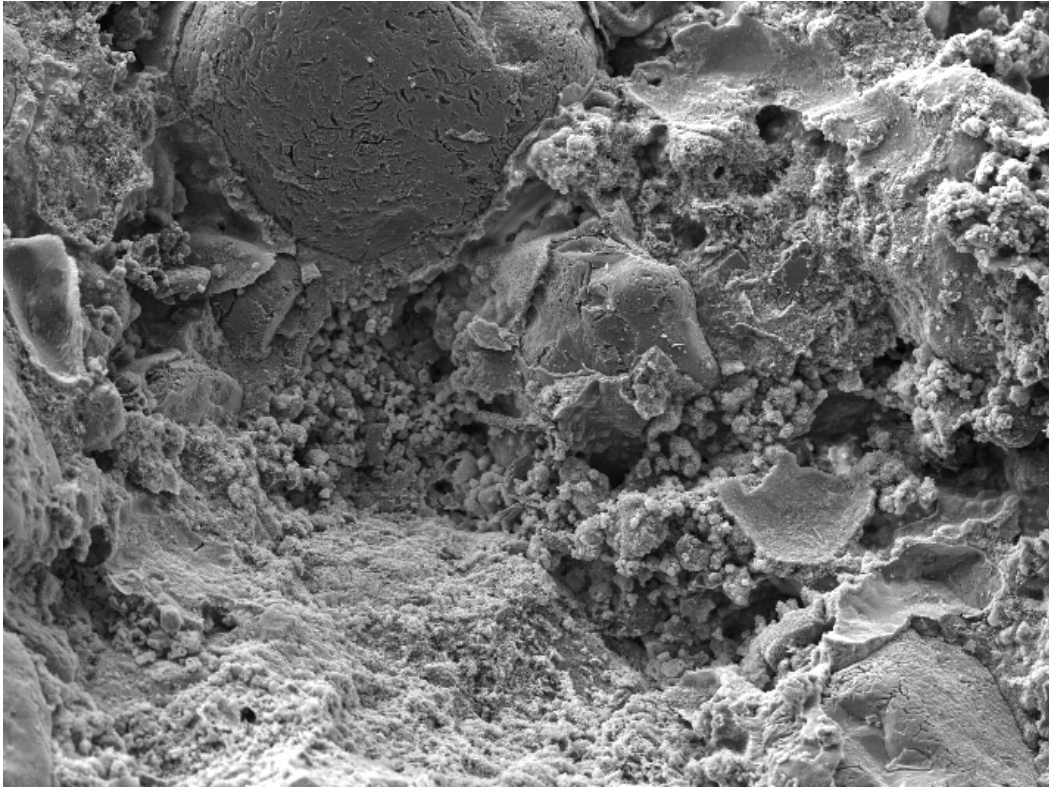


Bild M-R21: REM-Aufnahme der Probe 83, Bildbreite 925 µm

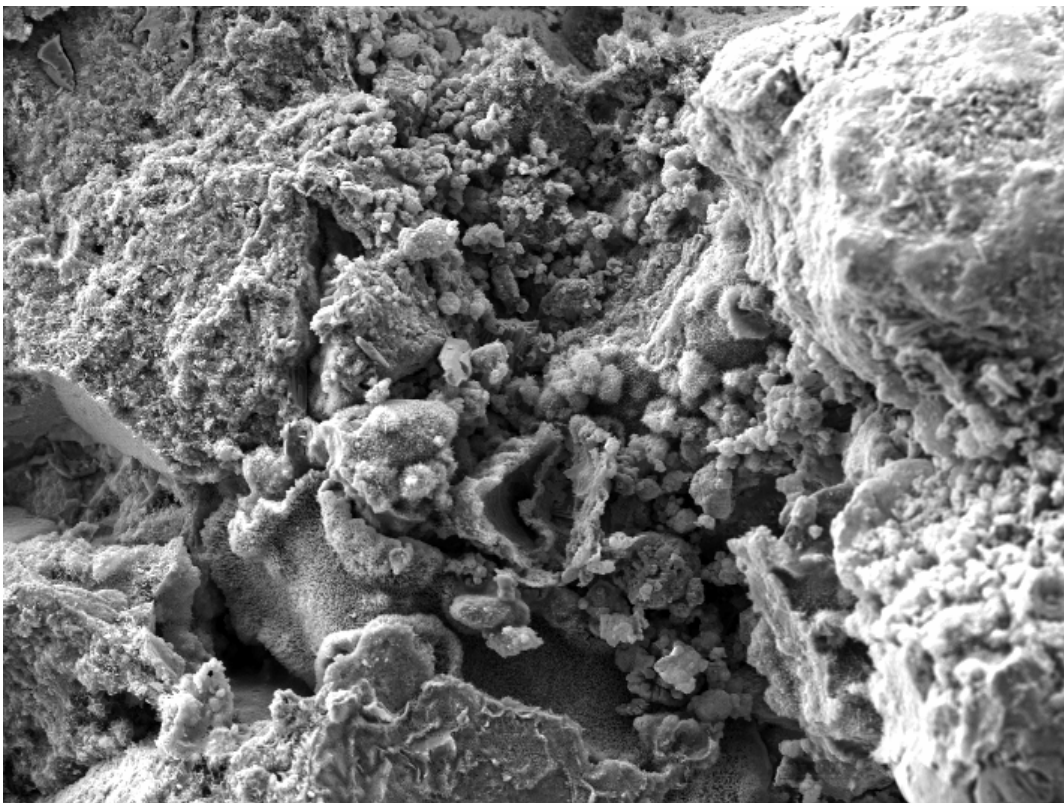


Bild M-R22: REM-Aufnahme der Probe 83, Bildbreite 462 µm



Bild N1: Kalksandstein-Ausgangsmaterial, Brockmann Recycling GmbH, Nützen,
Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N2: Ziegel-Ausgangsmaterial, Brockmann Recycling GmbH, Nützen,
Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N3: Beton-Ausgangsmaterial, Brockmann Recycling GmbH, Nützen,
Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N4: Beschickung des Backenbrechers, Brockmann Recycling GmbH, Nützen, Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N5: Befüllung der Mulde mit Kalksandsteinbruch, Brockmann Recycling GmbH, Nützen, Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N6: Kalksandstein-Bruchmaterial 0/5 mm, Brockmann Recycling GmbH, Nützen,
Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N7: Ziegel-Bruchmaterial 0/5 mm, Brockmann Recycling GmbH, Nützen,
Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N8: Beton-Bruchmaterial 0/5 mm, Brockmann Recycling GmbH, Nützen,
Foto: TerraTextura GmbH, Soest



Bild N9: Vermischung der 3 Mauerwerk-Recycling-Splitte, Brockmann Recycling GmbH, Nützen, Foto: TerraTextura GmbH, Soest

ANHANG B:

Liste der Forschungsberichte der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV

Untersuchung über den Einfluss von zwei verschiedenen Nachmischern auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. R. Hochstetter	1	Sept. 1967
Der Einfluss der Oberpressung auf die wichtigsten Eigenschaften industriell gefertigter Kalksandsteine Dr. H.-U. Oppermann	2	Sept. 1967
Untersuchung über die Abschirmwirkung von Kalksandprodukten, Ziegeln und Betonsteinen gegen Gammastrahlung und Neutronenstrahlung (I) Dr. R. Hochstetter	3	Sept. 1967
Untersuchungen über Ausblühungen und Verfärbungen von Kalksandsteinen Dr. R. Hochstetter	4	Sept. 1967
Eine Untersuchung über den Einfluss des Körnungsaufbaus von Sanden auf die Schwindung von Kalksandsteinen J. M. Coldrey	5	Nov. 1967
Eine Untersuchung über die Entstehung von Kalkschleiern auf Kalksandsteinen während der Herstellung J. M. Coldrey	6	Nov. 1967
Der Einfluss von Huminstoffen auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinen W. Ziechmann, W. Rochus, Dr. H.-U. Oppermann	7	Jan. 1968
Das Bindemittelskelett hydrothermal gebundener Kalk-Kieselsäure-Massen (I) Dr. R. Hochstetter	8	1968
Anleitung zur Messung der Rohlingsstandfestigkeit im Betrieb Dr. H.-U. Oppermann	9	Mai 1968
Untersuchung über die Abschirmwirkung von Kalksand-spezialprodukten gegen Gammastrahlung und Neutronenstrahlung (II) Dr. R. Hochstetter	10	Nov. 1968
Ein Beitrag zur Bestimmung und Beeinflussung der Haftfestigkeit von Kalksandsteinen und Mörtel P. Thormann	11	Nov. 1968
Der Einfluss karbonatischer Bindung auf die Eigenschaften hydrothermal erhärteter Kalk-Kieselsäure-Massen im System $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ Dr. W. Gormann	12	März 1969
Der Wasserdampfdiffusionswiderstand von Kalksandsteinen Dr. R. Hochstetter	13	März 1969

Kleiner Atlas der Sandeigenschaften der westdeutschen Kalksandsteinindustrie Dr. H.-U. Oppermann	14	Juni 1969
Die Beziehung zwischen einigen Gefügeeigenschaften von Kalksandsteinen und der Schwindung Dr. R. Hochstetter	15	Aug. 1969
Die laufende Qualitätskontrolle von Kalken mit Hilfe der Nasslöschkurve Dr. H.-U. Oppermann	16	Sept. 1969
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (I) Dr. R. Hochstetter	17	April 1970
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (II) Über den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kalksandsteinen Untersuchungen über physikalische Eigenschaften von Kalksandsteinen. Dr. R. Hochstetter	18	Mai 1970
Untersuchungen über die Frostwiderstandsfähigkeit von Kalksandsteinen H. Lehmann, E. Rauschenfels	19	Juni 1970
Fachwörter-ABC und Veröffentlichungen 1956 - 1970 der Kalksandsteinforschung Dr. H.-U. Oppermann	20	Aug. 1970
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (III) Dr. R. Hochstetter	21	Aug. 1970
Klebemörtel für Kalksandsteine Dr. H.-U. Oppermann	22	Sept. 1970
Außenanstriche auf Kalksandstein (I) Dr. H.-U. Oppermann	23	März 1971
Über die Bildung und Eigenschaften von Huminstoffen. Die analytische Charakterisierung von Sandvorkommen unter besonderer Berücksichtigung der Bestimmung postmortaler organischer Stoffe (Huminstoffe) W. Ziechmann, W. Rochus	24	März 1971
Die Wassergehaltsmessung von Sanden und Kalksandmischungen W. Lück	25	April 1972
Außenanstriche auf Kalksandstein (II) Dr. H.-U. Oppermann	26	April 1972
Löslichkeit von Quarz (I) Dr. R. Hochstetter	27	Mai 1972
Gezielte Produktion von hochwertigen Kalksandsteinen aus fraktionierten Rohstoffen Dr. H.-U. Oppermann	28	April 1973

Sandbevorratung und Sandhomogenisierung in der Kalksandsteinindustrie Dr. H.-U. Oppermann, H.-J. Weddig	29	Juni 1973
Das Austrocknungsverhalten von Gasbeton bei unterschiedlicher Lagerungsart Dr. H.-U. Oppermann, Dr. R. Hochstetter	30	Jan. 1974
Die Löslichkeit von Quarz (II) Dr. R. Hochstetter	31	Febr. 1974
Außenanstriche auf Kalksandstein (III) Dr. H.-U. Oppermann	32	März 1974
Die Löslichkeit von Quarz III Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. R. Hochstetter, Dr. W. Thomas	33	Nov. 1974
Beitrag zur Eigenschaftsuntersuchung von Kalksand-systemen, hergestellt bei hohen Temperaturen u. Drücken Dr. A. Hakim	34	Jan. 1975
Die heterogenen Eigenschaften großformatiger Kalksandblöcke Dr. F. Kendel	35	April 1975
Einfluss der Kornzusammensetzung des Sandes auf das Verformungsverhalten von Kalksandsteinen Dr. W. Thomas	36	Mai 1975
Der Einfluss von anorganischen Schadstoffen auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	37	Dez. 1975
Gefügeveränderungen von Kalksandsteinen durch Frost-Tau-Beanspruchungen Dr. A. Hakim	38	Dez. 1975
Gemeinschaftsforschung der Kalksandsteinindustrie 1966 - 1975 Dr.-Ing. W. Gormann	39	Febr. 1976
Zugfestigkeit von Kalksandsteinen Teil I: Betriebsgefertigte Steine Dr. W. Thomas	40	Juli 1976
Zugfestigkeit von Kalksandsteinen Teil II: Einfluss ausgewählter Herstellungsparameter, Untersuchungen an Prismen Dr. F. Kendel	41	Nov. 1976
Hochfestes KS-Mauerwerk Trag- und Verformungsverhalten Dr. W. Thomas	42	Nov. 1976
Der Einfluss verschiedener Kalke auf die Eigenschaften von Kalksandprodukten Dr. F. Kendel, Dr.-Ing. B. Oppermann, Dr.-Ing. U. Wittneben	43	Dez. 1976

Der Einfluss der Rauigkeit von Kalksandsteinen auf den Haftverbund Stein/Mörtel Dr. J. E. Quincke	44	April 1977
Modell für die Beziehungen zwischen Bindemittelaufbau und technischen Eigenschaften von KS-Produkten Dr.-Ing. W. Gormann	45	Dez. 1977
Dampfhärtung von Kalksandstein bei verlängerter Härtezeit und niedrigeren Temperaturen - Einfluss auf die Steineigenschaften Dr. F. Kendel	46	Febr. 1978
Der Einfluss des Brenngrades des Kalkes auf das Schwindverhalten von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	47	Juni 1978
Gutachtliche Stellungnahme zur Frage des Deponieverhaltens von Fabrikationsabfällen der Kalksandsteinindustrie	48	Okt. 1978
Zur Einführung von Formfaktoren bei der Druckfestigkeitsprüfung von Kalksandsteinen Prof. Dr. K. Kirtschig, Dipl.-Ing. D. Kasten, Dr. Ing. R. Cordes, Dr. J. E. Quincke	49	Juni 1979
Optimierung von Zugfestigkeit, Schwindung und Frostbeständigkeit von Kalksandsteinen bei Härtetemperaturen von 175 °C bis 250 °C Dr. F. Kendel	50	Jan. 1980
Das Dampfdiffusionsverhalten von Kalksandstein-Außenwandkonstruktionen Dipl.-Ing. M. Prepens, Dr.-Ing. R. Cordes, unter beratender Mitwirkung von Prof. W.-H. Pohl	51	Mai 1980
Gutachtliche Stellungnahme zur Abwassersituation in der Kalksandsteinindustrie	52	Sept. 1980
Einfluss von Nebenmineralen des Sandes auf die mechanischen Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	53	Sept. 1981
Stromverbrauch in der Kalksandsteinindustrie K. F. Ebersbach, A. Fischer, W. Steinberger	54	März 1982
Betriebstechnische Hinweise zum Einfluss von Änderungen der Rohstoffe und der Betriebsbedingungen auf die Steineigenschaften. Untersuchung zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Mauersteinen durch Saugen am Beispiel von Kalksand-Lochsteinen und Loch-Ziegeln. Herstellung von Kalksandsteinen der Rohdichteklasse 2,0 und größer. Untersuchung über die Dampfkondensation in Rohlingen während der Härtekesselfahrt. Dr. J. E. Quincke	55	März 1982
Wirtschaftlichkeit des Dampfenergiebedarfs bei der Herstellung von Kalksandsteinen K. F. Ebersbach	56	April 1982

Eignung von verzögerten Werk-Frischmörteln für Mauerwerk Dr.-Ing. R. Cordes, Dr.-Ing. D. Kasten, Dipl.-Ing. W. Krohn, Dr. J. E. Quincke	57	April 1983
Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Wassersituation in der Kalksandsteinindustrie aus technischer und rechtlicher Sicht	58	Mai 1983
Substitution üblicher Quarzsande bei der Kalksandsteinherstellung Dr.-Ing. U. Wittneben	59	Juli 1984
Thermische Spannungen in Wärmedämmverbundsystemen Dipl.-Ing. D. Nannen, u. Prof. Dr.-Ing. habil. K. Gertis	60	Aug. 1984
Zur Belastung, Beanspruchung und Arbeitsgestaltung beim Vermauern großformatiger Kalksandsteine Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau	61	Aug. 1984
Verblendschalen aus Kalksandsteinen - Beanspruchung, rissfreie Wandlänge, Hinweise zur Ausführung Dr.-Ing. D. Gasten, Dr.-Ing. P. Schubert	62	März 1985
Dampfkondensation und Rückverdampfung während des Kalksandstein-Härtungsprozesses im Autoklaven Dr.-Ing. U. Wittneben	63	März 1985
Anfall und Verbleib von technischem Abwasser der Kalksandsteinfertigung - Gutachtliche Stellungnahme zur Direkt- und Indirekteinleitung	64	Mai 1985
Verbesserung der Stein- und Rohlingseigenschaften durch geringe Mineralzusätze Dr.-Ing. U. Wittneben	65	Juni 1985
Produktionstechnische Maßnahmen zur Optimierung der Mörtelhaftung auf Kalksandsteinen Dr.-Ing. U. Wittneben	66	März 1986
Zur Verbesserung des Schwindverhaltens von Kalksandsteinen durch Ausfallkörnungen Dr.-Ing. U. Wittneben	67	Sept. 1986
Möglichkeiten zur Reduzierung des Kalk- und Energiebedarfes bei der Kalksandsteinherstellung durch Zusatz von Flugasche Dr.-Ing. U. Wittneben	68	Febr. 1988
Einfluss der Vermauerungsart und der Knotenpunkt-ausbildung auf die Längsschalldämmung von Kalksandsteinwänden Dr.-Ing. E. Veres	69	Juni 1988
Untersuchungen zu Raumbeständigkeitsprüfungen als Beurteilungskriterium von Kalken für die Kalksandsteinherstellung Dr.-Ing. U. Wittneben	70	Okt. 1988

Verwertung technischer Nebenprodukte bei der Herstellung von Kalksandsteinen - Sande aus Kraftwerken und Gießereien - Dr.-Ing. U. Wittneben	71	April 1989
Feuchtigkeitsabhängige Sperrwirkung von Kunstharzputzen H. Böhm, H. Künzel	72	Sept. 1989
Frost- und Witterungsbeständigkeit von Anstrichen und Imprägnierungen auf Kalksandstein-Sichtmauerwerk Prof. Dr.-Ing. M. Prepens	73	Jan. 1990
Kostenoptimierung der Kalksandstein-Technologie unter Berücksichtigung notwendiger Produkteigenschaften - Flugaschen Prof. Dr.-Ing. U. Ludwig, Dipl.-Ing. H. Nelskamp, Dr.-Ing. P. Schubert	74	März 1991
Verbesserung der Frostwiderstandsfähigkeit, der Tausalzbeständigkeit und der Duktilität von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile Prof. Dr.-Ing. M. Prepens	75	Dez. 1991
Nutzung der KS-Technologie für die Verarbeitung von Abfallstoffen Dipl.-Ing. H. Nelskamp	76	März 1992
Frostbeurteilung von Kalksandsteinen Grundlagen des DIN 106-Prüfverfahrens Dipl.-Ing. W. Eden, Dr.-Ing. D. Kasten, Drs. P.D. Rademaker	77	Mai 1993
Ermittlung der Druckfestigkeit von Kalksandstein-Mauerwerk unter Berücksichtigung der Beeinflussung der Mörtel­eigenschaften in der Fuge durch den Wasserhaushalt des Verbundsystems Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. G. Meyer	78	Sept. 1993
Maßnahmen und Zusatzmittel zur gezielten Verbesserung verschiedener Eigenschaften von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile Dipl.-Ing. W. Eden	79	Juni 1994
Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess, KS-Recycling Teil I Dipl.-Ing. W. Eden	80	Aug. 1994
Biegezug- und Zugtragfähigkeit von unbewehrtem und bewehrtem Kalksandsteinmauerwerk Dr.-Ing. P. Schubert, Dipl.-Ing. U. Meyer	81	Aug. 1995
Ökobilanz für den Baustoff Kalksandstein und Kalksandstein-Wandkonstruktionen Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ök. T. Kaczmarek, Dipl.-Ing. G. Meyer, Dr. rer. pol. H. Zapf, Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Waltermann, AGIMUS Umweltberatungsgesellschaft, Braunschweig	82	Nov. 1995

Untersuchung der Materialeigenschaften von Kalksandsteinen in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brand-schutztechnische Nachweise Dipl.-Ing. Ch. Hahn	83	Dez. 1995
Mineralische Zusammensetzung von Sanden für die Kalksandstein-Herstellung Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. E. Eberhard	84	Jan. 1996
Einsatz von Fasern bei der Herstellung von Kalksandsteinen Dipl.-Ing. B. Mankowski, Dr. H. Mörtel	85	März 1996
Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinmauerwerk mit anhaftenden Resten von Dämmstoffen sowie weiterer Baureststoffe, KS-Recycling Teil II Dipl.-Ing. W. Eden	86	Juni 1997
Einfluss der Fugendicke und der Verbandsregeln auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinmauerwerk, Mittelbettmörtel Dipl.-Ing. S. Brinkmann, Dipl.-Ing. W. Eden,	87	Juli 1997
Reduzierung der Produktionskosten und des Primärenergieverbrauchs durch Optimierung der Rezeptur der KS-Rohmischung und der Rohlingsstandfestigkeit Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. B. Mankowski, Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Waltermann	88	Nov. 1998
Einfluss von schweren Zuschlägen auf die Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen, sehr hohe Rohdichten Dipl.-Ing. W. Eden, Chem.-Ing. E. Hörster	89	Juli 1999
Einfluss der Unterbrechung des hydrothermalen Härteprozesses auf die Qualitätseigenschaften, optimale Härtung von Kalksandsteinen Dipl.-Ing. W. Eden	90	Juli 2000
Hinweise zur Kosten- und Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden, Mitglieder des Technischen Ausschusses	91	Mai 2001
Herstellparameter von Kalksand-Spezialbaustoffen für die Abschwächung von Wärmebrücken im Mauerwerksbau, KS-ISO-Kimmstein Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	92	Feb. 2002
Ermittlung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge von Kalksand-Plansteinmauerwerk - insbesondere Kellermauerwerk Dipl.-Ing. S. Brinkmann, Dipl.-Ing. W. Eden Dipl.-Ing. T. Hanold, Dipl.-Ing. G. Meyer	93	Mai 2002
Erhöhung der Schubtragfähigkeit von KS-Wänden unter Erdbebenlasten durch schlaff bewehrte Betonstützen in Formsteinen bzw. durch Vorspannung der Wand Prof. Dr. A. Ötes, Dipl.-Ing. S. Löring Dipl.-Ing. B. Elsche	94	Mai 2002

Ermittlung und Verifizierung schalltechnischer Grundlagendaten für Wandkonstruktionen aus Kalksandstein-Mauerwerk auf der Grundlage neuer europäischer Normen des baulichen Schallschutzes Prof. Dr.-Ing. H. M. Fischer, Dipl.-Ing. S. Blessing M.Sc. Dipl.-Ing. M. Schneider, Dipl.-Ing. M. Späh	95	Mai 2002
Ermittlung der Einflussparameter des Verformungsverhaltens von Kalksandsteinen, Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. G. Meyer, Dr. rer nat H. Mörtel, Dr.-Ing P. Schubert	96	Mai 2002
Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie, Recycling Teil III Dipl.-Ing. W. Eden; Dipl.-Ing. H. Kurkowski Dipl.-Ing. L. Friedl; Prof. Dr.-Ing. P. Schießl Prof. Dr.-Ing. K. Krass, Dr.-Ing. K. Mesters	97	August 2003
Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen, Kondensatverwertung bei der KS-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden; Dipl.-Ing. C. Gundlach, Dipl.-Geol. S. Hogewoning, Dr. rer nat O. Schmidt, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	98	Dez. 2003
Optimierung der Verdichtung des Kalksandstein-Gefüges unter Berücksichtigung der Rohstoffeigenschaften und des Herstellprozesses des KS-Scherbens Dipl.-Ing. W. Eden, Dr. rer nat Bernhard Middendorf Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil M. Schmidt, Dipl.-Ing. Viola Tesch	99	Nov. 2004
Reduzierung der CO ₂ -Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch Verwendung von Tonmineralen als Optimierungs-Zuschlag Dipl.-Ing. W. Eden, ir. M. H. M. Coppens, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	100	März 2005
Eignung von Kalksandstein-Material für witterungsbeanspruchte Gebäude-Außenfassaden – „Kalksand-Werksteine“ Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	101	Januar 2006
Entwicklung von zerstörungsfreien Ersatzprüfverfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit großformatiger Kalksandstein-Produkte Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. E. Dückmann Dipl.-Ing. H. Naumann, Prof.-Dr.-Ing W.-R. Metje	103	Juni 2006
Maßnahmen zur Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. A. van Briel, Dipl.-Ing. W. Eden Dr. rer nat H. Müller, Dipl.-Ing. S. Wolfram	104	Juni 2007
Entwicklung eines Schnell-Prüfverfahrens auf der Basis der Röntgen-Diffraktometrie zur Eignungsbeurteilung von Zuschlägen für die Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. rer nat. J.-Ch. Buhl	105	Juni 2007
Optimierung des Kalksandstein-Gefüges - Teil 2 Entwicklung von Grundlagen für ein Expertensystem zur Rezepturauslegung von Kalk-Sand-Rohmassen Maximale Packungsdichte Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. C. Geisenhanslücke, Dipl.-Ing. A. Glaubitt, Prof. Dr. rer nat B. Middendorf, Prof. Dr.-Ing. habil M. Schmidt,	106	März 2008

Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruch-
material und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie 107
Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. rer nat.B. Middendorf

März
2008