

**Reduzierung des Heizenergiebedarfs von
Wohngebäuden und der Emissionen treibhausrelevanter
Gase durch Einsatz von Kalksand-Spezialbaustoffen
zur Vermeidung von Wärmebrücken im Mauerwerksbau**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az.: 14652 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt eV

von

Dipl.-Ing. Wolfgang Eden

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV

Prof. Dr. Josef-Christian Buhl

Institut für Mineralogie der Universität Hannover

Fachbereich Geowissenschaften und Geographie

Hannover im November 2001

Dieser Forschungsbericht kann bezogen werden bei der:

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV

Entenfangweg 15

30419 Hannover

Tel.: 05 11 / 27 95 4-60

Fax.: 05 11 / 27 95 4-54

E-Mail: Wolfgang.Eden@Kalksandstein.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	14652	Referat	25	Fördersumme	143.318,00 DM
Antragstitel	Reduzierung des Heizenergiebedarfs von Wohngebäuden und der Emissionen treibhausrelevanter Gase durch Einsatz von Kalksand-Spezialbaustoffen zur Vermeidung von Wärmebrücken im Mauerwerksbau				
Stichworte	Ökobau, Emission, Energie				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
2 Jahre	01.11.1999	31.10.2001	1		
Zwischenberichte	31.12.1999	31.12.2000			
Bewilligungsempfänger	Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V.			Tel	0511/27954-60
	Postfach 21 01 60			Fax	0511/27954-54
	30401 Hannover			Projektleitung	
				Dipl.-Ing. Wolfgang Eden	
Kooperationspartner	1) Kalksandstein-Werk Wemding GmbH, 86648 Wemding				
	2) Institut für Mineralogie der Universität Hannover, 30167 Hannover				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der jährliche Energieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland für den Sektor Raumwärme beträgt immer noch ca. 30% vom jährlichen Gesamtenergieverbrauch. Für die Kalksandsteinindustrie besteht die Möglichkeit, einen Beitrag zur Energieeinsparung durch Vermeidung von erhöhten Wärmeströmen über Wärmebrücken zu leisten. Nicht immer sind rein konstruktive Detaillösungen ausreichend, um die Auswirkung von Wärmebrücken zu minimieren. Bei allen Detailpunkten ist der Einsatz von Mauersteinen mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit und gleichzeitig einer hohen Steindruckfestigkeit sinnvoll. Mit dem Forschungsvorhaben wurde zum einen der Einfluss umweltfreundlicher, verfügbarer und technisch einwandfreier Leichtzuschläge für die Herstellung von Kalksand-Leichtsteinen systematisch und detailliert untersucht. Hauptziel dieses Projektes ist es, Mauersteine mit einer hohen Normdruckfestigkeit bei gleichzeitig niedriger Wärmeleitfähigkeit sicher herzustellen. Das Forschungsziel wurde erreicht.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Durchführung des Forschungsvorhabens umfasst die Herstellung und Untersuchung von Kalksandstein-Laborprüfkörpern mit geringer Wärmeleitfähigkeit und hoher Festigkeit unter definierten Bedingungen. Als Leichtzuschlagstoffe wurden Blähton und Bimssand eingesetzt. Unter Ansatz verschiedener Rezepturen und Herstellbedingungen wurden Kalksandstein-Prüfkörper im Labor hergestellt und hinsichtlich folgender genormter und anderer wichtiger Eigenschaftswerte unter baustofftechnischen Gesichtspunkten untersucht:

- Steindruckfestigkeit
- Steinrohichte
- Steinbiegezugfestigkeit
- Frostwiderstandsfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Sorptionsverhalten, innere Oberfläche, Bezugsfeuchtegehalt
- Porenradienverteilung mittels Druckporosimetrie
- Wasseraufnahme
- Mineralogische Analyse durch das Institut für Mineralogie der Universität Hannover.

Um den Optimalbereich der gewünschten Eigenschaften zu erzielen, wurden die oben genannten Herstellparameter nacheinander stufenweise variiert. Es wurden zahlreiche Serien KS-Leichtsteine unterschiedlicher Herstellparameter hergestellt und im Labor sowie anschließend unter Praxisbedingungen im KS-Werk untersucht. Das Arbeitsprogramm hatte folgenden Ablauf:

1. Beschaffung und labortechnische Ermittlung der Rohstoffeigenschaften
2. Herstellung von Laborprüfkörpern
3. Untersuchung der Laborprüfkörper unter baustofftechnischen Gesichtspunkten
4. Auswertung der Untersuchungsergebnisse
5. Ermittlung des Optimums der günstigen Eigenschaftskombinationen
6. Herstellung von Kalksand-Leichtsteinen in einem KS-Werk

Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse zeigen eindeutig, dass die Herstellung von Kalksand-Leichtsteinen für KS-Hintermauerwerk bei Verwendung der ausgewählten Leichtzuschläge und unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie möglich ist. Ein wesentliches Ergebnis besteht darin, dass die Kalksand-Leichtsteine gleichzeitig die erwünschte, geringe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Steindruckfestigkeit aufweisen. Die Anforderungen der DIN 106-1 sind eingehalten. Die Anwendung der im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Grundlagenerkenntnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken ist in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung werkspezifischer Gegebenheiten durch eingehende Voruntersuchungen im Kalksandsteinwerk und im Labor zu überprüfen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Forschungsergebnisse werden den Bereichen Kalksandsteintechnologie und Kalktechnologie als Bericht zur Verfügung gestellt. Sie werden in KS-Fachbroschüren veröffentlicht und auf Seminaren und Tagungen, insbesondere der Kalk- und Kalksandsteinindustrie, sowie im Rahmen von direkten Beratungsgesprächen mit den Mitgliedern der Forschungsvereinigungen vorgestellt. Die Ergebnisse können direkt für die Optimierung des Kalksandstein-Herstellprozesses herangezogen werden. Ein besonderer Umsetzungsschwerpunkt sind die veranstalteten „Meisterseminare zur Produktionstechnik“ für die Betriebsleiter und Meister der Kalksandsteinwerke, die im zeitlichen Abstand von drei Jahren gemeinsam von den Verbänden der Kalk- und der Kalksandstein-Industrie ausgerichtet werden. Des weiteren fließen die Ergebnisse in die akademische Lehre ein.

Fazit

Die Hauptergebnisse sind im Folgenden zusammenfassend aufgeführt:

- Die Herstellung solider Kalksand-Leichtsteine mit einer hohen Steindruckfestigkeit und einer geringen Wärmeleitfähigkeit ist unter Verwendung verschiedener Leichtzuschläge (z. B.: Bims, Blähton) und unter Beachtung spezifischer Herstellparameter (Kalkdosis, Verdichtungsdruck, Pressfeuchte, Härteparameter,...) technisch möglich.
- Unter Verwendung von Bims werden Steindruckfestigkeiten von bis zu rd. 12 N/mm² erreicht. Bei Einsatz von Blähtonsanden werden in mehreren Fällen Steindruckfestigkeiten von bis zu rd. 30 N/mm² erzielt.
- Zwischen den einzelnen Blähtonsorten sind bezüglich der angestrebten Forschungsziele keine gravierenden Unterschiede erkennbar. Bei den Blähtonsanden haben sich bezüglich der Steindruckfestigkeit als Haupteinflussgrößen die CaO-Dosis und die Korngrößenverteilung herausgestellt.
- Bezüglich der Steindruckfestigkeit liegt die optimale CaO-Dosis bei 12 M.-%.
- Bei der feinsten Kornfraktion (0/0,5 mm) werden die höchsten Steindruckfestigkeiten von bis über 30 N/mm² festgestellt. Die bisher vorliegenden Ergebnisse weisen auf eine Zunahme der Steindruckfestigkeit bei hohem Pressdruck und abnehmender Korngröße hin.
- In Abhängigkeit von der Steinrohddichte (1,0 bis 1,2 kg/m³) werden Messwerte der Wärmeleitfähigkeit in einer Bandbreite von rd. $\lambda_{10, tr} = 0,22$ bis 0,32 W/(mK) festgestellt.
- Insgesamt ist für die Blähtonsande festzuhalten, dass die Beziehungen zwischen der Korngrößenverteilung, dem Pressdruck und der Steindruckfestigkeit noch tiefergehend untersucht werden sollten.
- Die Laborerkenntnisse sind durch die Werksversuche eindeutig bestätigt worden.
- Mit weitergehenden Projekten sollten weitere mögliche Leichtzuschläge untersucht werden.

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG	1
2	EINLEITUNG	2
3	VERSUCHSPROGRAMM	5
3.1	Allgemeines	5
3.2	Festlegung der Herstellparameter	5
3.3	Rohstoffe für die Herstellung der Prüfkörper	6
3.4	Herstellung der Prüfkörper	7
3.5	Untersuchungen an den Prüfkörpern	8
3.5.1	Steindruckfestigkeit	8
3.5.2	Steinrohddichte	8
3.5.3	Steinbiegezugfestigkeit	8
3.5.4	Frostwiderstandsfähigkeit	8
3.5.5	Wärmeleitfähigkeit	9
3.5.6	Bezugsfeuchtegehalt	9
3.5.7	Wasseraufnahme	9
3.5.8	Porenradienverteilung	9
3.5.9	Chemische und mineralogische Analyse	10
3.5.10	Werksversuche	11
4.	AUSWERTUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION	12
4.1	Untersuchung der Rohstoffe	12
4.1.1	Korngrößenverteilung mittels Trockensiebung	12
4.1.2	Schüttdichte	12
4.1.3	Spezifische Oberfläche nach FISCHER	13
4.1.4	Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen	13
4.1.5	Gehalt an Huminstoffen nach POST	13
4.1.6	Lichtmikroskopie	14
4.1.7	Raster-Elektronen-Mikroskopie	14
4.1.8	EDX-Analyse	14
4.1.9	Phasenanalyse mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie	15
4.1.10	Chemische Zusammensetzung	15

4.2	Untersuchung der Laborprüfkörper	16
4.2.1	Steindruckfestigkeit	16
4.2.2	Steinrohddichte	21
4.2.3	Steinbiegezugfestigkeit	22
4.2.4	Frostwiderstandsfähigkeit	23
4.2.5	Wärmeleitfähigkeit	23
4.2.6	Bezugsfeuchtegehalt	24
4.2.7	Wasseraufnahme	25
4.2.8	Porenradienverteilung	25
4.2.9	Chemische und mineralogische Eigenschaften	26
4.2.10	Eluatanalyse gemäß DEV-S4-Verfahren	28
4.3	Werksversuche	29
5	FAZIT	30
6	LITERATUR	31
	ANHANG A: Tabellen, Diagramme, Bilder	A1

Verzeichnis von Tabellen und Bildern

- Tabelle 1: Chemische und mineralogische Kennwerte von Blättonen und Blähschiefer, nach Literaturangaben zusammengestellt
- Tabelle 2: Ausgewählte Serien für die mineralogische Untersuchung
- Tabelle 3: Ausgewählte Serien für die Werksversuche
- Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Blätton-Materials
- Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Bims-Materials
- Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Lava-Materials
- Tabelle 7: Einfluss der Pressfeuchte auf die Steindruckfestigkeit / Blättonsand
- Tabelle 8: Einfluss der Pressfeuchte auf die Steindruckfestigkeit / Bimssand
- Tabelle 9: Einfluss der Härtedauer auf die Steindruckfestigkeit
- Tabelle 10: Einfluss der Härtetemperatur auf die Steindruckfestigkeit
- Tabelle 11: Ergebnisse der Eluatanalysen
- Tabelle 12: Ergebnisse der Sandanalyse 1
- Tabelle 13: Ergebnisse der Sandanalysen 2
- Tabelle 14: Ergebnisse der Sandanalysen 3
- Tabelle 15: KS-Prüfkörper aus Bimssand 0/5 mm
- Tabelle 16: KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/0,5 mm
- Tabelle 17: KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1
- Tabelle 18: KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 2
- Tabelle 19: KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/2 mm
- Tabelle 20: KS-Prüfkörper aus Mischungen der Leichtzuschläge
- Tabelle 21: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse der Werksversuche

- Bild 1: Korngrößenverteilung des Bimssandes
- Bild 2: Korngrößenverteilung der Blättonsand 1
- Bild 3: Korngrößenverteilung der Blättonsand 2
- Bild 4: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Bimssand 0/5 mm
- Bild 5: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Pressfeuchte, KS-Prüfkörper aus Bimssand 0/5 mm
- Bild 6: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/0,5 mm
- Bild 7: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1
- Bild 8: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis und der Dauer der Haltephase, KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1
- Bild 9: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 2
- Bild 10: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis KS-Prüfkörper aus Blättonsand, Fraktion 0/2 mm
- Bild 11: Zusammenhang zwischen der Steindruckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit, KS-Prüfkörper aus Blättonsand
- Bild 12: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte
- Bild 13: Porenanteil in Abhängigkeit vom Porenradius, Serie 18-1,2 KS-Prüfkörper aus Bimssand, Fraktion 0/5 mm

- Bild 14: Porenanteil in Abhängigkeit vom Porenradius, Serie 50-1,0
KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1
- Bild 15: Spektrum der DTA, Serie 18-1,2, Bimssand Fraktion 0/5 mm
- Bild 16: Spektrum der DTA, Serie 50-1,2, Blähtonsand Fraktion 0/1 mm, Probe 1
- Bild 17: Bimssand, Fraktion 0/5 mm, REM, 80-fache Vergrößerung
- Bild 18: Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, REM, 500-fache Vergrößerung
- Bild 19: Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, REM, 300-fache Vergrößerung
- Bild 20: Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm, REM, 50-fache Vergrößerung
- Bild 21: Bimssand, Fraktion 0/5 mm, EDX-Analyse
- Bild 22: Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, EDX-Analyse
- Bild 23: Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, EDX-Analyse
- Bild 24: Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm, EDX-Analyse
- Bild 25: Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm,
Spektrum aus der Röntgenpulverdiffraktometrie
- Bild 26: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Bimssand,
Fraktion 0/5 mm, Serie 18-1,1
REM, 800-fache Vergrößerung
- Bild 27: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand,
Fraktion 0/0,5 mm, Serie 34-1,0
REM, 300-fache Vergrößerung
- Bild 28: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand,
Fraktion 0/0,5 mm, Serie 34-1,0
REM, 1500-fache Vergrößerung
- Bild 29: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand,
Fraktion 0/1 mm, Serie 50a-1,2
REM, 800-fache Vergrößerung
- Bild 30: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand,
Fraktion 0/1 mm, Serie 58-1,0
REM, 4000-fache Vergrößerung
- Bild 31: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand,
Fraktion 0/2 mm, Serie 42-1,0
REM, 1500-fache Vergrößerung

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

A_{spez}	Spezifische Oberfläche des Zuschlags [m ²]
F_p	Pressfeuchte der Kalksand-Rohmischung [M.-%]
σ_p	Pressdruck beim Verdichten [N/mm ²]
t_a	Dauer der Aufheizphase des Hydrothermalprozesses [h]
t_h	Dauer der Haltephase des Hydrothermalprozesses [h]
t_e	Dauer der Entspannungsphase des Hydrothermalprozesses [h]
p_e	Druck beim Hydrothermalprozess [bar]
T_h	Temperatur beim Hydrothermalprozess [° C]
w	Wasseraufnahme [M.-%]
Q_{,tr}	Steinrohddichte [kg/dm ³]
R_{D,st}	Steindruckfestigkeit [N/mm ²]
R_{Bz}	Steinbiegezugfestigkeit [N/mm ²]
λ_{10,tr}	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
Ca(OH)₂	Calciumhydrat
CaO	Calciumoxid
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat [CaO _x x SiO _{2,y} x H ₂ O _z]

1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des energiesparenden Wärmeschutzes gewinnen konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung von Wärmeverlusten zunehmend an Bedeutung. Beispielsweise kann bei der Anwendung von Kalksandstein-Mauerwerk durch den gezielten Einsatz von speziell entwickelten Kalksand-Leichtsteinen ein erhöhter Wärmestrom über Wärmebrücken verringert werden. Auf diese Weise kann ein weiterer Beitrag zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs geleistet werden. Mauersteine, die zur Abschwächung von Wärmebrücken verwendet werden, müssen besondere Anforderungen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften erfüllen. So ist die Kombination aus einer ausreichend hohen Steindruckfestigkeit und einer gleichzeitig niedrigen Wärmeleitfähigkeit entscheidend.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Zusammenhängen zwischen den Rohstoffeigenschaften, den verfahrenstechnischen Herstellbedingungen und den Eigenschaftswerten von Kalksand-Leichtsteinen für die Abschwächung von Wärmebrücken.

Unter Verwendung von Leichtzuschlägen auf der Rohstoffbasis von Blähton- und Bimssanden wurden im Labor Prüfkörper unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie hergestellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Rezepturen erprobt und die verfahrenstechnischen Herstellparameter (Kalkdosis, Pressfeuchte, Pressdruck, Härtezeit,...) systematisch variiert. Die Prüfkörper wurden nach baustofftechnischen Gesichtspunkten eingehend hinsichtlich ihrer physikalischen sowie chemisch-mineralogischen Eigenschaften untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen eindeutig, dass die Herstellung von Kalksand-Leichtsteinen für KS-Hintermauerwerk bei Verwendung der ausgewählten Leichtzuschläge und unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie möglich ist. Ein wesentliches Ergebnis besteht darin, dass die Kalksand-Leichtsteine gleichzeitig die erwünschte, geringe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Steindruckfestigkeit aufweisen. Die Anforderungen der DIN 106-1 sind eingehalten.

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.

Kooperationspartner:

- Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover
- Institut für Mineralogie der Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Hannover
- Kalksandstein-Werk Wemding GmbH, Wemding

2 EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund steigender ökologischer Anforderungen und ökonomischer Erfordernisse gewinnt der bauliche Wärmeschutz zunehmend an Bedeutung. Der jährliche Energieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland für den Sektor Raumwärme beträgt immer noch ca. 30% vom jährlichen Gesamtenergieverbrauch. Es ist bekannt, dass sich zwar kurzfristig eine signifikante Senkung des Energieverbrauchs durch eine energetische Sanierung des Gebäudebestandes erreichen lässt. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass Gebäude eine lange Lebensdauer haben und somit bereits heute ein energetischer Standard für die nächsten 100 Jahre festgelegt wird. Die zur Gebäudeheizung aufzuwendende Energie resultiert im wesentlichen aus folgenden Anteilen: Transmissionsenergiebedarf, Lüftungsenergiebedarf, Energiebedarf zur Erzeugung und Verteilung des Heizwärmebedarfs.

Für die Kalksandsteinindustrie besteht die Möglichkeit, einen Beitrag zur Energieeinsparung durch Vermeidung von erhöhten Wärmeströmen über Wärmebrücken zu leisten. Nicht immer sind rein konstruktive Detaillösungen ausreichend, um die Auswirkung von Wärmebrücken zu minimieren. Wärmebrücken haben bei der Planung und Errichtung von Gebäuden eine herausragende Bedeutung. Während früher die Auswirkungen von Wärmebrücken in erster Linie unter hygienischen Aspekten bewertet wurden, wie z. B. Oberflächentauwasser in Raumecken oder Schimmelpilzbildung, so muss im Zeitalter von Niedrigenergiehäusern, Passivhäusern und der Energieeinsparverordnung zusätzlich der energetische Aspekt mit betrachtet werden.

Die bekannten Lösungen hatten bisher jedoch gravierende Nachteile, da sie ausschließlich unter wärmetechnischen Gesichtspunkten beurteilt wurden. Eine gute Detaillösung muss jedoch ebenfalls im Hinblick auf andere Anforderungen (Tragfähigkeit, Schall- und Brandschutz) bewertet werden. Diese spezielle Anforderungskombination kann von Kalksand-Leichtsteinen auf der Basis von Blähton- und Bimssandrohstoffen erfüllt werden.

Im Folgenden sind mögliche Anwendungsbereiche für Kalksand-Leichtsteine zur Abschwächung von Wärmebrücken aufgeführt:

- unterste Steinschicht von Keller-Außen- und Keller-Innenwänden bei beheizten Kellern,
- unterste Steinschicht im Erdgeschoss von Außen- und Innenwänden bei nicht beheizten Kellern,
- oberste Steinschicht in nicht beheizten Kellern und Dämmschichten unterhalb der Kellerdecke,
- unterste Steinschicht von Außen- und Innenwänden im Erdgeschoss ohne Unterkellerung.

Mit diesem Forschungsvorhaben wird die Herstellung von Kalksand-Leichtsteinen unter Verwendung von Leichtzuschlägen untersucht. Hauptziel ist es dabei, die produktionstechnischen Zusammenhänge für die Herstellung von Mauersteinen mit einer hohen Steindruckfestigkeit bei gleichzeitig niedriger Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln. Diese Eigenschaftskombination kann durch die Verwendung von Blähton- und Bimssanden erreicht werden.

Ein weiteres Augenmerk ist auf die Entwicklung von Kalksand-Leichtsteinen mit geringer Sorptionsfeuchte (Bezugsfeuchtegehalt) zu legen, da der Feuchtigkeitsgehalt von Kalksandsteinen einen wesentlichen Einfluss auf deren Wärmeleitfähigkeit hat. Eine möglichst geringe Ausgleichsfeuchte wird angestrebt.

Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich deshalb darauf, verschiedene Leichtzuschläge für die Herstellung von Kalksand-Leichtsteinen zu erproben und die Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften, den verfahrenstechnischen Herstellbedingungen und den erreichbaren Eigenschaftswerten von Kalksand-Leichtsteinen aufzuzeigen. Dazu wurden im Labor und in einem Kalksandsteinwerk umfangreiche Versuche durchgeführt.

Das Ausgangsmaterial herkömmlicher Kalksandstein-Produkte ist gebrannter Kalk, erdfeuchter Quarzsand als Zuschlag und Wasser. Da der Quarzsand im Vergleich zu den anderen beteiligten Stoffen die höchste, d. h. ungünstige Eigenwärmeleitfähigkeit aufweist, ist er für diesen speziellen Anwendungszweck möglichst vollständig durch Leichtzuschläge zu substituieren. Blähton- oder Bimssande sowie weitere mineralische Rohstoffe bieten sich aufgrund ihrer geringen Eigenrohddichte bzw. hoher Porosität für diesen Zweck an.

Der Herstellablauf bei der Erzeugung von Kalksand-Leichtsteinen entspricht in etwa dem der herkömmlichen Kalksandstein-Produktion: Die Rohstoffe werden nach Gewicht dosiert, intensiv miteinander vermischt und in einen Reaktionsbehälter geleitet, in dem der Branntkalk zu Kalkhydrat ablöscht. Mit Hilfe von vollautomatisch arbeitenden Pressen werden die Steinrohlinge geformt und anschließend in Autoklaven mittels gespanntem Wasserdampf bei Temperaturen zwischen $T=180$ bis 210 °C für einen Zeitraum von $t=6$ bis 8 Stunden behutsam gehärtet. Es ist bekannt, dass neben Quarzsanden ebenfalls Zuschläge mit anderer chemischer Zusammensetzung und mineralischer Beschaffenheit für die Hydrothermalhärtung eignen [1]. Die Rohstoffe werden im Folgenden beschrieben.

Blähtone werden durch das Brennen von Tonmineralien gewonnen. Die mineralische Zusammensetzung blähfähiger Tone ist variabel. Blähtone haben meist hohe Anteile von Illit, Sericit, Montmorillonit und Illit/Montmorillonit-mixed layer. Die chemische Zusammensetzung von Blähtonen ist entsprechend der variablen mineralogischen Zusammensetzung wechselhaft, bewegt sich aber in den im Folgenden angegebenen Grenzen.

In der Tabelle 1 ist die chemische und mineralogische Zusammensetzung von Blättonen aufgeführt. Es handelt dabei um globale Anhaltswerte zur Orientierung, ohne verbindlichen Charakter [2].

Parameter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃	GV
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
min.	44,4	8,0	2,6	0,5	0,3	0,2	1,5	0,2	0,01	0,01	0,38
max.	80,0	25,0	12,0	5,9	4,6	6,0	5,1	1,1	0,5	0,8	15,1
durchschn.	59,7	18,0	7,1	1,8	2,4	1,2	3,2	0,74	0,12	0,32	7,09
Organische Substanz										bis ca. 3.5 M.-%	
Karbonatgehalt										< 5 bis 10 M.-%	
Quarzgehalt (auch Hornblende u. ä.)										< 40 M.-%	
Tonmineralgehalt (vor allem Illit- bzw. Glimmergruppe)										> 30 bis 40 M.-%	
Kaolingehalt (incl. Fireclay und Halloysit)										< 35 M.-%	
pH (wässrige Suspension)										> 6	

Tabelle 1: Chemische und mineralogische Kennwerte von Blättonen und Blätschiefer, nach Literaturangaben zusammengestellt [2]

Beim Brand der Tonminerale bleibt die chemische Zusammensetzung weitgehend erhalten. Das im Ton enthaltene Wasser wird abgegeben. Die charakteristische Schichtstruktur der Tonminerale wird beim Brennvorgang weitgehend zerstört. Die Eigenschaftswerte des Blättons hängen eng von den gewählten Herstellbedingungen und der Rohstoffzusammensetzung ab.

Bims ist ein hochporöses vulkanisches Gestein, das wegen der meist rhyolitischen, dazitischen, trachitischen bzw. phonolitischen Zusammensetzung von heller Farbe ist [2]. **Vulkanische Aschen und Schlacken** sind Lockergesteine von basaltischem, andesitischem bis rhyolitischen Chemismus. Bims- und Lavaschlacken sind durch explosiven Vulkanismus entstandene Pyroklastite. Entsprechend den Entstehungsbedingungen, dem Ablagerungs- bzw. Transportmechanismus variieren die Eigenschaften dieser Stoffe.

Die chemische und mineralogische Zusammensetzung weist – je nach den geologischen Entstehungsbedingungen - eine außerordentlich große Bandbreite auf. Die Abgrenzung zwischen Bims und vulkanischen Schlacken ist keineswegs scharf, sie folgt der in der Industrie üblichen Abgrenzung. Aschen und Schlacken sind grobporös, rauzackig, druckfest, frost- und wetterbeständig. Der Porositätsgrad innerhalb eines Vorkommens kann sehr unterschiedlich sein. Die Farbe streut von grau/schwarz-braun über rot-braun bis rot. Farbunterschiede sind jedoch kein Qualitätsmerkmal [2].

Aufgrund der anderen chemischen Zusammensetzung und der mineralischen Beschaffenheit der Leichtzuschläge gegenüber herkömmlichen Quarzsanden werden die Vorgänge bei der Hydrothermalhärtung verändert. Bei Verwendung von Blähtonsand, Bimssand bzw. Lavasand an Stelle von Quarzsand kann das System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ näherungsweise durch das System $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ ersetzt werden. In den Blähton- und Bimssanden ist das benötigte SiO_2 ausreichend vorhanden, das während der Hydrothermalhärtung mit dem Ca(OH)_2 zu den erwünschten Calcium-Silikat-Hydraten reagieren kann.

Allgemeine Angaben zur Verwendbarkeit der beschriebenen Rohstoffe sind prinzipiell nicht möglich. Jeder Rohstoff ist stets einzeln zu bewerten. Insofern ist die Anwendung der im Rahmen dieses Projektes ermittelten Grundlagenerkenntnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken 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.

3 VERSUCHSPROGRAMM

3.1 Allgemeines

Die angestrebten Forschungsziele wurden durch systematische Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen den Rohstoffeigenschaften, den verfahrenstechnischen Herstellbedingungen und den Eigenschaftswerten von Laborprüfkörpern erreicht. Die Rohstoffe und die Laborprüfkörper wurden nach baustofftechnischen Gesichtspunkten untersucht.

3.2 Festlegung der Herstellparameter

Bei der Durchführung des Forschungsvorhabens wurden die wichtigsten Herstellparameter innerhalb praxisüblicher Bandbreiten variiert. Diese sind im Folgenden näher erläutert:

Bei der Praxis der Kalksandsteinherstellung ist der Feuchtigkeitsgehalt der Rohmischung (Pressfeuchte) aufgrund verschiedener Rohstoffeigenschaften und verfahrenstechnischer Möglichkeiten und Gegebenheiten unterschiedlich einzustellen. Da die Pressfeuchte einen maßgeblichen Einfluss auf alle weiteren Produktionsschritte hat, wurde sie bei den betreffenden Serien variiert. Folgende Werte kamen im Einzelnen zur Anwendung:

- $F_{p1} = 8 \text{ M.-%}$
- $F_{p2} = 10 \text{ M.-%}$
- $F_{p3} = 12 \text{ M.-%}$
- $F_{p4} = 15 \text{ M.-%}$

Die Steigerung der Kalkdosis hat über den Aufbau von Bindungskräften einen erhöhenden Einfluss auf die Rohlingsstandfestigkeit und Steindruckfestigkeit. Deshalb wurde die Kalkdosis variiert. Es kamen folgende Werte für die CaO-Dosis (bezogen auf die gesamte Trockensubstanzmenge) zur Anwendung:

- $\text{CaO}_1 = 8 \text{ M.-%}$
- $\text{CaO}_2 = 10 \text{ M.-%}$
- $\text{CaO}_3 = 12 \text{ M.-%}$
- $\text{CaO}_4 = 14 \text{ M.-%}$

Um den grundsätzlichen Einfluss der Härteparameter auf die Eigenschaftswerte der Steine zu erfassen, wurden für die Auslegung der Härtekurven die Härtezeit, die Temperatur bzw. der Druck wie folgt variiert:

- Dauer der Aufheizphase: $t_a = 1 \text{ h}$
- Dauer der Haltephase: $t_h = 2 / 4 / 6 \text{ h}$
- Dauer der Entspannungsphase: $t_e = 1 \text{ h}$
- Härtedruck: $p_e = 12 / 16 \text{ bar}$
- Härtetemperatur: $T_h = 191 / 203 \text{ }^\circ \text{C}$

Zu jeder Härtekesselfahrt liegt ein Temperatur-Zeit-Protokoll vor. Der Ort der Temperaturmessung ist der freie Dampfraum im Autoklaven.

3.3 Rohstoffe für die Herstellung der Prüfkörper

Als Zuschläge wurden die im Folgenden aufgeführten Rohstoffe verwendet:

- **Blähtonsand:**
 - Fraktion: 0/0,5 mm
 - Fraktion: 0/1 mm
 - Fraktion: 0/2 mm
- **Bimssand** der Fraktion:
 - Fraktion 0/5 mm
- **Lavasand** der Fraktion:
 - Fraktion 0/4 mm (einzelner Tastversuch, hohe Steinrohddichte)

In weiterführenden Tastversuchen wurden die Rohstoffe kombiniert, siehe Serien 100 bis 104, Tabelle 20, Anhang A, Seite A 9.

Als Bindemittel wurde für die Herstellung der Prüfkörper ein handelsübliches Weißkalkhydrat mit einem CaO-Gehalt von ca. 72 M.-% verwendet. Das Anmachwasser wurde mittels Ionenaustauschverfahren entsalzt.

An den Rohstoffen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung mittels Trockensiebung
- Bestimmung der Schüttdichte nach FISCHER,
- Bestimmung des Gehaltes an abschlämmbaren Bestandteilen (Standzylinderversuch)
- Bestimmung des Gehaltes an Huminstoffen nach POST
- Eluatanalyse gemäß DEV-S4-Verfahren und Spektralphotometrie bezüglich folgender Parameter:
 - pH-Wert
 - Chlorid
 - Sulfat
 - Blei
 - Cadmium
 - Chrom, ges.
 - Nickel
- Lichtmikroskopie
- Raster-Elektronen-Mikroskopie
- EDX-Analyse
- Phasenanalyse mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie

3.4 Herstellung der Prüfkörper

Als Prüfkörper wurden unter praxiskonformen Bedingungen Kalksand-Leichtsteine des Formats NF ($l \times b \times h = 240 \times 115 \times 71 \text{ mm}^3$) der Rohdichteklassen 1,0 / 1,1 und 1,2 hergestellt. Die für die Herstellung der KS-Prüfkörper ausgewählten Parameter (Rezeptur, Pressdruck, Härtezeit...) entsprechen dabei praxisüblichen Werten. Zunächst wurden die Rohstoffkomponenten mit einem Labormischer intensiv vermengt. Aus den Mischungen wurden die Kalksandstein-Prüfkörper mit einer zweiseitig verdichtenden hydraulischen Presse hergestellt. In einem Laborautoklaven wurden die Rohlinge gemäß den ausgewählten Programmen gehärtet.

Mit dem Ziel der einfacheren Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungsergebnisse wurden als Standard-Herstellbedingungen folgende Parameter festgelegt:

- Standard-Pressfeuchte: $F_p = 10 \text{ M.-%}$
- Standard-CaO-Dosis: $\text{CaO} = 10 \text{ M.-%}$
- Standard-Härtedauer: $t_h = 1-4-1 \text{ h}$
- Standard-Härtetemperatur: $T_h = 203^\circ\text{C}$ ($p_e = 16 \text{ bar}$)

3.5 Untersuchungen an den Prüfkörpern

An den hergestellten Kalksandstein-Prüfkörpern wurden die im Folgenden aufgeführten Eigenschaftswerte ermittelt:

- Steindruckfestigkeit
- Steinrohddichte
- Steinbiegezugfestigkeit
- Frostwiderstandsfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Bezugsfeuchtegehalt
- Wasseraufnahme
- Ermittlung der Porosität und Porenradialverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie
- Chemisch-mineralogische Beschaffenheit mittels:
 - Differenzial-Thermo-Analyse
 - lichtmikroskopischer Bemusterung
 - Raster-Elektronen-Mikroskopie
 - Qualitativer Elementanalyse (EDX)
 - röntgenographischer Phasenanalyse

Die einzelnen Untersuchungsverfahren werden im Folgenden – soweit sie nicht genormt sind - näher beschrieben:

3.5.1 Steindruckfestigkeit

Die Ermittlung der Steindruckfestigkeit erfolgte nach DIN 106-1 an 6 Prüfkörpern.

3.5.2 Steinrohddichte

Die Ermittlung der Steinrohddichte erfolgte nach DIN 106-1 an 6 Prüfkörpern.

3.5.3 Steinbiegezugfestigkeit

Die Ermittlung der Steinbiegezugfestigkeit erfolgte an 3 Prüfkörpern durch einen Biegeversuch. Der Abstand zwischen den zwei unteren Auflagern betrug 200 mm. Die Auflast wurde in Feldmitte angesetzt.

3.5.4 Frostwiderstandsfähigkeit

Die Ermittlung der Frostwiderstandsfähigkeit erfolgte in Anlehnung an DIN 106-2 an 3 Prüfkörpern.

3.5.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte nach DIN 52 616 an aus den Kalksand-Leichtsteinen ausgesägten Prüfkörpern.

3.5.6 Bezugsfeuchtegehalt

Die Bestimmung des Bezugsfeuchtegehaltes erfolgte nach DIN 52 620 an jeweils 5 aus den Kalksand-Leichtsteinen ausgesägten Prüfkörpern mit den Abmessungen $l \times b \times h = 100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$.

3.5.7 Wasseraufnahme

Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte nach DIN 52 617 an jeweils 3 Prüfkörpern.

3.5.8 Porenradienverteilung

Die Bestimmung der Porenradienverteilung und der quecksilberfüllbaren Porosität erfolgte mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Firma Carlo Ebra, Italien, Modell „Porosimetro AG 65“. Das Gerät arbeitet mit einem Betriebsdruck von bis zu $p = 1000 \text{ bar}$. Diese Methode zur Bestimmung des Porenanteils am Gesamtvolumen mittels Durchdringung von Quecksilber beruht auf dem Verhalten nicht benetzender Flüssigkeiten in Kapillaren. Gemessen wird das Quecksilbervolumen, das in Abhängigkeit vom jeweiligen Porenradius bei steigendem Druck in die Probe eindringt.

Als Ergebnisse werden die quecksilberfüllbare Porosität und die für die Kennzeichnung der Porenradienverteilung von Kalksandsteinen charakteristischen Radienfraktionen ausgewiesen:

- Bereich 1: $r < 10^{-7} \text{ m}$,
- Bereich 2: $10^{-7} \leq r < 10^{-6} \text{ m}$,
- Bereich 3: $10^{-6} \leq r < 10^{-5} \text{ m}$,
- Bereich 4: $10^{-5} \leq r \text{ m}$.

3.5.9 Chemische und mineralogische Analyse

Mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse wurde an zahlreichen Serien der Gehalt an evtl. vorliegendem nicht umgesetzten Kalk in den gehärteten Prüfkörpern abgeschätzt. Die Entwässerung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im Mineralgemisch eines handelsüblichen Kalksandsteinmaterials verläuft im allgemeinen im Temperaturbereich von $T = 400$ bis 600°C . Die Abschätzung der Gehalte an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wurde anhand Eichkurven vorgenommen. Die Auswertung der Differential-Thermo-Analysen erfolgte auf der Basis von [3/4/5/6/7].

Für die weitergehenden mineralogischen Untersuchungen wurden die in der folgenden Tabelle 2 aufgeführten Serien (Standard-Herstellparameter) ausgewählt:

Serie	Art des Leichtzuschlags	Menge an Leichtzuschlag	CaO-Dosis	Pressfeuchte	Pressdruck (gemessen)	Härte- druck	Härte- dauer
		[M.-%]	[M.-%]	Fp [M.-%]	σ_p [N/mm ²]	p_e [bar]	t_h [h]
18-1,1	Bimssand 0/5 mm	90	10	10	3,0	16	1-4-1
18-1,2		90	10	10	7,0	16	1-4-1
34-1,0	Blähtonsand 0/0,5 mm	90	10	10	8,0	16	1-4-1
34-1,2		90	10	10	24,0	16	1-4-1
50-1,2	Blähtonsand 0/1 mm	90	10	10	14,5	16	1-4-1
50a-1,2		90	10	10	14,5	16	1-6-1
50b-1,2		90	10	10	13,0	16	1-2-1
58-1,0	Blähtonsand 0/1 mm	90	10	10	8,5	16	1-4-1
58-1,2		90	10	10	22,0	16	1-4-1
42-1,0	Blähtonsand 0/2 mm	90	10	10	16,0	16	1-4-1
42-1,1		90	10	10	22,0	16	1-4-1

Tabelle 2 : Ausgewählte Serien für die mineralogische Untersuchung

Folgende Untersuchungsmethoden kamen zum Einsatz:

- **Lichtmikroskopische Bemusterung**
Von allen ausgewählten Mustern wurden frisch gebrochene Scherben lichtmikroskopisch untersucht.
- **Rasterelektronenmikroskopie und EDX-Analyse**
Von den ausgewählten Mustersteinen wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt. Anschließend wurden an einigen Proben mittels EDX-Verfahren Elementanalysen durchgeführt.
- **Röntgenographische Phasenanalyse**
Die röntgenographische Phasenanalyse erfolgte an separiertem Bindemittel mittels der Guinier-Pulvermethode. Das Bindemittel wurde dazu vorher von den Quarzkörnern mechanisch weitgehend abgetrennt.

3.5.10 Werksversuche

In einem Kalksandsteinwerk wurden unter Zugrundelegung der im Labor ermittelten Erkenntnisse mehrere Rezepturvorschläge durch einen Praxisversuch erprobt. Die bei diesen Versuchen hergestellten Prüfkörper wurden anschließend im Labor nach baustofftechnischen Gesichtspunkten eingehend analysiert. Für die Werksversuche wurden unter Zugrundelegung der Standard-Herstellparameter die in der folgenden Tabelle 3 aufgeführten Serien ausgewählt:

Serie	Format / Abmessungen	Menge an Blähton sand 0/1 mm	CaO- Dosis	Press- feuchte	Press- druck σ_p	Härte- druck p_e	Härte- dauer t_h
		[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[N/mm ²]	[bar]	[h]
50-1,2	2DF	90	10	10	14,4	15,4	1,5-2-6
	498x200x113				15,3		1,5-5-6
50a-1,0	2DF	90	10	10	3,9	15,4	1,5-2-6
	498x200x113				6,1		1,5-5-6
50a-1,2	2DF	90	10	10	14,1	15,4	1,5-2-6
	498x200x113				14,7		1,5-5-6
51-1,2	2DF	88	12	10	13,5	15,4	1,5-2-6
	498x200x113				13,1		1,5-5-6

Tabelle 3 : Ausgewählte Serien für die Werksversuche

4 AUSWERTUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Untersuchung der Rohstoffe

4.1.1 Korngrößenverteilung mittels Trockensiebung

Die Korngrößenverteilungen der Leichtzuschläge liegen im allgemeinen nicht vollständig innerhalb des für Kalksandstein-Standardprodukte üblichen Wertebereichs. Bedingt durch die Zerkleinerungsvorgänge und das Absiebehverhalten bei der Rohstoffaufbereitung sind in der Regel größere Anteile an sehr feinem Material mit einem Korndurchmesser von $d < 0,1$ mm vorhanden. Bei unterschiedlichen Rohstoffsorten gleicher Fraktion (z. B. 0/1 mm) können durchaus sehr verschiedene Korngrößenverteilungen mit statistisch mittleren Korndurchmessern von beispielsweise $d' = 0,2$ bis $0,55$ mm auftreten.

Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 12 bis 14 und in den Bildern 1 bis 3 im Anhang A auf den Seiten A 1 bis A 3 dargestellt.

4.1.2 Schüttdichte

Die Schüttdichte liegt bei den untersuchten Leichtzuschlägen innerhalb folgender Bandbreiten:

- **Blähtonsande:**
 - Schüttdichte, geschüttet: 0,50 bis 0,73 kg/dm³
 - Schüttdichte, gerüttelt: 0,59 bis 0,90 kg/dm³

- **Bimssand:**
 - Schüttdichte, geschüttet: 0,90 kg/dm³
 - Schüttdichte, gerüttelt: 1,05 kg/dm³

Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 12 bis 14 und in den Bildern 1 bis 3 im Anhang A auf den Seiten A 1 bis A 3 dargestellt.

4.1.3 Spezifische Oberfläche nach FISCHER

Die Spezifische Oberfläche liegt bei den untersuchten Leichtzuschlägen innerhalb folgender Bandbreiten:

- **Blähtonsande:** $A_{\text{spez}} = 694 \text{ bis } 1590 \text{ cm}^2/\text{g}$
 - Fraktion 0/0,5 mm: $A_{\text{spez}} = 1079 \text{ cm}^2/\text{g}$
 - Fraktion 0/1 mm: $A_{\text{spez}} = 694 \text{ bis } 1590 \text{ cm}^2/\text{g}$
 - Fraktion 0/2 mm: $A_{\text{spez}} = 1204 \text{ cm}^2/\text{g}$

- **Bimssand:** $A_{\text{spez}} = 757 \text{ cm}^2/\text{g}$

Die spezifischen Oberflächen dieser Rohstoffe sind aufgrund der im Vergleich zu betriebsüblichen Quarzsanden großen Feinanteilgehalte und der Kornstruktur sehr hoch. Infolge der sehr porösen Beschaffenheit und der großen Oberflächen beteiligen sich die Rohstoffe intensiv am Reaktionsgeschehen bei der Hydrothermalsynthese.

Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 12 bis 14 und in den Bildern 1 bis 3 im Anhang A auf den Seiten A 1 bis A 3 dargestellt.

4.1.4 Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen

Der Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen liegt bei den untersuchten Leichtzuschlägen innerhalb folgender Bandbreiten:

- **Blähtonsande:** 3,5 bis 12,0 Vol.-%

- **Bimssand:** 10,5 Vol.-%

Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 12 bis 14 und in den Bildern 1 bis 3 im Anhang A auf den Seiten A 1 bis A 3 dargestellt.

4.1.5 Gehalt an Huminstoffen nach POST

Der Huminstoff-Test hat zu folgenden Ergebnissen geführt:

- **Blähtonsande:** farblos über hellgelb bis mittelgelb

- **Bimssand:** farblos

Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 12 bis 14 und in den Bildern 1 bis 3 im Anhang A auf den Seiten A 1 bis A 3 dargestellt.

4.1.6 Lichtmikroskopie

- **Blähtonsande:**
Die lichtoptische Bemusterung der Blähtonsande zeigt typische, graue und bräunliche Blähtonkörner und kleine dreieckige schuppenartige Bestandteile. Letztere rühren vom Zerfall der durch den Temperprozess stark zerklüfteten, sehr porösen Blähtonkörner her.
- **Bimssand:**
Die lichtoptische Bemusterung des Bimssandes zeigt typische, weiße Bimskörner. Als Verunreinigung finden sich einige kleine dunkle, sehr wahrscheinlich eisenhaltige Körner.

4.1.7 Raster-Elektronen-Mikroskopie

- **Blähtonsande:**
Die REM-Aufnahmen zeigen die Übersicht über die Proben sowie einzelne Körner in verschiedener Vergrößerung. Die poröse Kornstruktur ist deutlich zu erkennen.
- **Bimssand:**
Die REM-Aufnahmen zeigen ebenfalls die Übersicht über die Proben sowie einzelne Körner. Der poröse Charakter des „Schaumglases“ ist deutlich zu erkennen.

Siehe Bilder 17 bis 20 im Anhang A auf den Seiten A 21 und A 22.

4.1.8 EDX-Analyse

- **Blähtonsande:**
Die EDX-Analyse zeigt neben Silizium und Aluminium bei allen Blähtonsanden Eisen, Calcium und Kalium, sowie etwas Magnesium und zum Teil geringe Mengen an Titan. Teilweise werden lokale Calciumanreicherungen beobachtet. Der relativ hohe Eisengehalt wird die Form der Ausbildung der CSH-Phasen beeinflussen. Teilweise beobachtete oberflächliche Calciumablagerungen sind zu erkennen.
- **Bimssand:**
Die EDX-Analyse zeigt neben Silizium, Aluminium, Eisen und Calcium sowie als Alkalien Natrium und Kalium. Wegen der hohen Reaktivität der Bimskörner als Silikatquelle ist mit einer Veränderung der Reaktionskinetik sowie mit Ausblühungen durch den Kalium-Anteil zu rechnen.

4.1.9 Phasenanalyse mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie

- **Blähtonsande:**

Die röntgenographische Phasenanalyse zeigt bei den Blähtonsanden einen hohen Untergrund, was auf die Anwesenheit amorpher Bestandteile hindeutet. Ebenfalls werden kristalline Anteile gefunden, die durch die scharfen Signale angezeigt werden. Hier ist außer für den hauptsächlich vorhandenen Quarz die Zuordnung sehr schwierig, da neben der bevorzugten Orientierung auch die Signale im hohen Untergrund verdeckt bleiben. Vermutlich handelt es sich um eine dem Anorthit (PDF-No. 411481) ähnliche Phase sowie um eine dem Eisenmagnesiumsilikat ähnliche Phase (PDF-No. 37-415) ähnelnde Phase. In Bild 25 im Anhang A auf der Seite A 25 ist ein exemplarisches Spektrum aus der Röntgenpulverdiffraktometrie dargestellt.

- **Bimssand:**

Die röntgenographische Phasenanalyse liefert als Hauptergebnis, das der weitaus überwiegende Anteil der Probe nichtkristallin-glasartig ist.

4.1.10 Chemische Zusammensetzung

In der Tabelle 4 ist exemplarisch die chemische Zusammensetzung eines eingesetzten Blähtonsandes wiedergegeben.

Parameter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
durchschn.	56,2	20,3	12,0	2,8	0,63	0,49	1,24	0,10	0,93	0,73

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Blähton-Materials gemäß Herstellerangabe

In der Tabelle 5 ist exemplarisch die chemische Zusammensetzung eines Bimssandes wiedergegeben.

Parameter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	GV	nicht best.
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
durchschn.	70,55	12,24	0,89	2,36	0,10	3,49	4,21	0,03	5,51	0,62

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Bims-Materials gemäß Herstellerangabe

In der Tabelle 6 ist die chemische Zusammensetzung des eingesetzten Lava-Materials wiedergegeben.

Parameter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
durchschn.	43,49	13,83	10,99	11,53	13,63	1,49	1,79	2,61	0,58

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Lava-Materials gemäß Herstellerangabe

4.2 Untersuchung der Laborprüfkörper

Die Steindruckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit sind die im Rahmen dieser Untersuchungen wichtigsten qualitätskennzeichnenden Steineigenschaftsgrößen. Deshalb erfolgt die Auswertung der Untersuchungsergebnisse und deren Diskussion in erster Linie für diese Kennwerte.

4.2.1 Steindruckfestigkeit

Im Folgenden sind für die Steinrohdklassen 1,0 / 1,1 und 1,2 die erreichten Steindruckfestigkeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen **Kalkdosis** aufgeführt:

Steinrohdklasse 1,0:

- **Blähtonsande:**
 - CaO = 8 M.-%: $\beta_{D,St} = 11,6 \text{ bis } 13,6 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 10 M.-%: $\beta_{D,St} = 13,2 \text{ bis } 16,0 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 12 M.-%: $\beta_{D,St} = 10,0 \text{ bis } 19,4 \text{ N/mm}^2$ (Maximum)
 - CaO = 14 M.-%: $\beta_{D,St} = 11,8 \text{ bis } 17,0 \text{ N/mm}^2$

Steinrohdklasse 1,1:

- **Bimssand:**
 - CaO = 8 M.-%: $\beta_{D,St} = 7,6 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 10 M.-%: $\beta_{D,St} = 7,6 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 12 M.-%: $\beta_{D,St} = 7,4 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 14 M.-%: $\beta_{D,St} = 7,6 \text{ N/mm}^2$

Steinrohdklasse 1,2:

- **Blähtonsande:**
 - CaO = 8 M.-%: $\beta_{D,St} = 14,2 \text{ bis } 24,2 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 10 M.-%: $\beta_{D,St} = 13,4 \text{ bis } 28,0 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 12 M.-%: $\beta_{D,St} = 9,8 \text{ bis } 31,4 \text{ N/mm}^2$ (Maximum)
 - CaO = 14 M.-%: $\beta_{D,St} = 13,2 \text{ bis } 29,2 \text{ N/mm}^2$

- **Bimssand:**

- CaO = 8 M.-%: $\beta_{D,St} = 11,6 \text{ N/mm}^2$
- CaO = 10 M.-%: $\beta_{D,St} = 11,8 \text{ N/mm}^2$
- CaO = 12 M.-%: $\beta_{D,St} = 12,0 \text{ N/mm}^2$
- CaO = 14 M.-%: $\beta_{D,St} = 12,2 \text{ N/mm}^2$

Bei den aus **Blähtonsand** hergestellten Prüfkörpern ist der Einfluss der **Kalkdosis** auf die erreichte Steindruckfestigkeit sehr deutlich erkennbar. Je höher die CaO-Dosis in der Rezeptur ist, desto höher ist bis zu einer Dosis von CaO = 12 M.-% auf Grund der bindenden Wirkung neu gebildeter Phasen die Steindruckfestigkeit. Eine CaO-Dosis von 14 M.-% ist als zu hoch anzusehen, hier werden Festigkeitseinbußen verzeichnet.

Bei den aus **Bimssand** hergestellten Prüfkörpern wird durch eine Steigerung der **Kalkdosis** kein Festigkeitszuwachs erzielt. Die erreichten Festigkeiten sind bei den Standardserien als quasi gleich anzusehen.

Bei den aus **Blähtonsand** hergestellten Prüfkörpern ist die Abhängigkeit der erreichten Steindruckfestigkeit von der **Korngrößenverteilung** deutlich zu erkennen. Die höchsten Festigkeitswerte wurden unter Verwendung der feinsten Blähtonsandfraktion (0/0,5 mm) erreicht. Die geringsten Festigkeiten wurden bei Verwendung der Fraktion 0/2 mm gefunden. Zwischen den verschiedenen Blähtonsorten der Fraktion 0/1 mm sind hinsichtlich der Steindruckfestigkeit noch keine eindeutig erklärbaren Unterschiede erkennbar. Zum detaillierten Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Steindruckfestigkeit besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Mit jeder Sorte werden durchaus hohe Steindruckfestigkeiten erreicht.

Im Folgenden sind für die Standardserien der **Blähtonsand**-Prüfkörper die erreichten Steindruckfestigkeiten in Abhängigkeit von der verwendeten **Kornfraktion** aufgeführt:

Steinrohdklasse 1,0:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $\beta_{D,St} = 13,6 \text{ bis } 19,4 \text{ N/mm}^2$
- Blähtonsand-Fraktion 0/1 mm: $\beta_{D,St} = 11,6 \text{ bis } 15,0 \text{ N/mm}^2$
- Blähtonsand-Fraktion 0/2 mm: $\beta_{D,St} = 10,0 \text{ bis } 13,0 \text{ N/mm}^2$

Steinrohdklasse 1,2:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $\beta_{D,St} = 23,0 \text{ bis } 31,4 \text{ N/mm}^2$
- Blähtonsand-Fraktion 0/1 mm: $\beta_{D,St} = 21,0 \text{ bis } 29,6 \text{ N/mm}^2$
- Blähtonsand-Fraktion 0/2 mm: $\beta_{D,St} = 9,8 \text{ bis } 14,2 \text{ N/mm}^2$

Unter Verwendung von **Blähtonsand** wurden die höchsten Steindruckfestigkeitswerte bei Ansatz einer **Pressfeuchte** von $F = 10$ M.-% erreicht. Die Erhöhung der Pressfeuchte von $F = 10$ auf 15 M.-% bewirkt unter sonst gleichen Bedingungen unter Verwendung der Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm keine nennenswerte Änderung der Steindruckfestigkeit. Bei Einsatz der Fraktionen 0/1 mm und 0/2 mm fällt bei Erhöhung der Pressfeuchte ein deutlicher Abfall um bis zu maximal rd. 28 % auf. Die nachfolgenden Tabellen 7 und 8 zeigen den Vergleich der Steindruckfestigkeitswerte bei Änderung der Pressfeuchte. Die jeweiligen Änderungen sind in Klammern angegeben.

Blähton- sand- fraktion	Steindruckfestigkeit $\beta_{D,St}$ [N/mm ²]			
	Rohdichteklasse 1,0		Rohdichteklasse 1,2	
	Press- feuchte F _p = 10 M.-%	Press- feuchte F _p = 15 M.-%	Press- feuchte F _p = 10 M.-%	Press- feuchte F _p = 15 M.-%
0/0,5 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	16,0	16,6	28,0	27,2
0/1 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	13,4	9,6 (- 28 %)	26,8	24,0 (- 10 %)
0/2 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	13,2	10,4 (- 21 %)	13,4	10,4 (- 22 %)

Tabelle 7: Einfluss der Pressfeuchte auf die Steindruckfestigkeit
Zuschlag: Blähtonsand
Standard-Härtekurve: $t_h = 1-4-1$ h
Standard-Pressfeuchte: $F_p = 10$ M.-%

Unter Verwendung von **Bimssand** wurden die höchsten Steindruckfestigkeitswerte ebenfalls bei Ansatz einer Pressfeuchte von $F = 10$ M.-% erreicht. Die Erhöhung der **Pressfeuchte** von $F = 10$ über 12 auf 15 M.-% führt wiederum unter sonst gleichen Bedingungen zu Einbußen bei der Steindruckfestigkeit in einer Größenordnung von bis zu rd. 20 %.

Pressfeuchte [M.-%]	Steindruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ [N/mm ²]	
	Rohdichte- klasse 1,1	Rohdichte- klasse 1,2
10	7,6	11,8
12	6,2 (- 18 %)	10,2 (- 14 %)
15	6,2 (- 18 %)	9,4 (- 20 %)

Tabelle 8: Einfluss der Pressfeuchte auf die Steindruckfestigkeit
 Zuschlag: Bimssand
 Standard-Härtekurve: $t_h = 1-4-1$ h
 Standard-Pressfeuchte: $F_p = 10$ M.-%

Die Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit von der Steinrohddichte wurde durch die Normierung der Festigkeitswerte auf die Steinrohddichte vorab untersucht. Sie kann auf Grund der sehr geringen einzelnen Unterschiede der zu vergleichenden Steinrohddichten innerhalb der Klassen vernachlässigt werden.

Der Einfluss der **Härte**dauer auf die erreichte Steindruckfestigkeit ist deutlich erkennbar. Die höchsten Festigkeitswerte wurden im Rahmen dieser Untersuchungen bei einer Haltezeit von $t=4$ h erzielt. Eine Verlängerung der Haltephase von $t=4$ auf $t=6$ h führt in den allermeisten Fällen nicht zu höheren Steindruckfestigkeiten. Bei Verwendung der (größten) Blähtonsand-Fraktion (0/2 mm) sind sogar erhebliche Einbußen bei der Steindruckfestigkeit von bis zu maximal rd. 30 % zu verzeichnen. Eine Reduzierung der Haltezeit von $t=4$ auf $t=2$ h führt ebenfalls zu einer deutlichen Abnahme der Steindruckfestigkeit um bis zu maximal rd. 23 %.

In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die erreichten Steindruckfestigkeiten bei Variation der Härte

dauer für die beiden Rohdichteklassen 1,0 und 1,2 und für die einzelnen Fraktionen der verwendeten **Blähtonsande** aufgeführt.

Blähtonsand- fraktion	Steindruckfestigkeit $\beta_{D,St} [N/mm^2]$					
	Rohdichteklasse 1,0			Rohdichteklasse 1,2		
	Härtedauer $t_h = 1-2-1$ h	Härtedauer $t_h = 1-4-1$ h	Härtedauer $t_h = 1-6-1$ h	Härtedauer $t_h = 1-2-1$ h	Härtedauer $t_h = 1-4-1$ h	Härtedauer $t_h = 1-6-1$ h
0/0,5 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	-	16,0	18,0 (+ 13 %)	-	28,0	27,6
0/1 mm CaO-Dosis: 12 M.-%	11,2 (- 23 %)	14,6	13,4 (- 8 %)	23,6 (- 20 %)	29,6	28,6 (- 3 %)
0/2 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	-	13,2	9,6 (- 27 %)	-	13,4	9,4 (- 30 %)

Tabelle 9: Einfluss der Härtedauer auf die Steindruckfestigkeit,
Standard-Härtekurve: $t_h = 1-4-1$ h, Zuschlag: Blähtonsand

Bei Verwendung des **Bimssandes** wird durch die Verlängerung der **Härtezeit** eine Erhöhung der Steindruckfestigkeit von rd. 5 % erreicht.

Beim Einsatz des **Blähtonsandes** und einer Härtedauer von $t_h = 1-4-1$ h (Standardparameter) ist der Einfluss der **Härtetemperatur** auf die erreichte Steindruckfestigkeit deutlich erkennbar. Eine Reduzierung des Härte drucks von $p_e = 16$ auf 12 bar mit einer entsprechenden Absenkung der Härtetemperatur von $T_h = 203$ auf 191 °C führt infolge ungünstigerer Reaktionsbedingungen Einbußen bei der Steindruckfestigkeit von bis zu maximal 30 %.

Bei Verwendung des **Bimssandes** wird durch die Reduzierung der **Härtetemperatur** eine Einbuße bei der Steindruckfestigkeit von rd. 5 % verzeichnet.

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die erreichten Steindruckfestigkeiten bei Variation der Härtetemperatur für die beiden Rohdichteklassen 1,0 und 1,2 und für die einzelnen **Blähtonsand**-Fraktionen exemplarisch aufgeführt.

Blähtonsand- fraktion	Steindruckfestigkeit $\beta_{D,St}$ [N/mm ²]			
	Rohdichteklasse 1,0		Rohdichteklasse 1,2	
	Härte- temperatur $T_h = 191^\circ\text{C}$	Härte- temperatur $T_h = 203^\circ\text{C}$	Härte- temperatur $T_h = 191^\circ\text{C}$	Härte- temperatur $T_h = 203^\circ\text{C}$
0/0,5 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	14,2 (- 11 %)	16,0	24,0 (- 14 %)	28,0
0/1 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	9,4 (- 30 %)	13,4	21,6 (- 19 %)	26,8
0/2 mm CaO-Dosis: 10 M.-%	9,6 (- 27 %)	13,2	9,4 (- 30 %)	13,4

Tabelle 10: Einfluss der Härtetemperatur auf die Steindruckfestigkeit, Standard-Härtetemp: $t_h = 1-4-1$ h, Zuschlag: Blähtonsand

Die einzelnen Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen 15 bis 21 und in den Bildern 4 bis 10 im Anhang A auf den Seiten A 4 bis A 14 dargestellt.

4.2.2 Steinrohddichte

Die Einwaagen der Rohmischungen wurden generell für die Herstellung der Steinrohddichteklassen 1,0 und 1,1 sowie 1,2 (auch im Hinblick auf die Rohddichteklassifizierung in der zukünftigen DIN 106) ausgelegt. Bei der Verwendung des Bimssandes 0/5 mm und beim Blähtonsand der Fraktion 0/2 mm war bei den Versuchen zur Rohddichteklasse 1,0 keine ausreichende Rohlingsstandfestigkeit erreichbar, so dass in diesen Fällen die Rohddichteklassen 1,1 bzw. 1,2 hergestellt wurden.

Mit zunehmendem Verdichtungsgrad der Rohlinge nimmt die Steindruckfestigkeit zu. Der für die Verdichtung der Rohmischung erforderliche Pressdruck wurde jeweils erfasst und dokumentiert. Die Bandbreite der Pressdruckwerte ist für jeden Rohstoff spezifisch und liegt global für alle verwendeten **Blähtonsand-Zuschläge** innerhalb der im Folgenden aufgeführten Bandbreiten:

- Rohddichteklasse 1,0: $\sigma_p = 2,2$ N/mm² bis = max. 17,0 N/mm²
- Rohddichteklasse 1,1: $\sigma_p = 18,0$ N/mm² bis = max. 24,5 N/mm²
- Rohddichteklasse 1,2: $\sigma_p = 8,8$ N/mm² bis = max. 26,0 N/mm²

Beim **Bimssand** wurden folgende **Pressdruck**-Bandbreiten festgestellt:

- Rohdichteklasse 1,1: $\sigma_p = 2,8 \text{ N/mm}^2$ bis $= 4,0 \text{ N/mm}^2$
- Rohdichteklasse 1,2: $\sigma_p = 7,0 \text{ N/mm}^2$ bis $= 9,0 \text{ N/mm}^2$

4.2.3 Steinbiegezugfestigkeit

Bezüglich der Steinbiegezugfestigkeit bestehen keine Normanforderung. Diese Größe dient zusätzlich der Beurteilung der Festigkeit von Laborprüfkörpern und steht auch bei diesen Rohstoffen in einem engen Zusammenhang mit der Steindruckfestigkeit. Der für die Prüfkörper aus Blähtonsand gefundene Zusammenhang ist in Bild 11 im Anhang auf der Seite A 15 dargestellt. Die Korrelationsanalyse weist ein hohes Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,86$ aus.

Die Abhängigkeit der Steinbiegezugfestigkeit von den Herstellparametern ist deutlich erkennbar. Eine wichtige Einflussgröße ist die Kalkmenge. Mit steigender CaO-Dosis nimmt die Steinbiegezugfestigkeit der aus **Blähtonsand** hergestellten Prüfkörper in der Tendenz zu. Bei den aus **Bimssand** hergestellten Prüfkörpern liegen die Biegezugfestigkeiten insgesamt auf einem etwas geringeren Wertenniveau und ändern sich mit steigender Kalkdosis nur unwesentlich. Im Folgenden sind für die Standardserien die erreichten Steinbiegezugfestigkeiten in Abhängigkeit von der **Kalkdosis** aufgeführt.

Steinrohdklasse 1,0:

- **Blähtonsande:**
 - CaO = 8 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 2,8$ bis $3,4 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 10 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 3,1$ bis $4,4 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 12 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 3,2$ bis $4,7 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 14 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 3,1$ bis $4,5 \text{ N/mm}^2$

Steinrohdklasse 1,1:

- **Bimssand:**
 - CaO = 8 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 1,8 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 10 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 1,8 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 12 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 1,8 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 14 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 2,0 \text{ N/mm}^2$

Steinrohdklasse 1,2:

- **Blähtonsande:**
 - CaO = 8 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 3,9$ bis $6,5 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 10 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 5,5$ bis $7,7 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 12 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 5,4$ bis $8,9 \text{ N/mm}^2$
 - CaO = 14 M.-%: $\beta_{\text{BZ,St}} = 5,0$ bis $7,8 \text{ N/mm}^2$

- **Bimssand:**

- CaO = 8 M.-%: $\beta_{BZ,St} = 2,5 \text{ N/mm}^2$
- CaO = 10 M.-%: $\beta_{BZ,St} = 2,4 \text{ N/mm}^2$
- CaO = 12 M.-%: $\beta_{BZ,St} = 2,5 \text{ N/mm}^2$
- CaO = 14 M.-%: $\beta_{BZ,St} = 2,8 \text{ N/mm}^2$

4.2.4 Frostwiderstandsfähigkeit

An Kalksandsteine für Hintermauerwerk bestehen keine Normanforderungen hinsichtlich deren Frostwiderstandsfähigkeit. Die unter Verwendung der Leichtzuschläge hergestellten Laborprüfkörper weisen jedoch eine durchaus hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber der Frostbeanspruchung auf. Die aus Blähton-sand hergestellten Prüfkörper überstehen in sehr vielen Fällen sogar 50 und häufig mindestens 25 Frost-Tau-Wechsel schadenfrei im Sinne der DIN 106-2.

Geringere Frostwiderstandsfähigkeiten treten im Fall einer geringen CaO-Dosis (geringerer Gehalt an bindenden Phasen), bei der Rohdichteklasse 1,0 mit entsprechend geringer Verdichtung der Rohmischung und somit bei geringer Festigkeit auf. Mit zunehmender Porosität (Wasser- bzw. Hg-füllbare Porosität) nimmt die Frostwiderstandsfähigkeit der Prüfkörper der Blähtonsandfraktion 0/1 mm tendenziell ab. Bei den Blähtonsandfraktionen 0/0,5 mm und 0/2 mm tritt diese Erscheinung nicht auf.

4.2.5 Wärmeleitfähigkeit

Zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Steinrohddichte besteht auch bei Verwendung der hier eingesetzten Leichtzuschläge der bekannte Zusammenhang: Je geringer die Steinrohddichte ist, desto geringer ist die Wärmeleitfähigkeit. Im Folgenden sind für die **Blähtonsand**-Prüfkörper die erreichten Messwerte der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,tr}$ in Abhängigkeit von der verwendeten Kornfraktion und für die einzelnen Rohdichteklassen aufgeführt:

Steinrohddichteklasse 1,0:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $\lambda_{10,tr} = 0,217 \text{ bis } 0,223 \text{ W/(mK)}$
- Blähtonsand-Fraktion 0/1 mm: $\lambda_{10,tr} = 0,221 \text{ bis } 0,258 \text{ W/(mK)}$
- Blähtonsand-Fraktion 0/2 mm: $\lambda_{10,tr} = 0,221 \text{ bis } 0,227 \text{ W/(mK)}$

Steinrohddichteklasse 1,1:

- Blähtonsand-Fraktion 0/2 mm: $\lambda_{10,tr} = 0,239 \text{ bis } 0,244 \text{ W/(mK)}$

Steinrohdklasse 1,2:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,272$ bis $0,274$ W/(mK)
- Blähtonsand-Fraktion 0/1 mm: $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,282$ bis $0,323$ W/(mK)

Im Folgenden sind für die **Bimssand**-Prüfkörper die erreichten Messwerte der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ aufgeführt:

Steinrohdklasse 1,1:

- Bimssand-Fraktion 0/5 mm $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,257$ bis $0,259$ W/(mK)

Steinrohdklasse 1,2:

- Bimssand-Fraktion 0/5 mm $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,297$ bis $0,312$ W/(mK)

Der enge Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte der Prüfkörper ist in Bild 12 im Anhang auf der Seite A 16 dargestellt. Die Korrelationsanalyse „über alle Rohstoffe“ hat ein Bestimmtheitsmaß von $r^2=0,85$ ergeben. Für die einzelnen Rohstoffe liegen die jeweiligen Bestimmtheitsmaße mit Werten zwischen $r^2=0,94$ und $0,99$ noch deutlich höher. Die Wärmeleitfähigkeit kann somit in etwa aus der Rohdichte abgeschätzt werden.

4.2.6 Bezugsfeuchtegehalt

Der Bezugsfeuchtegehalt von Baustoffen spielt für die Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Grundsätzlich gilt, dass die Wärmeleitfähigkeit von bindemittelgebundenen Baustoffen mit zunehmendem Feuchtegehalt ansteigt. In der Konsequenz werden im Rahmen dieser Entwicklung für Kalksand-Leichtsteine möglichst geringe Werte des Bezugsfeuchtegehaltes angestrebt.

Im Folgenden sind für die **Blähtonsand**-Prüfkörper die Messwerte des Bezugsfeuchtegehaltes aufgeführt:

- $U_{m,80} = 3,1$ bis $4,2$ M.-%

Bei den aus **Bimssand** hergestellten Prüfkörper liegen die Messwerte auf einem etwas niedrigeren Wertenniveau innerhalb einer Bandbreite von:

- $U_{m,80} = 2,1$ bis $3,1$ M.-%.

Bei beiden Rohstoffgruppen liegen die Messwerte insgesamt innerhalb der im Rahmen von Nachweisen üblicherweise geforderten Grenzwerte.

4.2.7 Wasseraufnahme

Die Bandbreite der Messwerte der Wasseraufnahme der Labor-Prüfkörper aus **Blähtonsand** ist im Folgenden für die einzelnen Rohdichteklassen aufgeführt:

Steinrohdklasse 1,0:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $w = 44,2$ bis $46,5$ M.-%
- Blähtonsand-Fraktion 0/1 mm: $w = 42,1$ bis $50,0$ M.-%
- Blähtonsand-Fraktion 0/2 mm: $w = 31,8$ bis $34,5$ M.-%

Steinrohdklasse 1,1:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $w = 38,4$ M.-%
- Blähtonsand-Fraktion 0/2 mm: $w = 22,4$ bis $30,5$ M.-%

Steinrohdklasse 1,2:

- Blähtonsand-Fraktion 0/0,5 mm: $w = 30,8$ bis $33,1$ M.-%
- Blähtonsand-Fraktion 0/1 mm: $w = 28,5$ bis $36,9$ M.-%

Bei den aus **Bimssand** (Fraktion 0/5 mm) hergestellten Prüfkörper liegt folgende Bandbreite der Messwerte vor:

Steinrohdklasse 1,1:

- Bimssand: $w = 27,7$ bis $32,1$ M.-%

Steinrohdklasse 1,2:

- Bimssand: $w = 25,7$ bis $36,2$ M.-%

4.2.8 Porenradialverteilung

Obwohl insgesamt eine hohe Streuung der Messwerte zu erkennen ist, ist in der Tendenz erkennbar, dass mit steigendem Pressdruck aufgrund der damit einhergehenden dichteren Gefügepackung erwartungsgemäß die mit Quecksilber füllbare Porosität ansteigt. Für die Serien 18-1,2 und 50-1,0 sind die Untersuchungsergebnisse in den Bildern 13 und 14 im Anhang A auf den Seiten A 17 bis A 18 exemplarisch dargestellt.

4.2.9 Chemische und mineralogische Eigenschaften

Differential-Thermo-Analyse

Bei Mauersteinen auf der Bindemittelbasis von Kalk erfolgt die Entwässerung von nicht umgesetztem Ca(OH)_2 erfahrungsgemäß innerhalb eines Temperaturintervalls von $T=400$ bis $600\text{ }^\circ\text{C}$. Bekanntermaßen ist der Kalkgehalt in der Rohmischung dann als zu hoch gewählt anzusehen, wenn in fertigen Kalksandsteinen erhebliche Gehalte an nicht umgesetztem Ca(OH)_2 festgestellt werden. Eine nicht ausreichend lange Härtezeit kann ebenfalls zu einem Freikalkgehalt führen.

Die registrierten Freikalkgehalte liegen sämtlich auf einem sehr niedrigen Wertenniveau. In vier Fällen wird ein maximaler Gehalt von lediglich 0,3 M.-% Ca(OH)_2 ermittelt. Eine wesentliche Überdosierung an Kalk bzw. eine in diesem Zusammenhang zeitlich nicht ausreichende Dampfhärtung wurde in keinem Fall festgestellt.

Für die Serien 18-1,2 und 50-1,2 sind die Untersuchungsergebnisse in den Bildern 15 und 16 im Anhang A auf den Seiten A 19 bis A 20 exemplarisch dargestellt.

Lichtmikroskopische Bemusterung, Rasterelektronenmikroskopie mit EDX-Analyse sowie röntgenographische Phasenanalyse

Im Folgenden sind für die Serien, die unter Ansatz der Standard-Herstellparameter erzeugt wurden, die mineralogischen Untersuchungsergebnisse aufgeführt. Durch die Einbeziehung der Serien 50-1,2 / 50a-1,2 und 50b-1,2 in die mineralogische Untersuchung wurde insbesondere der Einfluss der Dauer der Haltezeit ($t_h = 2/4/6\text{ h}$) auf die Beschaffenheit der Prüfkörper untersucht [8/9/10].

- **Prüfkörper der Serien 18-1,1 und 18-1,2 aus Bimssand:**

Bei den unter Verwendung von Bimssand hergestellten Prüfkörpern ist das um die Bimskörner herum entstandene dreidimensional vernetzte Stützgerüst aus CSH-Phasen unter Zugrundelegung der hier gewählten Herstellparameter im Hinblick auf die hohen Steindruckfestigkeiten zunächst zufriedenstellend ausgebildet. Weitergehende Optimierungsuntersuchungen – insbesondere zur Bedeutung des Pressdrucks – sind hier erforderlich.

Prüfkörper der Serien 34-1,0 und 34-1,2 aus Blähtonsand 0/0,5 mm:

Bei der unteren Rohdichteklasse 1,0 liegt bereits ein zufrieden stellendes Stützgerüst aus CSH-Phasen vor. Wird der Pressdruck jedoch erhöht, so dass Prüfkörper der Rohdichteklasse 1,2 entstehen, lässt sich Folgendes feststellen: Die Ausbildung des Bindemittels in Form kleiner nadeliger Kristallite ist für die gute mechanische Stabilität der Probe verantwortlich. Unter den benutzten Herstellbedingungen ist ein dreidimensional recht gut vernetztes Stützgerüst aus CSH-Phasen entstanden. Die Kristallite sind zwar lediglich feine Nadeln, die gute dreidimensionale Vernetzung um die Blähtonkörner herum scheint jedoch für die mechanischen Eigenschaften wichtiger zu sein, als die Ausbildung größerer lattenförmiger Tobermorit-Kristalle. Da sich die Probe vom Vormuster nur durch den höheren Pressdruck unterscheidet, kommt hier die Bedeutung dieses Parameters beim Einsatz von Blähtonsanden zum Ausdruck.

- **Prüfkörper der Serien 50-1,2 / 50a-1,2 und 50b-1,2 aus Blähtonsand 0/1 mm:**

Zusammenfassend ist sich für die Probe 50-1,2 (Standardhärtezeit: $t_h = 1-4-1$ h) feststellen, dass unter den benutzten Herstellbedingungen ein dreidimensional recht gut vernetztes Stützgerüst aus CSH-Phasen entstanden ist. Die Kristallite sind zwar wieder nur feinste Nadeln, die gute dreidimensionale Vernetzung um die Blähtonkörner herum scheint aber auch hier wieder für die mechanischen Eigenschaften wichtiger zu sein, als die Ausbildung größerer lattenförmiger Tobermorit-Kristalle.

Bei der Probe 50a-1,2 (Härtezeit: $t_h = 1-6-1$ h) scheint die Verlängerung der Haltezeit um 2 Stunden für das Material und die Korngröße nur noch eine geringfügige Verbesserung im Vergleich zum Vormuster zu ergeben.

Bei der Probe 50b-1,2 (Härtezeit: $t_h = 1-2-1$ h) führt die Verkürzung der Haltezeit zu einem qualitativ etwas weniger gut ausgebildeten Stützgerüst aus CSH-Phasen. Zwar findet man die Ausbildung guter Tobermorit-Kristalle in größeren Hohlräumen vor, diese haben jedoch keine relevante Bedeutung für das räumliche CSH-Phasen-Bindemittelnetzwerkes um die Blähtonkörner herum.

Die Beziehungen zwischen der Tobermorit-Kristallqualität in den Hohlräumen, der Ausbildung des CSH-Stützgerüsts und der resultierenden Steindruckfestigkeit können an diesen Proben modellhaft abgelesen werden.

- **Prüfkörper der Serien 58-1,0 und 58-1,2 aus Blähtonsand 0/1 mm:**

Die Interpretation des Musters der Rohdichteklasse 1,0 erfordert weiter gehende Untersuchungen. Bei der Erhöhung des Pressdrucks ist festzustellen, dass unter den benutzten Herstellbedingungen ein dreidimensional gut vernetztes Stützgerüst aus CSH-Phasen entstanden ist.

Prüfkörper der Serien 42-1,0 und 42-1,1 aus Blähtonsand 0/2 mm:

Zusammenfassend lässt sich für diese Proben feststellen, dass hier der Härteprozess in einem Frühstadium stehen geblieben ist. Bei dieser Korngröße scheint ein erhöhter Pressdruck die Kinetik der CSH-Phasenbildung zu verringern. Wie sich längere Härtezeiten auswirken, müssen weitere Untersuchungen klären.

Insgesamt ist für die Blähtonsande festzuhalten, dass die Beziehungen zwischen der Korngrößenverteilung, dem Pressdruck und der Steindruckfestigkeit tiefer gehend und auch mineralogisch systematisch untersucht werden sollten. Die bisherigen Ergebnisse weisen auf eine Zunahme der Steindruckfestigkeit bei hohem Pressdruck und abnehmender Korngröße hin.

In den Bildern 26 bis 31 im Anhang A auf den Seiten A 26 bis A 28 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Hauptserien exemplarisch abgebildet.

4.2.10 Eluatanalyse gemäß DEV-S4-Verfahren

Die Ergebnisse der Eluatanalyse sind in der folgenden Tabelle 11 aufgeführt.

Leicht- zuschlag	pH-Wert	Chlorid	Sulfat	Blei	Cad- mium	Chrom, ges.	Nickel
	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Blähtonsand 0/1 Probe 1	12	<10	95	<0,1	<0,02	<0,03	<0,1
Blähtonsand 0/1 Probe 2	12	<10	270	<0,1	<0,02	<0,03	<0,1
Blähtonsand 0/2	12	<10	125	<0,1	<0,02	<0,03	<0,1
Bimssand 0/5	12,5	20	<40	<0,1	<0,02	<0,03	<0,1
Lavasand	12,5	<10	<40	<0,1	<0,02	<0,03	<0,1

Tabelle 11: Ergebnisse der Eluatanalysen nach DEV-S4 (Spektralphotometrie)

Die Analysen ergaben, dass von den exemplarisch untersuchten Schwermetallen Blei, Cadmium, Chrom und Nickel in keinem Fall die Bestimmungsgrenze überschritten wurde. Aus ökologischer Sicht sind mit großer Sicherheit keine Einschränkungen für die Verwendbarkeit der untersuchten Rohstoffe bei der KS-Produktion zu verzeichnen und auch nicht zu erwarten.

4.3 Werksversuche

Die Festigkeitskennwerte der Prüfkörper aus den Werksversuchen befinden sich insgesamt auf einem hohen Niveau. In Abhängigkeit von der jeweiligen Ziel-Rohdichte werden Steindruckfestigkeiten in Höhe von $\beta_{D,St} = 11,7$ bis zu maximal $24,9 \text{ N/mm}^2$ festgestellt.

Die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit liegen, ebenfalls in Abhängigkeit von der Ziel-Rohdichte, zwischen $\lambda_{10,tr} = 0,229$ bis $0,308 \text{ W/(mK)}$ in der gleichen Größenordnung wie die Messwerte der unter Laborbedingungen hergestellten Prüfkörper.

Die Bezugsfeuchtegehalte befinden sich mit Messwerten von $u_{m,80} = 3,0$ bis $3,3 \text{ M.-%}$ durchweg auf einem niedrigen und damit günstigen Wertenniveau.

Gehalte an nicht umgesetztem Kalk wurden in keinem Fall festgestellt, so dass davon auszugehen ist, dass die Rezeptur und die angesetzten Härteparameter im Hinblick auf die vollständige Umsetzung der in der Rohmischung befindlichen Kalkmenge als ausreichend angesehen werden können.

Die Werksversuche bestätigen insofern die Laboruntersuchungen in vollem Umfang. Die Anforderungen der DIN 106 sind erfüllt.

Die Untersuchungsergebnisse zu den Werksversuchen sind in der Tabelle 21 im Anhang A auf der Seite A 10 zusammengestellt.

5 FAZIT

Die Untersuchungen haben gezeigt, in welcher Weise die Eigenschaftswerte der Prüfkörper von den vorgewählten Herstellparametern abhängen. Die Hauptergebnisse sind im Folgenden zusammenfassend aufgeführt:

- Die Herstellung solider Kalksand-Leichtsteine mit einer hohen Steindruckfestigkeit und einer geringen Wärmeleitfähigkeit ist unter Verwendung verschiedener Leichtzuschläge (z. B.: Bims-, Blähtonsand) und unter strenger Beachtung spezifischer Herstellparameter (Kalkdosis, Verdichtungsdruck, Pressfeuchte, Härteparameter,...) technisch möglich.
- Unter Verwendung von Bimssand werden Steindruckfestigkeiten von bis zu rd. 12 N/mm^2 erreicht. Bei Einsatz von Blähtonsanden werden in mehreren Fällen Steindruckfestigkeiten von bis zu rd. 30 N/mm^2 erzielt.
- Zwischen den einzelnen Blähtonsorten sind bezüglich der angestrebten Forschungsziele keine gravierenden Unterschiede erkennbar. Bei den Blähtonsanden haben sich bezüglich der Steindruckfestigkeit als Haupteinflussgrößen die CaO-Dosis und die Korngrößenverteilung herausgestellt.
- Bezüglich der Steindruckfestigkeit der Laborprüfkörper liegt die optimale CaO-Dosis bei 12 M.-%.
- Bei der feinsten Kornfraktion (0/0,5 mm) werden die höchsten Steindruckfestigkeiten von bis über 30 N/mm^2 festgestellt. Die bisher vorliegenden Ergebnisse weisen auf eine Zunahme der Steindruckfestigkeit bei hohem Pressdruck und abnehmender Korngröße hin.
- In Abhängigkeit von der Steinrohddichte ($1,0$ bis $1,2 \text{ kg/m}^3$) werden Messwerte der Wärmeleitfähigkeit in einer Bandbreite von rd. $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,22$ bis $0,32 \text{ W/(mK)}$ festgestellt.
- Insgesamt ist festzuhalten, dass die Beziehungen zwischen der Korngrößenverteilung der Leichtzuschläge, dem Pressdruck und der Steindruckfestigkeit tiefer gehend und auch mineralogisch weiter untersucht werden sollten.
- Die Laborerkenntnisse wurden durch die Werksversuche in vollem Umfang bestätigt.
- Mit Anschlussuntersuchungen sollten weitere Leichtzuschläge erprobt werden.

Obwohl bei diesem Forschungsvorhaben die Wirkung zahlreicher Einflussgrößen auf die Eigenschaftswerte der Kalksandsteinprüfkörper (Porosität, Verformungen, mechanische Eigenschaften) bereits schlüssig erklärt werden kann, sind dennoch einige Fragen offen geblieben. Die hier gewonnenen Erkenntnisse bedürfen weitergehender Forschung und Praxiserfahrungen, um die Technologie der Kalksand-Leichtstein-Produktion noch fundierter beurteilen zu können. Insbesondere sollte die Suche nach weiteren geeigneten Leichtzuschlägen fortgesetzt werden.

6 LITERATUR

- [1] GUNDLACH, H.: Dampfgehärtete Baustoffe, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1973
- [2] LORENZ, W.; GWOSZD, W.: Bewertungskriterien für Industriemineraie, Steine und Erden, Teil 4: Vulkanische Gesteine und Leichtzuschläge, Geologisches Jahrbuch Reihe H, Heft 7, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 2000
- [3] EDEN, W.: Handbuch zur Herstellung von Kalksandsteinen, 2. Auflage, Bundesverband Kalksandsteinindustrie, Hannover, 1998
- [4] MÖRTEL, H.: Art und Entstehung der Bindephasen in dampfgehärteten Kalzium-Silikat-Baustoffen, Forschungsvorhaben MO 256/1, Bericht aus dem Institut für Werkstoffwissenschaften der Universität Erlangen-Nürnberg, 1977
- [5] MACKENZIE, R.C.; MITCHELL, B.D.: Section A4 in Differential Thermal Analysis, Vol.1, S. 101-120, London-New York, 1970
- [6] SAUMANN, Z.: Der Einfluss langfristiger Karbonisation auf den Charakter der Hauptbindungsphasen von dampfgehärteten Baustoffen, Vortrag 1.1.19.4, Ibausil, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 18. Jahrgang, Heft 3/4, 1971
- [7] KLIPPEL, H.; LUDWIG, U.: Über den Einfluss der gebildeten Calciumhydroxilicate auf die Festigkeit von Kalk-Sand-Produkten, RWTH Aachen, Lehrgebiet für Bindemittel, 1973
- [8] BUHL, J.-CH.: Untersuchungsbericht über die Eigenschaften der Rohstoffmaterialien, Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Institut für Mineralogie, Hannover, 08.12.2000
- [9] BUHL, J.-CH.: Untersuchungsbericht über die Eigenschaften der Kalksandstein-Laborprüfkörper, Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Institut für Mineralogie, Hannover, 18.07.2001
- [10] BUHL, J.-CH.: Untersuchungsbericht über die Eigenschaften der Prüfkörper der Werksversuche, Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie, Institut für Mineralogie, Hannover, 07.10.2001

Tabelle 12: Ergebnisse der Sandanalyse

Probe	Bimssand 0/5 mm	
Sandfarbe	hellbeige	
Statist. mittl. Korndurchmesser	1,17 mm	
Schüttdichte, trocken	0,93 / 1,05 kg/dm ³	
Spezifische Oberfläche	757 cm ² /g	
Abschlammbares	10,5 Vol.-%	
Humussäure (Farbe)	farblos	
Siebanalyse (DIN 4188)	R M.-%	Summe R M.-%
> 35,5 mm	-	-
> 20 mm	-	-
> 11,2 mm	-	-
> 6,3 mm	-	-
> 3,55 mm	8,8	8,8
> 2 mm	20,4	29,2
> 1,12 mm	18,0	47,2
> 0,63 mm	11,6	58,8
> 0,355 mm	9,4	68,2
> 0,2 mm	7,6	75,8
> 0,112 mm	5,5	81,3
> 0,063 mm	4,6	85,9
> 0,036 mm	5,2	91,1
£ 0,036 mm	8,9	100,0

Bild 1: Korngrößenverteilung des Bimssandes

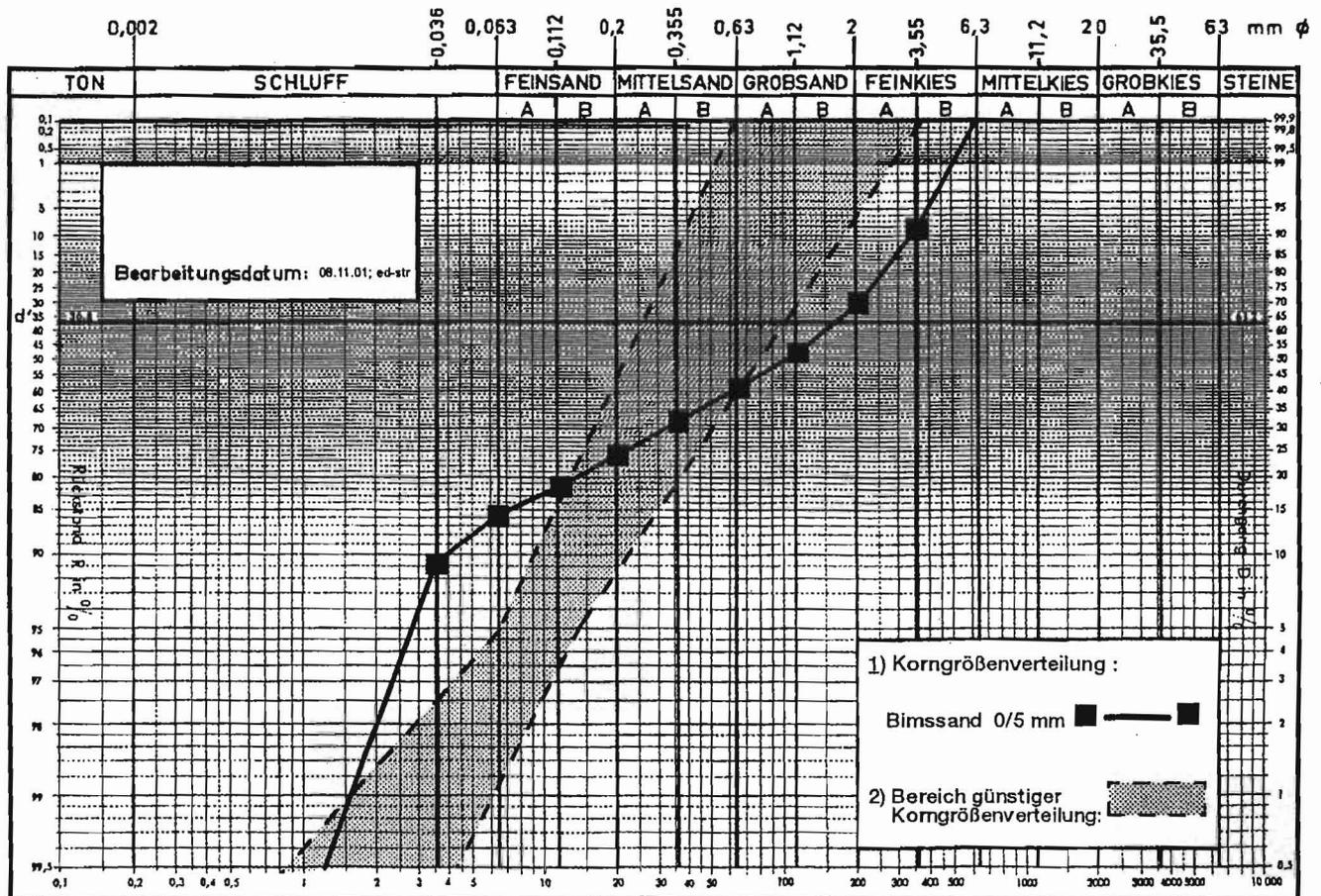


Tabelle 13: Ergebnisse der Sandanalysen

Probe	Blähtonsand Fraktion 0/0,5 mm		Blähtonsand Fraktion 0/2 mm	
	Sandfarbe	dunkelbraun		dunkelbraun
Statist. mittl. Korndurchmesse	0,15 mm		1,12 mm	
Schüttdichte, trocken	0,59 / 0,77 kg/dm ³		0,50/ 0,59 kg/dm ³	
Spezifische Oberfläche	1079 cm ² /g		1204 cm ² /g	
Abschlämbbares	5,3 Vol.-%		5,7 Vol.-%	
Humussäure (Farbe)	hellgelb		mittelgelb	
Siebanalyse (DIN 4188)	R M.-%	Summe R M.-%	R M.-%	Summe R M.-%
> 35,5 mm	-	-	-	-
> 20 mm	-	-	-	-
> 11,2 mm	-	-	-	-
> 6,3 mm	-	-	-	-
> 3,55 mm	-	-	-	-
> 2 mm	-	-	13,2	13,2
> 1,12 mm	0,2	0,2	21,6	34,8
> 0,63 mm	0,1	0,3	11,0	45,8
> 0,355 mm	8,3	8,6	11,6	57,4
> 0,2 mm	17,7	26,3	11,1	68,5
> 0,112 mm	19,4	45,7	10,7	79,2
> 0,063 mm	18,8	64,5	9,2	88,4
> 0,036 mm	16,6	81,1	5,4	93,8
£ 0,036 mm	18,9	100,0	6,2	100,0

Bild 2: Korngrößenverteilung der Blähtonsande

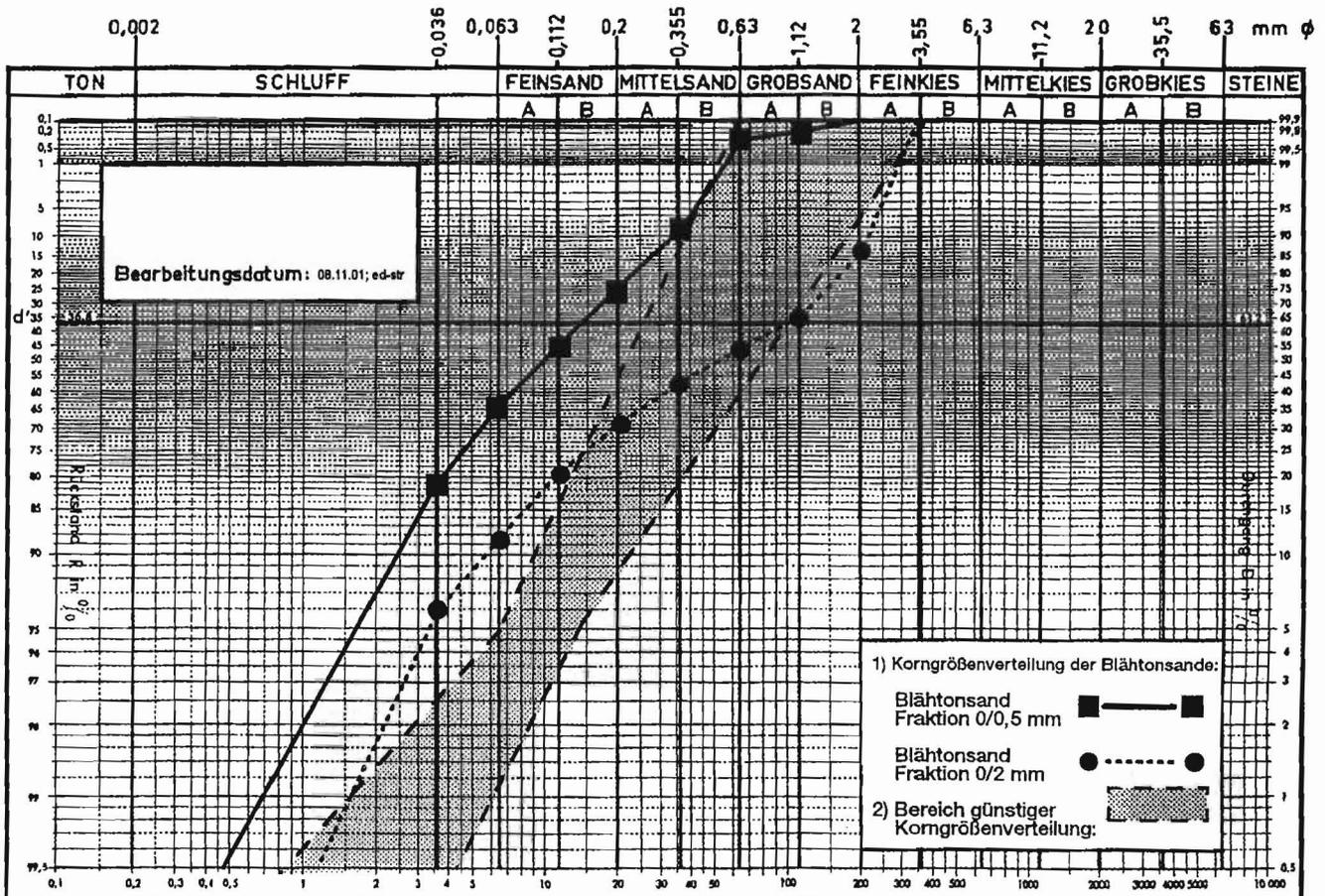


Tabelle 14: Ergebnisse der Sandanalysen

Probe	Blähtonsand Fraktion 0/1 mm, Probe 1		Blähtonsand Fraktion 0/1 mm, Probe 2	
Sandfarbe	dunkelbraun		dunkelbraun	
Statist. mittl. Korndurchmesse	0,20 mm		0,55 mm	
Schüttdichte, trocken	0,73 / 0,90 kg/dm ³		0,58/ 0,71 kg/dm ³	
Spezifische Oberfläche	1590 cm ² /g		694 cm ² /g	
Abschlammbares	12,0 Vol.-%		3,5 Vol.-%	
Humussäure (Farbe)	farblos		farblos	
Siebanalyse (DIN 4188)	R M.-%	Summe R M.-%	R M.-%	Summe R M.-%
> 35,5 mm	-	-	-	-
> 20 mm	-	-	-	-
> 11,2 mm	-	-	-	-
> 6,3 mm	-	-	-	-
> 3,55 mm	-	-	-	-
> 2 mm	-	-	-	-
> 1,12 mm	-	-	7,6	7,6
> 0,63 mm	7,4	7,4	24,3	31,9
> 0,355 mm	16,5	23,9	21,5	53,4
> 0,2 mm	14,6	38,5	17,2	70,6
> 0,112 mm	13,3	51,8	12,3	82,9
> 0,063 mm	13,9	65,7	9,1	92,0
> 0,036 mm	16,2	81,9	4,6	96,6
∑ 0,036 mm	18,1	100,0	3,4	100,0

Bild 3: Korngrößenverteilung der Blähtonsande

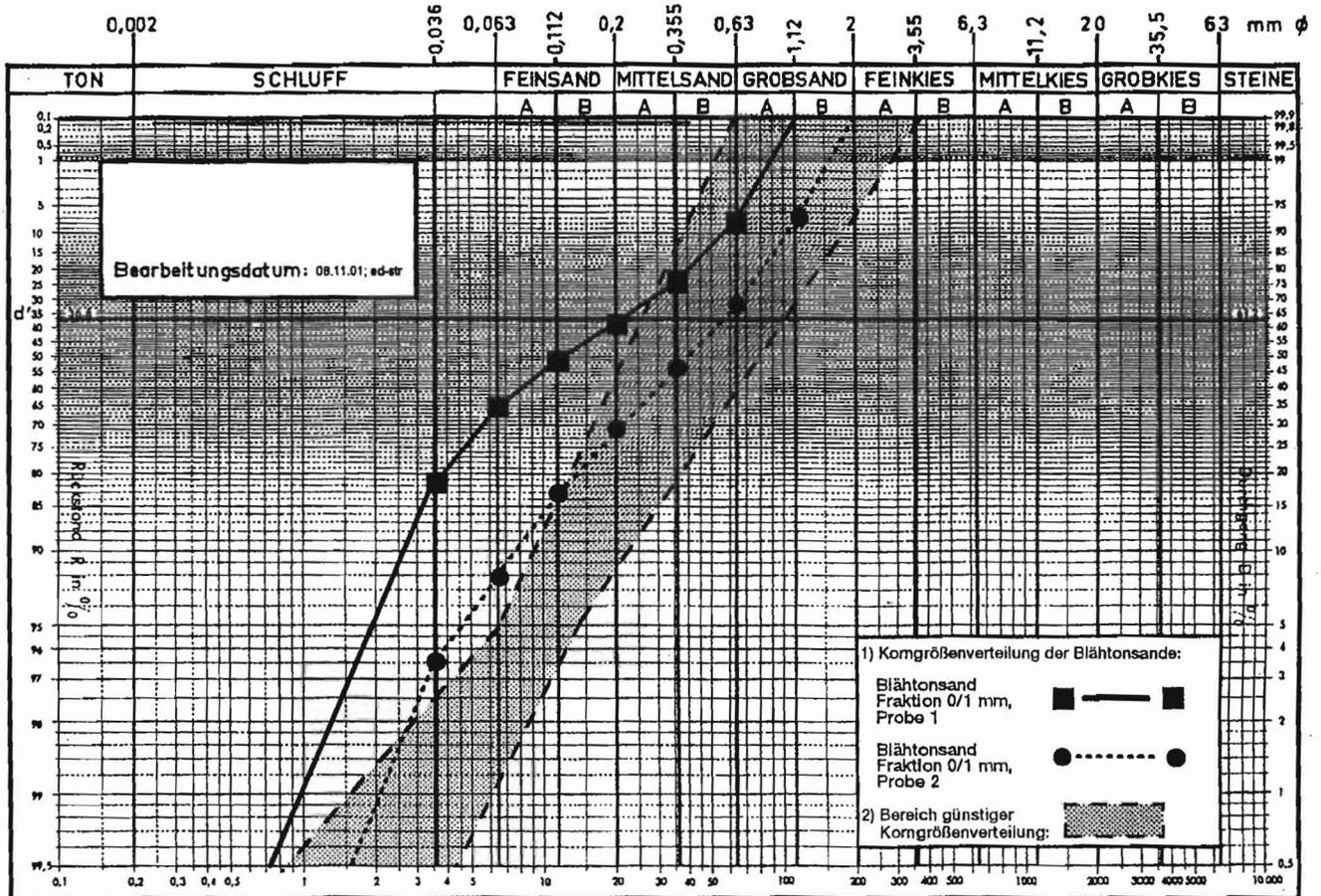


Tabelle 15: KS-Prüfkörper aus Bimssand 0/5 mm

Serie	HERSTELLPARAMETER						UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE												
	Menge an Leichtzuschlag	Kalkdosis CaO	Pressfeuchte F _p	Pressdruck σ _p	Härte- druck P _e	Härte- dauer t _h	Steindruck- festigkeit β _{D,St}	Steinroh- dichte ρ _{tr}	Steinbiege- zugfestig- keit β _{BZ,St}	Anzahl Frost-Tau- Wechsel n	Wärmeleit- fähigkeit λ _{10,lr}	Bezugs- feuchte- gehalt U _{m,80}	Wasser- aufnahme w	Freikalk Ca(OH) ₂	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität cm ³ /g
															Porenradius r [m]				
															r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	r ≥ 10 ⁻⁵	
M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(mK)	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%		
17-1,1	92	8	10	4,0	16	1-4-1	7,6	1,09	1,8	23	-	-	32,1	-	-	-	-	-	-
17-1,2	92	8	10	9,0	16	1-4-1	11,6	1,19	2,5	48	-	-	27,5	0,0	-	-	-	-	-
18-1,1	90	10	10	3,0	16	1-4-1	7,6	1,09	1,8	23	0,259	2,6	32,1	0,0	17,14	14,12	29,00	34,74	0,4082
18-1,2	90	10	10	7,0	16	1-4-1	11,8	1,19	2,4	39	0,298	3,1	27,9	0,2	15,36	17,08	24,95	42,61	0,3784
19-1,1	88	12	10	4,0	16	1-4-1	7,4	1,10	1,8	11	-	-	30,4	-	-	-	-	-	-
19-1,2	88	12	10	8,0	16	1-4-1	12,0	1,19	2,5	23	-	-	36,2	0,2	-	-	-	-	-
20-1,1	86	14	10	3,5	16	1-4-1	7,6	1,09	2,0	11	-	-	31,4	-	-	-	-	-	-
20-1,2	86	14	10	8,0	16	1-4-1	12,2	1,19	2,8	23	0,312	2,9	27,1	0,3	12,23	17,36	28,40	42,01	0,3554
21-1,1	90	10	15	3,5	16	1-4-1	6,2	1,09	1,5	5	-	-	27,7	-	-	-	-	-	-
21-1,2	90	10	15	7,0	16	1-4-1	9,4	1,19	2,1	8	-	-	25,7	-	-	-	-	-	-
22-1,1	90	10	12	2,8	16	1-4-1	6,2	1,09	1,5	8	-	-	28,4	-	-	-	-	-	-
22-1,2	90	10	12	7,0	16	1-4-1	10,2	1,18	2,3	11	-	-	25,8	-	-	-	-	-	-
23-1,1	90	10	10	3,0	12	1-4-1	7,0	1,10	1,4	15	0,257	2,1	29,7	0,1	14,86	17,34	23,87	43,92	0,3378
23-1,2	90	10	10	7,8	12	1-4-1	10,6	1,19	2,2	25	0,297	2,4	26,1	0,0	13,11	15,17	27,72	44,01	0,3557
24-1,1	90	10	10	3,0	16	1-4-1	8,0	1,09	2,0	18	-	-	31,9	-	-	-	-	-	-
24-1,2	90	10	10	8,5	16	1-6-1	12,4	1,19	2,6	zerstört	-	-	27,6	-	-	-	-	-	-

Tabelle 16: KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm

Serie	HERSTELLPARAMETER						UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE													
	Menge an Leichtzuschlag	Kalkdosis CaO	Pressfeuchte F _p	Pressdruck σ _p	Härte- druck P _e	Härte- dauer t _h	Steindruck- festigkeit β _{0,st}	Steinroh- dichte ρ _{tr}	Steinbiege- zugfestig- keit β _{BZ,st}	Anzahl Frost-Tau- Wechsel n	Wärmeleit- fähigkeit λ _{10,tr}	Bezugs- feuchte- gehalt U _{m,80}	Wasser- aufnahme w	Freikalk Ca(OH) ₂	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität cm ³ /g	
															Porenradius r [m]					
															r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	r ≥ 10 ⁻⁵		
M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(m·K)	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	cm ³ /g		
33-1,0	92	8	10	9,0	16	1-4-1	13,6	1,02	3,4	50 *)	-	-	44,5	-	-	-	-	-	-	
33-1,2	92	8	10	26,0	16	1-4-1	23,0	1,20	6,5	50	-	-	32,3	-	-	-	-	-	-	
34-1,0	90	10	10	8,0	16	1-4-1	16,0	1,02	4,4	50	0,217	3,6	44,9	0,0	1,6	14,64	22,53	61,18	0,5224	
34-1,2	90	10	10	24,0	16	1-4-1	28,0	1,20	7,7	50	0,274	3,8	32,4	0,0	1,7	14,34	26,10	57,90	0,2330	
35-1,0	88	12	10	8,0	16	1-4-1	19,4	1,02	4,7	50	0,223	-	44,6	-	-	-	-	-	-	
35-1,2	88	12	10	22,0	16	1-4-1	31,4	1,20	8,9	50	0,272	-	32,4	-	-	-	-	-	-	
36-1,0	86	14	10	7,0	16	1-4-1	17,0	1,02	4,5	50	-	-	46,2	-	-	-	-	-	-	
36-1,2	86	14	10	21,0	16	1-4-1	29,2	1,20	7,8	50	-	-	33,1	-	-	-	-	-	-	
37-1,0	90	10	15	7,8	16	1-4-1	16,6	1,00	4,6	25	0,219	-	46,5	0,0	-	-	-	-	-	
37-1,2	90	10	15	24,2	16	1-4-1	27,2	1,18	6,6	25	0,274	-	30,8	0,0	-	-	-	-	-	
39-1,0	90	10	10	10,6	12	1-4-1	14,2	1,02	3,7	50 *)	0,217	3,8	45,0	0,0	1,9	19,70	26,21	52,23	0,4818	
39-1,1	90	10	10	16,8	12	1-4-1	19,8	1,10	5,3	50	0,241	-	38,4	0,0	2,0	14,38	24,30	59,34	0,4762	
39-1,2	90	10	10	26,0	12	1-4-1	24,0	1,18	5,8	50	0,272	4,2	32,3	0,2	1,0	13,02	29,96	55,99	0,3953	
40-1,0	90	10	10	9,8	16	1-6-1	18,0	1,01	4,8	50	-	-	44,5	0,0	-	-	-	-	-	
40-1,2	90	10	10	26,0	16	1-6-1	27,6	1,18	7,1	50	-	-	31,9	-	-	-	-	-	-	

*) leichte Kantenaplutzungen

projekte\99-10\End-ber-11-2001\A4-A9tab15-20.xls; 08.11.2001 ed-str

Tabelle 17: KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1

Serie	HERSTELLPARAMETER						UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE												
	Menge an Leicht- zuschlag	Kalk- dosis CaO	Press- feuchte F _p	Press- druck σ _p	Härte- druck P _e	Härte- dauer t _h	Steindruck- festigkeit β _{D,St}	Steinroh- dichte P _{tr}	Steinblege- zugfestig- keit β _{BZ,St}	Anzahl Frost-Tau- Wechsel n	Wärmeleit- fähigkeit λ _{10,Tr}	Bezugs- feuchte- gehalt U _{m,80}	Wasser- aufnahme w	Freikalk Ca(OH) ₂	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität cm ³ /g
															Porenradius r [m]				
															r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	r ≥ 10 ⁻⁵	
M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(m·K)	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%		
49-1,0	92	8	10	4,0	16	1-4-1	11,6	1,03	2,8	8	-	-	48,5	-	-	-	-	-	-
49-1,2	92	8	10	16,0	16	1-4-1	24,2	1,20	5,2	50	-	-	32,8	-	-	-	-	-	-
50-1,0	90	10	10	3,5	16	1-4-1	13,4	1,02	3,1	11	0,225	3,1	48,7	0,0	5,44	29,23	20,63	44,70	0,5521
50-1,2	90	10	10	14,5	16	1-4-1	26,8	1,20	5,6	50	0,290	3,3	33,1	0,0	2,67	15,62	28,95	52,76	0,4210
50a-1,0	90	10	10	3,5	16	1-6-1	13,6	1,02	3,2	8	0,225	-	49,3	0,0	-	-	-	-	-
50a-1,2	90	10	10	14,5	16	1-6-1	28,0	1,19	6,4	50	0,294	-	32,9	0,0	-	-	-	-	-
50b-1,0	90	10	10	3,8	16	1-2-1	11,0	1,03	2,3	15	0,223	-	48,8	0,0	29,27	17,80	13,29	39,63	0,5271
50b-1,2	90	10	10	13,0	16	1-2-1	22,4	1,20	4,8	50	0,282	-	34,7	0,0	-	-	-	-	-
51-1,0	88	12	10	3,4	16	1-4-1	14,6	1,03	3,1	11	0,229	-	49,4	-	-	-	-	-	-
51-1,2	88	12	10	13,0	16	1-4-1	29,6	1,20	5,4	50	0,291	-	34,2	-	-	-	-	-	-
51a-1,0	88	12	10	3,4	16	1-6-1	13,4	1,02	3,3	39	-	-	49,1	-	-	-	-	-	-
51a-1,2	88	12	10	17,0	16	1-6-1	28,6	1,19	6,2	50	-	-	33,5	-	-	-	-	-	-
51b-1,0	88	12	10	3,7	16	1-2-1	11,2	1,02	2,8	50 *)	-	-	50,0	-	-	-	-	-	-
51b-1,2	88	12	10	12,0	16	1-2-1	23,6	1,20	5,6	50	-	-	35,3	-	-	-	-	-	-
52-1,0	86	14	10	2,5	16	1-4-1	11,8	1,02	3,1	< 25	-	-	49,0	-	-	-	-	-	-
52-1,2	86	14	10	11,0	16	1-4-1	27,4	1,19	7,1	50	-	-	35,6	-	-	-	-	-	-
52a-1,0	86	14	10	2,5	16	1-6-1	13,2	1,01	3,5	25	-	-	48,8	-	-	-	-	-	-
52a-1,2	86	14	10	11,0	16	1-6-1	27,8	1,19	6,3	25	-	-	33,3	-	-	-	-	-	-
53-1,0	90	10	15	2,2	16	1-4-1	9,6	1,01	2,6	25	-	-	50,0	-	-	-	-	-	-
53-1,2	90	10	15	8,8	16	1-4-1	24,0	1,19	5,6	50	-	-	36,9	-	-	-	-	-	-
55-1,0	90	10	10	3,2	12	1-4-1	9,4	1,02	1,8	15	0,221	3,3	48,6	0,0	23,15	23,60	16,94	36,31	0,5220
55-1,2	90	10	10	13,0	12	1-4-1	21,6	1,20	5,3	50	0,285	3,8	33,7	0,0	2,08	16,42	28,11	53,40	0,4141

*) leichte Kantenapplatzungen

\\projekte\99-10\End-ber-11-2001\A4-A9tab15-20.xls; 08.11.2001 ed-str

Tabelle 18: KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 2

Serie	HERSTELLPARAMETER						UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE												
	Menge an Leichtzuschlag	Kalkdosis CaO	Pressfeuchte F _p	Pressdruck σ _p	Härte druck P _e	Härte dauer t _h	Steindruckfestigkeit β _{D,St}	Steinroh-dichte P _{tr}	Steinbiegezugfestigkeit β _{BZ,St}	Anzahl Frost-Tau-Wechsel n	Wärmeleitfähigkeit λ _{10,tr}	Bezugsfeuchtegehalt U _{m,80}	Wasser-aufnahme w	Freikalk Ca(OH) ₂	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität cm ³ /g
															Porenradius r [m]				
															r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	r ≥ 10 ⁻⁵	
M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(m·K)	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	cm ³ /g	
57-1,0	92	8	10	8,5	16	1-4-1	13,0	1,02	3,2	23	-	-	42,1	-	-	-	-	-	-
57-1,2	92	8	10	24,0	16	1-4-1	21,0	1,20	5,2	50	-	-	28,5	-	-	-	-	-	-
58-1,0	90	10	10	8,5	16	1-4-1	14,4	1,02	3,1	39	0,258	3,4	43,0	0,3	31,93	17,67	12,16	38,25	0,4654
58-1,2	90	10	10	22,0	16	1-4-1	22,0	1,19	5,5	50	0,317	3,4	31,1	0,3	5,68	22,92	22,31	49,09	0,3786
59-1,0	88	12	10	7,5	16	1-4-1	15,0	1,02	3,7	50	0,257	-	43,9	-	-	-	-	-	-
59-1,2	88	12	10	20,5	16	1-4-1	23,4	1,19	5,5	50	0,323	-	31,0	-	-	-	-	-	-
60-1,0	86	14	10	7,0	16	1-4-1	14,0	1,02	3,1	50	-	-	45,0	-	-	-	-	-	-
60-1,2	86	14	10	18,0	16	1-4-1	23,8	1,20	5,0	50	-	-	31,0	-	-	-	-	-	-

Tabelle 19: KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm

Serie	HERSTELLPARAMETER						UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE												
	Menge an Leichtzuschlag	Kalkdosis CaO	Pressfeuchte F _p	Pressdruck σ _p	Härte druck P _e	Härte dauer t _h	Steindruckfestigkeit β _{D,St}	Steinroh-dichte ρ _{tr}	Steinbiegezugfestigkeit β _{BZ,St}	Anzahl Frost-Tau-Wechsel n	Wärmeleitfähigkeit λ _{10,lr}	Bezugsfeuchtegehalt U _{m,80}	Wasser-aufnahme w	Freikalk Ca(OH) ₂	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität
															Porenradius r [m]				
															r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	r ≥ 10 ⁻⁵	
M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(mK)	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	cm ³ /g	
41-1,0	92	8	10	16,0	16	1-4-1	12,6	1,02	3,3	50	-	-	32,3	-	-	-	-	-	-
41-1,1	92	8	10	21,5	16	1-4-1	14,2	1,10	3,9	50	-	-	29,3	-	-	-	-	-	-
42-1,0	90	10	10	16,0	16	1-4-1	13,2	1,02	3,5	50	0,227	3,3	31,8	0,0	7,11	20,83	23,31	48,76	0,4523
42-1,1	90	10	10	22,0	16	1-4-1	13,4	1,10	3,6	50	0,244	3,4	29,1	0,0	4,82	16,37	23,76	55,06	0,4383
43-1,0	88	12	10	17,0	16	1-4-1	10,0	1,02	3,3	50	0,226	-	31,8	-	-	-	-	-	-
43-1,1	88	12	10	23,0	16	1-4-1	9,8	1,09	3,5	50	0,242	-	22,4	-	-	-	-	-	-
44-1,0	86	14	10	14,0	16	1-4-1	13,0	1,02	3,2	50	-	-	33,1	-	-	-	-	-	-
44-1,1	86	14	10	18,0	16	1-4-1	13,2	1,10	3,7	50	-	-	28,4	-	-	-	-	-	-
45-1,0	90	10	15	16,4	16	1-4-1	10,4	1,00	3,7	50	0,221	-	34,5	-	-	-	-	-	-
45-1,1	90	10	15	24,5	16	1-4-1	10,4	1,10	3,8	50	0,239	-	28,2	-	-	-	-	-	-
47-1,0	90	10	10	15,6	12	1-4-1	9,6	1,01	3,3	50	0,221	3,7	34,1	0,3	3,57	13,69	17,02	65,71	0,5433
47-1,1	90	10	10	22,0	12	1-4-1	9,8	1,08	3,4	50	0,240	4,0	30,5	0,2	3,23	14,77	24,96	57,05	0,4806
48-1,0	90	10	10	17,0	16	1-6-1	9,6	1,00	3,5	50	-	-	33,3	0,0	-	-	-	-	-
48-1,1	90	10	10	24,0	16	1-6-1	9,4	1,09	3,7	50	-	-	23,6	-	-	-	-	-	-

Tabelle 20: KS-Prüfkörper aus Mischungen der Leichtzuschläge

Serie	HERSTELLPARAMETER									UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE												
	Menge an Leichtzuschlag				Kalk- dosis	Press- feuchte	Press- druck	Härte- druck	Härte- dauer	Steindruck- festigkeit	Steinroh- dichte	Steinblege- zugfestig- keit	Anzahl Frost-Tau- Wechsel	Wärmeleit- fähigkeit	Bezugs- feuchte- gehalt	Wasser- aufnahme	Freikalk	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität
	Bims- sand	Blähton- sand	Blähton- sand	Blähton- sand														CaO	F _p	σ _p	D _e	
	¹⁾ Lava 0/5 mm	Fraktion 0/0,5 mm	Fraktion 0/2 mm	Fraktion 0/1 mm	r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	r ≥ 10 ⁻⁵														
M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(m·K)	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	cm ³ /g
100-1,0	-	20	-	70	10	10	4,8	16	1-4-1	13,6	1,02	3,5	zerstört	0,223	3,3	47,9	0,0	-	-	-	-	-
100-1,2	-	20	-	70	10	10	15,3	16	1-4-1	26,8	1,19	6,1	50	0,285	3,6	32,9	0,0	1,52	15,50	24,32	58,66	0,4014
101-1,0	-	45	-	45	10	10	6,8	16	1-4-1	15,4	1,02	3,6	50	0,218	3,7	46,5	0,0	2,79	23,54	20,47	53,20	0,5017
101-1,2	-	45	-	45	10	10	19,5	16	1-4-1	28,2	1,20	6,5	50	0,285	4,0	32,3	0,0	-	-	-	-	-
102-1,0	45	45	-	-	10	10	4,2	16	1-4-1	13,8	1,02	3,1	50*)	0,228	3,7	43,1	0,0	12,04	23,93	17,27	46,75	0,5058
102-1,2	45	45	-	-	10	10	16,5	16	1-4-1	23,2	1,19	4,8	50	0,284	4,1	28,9	0,0	2,74	24,63	16,92	55,72	0,3583
103-0,8	-	-	90	-	10	10	6,0	16	1-4-1	9,0	0,81	2,2	50*)	0,175	-	51,8	0,0	-	-	-	-	-
103-0,9	-	-	90	-	10	10	9,8	16	1-4-1	10,4	0,89	2,9	50	0,197	-	41,0	0,0	-	-	-	-	-
104-1,0	-	45	45	-	10	10	13,0	16	1-4-1	14,2	1,01	4,1	50	0,223	-	36,7	0,0	-	-	-	-	-
104-1,1	-	45	45	-	10	10	20,8	16	1-4-1	15,0	1,09	4,8	50	0,240	-	32,2	0,0	-	-	-	-	-
120	¹⁾ 92	-	-	-	8	15	8	16	1-4-1	23,0	1,97	-	-	0,626	9,5	-	-	-	-	-	-	-

*) Ecken- und Kantenablösung

Tabelle 21: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse der Werksversuche

Serie	HERSTELLPARAMETER							UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE												
	Prüfkörper- bezeichnung	Menge an Leicht- zuschlag	Kalk- dosis	Press- feuchte	Pressdruck	Härte- druck	Härte- dauer	Steindruck- festigkeit	Steinroh- dichte	Steinbiege- zug- festigkeit	Anzahl Frost-Tau- Wechsel	Wärmeleit- fähigkeit	Bezugs- feuchte- gehalt	Wasser- aufnahme	Freikalk- gehalt	POROSITÄTSKENNWERTE				Hg-füllbare Porosität
			CaO	F _p	σ _p	P _e	t _h	β _{0,SR}	ρ _v	β _{2,SR}	n	λ _{10,SR}	U _{m,60}	w	Ca(OH) ₂	Porenradius r [m]				
			M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	W/(m·K)	M.-%	M.-%	M.-%	r < 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ≤ r < 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ ≤ r < 10 ⁻⁵	
50-1,2	1a 2DF	90	10	10	14,4	15,4	1,5-2-6	22,2	1,21	4,0	25	0,293	3,0	35,0	0,0	62,91	20,19	15,80	1,10	0,3439
50-1,2	1b l = 498	90	10	10	15,3	15,4	1,5-5-6	23,9	1,20	4,5	50	0,305	3,2	32,6	0,0	55,63	23,45	19,97	0,95	0,4149
50a-1,0	2a 2DF	90	10	10	3,9	15,4	1,5-2-6	11,7	1,05	2,9	15	0,229	3,1	48,1	0,0	47,80	9,56	25,53	17,11	0,5152
50a-1,0	2b l = 498	90	10	10	6,1	15,4	1,5-5-6	15,5	1,10	3,3	15	0,275	3,0	41,2	0,0	55,90	9,90	32,17	2,03	0,4505
50a-1,2	3a 2DF	90	10	10	14,1	15,4	1,5-2-6	23,1	1,21	5,8	50	0,295	3,1	34,5	0,0	60,21	23,50	15,44	0,85	0,3700
50a-1,2	3b l = 498	90	10	10	14,7	15,4	1,5-5-6	24,9	1,17	4,6	50	0,308	3,2	34,0	0,0	56,25	25,37	17,65	0,73	0,3303
51 -1,2	4a 2DF	88	12	10	13,5	15,4	1,5-2-6	22,1	1,19	4,9	50	0,285	3,2	35,9	0,0	67,49	19,24	12,39	0,88	0,4237
51 -1,2	4b l = 498	88	12	10	13,1	15,4	1,5-5-6	23,1	1,15	4,2	50	0,293	3,3	35,4	0,0	62,97	20,94	15,17	0,92	0,4047

\\projekte\99-10\End-ber-11-2001\A10-tab21.xls; 22.11.2001 ed-str

Steindruckfestigkeit

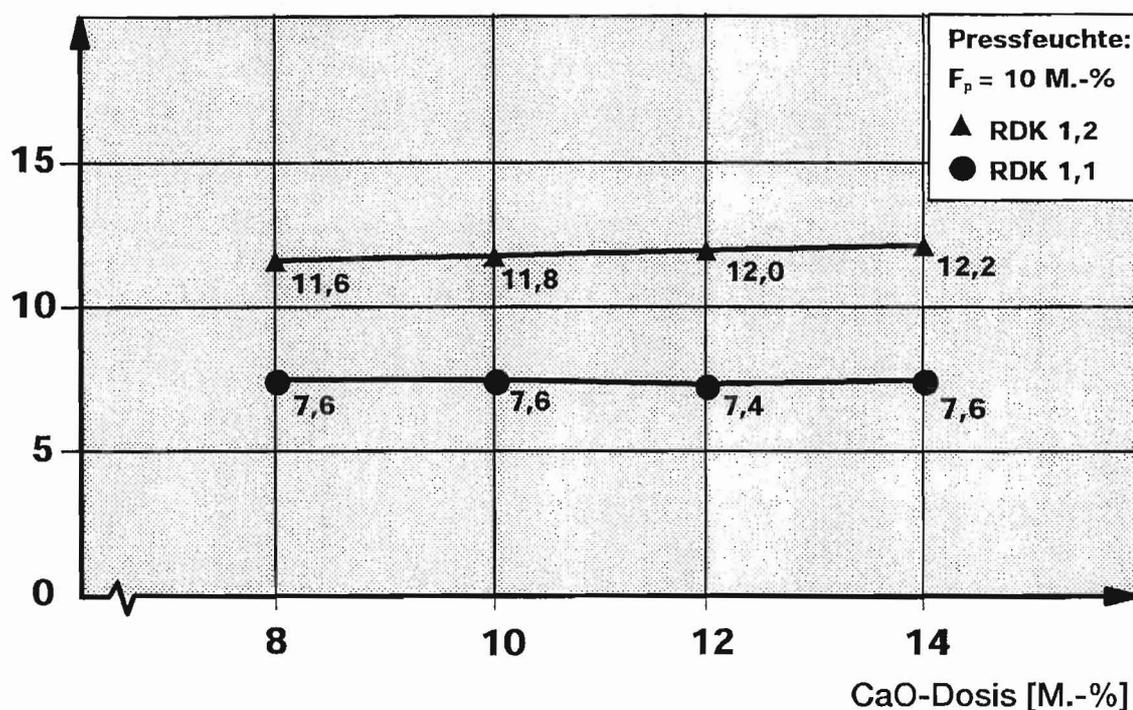
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 4: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Bimssand 0/5 mm

Steindruckfestigkeit

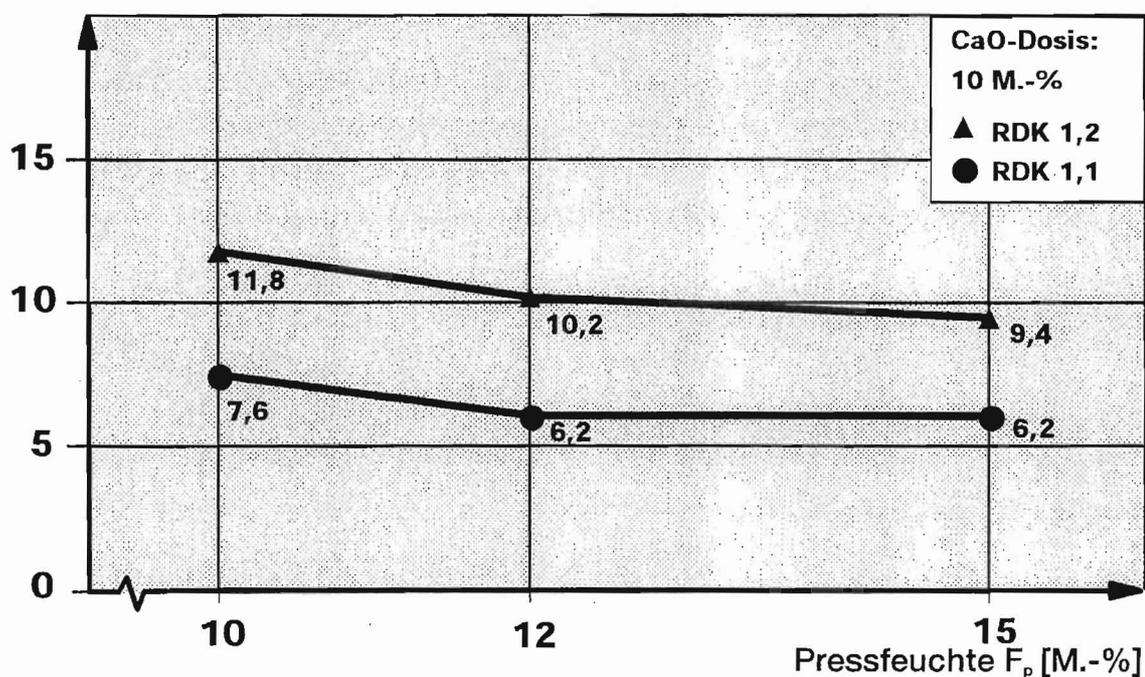
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 5: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Pressfeuchte, KS-Prüfkörper aus Bimssand 0/5 mm

Steindruckfestigkeit

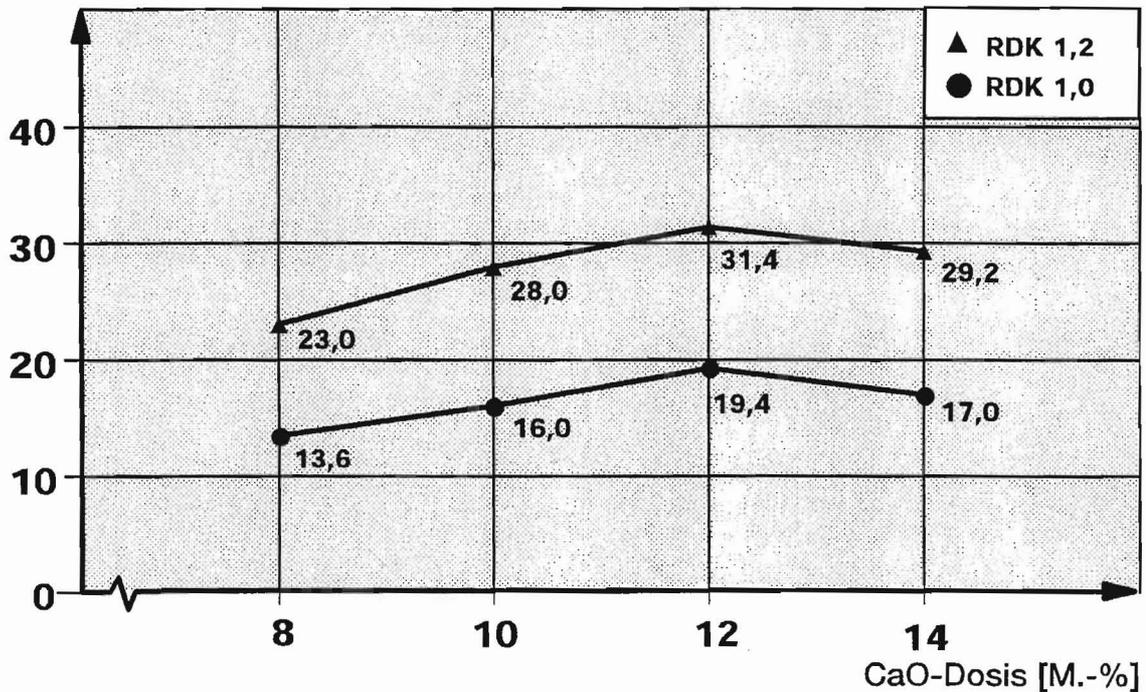
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 6: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm

Steindruckfestigkeit

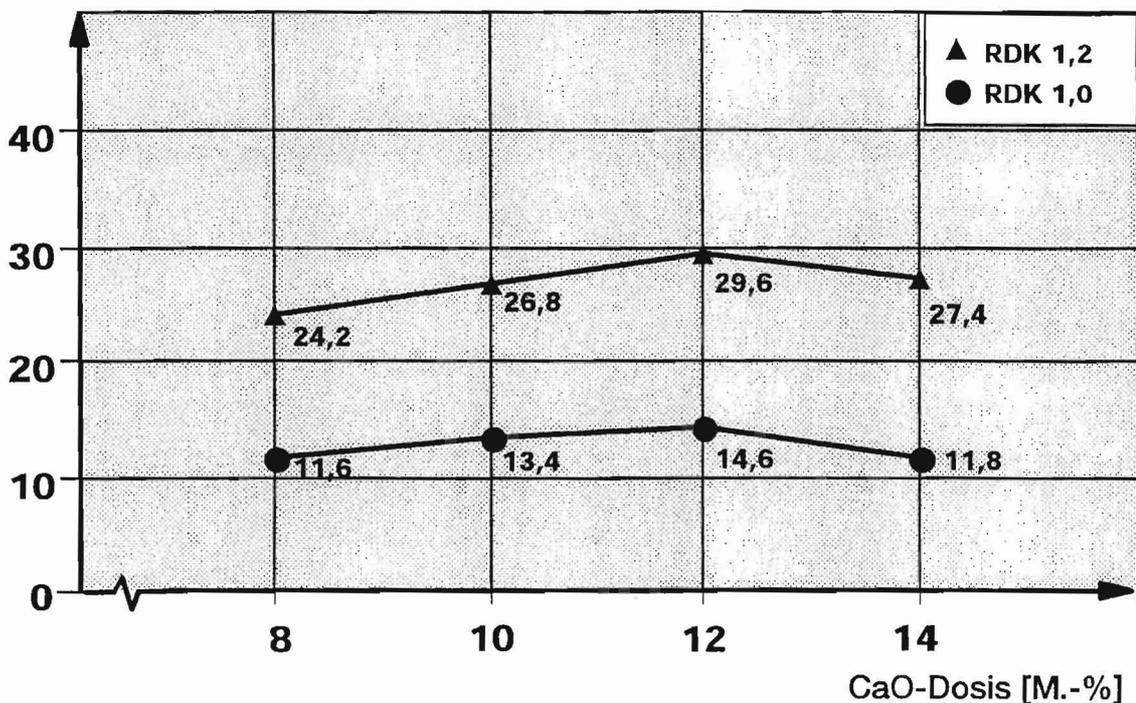
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 7: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1

Steindruckfestigkeit

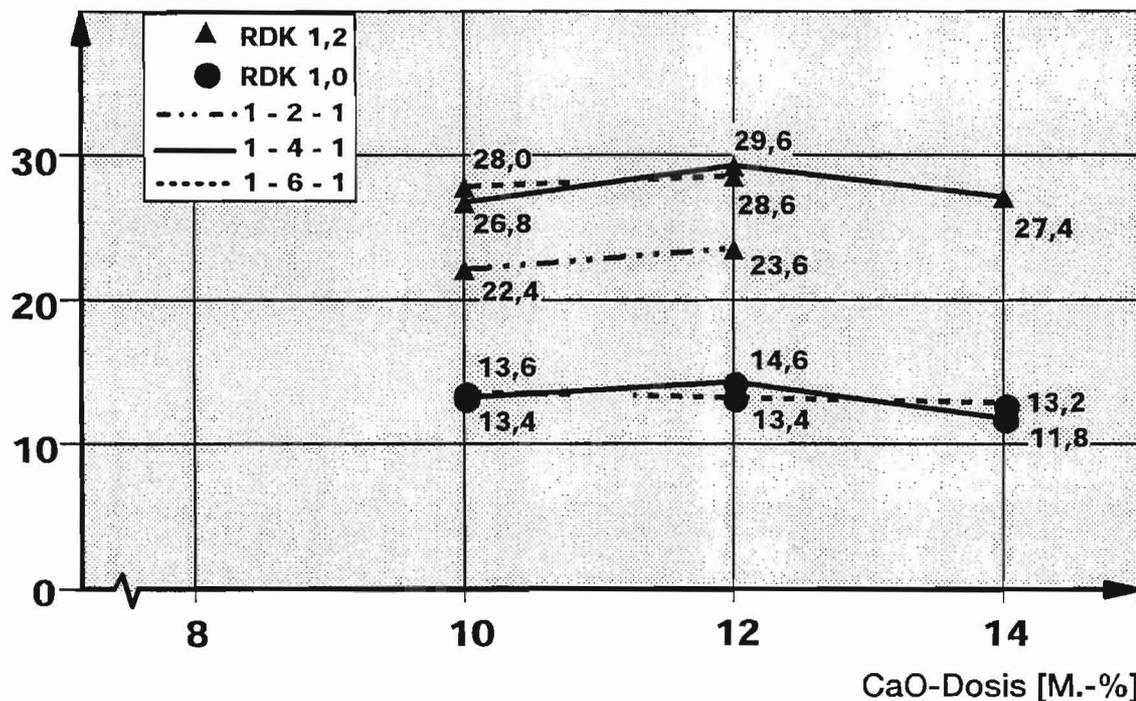
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 8: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis und der Dauer der Haltephase, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 1

Steindruckfestigkeit

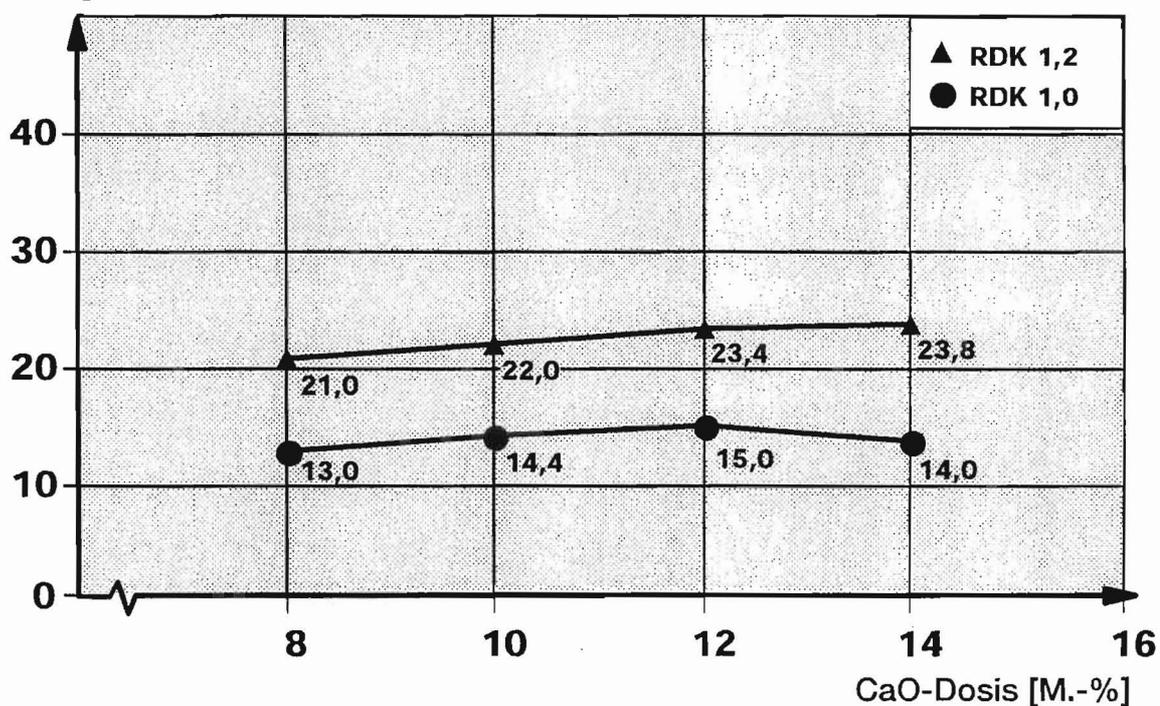
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 9: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Probe 2

Steindruckfestigkeit

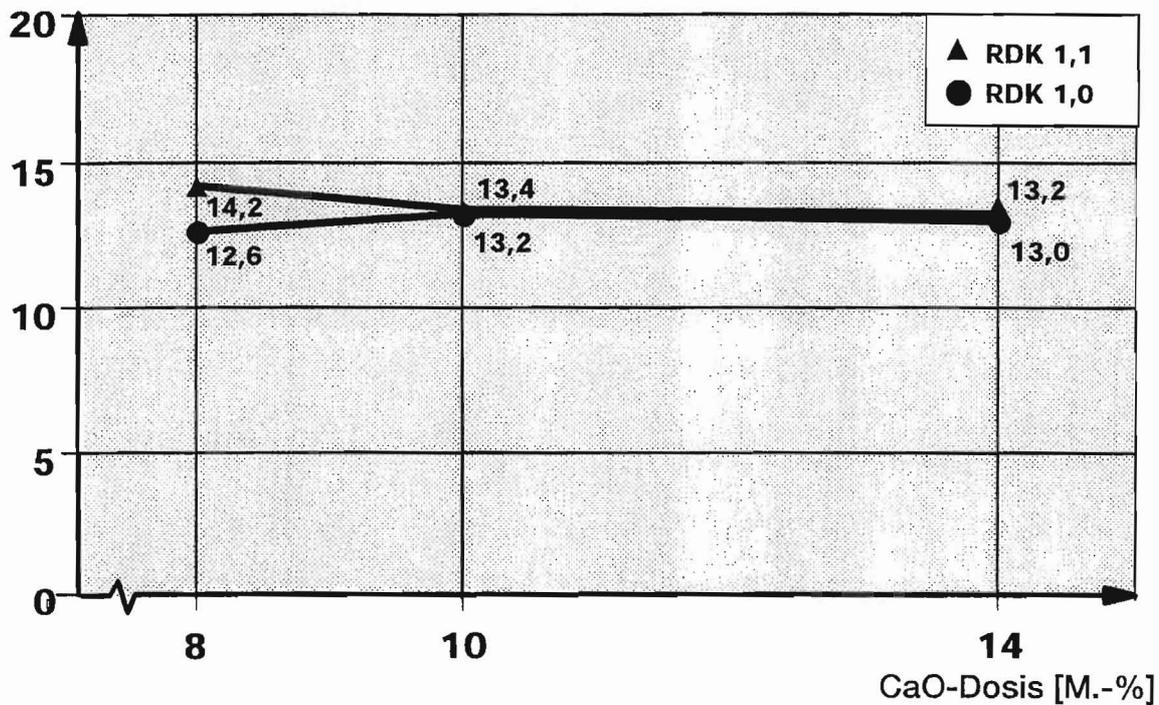
 $\beta_{D,St}$ [N/mm²]

Bild 10: Steindruckfestigkeit in Abhängigkeit von der CaO-Dosis, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm

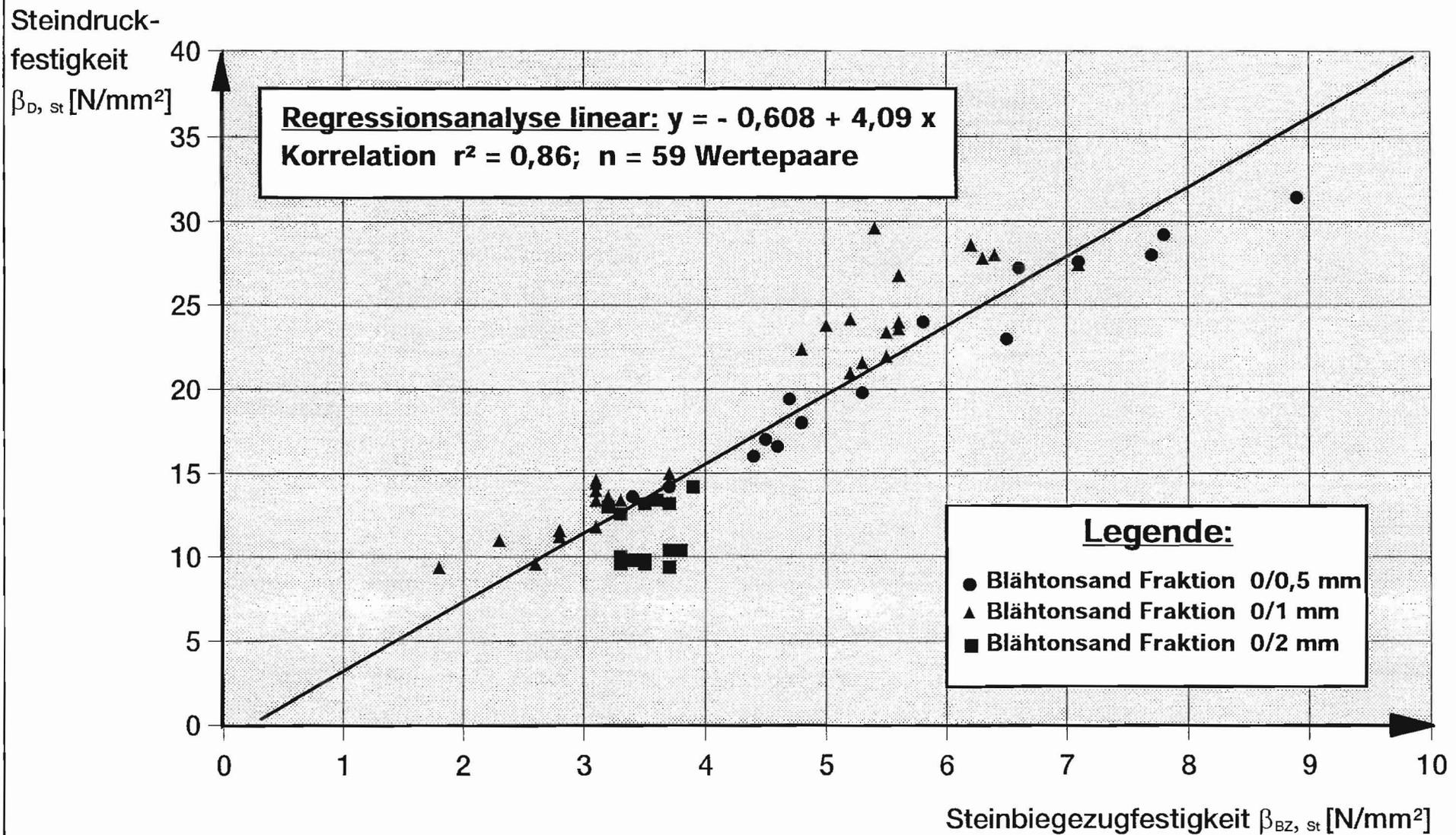


Bild 11: Zusammenhang zwischen der Steindruckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand

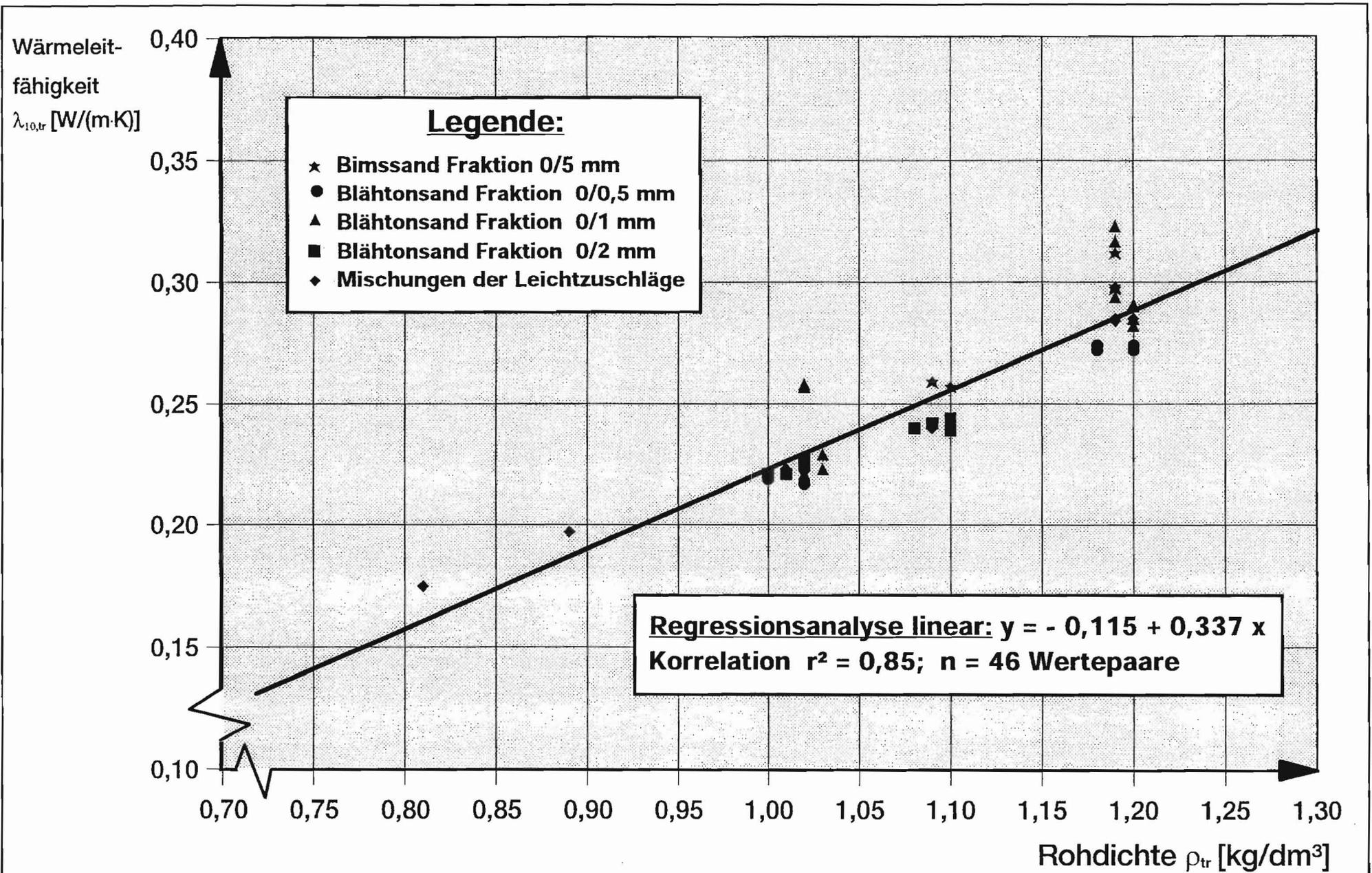
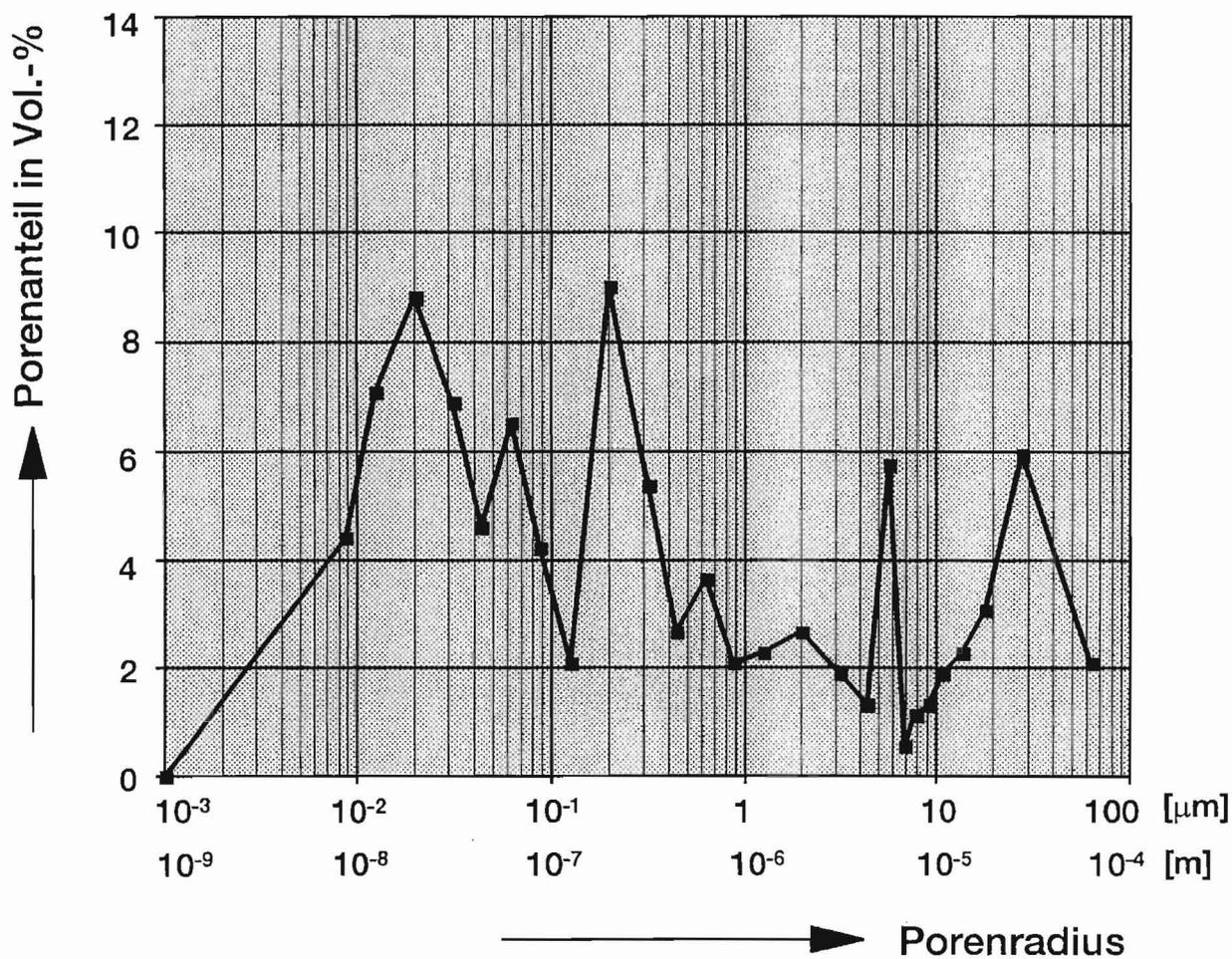
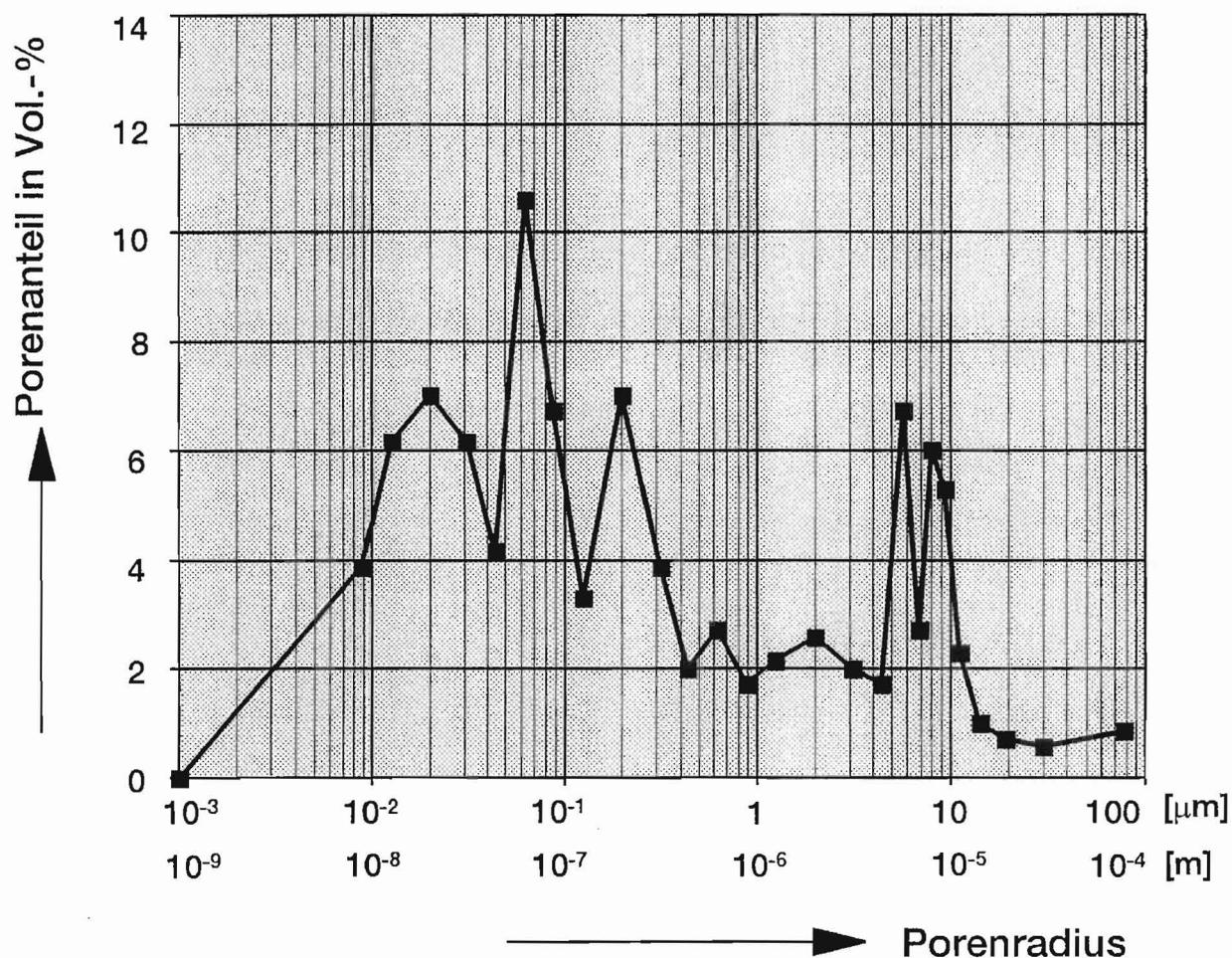


Bild 12: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte



Hg-füllbare Porosität : 0,3784 cm³/g
Porenanteil < 0,05 μm : 31,86 Vol.-%
Porenanteil ≤ 5 μm : 75,8 Vol.-%

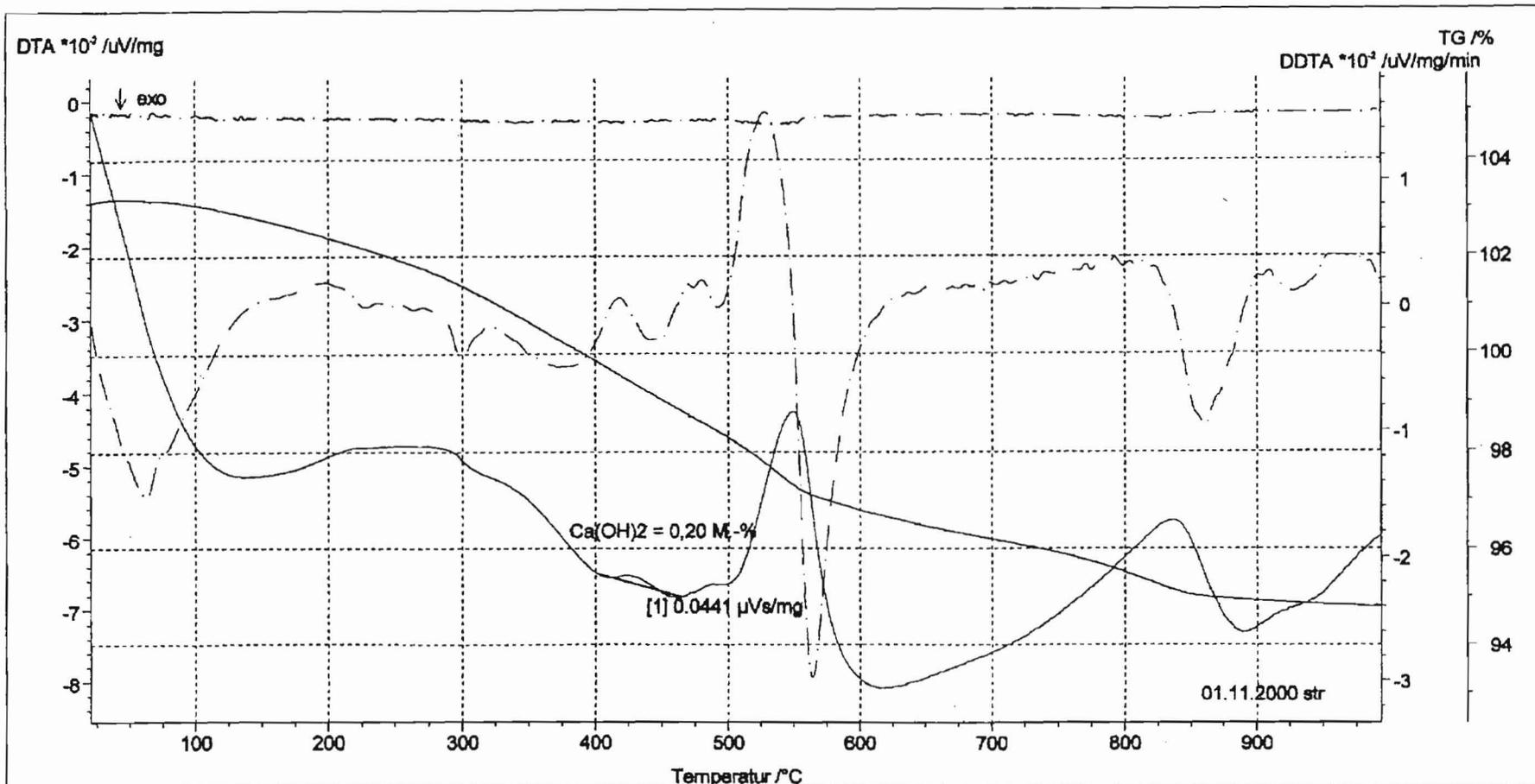
Bild 13: Porenanteil in Abhängigkeit vom Porenradius
Serie 18-1,2, KS-Prüfkörper aus Bimssand
Fraktion 0/5 mm



Hg-füllbare Porosität : 0,5521 cm³/g
Porenanteil < 0,05 μm : 27,36 Vol.-%
Porenanteil $\leq 5 \mu\text{m}$: 73,8 Vol.-%

Bild 14: Porenanteil in Abhängigkeit vom Porenradius
Serie 50-1,0, KS-Prüfkörper aus Blähtonsand
Fraktion 0/1 mm, Probe 1

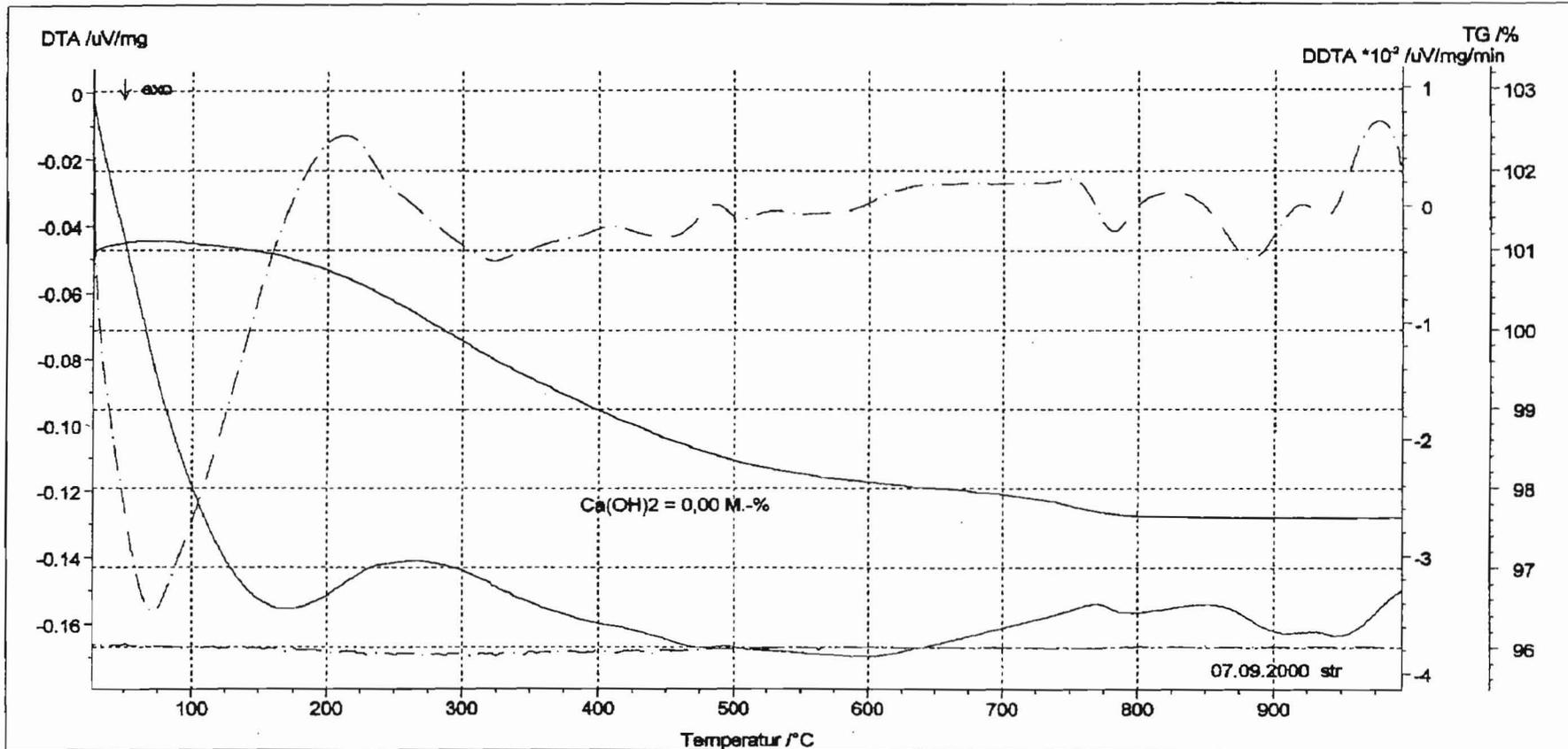
FV KS



INSTRUMENT:	STA 409EP	PROBE:	FV KS	681.900 mg	MODUS/MESSART:	DTA-TG/Probe
DATEI:	99101812.SS9	REFERENZ:	Al2O3	679.200 mg	SEGMENTE:	1/1
PROJEKT:	Serie 18-1,2	MATERIAL:			TIEGEL:	DTA/TG crucible Pt-Ir
VERSUCHS-ID:	Serie 18-1,2	KORR./TEMP./EMPF.:	-TCALNULL.TCX/SENSNULL.EXX		ATMOSPHERE:	
DATUM/ZEIT:	01.11.00 13:45	BEREICH:	20 °C/20.0(K/min)/1000 °C		TG-KORR/BEREICH:	000/1000
LABOR:	FV KS	PROBENTR./TC:	DTA/(TG) HIGH RG 2/S		DSC-KORR/BEREICH:	000/500
OPERATOR:	SI-Ströbel	BEMERKUNG:				

Bild 15: Spektrum der DTA, Serie 18-1,2, Bimssand Fraktion 0/5 mm

FV KS



INSTRUMENT: STA 409EP	PROBE: Al2O3	529.300 mg	MODUS/MESSART: DTA-TG/Probe
DATEI: 9910-50.SS9	REFERENZ: Al2O3	532.800 mg	SEGMENTE: 1/1
PROJEKT: Serie 50-1,2	MATERIAL: —/TCALNULL.TCX/SENSNULL.EXX		TIEGEL: DTA/TG crucible Pt-Ir
VERSUCHS-ID: Serie 50-1,2	KORR./TEMP./EMPFF.: 26 °C/20.0(K/min)/1000 °C		ATMOSPHERE: 000/1000
DATUM/ZEIT: 07.09.00 11:47	BEREICH: DTA/(TG) HIGH RG 2/S		TG-KORR/BEREICH: 000/500
LABOR: FV KSI	BEMERKUNG:		DSC-KORR/BEREICH: 000/500
OPERATOR: Si-Ströbel			

Bild 16: Spektrum der DTA, Serie 50-1,2, Blähtonsand Fraktion 0/1 mm, Probe 1

A 20

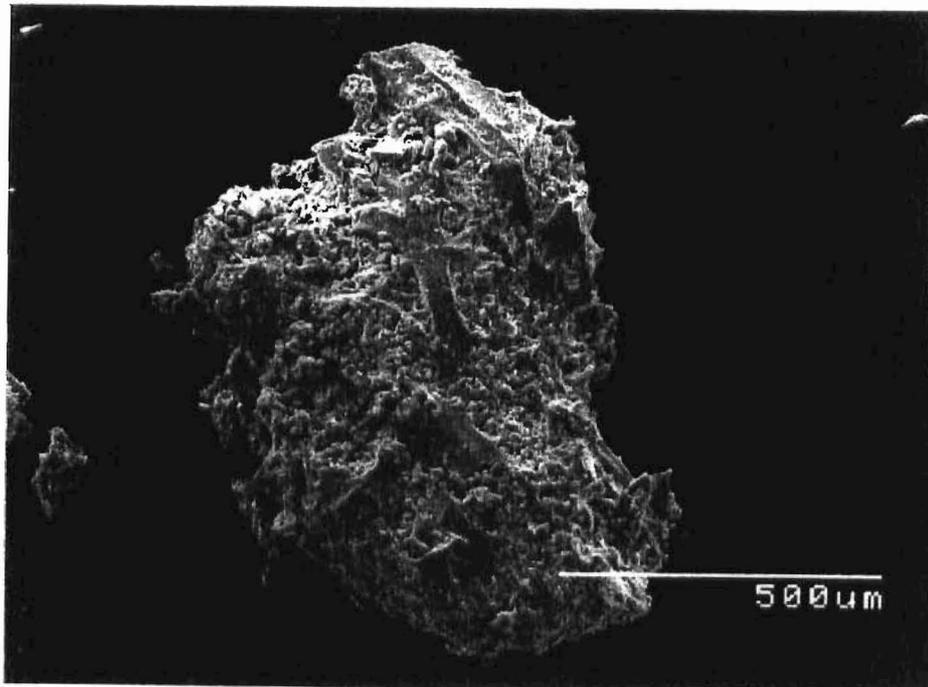


Bild 17: Bimssand, Fraktion 0/5 mm, REM, 80-fache Vergrößerung

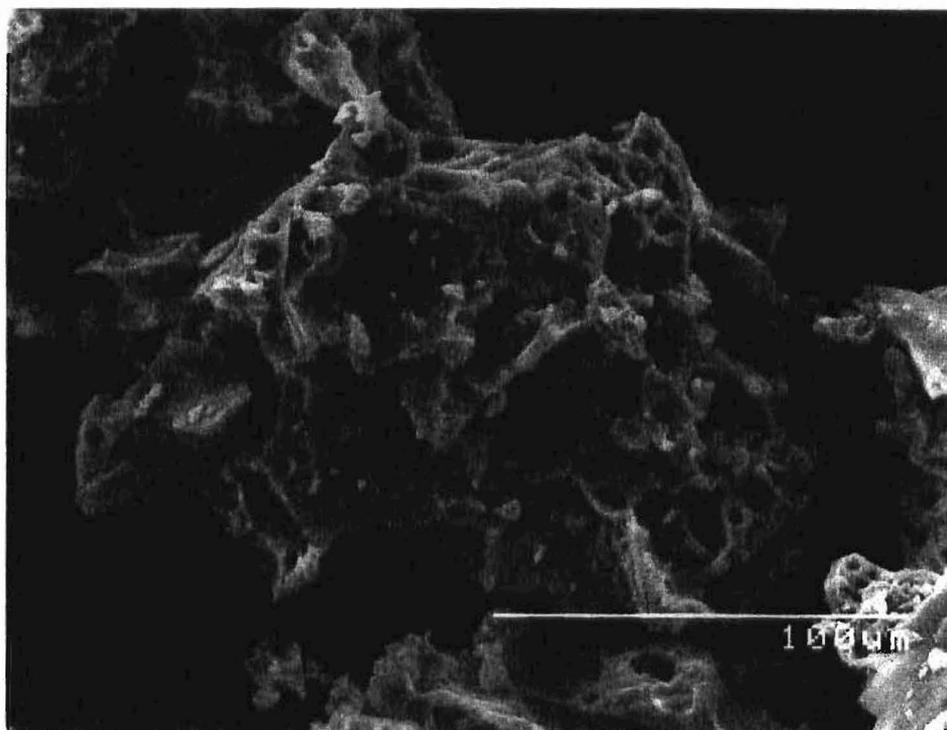


Bild 18: Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, REM, 500-fache Vergrößerung

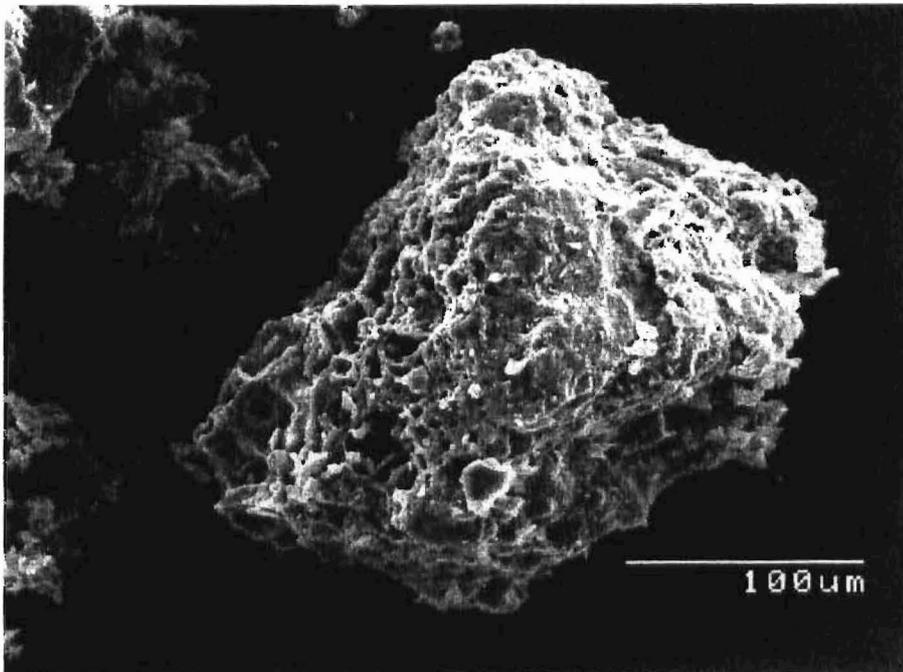


Bild 19: Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, REM, 300-fache Vergrößerung

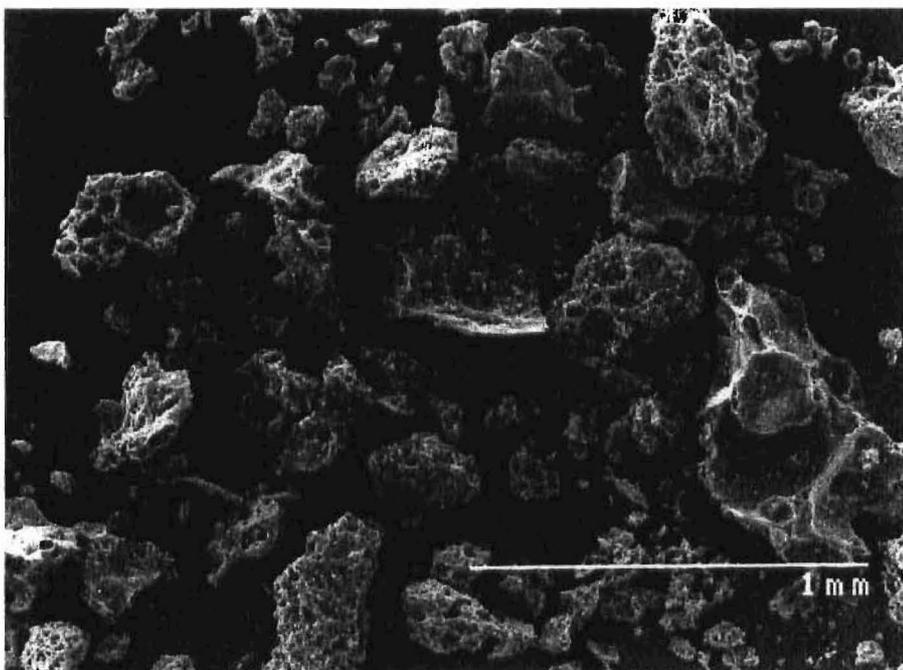


Bild 20: Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm, REM, 50-fache Vergrößerung

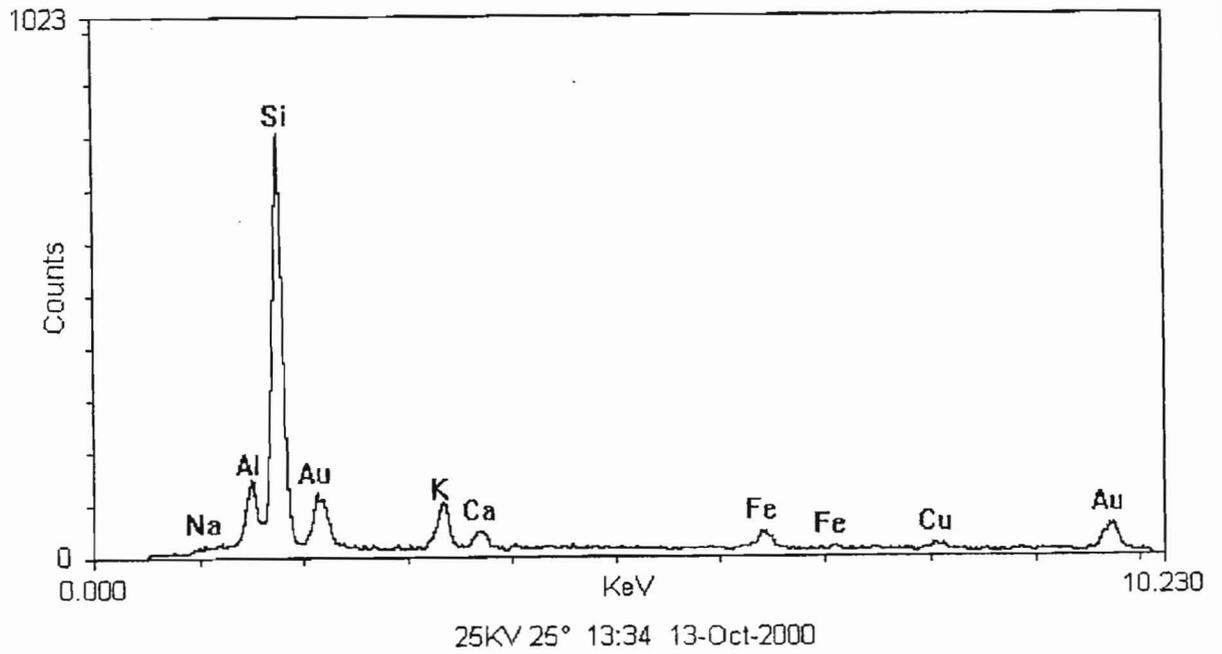


Bild 21: Bimssand, Fraktion 0/5 mm, EDX-Analyse

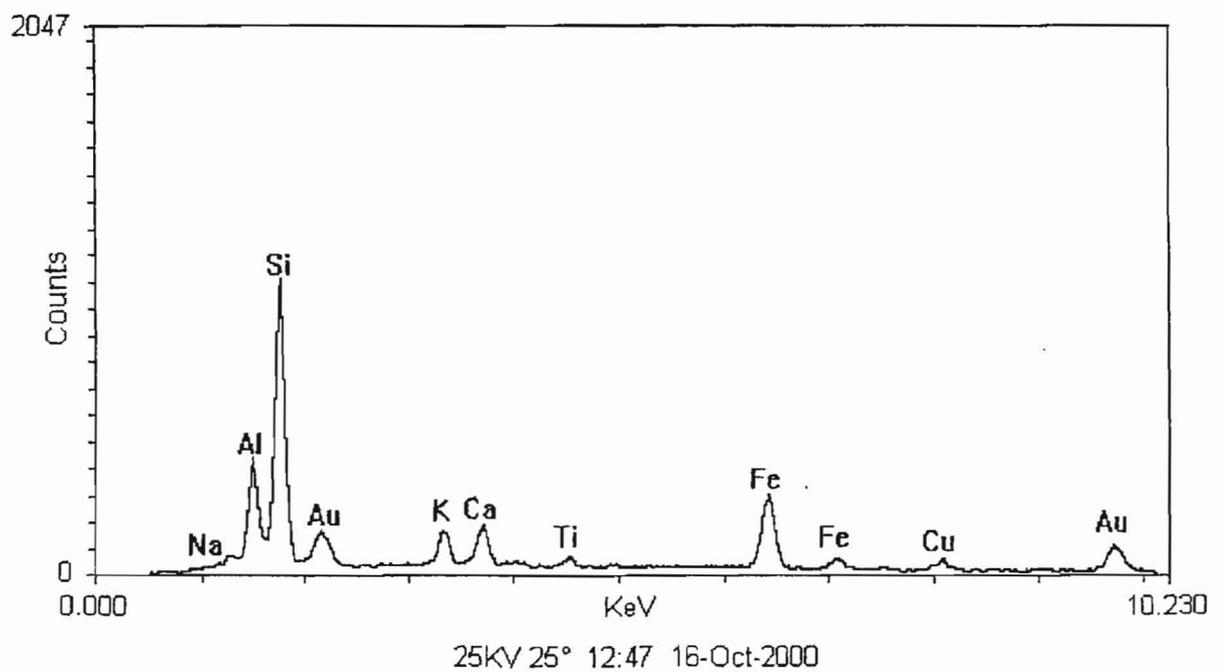


Bild 22: Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, EDX-Analyse

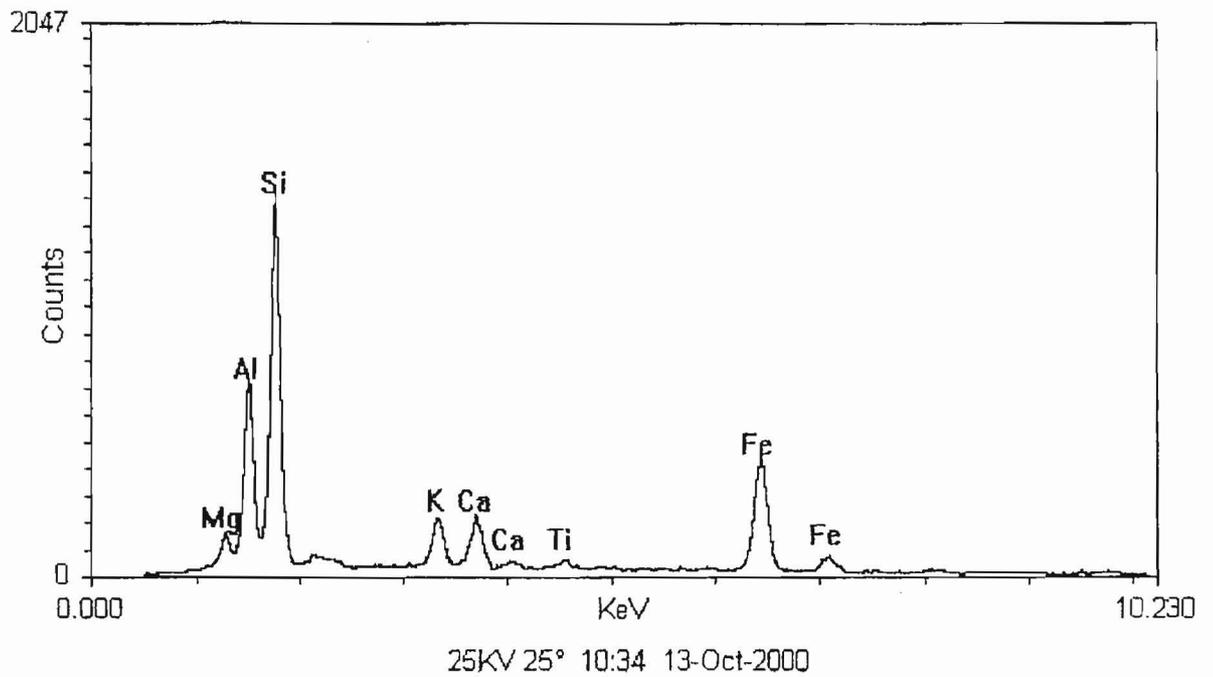


Bild 23: Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, REM, EDX-Analyse

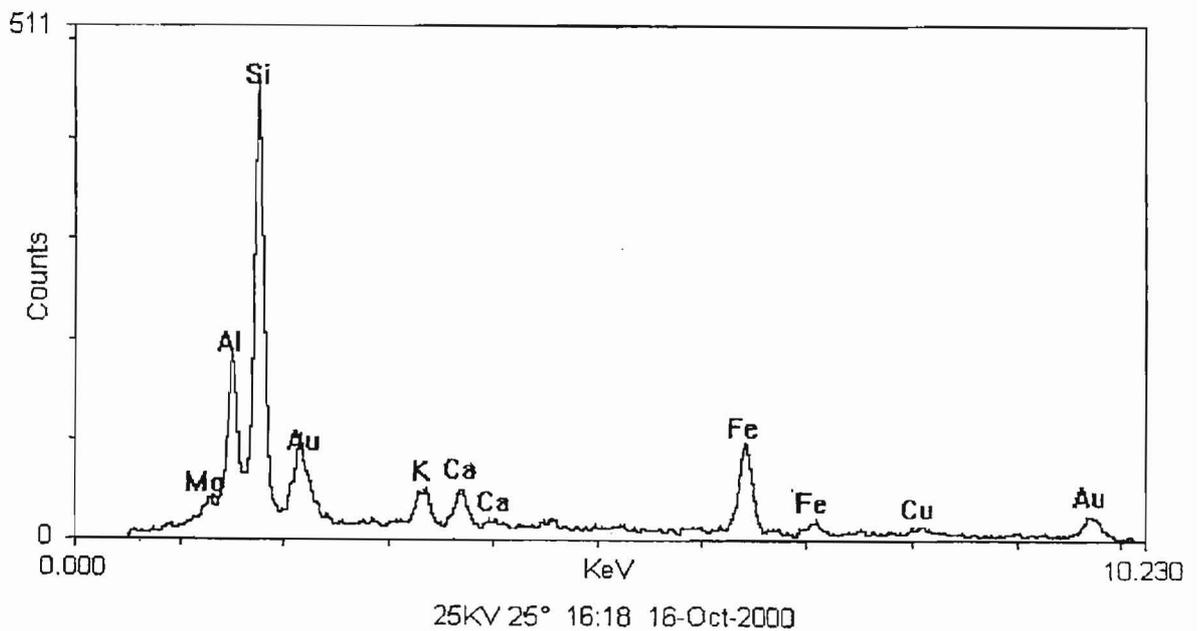


Bild 24: Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm, EDX-Analyse

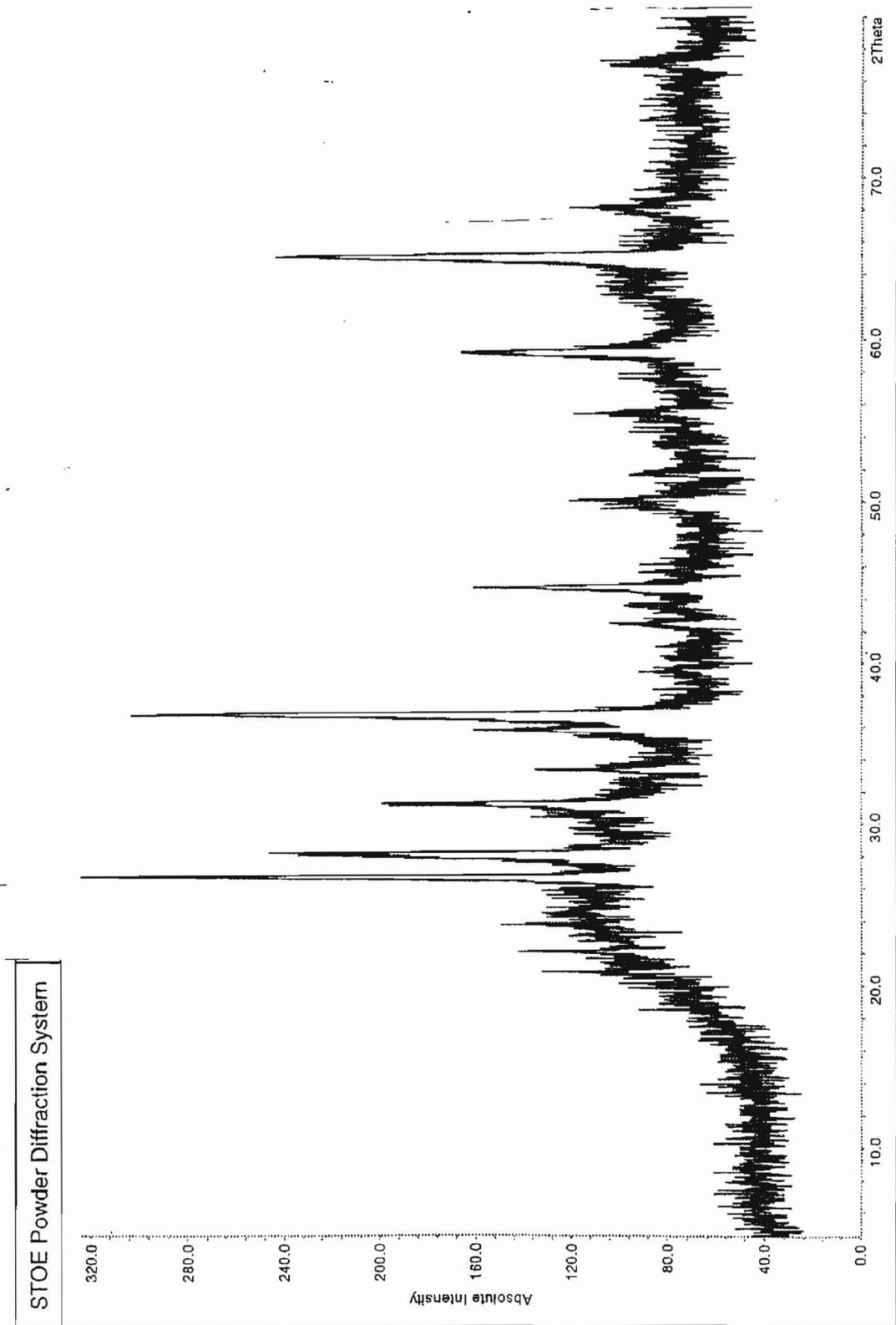


Bild 25: Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, Spektrum aus der Röntgenpulverdiffraktometrie

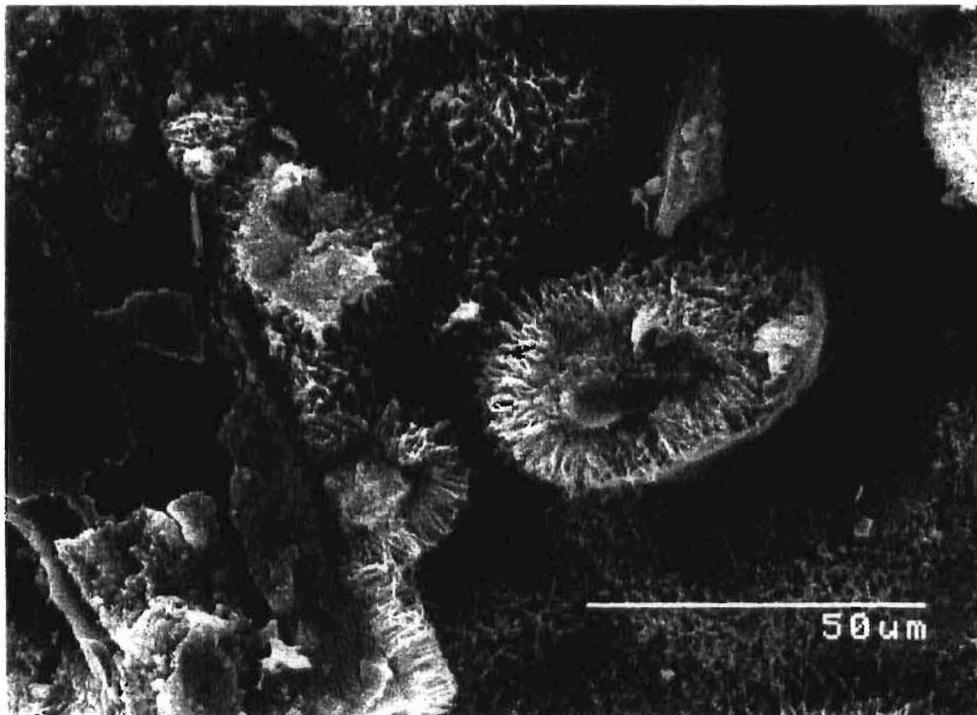


Bild 26: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Bimssand, Fraktion 0/5 mm, Serie 18-1,1
REM, 800-fache Vergrößerung

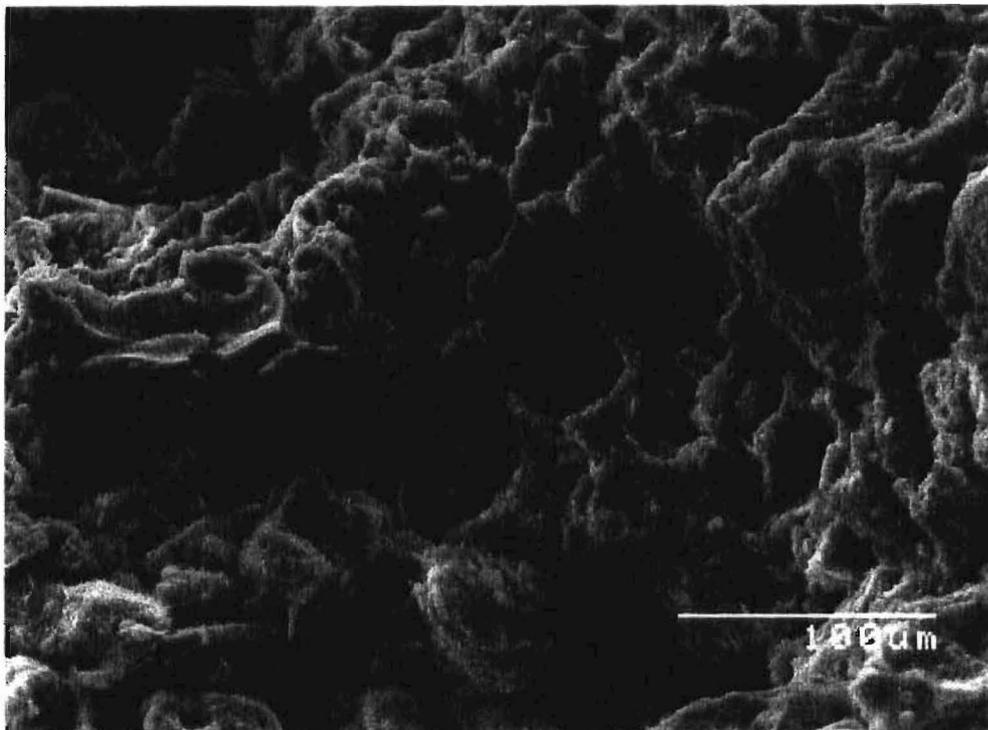


Bild 27: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, Serie 34-1,0
REM, 300-fache Vergrößerung

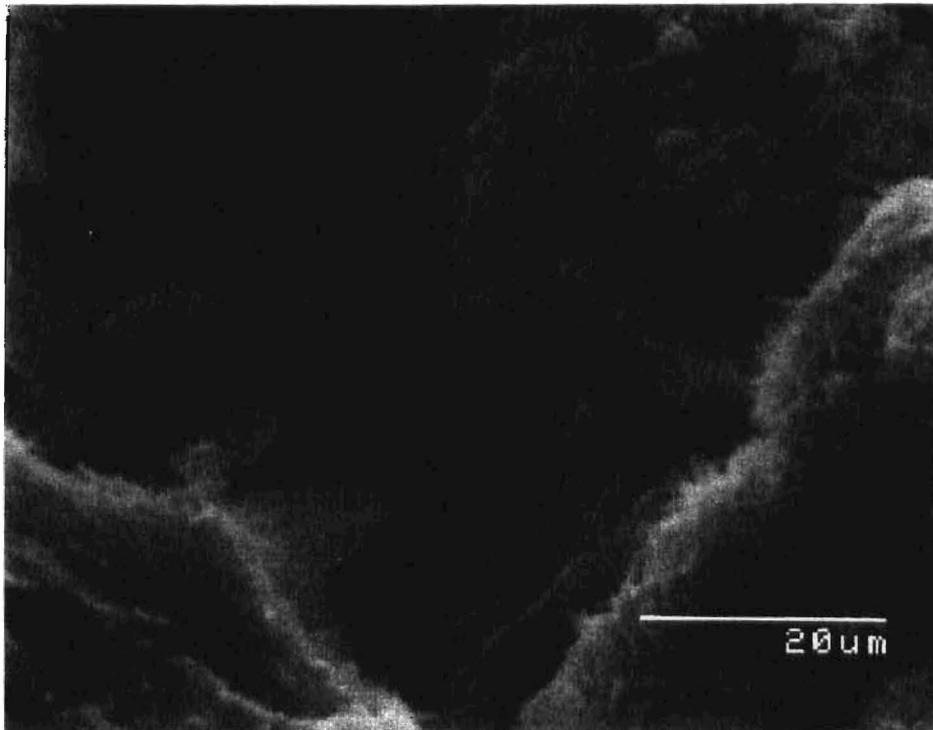


Bild 28: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand, Fraktion 0/0,5 mm, Serie 34-1,0
REM, 1500-fache Vergrößerung

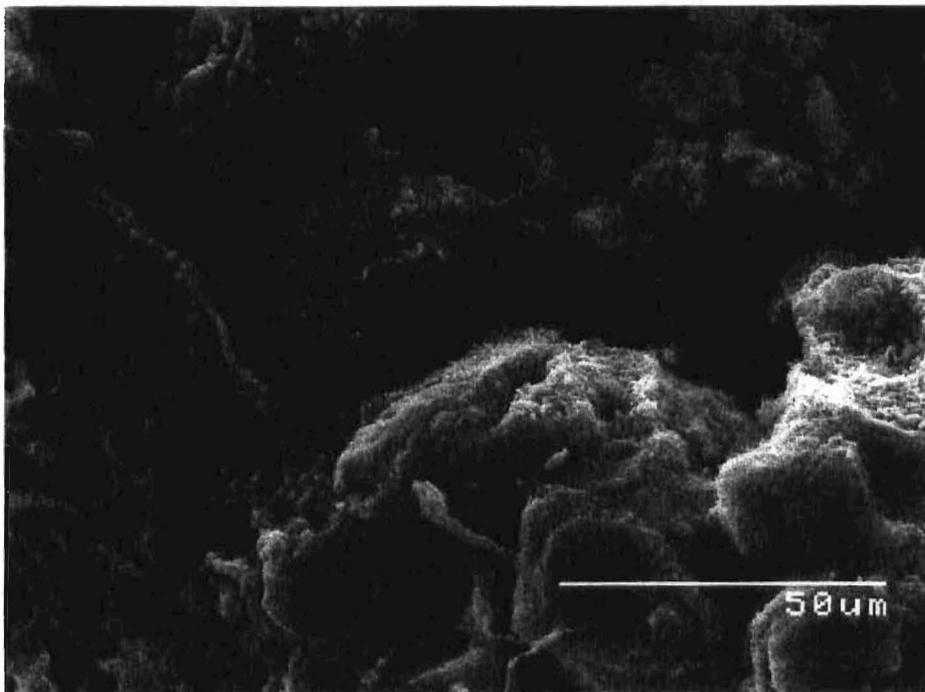


Bild 29: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Serie 50a-1,2
REM, 800-fache Vergrößerung

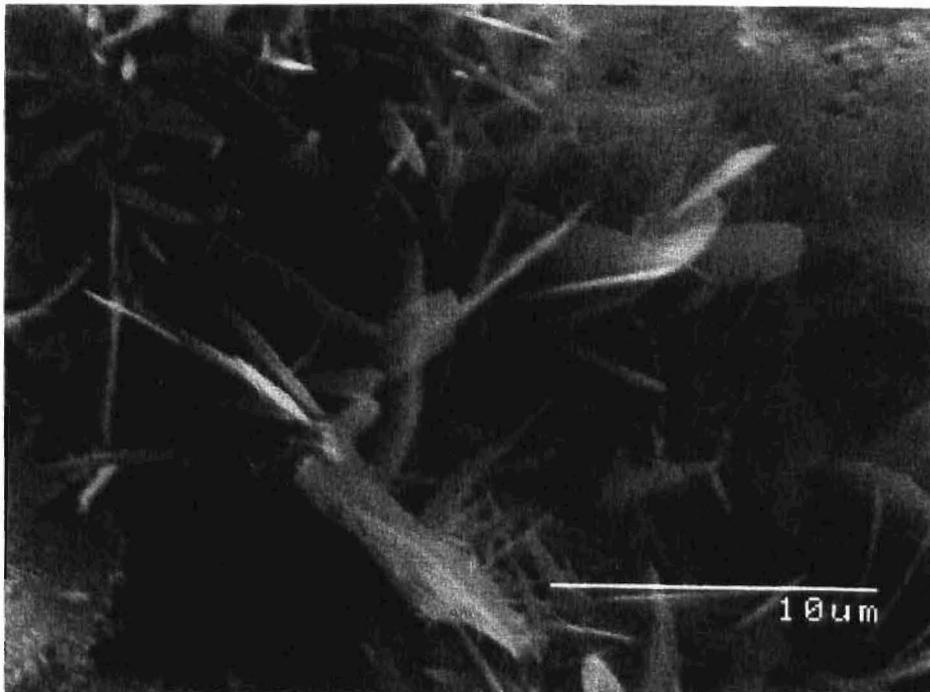


Bild 30: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand, Fraktion 0/1 mm, Serie 58-1,0
REM, 4000-fache Vergrößerung

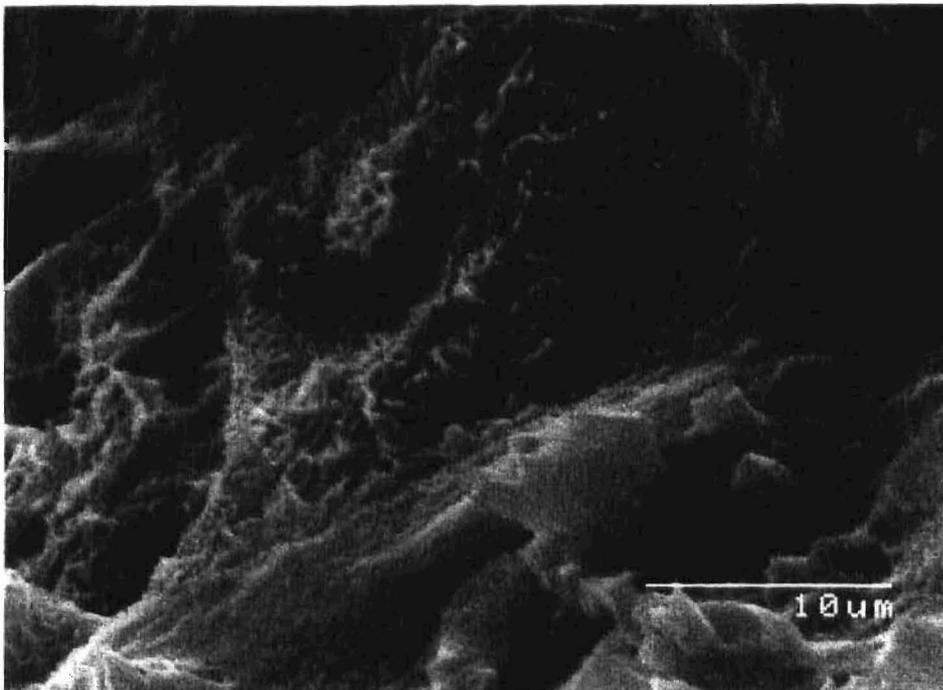


Bild 31: KS-Prüfkörper, hergestellt unter Verwendung von Blähtonsand, Fraktion 0/2 mm, Serie 42-1,0
REM, 1500-fache Vergrößerung