Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Studiengang Werkstoffwissenschaften
Professur Bauchemie

Diplomarbeit

Eignung alumosilikatischer Polymerbinder zur Modifizierung von Lehmbaustoffen

eingereicht von Steffen Schiecke
geb. am 11. Oktober 1976 in Weimar
Seminargruppe Werkstoffwissenschaft

Reg.-Nr. WW/2004/01

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. habil. Chr. Kaps
Zweitprüfer: Dr.-Ing. A. Buchwald

Ausgabedatum: 16.12.2003
Abgabedatum: 16.06.2004

Prof. Dr. rer. nat. habil. Chr. Kaps
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Inhalt

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG ---------- 3

2 BAUEN MIT LEHM ---------- 4

2.1 WAS IST LEHM? ---------- 4
2.2 TRADITIONELLER UND HEUTIGER EINSATZ VON LEHM ALS BAUSTOFF ---------- 6
2.3 STAND DER TECHNIK ZUR MODIFIZIERUNG VON LEHM ---------- 7

3 GEOPOLYMERBINDER ---------- 10

4 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN ---------- 11

4.1 VERWENDETE LEHME UND CHARAKTERISIERUNGSMETHODEN ---------- 11
4.2 HERSTELLUNG DER PROBEKÖRPER ---------- 11
4.3 BESTIMMUNG DER FESTIGKEIT ---------- 13
4.4 BESTIMMUNG DER ROHDICHTE, DER REINDICHTE UND DER POROSITÄT ---------- 13
4.5 BESTIMMUNG DES WASSERDAMPFDIFFUSIONSWIDERSTANDES ---------- 14
4.6 BESTIMMUNG DER SORPTIONSFEUCHTE ---------- 16
4.7 BESTIMMUNG DER WASSERBESTÄNDIGKEIT ---------- 16

5 ERGEBNISSE UND DISKUSSION ---------- 17

5.1 CHARAKTERISIERUNG DER LEHME ---------- 17
5.2 AUSWAHL DES GEOPOLYMERBINDERS (VORVERSUCHE AN KLEINSTPRISMEN) ---------- 26
5.2.1 Bestimmung der Dichten und Porositäten der Mischungen ---------- 26
5.2.2 Ergebnisse der Druck-/Biegezugfestigkeitsprüfung ---------- 28
5.3 EIGENSCHAFTEN DER VERFESTIGTEN LEHMFORMLINGE ---------- 30
5.3.1 Festigkeit ---------- 30
5.3.2 Wasserbeständigkeit ---------- 32
5.3.3 Wasserdampfdiffusionswiderstand ---------- 34
5.3.4 Wasserdampfspeicherung ---------- 35

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ---------- 39

7 LITERATURQUELLEN ---------- 41

ANHANG ---------- 43

MINERALOGISCHE ANALYSEN ---------- 44
ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE AUFNAHMEN ---------- 49

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG ---------- 53

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Seit den achtziger Jahren ist eine Renaissance des Lehmbaus zu verzeichnen. Die Zeiten, in denen Menschen, die Häuser aus Lehm bauten, einer Minderheit angehörten und als "Öko-Freaks" belächelt wurden sind vorbei. Mehr und mehr Menschen entdecken die positiven bauklimatischen Eigenschaften des Lehms wieder für sich. Jedoch möchten die neuen Lehmbau-Auftraggeber bei ihren Häusern nicht auf die Vorzüge der altbewährten Baustoffe verzichten. Umso wichtiger ist es für Firmen, die sich mit dem Lehmbau bzw. der Herstellung von Lehmbauteilen beschäftigen, an den nachteiligen Eigenschaften des Lehms zu arbeiten und diese zu verbessern. Herzuheben sind in diesem Zusammenhang die geringe Wasserbeständigkeit und Festigkeit des Lehms. Zu den traditionellen Verfestigungsmethoden kamen im vergangenen Jahrhundert durch die Entwicklung neuer Bindemittel weitere Möglichkeiten hinzu. Ein wenig erforschtes Gebiet ist der Einsatz von alumosilikatischen Polymerbindern zur Verfestigung von Lehm.

Deshalb ist es Ziel der vorliegenden Diplomarbeit, festzustellen, inwieweit sich alumosilikatische Polymerbinder (auch bekannt als Geopolymere) dazu eignen, die Wasserbeständigkeit und die Festigkeit des Baustoffs Lehm zu erhöhen. In diesem Zusammenhang sind die Auswirkungen des Geopolymerzusatzes auf die bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms zu bestimmen, sowie der Wasserdampfdurchlässigkeitswiderstand und die Sorptionsfeuchte zu ermitteln. Zu diesem Zweck sind vier Lehme deutscher Hersteller von Lehmprodukten zu charakterisieren und einer von diesen für die Modifizierung auszuwählen.

2 Bauen mit Lehm

2.1 Was ist Lehm?

Lehm ist kein genormter oder homogener Baustoff. Er ist ein Gemisch aus Ton, Schluff und Sand, welches zusätzlich größere Gesteinspartikel und organische Bestandteile enthalten kann. Lehm entsteht bei der Verwitterung von Gesteinen, speziell bei jener der Feldspäte. Diese Verwitterung kann durch mechanischen Abrieb aufgrund der Bewegung von Gletschern, Flüssen oder Wind erfolgen, durch Spannungen aufgrund Temperaturdifferenzen oder durch die sprengende Wirkung gefrierenden Wassers. Chemische Verwitterung geschieht vor allem durch organische Säuren der Pflanzen, sowie durch Wasser und Sauerstoff. Eine Einteilung der Lehme basiert in Folge dessen auf dem Fundort. Man unterscheidet danach Lößlehme, Berglehme (oder auch Gehängelehme), Geschiebelehme, Schwemmlehme und Auelehme. Je nach den Bedingungen an ihrem Verwitterungsort und dem Transport zum Ablagerungsort weisen sie Unterschiede in der chemischen, mineralogischen und der Kornzusammensetzung auf. So unterscheidet man nach der Kornverteilung sandige, schluffige und tonige Lehme.

Bestimmend für die Eigenschaften des Lehms ist der Ton. Er ist das Bindemittel im Lehm und verbindet die gröberen Partikel miteinander. Dabei ist der Begriff „Ton“ nicht klar definiert. Nach DIN 4022-1 bezeichnet man mineralische Teilchen mit einer Korngröße von unter 2 µm als Ton, als Schluff solche mit 2 µm bis 60 µm und als Sand jene mit 60 µm bis 2 mm. Die gröberen Bestandteile sind, bezogen auf die Korngröße, meist Kiese, welche Korndurchmesser von 2 mm bis 63 mm umfassen [2]. Nach [1] gehören Tonmineralien zur Gruppe der Silikate und sind unverfestigte Sedimente. Unter den Sedimentpartikeln herrschen blättchenförmige Schichtsilikate mit Korngrößen < 2 µm mengenmäßig vor. Ton entsteht bei der Verwitterung der Urgesteine, speziell bei jener der Silikatgesteine. Man bezeichnet Tone deshalb auch als *Verwitterungsneubildungen.* Häufige Ur-Silikatgesteine, die eine Voraussetzung der Tonbildung darstellen, sind die Feldspäte. Sie bestehen im wesentlichen aus Aluminiumoxid, einem Metalloxid und Kieselsäure. Der weit verbreitete Kalifeldspat hat beispielsweise die Formel $Al_2O_3 \cdot K_2O \cdot 6SiO_2$. Tone sind überwiegend wasserhaltige Aluminiumsilikate. Während der Verwitterung lösen sich die leichter löslichen Erdalkaliverbindungen heraus und es entsteht kieselsaure Tonerde. Diese wird in der Mineralogie als Kaolinit bezeichnet und hat die Formel ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$). Zu den Verwitterungsneubildungen zählen auch mineralische Verbindungen anderer Elemente, wie zum Beispiel des Eisens (z.B. Hämatit) oder des Titans (z.B. Rutil oder Anatas). Weiterhin enthalten Tone auch Mineralneubildungen und Verwitterungsreste. Unter den Mineralneubildungen trifft man häufig Silikate wie Glaukonit, Carbonate wie Calcit, Eisensulfide wie Pyrit oder

aber Kupferkies und Bleiglanz an. Unter den Verwitterungsresten findet man sehr widerstandfähige Minerale wie Quarz, Muskovit, Feldspäte und seltener Chlorite.

Der Lehm erhält seine charakteristische Farbe durch den Gehalt und die Art der vorliegenden Eisenoxide (z.B. gelb bis gelbbrauner Goethit, orangefarbener Lepidokrokit, roter Hämatit und rotbrauner bis schwarzer Maghemit, usw.).

Der strukturelle Aufbau der Tonminerale erfolgt in Schichten. Dabei sind die Grundbausteine [SiO_4]-Tetraeder und [Metall$(O,OH)_6$]-Oktaeder. Sie bilden jeweils Tetraeder- bzw. Oktaeder-Schichten. Innerhalb der Tetraederschichten sind die [SiO_4]-Tetraeder über gemeinsame Sauerstoffionen so verknüpft, dass die freien Spitzen in eine Richtung weisen. In der Ebene betrachtet sind die Tetraeder somit zu Sechserringen verbunden. In der Oktaederschicht sind die Oktaeder über Kanten miteinander verknüpft. Diese Schicht ist an die Tetraederschicht ankondensiert. Damit gehören die Sauerstoffionen der Tetraederspitzen gleichzeitig den Sauerstoffoktaedern an. Die Sauerstoffionen der Oktaederschicht, welche nicht gleichzeitig zu einem [SiO_4]-Tetraeder gehören, haben ein Proton gebunden und liegen somit als Hydroxidionen vor. Minerale, deren Schichten aus je einer Tetraeder und einer Oktaederschicht bestehen, nennt man Zweischichtminerale (1:1-Schichtsilikate). Zu ihnen zählen die Serpentinminerale und die Kaolinminerale. Die ungeladenen Schichten werden dabei durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen und "van-der-Waals-Kräfte" zusammengehalten. Minerale, bei denen an die Okatederschicht eine zweite Tetraederschicht ankondensiert ist, nennt man Dreischichtminerale (2:1-Schichtsilikate). Vertreter sind hierbei Talk und Pyrophyllit. Die Spitzen der zweiten Tetraederschicht sind denen der ersten entgegengerichtet [1].

Tone weisen unter anderen folgende typische Eigenschaften auf: seifenartige Konsistenz bei Feuchtigkeit, hohes Wasserbindevermögen, Quellung bei Wasseraufnahme, hohe Adsorptionskapazität gegenüber verschiedensten organischen und anorganischen Stoffen, Abdichtungsvermögen, nicht-newtonsches Fließverhalten, Thixotropie, Plastizität. Diese Eigenschaften werden entscheidend durch die Tonmineralien hervorgerufen.

In der Lagerstättenkunde unterscheidet man zwischen Kaolinen, Kaolinittonen, gemeinen Tonen und Bentoniten. Kaoline liegen auf primärer Lagerstätte und entstehen aus der Verwitterung an der Erdoberfläche bzw. hydrothermaler Umwandlung der Muttergesteine. Sie enthalten meist unveränderte Mineralien der Ausgangsgesteine (Feldspat, Quarz, Glimmer).

In der Technik versteht man unter Tonen die durch Wasser oder Wind umgelagerten Sedimente, welche auf sekundärer Lagerstätte zu finden sind. Je nach Transport und Grad und Mechanismus der Verwitterung unterscheiden sie sich nach Art und Menge im Mineralbestand. So unterscheidet man kaolinitreiche, smectitreiche und gemeine Tone. Kaolinitreiche Lagerstätten enthalten vor allem Kaolinittone und smectitreiche

Lagerstätten vorrangig Bentonite (Montmorillonit). Die weit verbreiteten Lagerstätten gemeiner Tone enthalten Gemische aus diesen beiden und weiteren Tonmineralien wie Illit und Chloriten. Während Kaolinite in der feinkeramischen und der Papierindustrie Anwendung finden, werden Bentonite vom Adsorptionsmittel in der Lebensmittelindustrie bis hin zum Dichtstoff im Bauwesen eingesetzt. Die Anwendung der gemeinen Tone liegt vor allem in der Grobkeramik und im Lehmbau, wo mit gröberen Bestandteilen vermischte Tone als Lehme bezeichnet werden [1].

2.2 Traditioneller und heutiger Einsatz von Lehm als Baustoff

Schon vor Jahrhunderten wurde Lehm als Baustoff genutzt. Da er an den meisten Orten der Welt zu finden ist und oft schon beim Aushub einer Baugrube entsteht, lag seine Verwendung zum Hausbau nahe. Nach Beginn der Industrialisierung und der damit verbundenen Nutzung neuer Massenbaustoffe wie Ziegel und später Beton, verlor der Lehmbau an Bedeutung. Lediglich in Zeiten mangelnder Ressourcen, wie beispielsweise nach Kriegen, wurden zeitweise vermehrt Lehmhäuser gebaut. Mit dem wachsenden ökologischen Bewusstsein Ende des 20. Jahrhunderts gewann der Lehmbau wieder an Bedeutung. Man erkannte den Vorteil seiner guten raumklimatischen Wirkung im Vergleich zu heutigen Massenbaustoffen.

Mit der Renaissance des Lehmbaus in Deutschland finden alte Lehmbautechniken neue Anwendung. Häuser werden wieder, wie schon vor Jahrhunderten, in Stampflehmbauweise, Lehmsteinbauweise, Nasslehm-Fülltechniken oder durch direktes Formen von plastischem Lehm hergestellt. Hinzu kommt, dass herkömmliche Bauweisen mit Lehm sinnvoll ergänzt werden können. So werden Lehmwände als Innenwände erstellt und Lehmputze als Innenputze aufgebracht. Für den Trockenbau stehen Lehmbauplatten sowie Deckenelemente und Schallschutzsteine zur Verfügung. Ob reine Lehmbauweise oder Modifizierung herkömmlicher Bauweisen mit Lehm, Hauptmotivation für den Lehmeinsatz sind seine günstigen raumklimatischen Eigenschaften. Weithin bekannt ist die Aussage: „Lehm reguliert die Luftfeuchtigkeit“. Tatsächlich kann Lehm aufgrund seines ausgeprägten offenen Porensystems beachtliche Mengen an Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben. Steigt die Raumluftfeuchte plötzlich an, nimmt der Lehm verstärkt Wasserdampf auf, wodurch die relative Feuchte im Raum wieder sinkt. Sinkt die Luftfeuchte jedoch unter ein bestimmtes Niveau, zum Beispiel durch starkes Heizen und Lüften in den Wintermonaten, so gibt der Lehm das Wasser wieder frei. In Räumen mit Lehmwänden stellt sich eine mittlere relative Luftfeuchte von etwa 50% ein, die um etwa 5% schwankt. Diese Eigenschaft wirkt sich auch positiv bei der kombinierten Verwendung von Holz und Lehm aus. Der Lehm hält das Holz trocken und verhindert somit dessen Verfall durch Schimmelpilze und Schädlinge [2]. Weiterhin speichert er mit seiner relativ hohen Rohdichte mehr Wärme als viele Dämmstoffe. Ohne leichte Zusätze liegt die Rohdichte über 1800 kg/m³, was herkömmlichen Baustoffen wie

Kalk/Sandstein nahe kommt, wodurch Lehm diesen Baustoffen hinsichtlich der Wärmespeicherfähigkeit in nichts nachsteht.

Unter ökologischen Gesichtspunkten betrachtet ist vor allem die Wiederverwertbarkeit und die energiearme Herstellung des Baustoffs von Interesse. Herkömmliche Massenbaustoffe wie Zement (als Vorstufe des Betons) oder Ziegel werden in Hochtemperaturprozessen hergestellt. Die dazu notwendige Energie wird vor allem aus fossilen Energieträgern gewonnen. Diese sind jedoch nur begrenzt vorhanden. Weiterhin stellt sich bei den genannten Baustoffen nach Ablauf der Nutzungsphase eines Gebäudes die Frage nach der Endlagerung bzw. Wiederverwertung.

Lehm ist in den meisten Gegenden der Welt vorhanden und kann mit einfachen Mitteln oberflächennah abgebaut werden. Oft ergibt sich bereits beim Aushub einer Baugrube eine beachtliche Menge. Dieser Lehm ist in den meisten Fällen als Hausbaustoff geeignet. Gegebenenfalls muss er etwas mit Sand gemagert werden. Es ist kein Wärmeprozess notwendig. Folglich wird Energie nur noch zum Homogenisieren des plastischen Lehms benötigt. Damit ist für die Lehmaufbereitung nur etwa 1% der Energie notwendig, die für die Herstellung gleicher Mengen Ziegel aufgewendet werden muss. Ebenso unproblematisch stellt sich die End- bzw. Wiederverwertung dar. Unmodifizierter Lehm kann durch Zerkleinern und Wasserzugabe erneut plastisch verformbar gemacht werden. Damit steht einer Wiederverwertung nichts im Wege. Wird der Lehm nicht weiter benötigt oder enthält er nichttoxische Zusatzstoffe wie Stroh, Holz, Blähglas usw., kann er wie herkömmlicher Bodenaushub auf eine Halde transportiert oder kompostiert werden, wodurch er wieder dem natürlichen Stoffkreislauf zugeführt wird.

Obwohl bislang wenig untersucht tragen zwei weitere Eigenschaften bei einigen Menschen zu dem Entschluss bei mit Lehm zu bauen. Lehm bindet Luftschadstoffe. Wahrscheinlich beruht dies auf dem Ionenaustausch der Tonminerale. Lehm schirmt weiterhin hochfrequente Strahlung, wie UMTS und GPS besser ab als andere massive Wandbaustoffe [2].

2.3 Stand der Technik zur Modifizierung von Lehm

Bemühungen um eine Stabilisierung von Lehm erfolgten bisher weniger aus der Intension heraus, die Druckfestigkeit der Lehmbauteile zu erhöhen. Vielmehr versuchte man, eine ungünstige Eigenschaft des Lehms aufzubessern, seine geringe Wasserbeständigkeit. In den meisten Fällen können die Lehmbauteile schon durch konstruktive Maßnahmen vor Wassereinwirkung geschützt werden. An Stellen, wo dies nicht möglich ist, müssen baustofftechnische Maßnahmen durchgeführt werden.

In Deutschland sind bisher nur zweigeschossige Lehmbauten gestattet. Die dort zulässigen Druckspannungen von 0,3-0,5 N/mm² konnten vom Lehm mit seinen üblichen Festigkeiten von 2-5 N/mm² problemlos aufgenommen werden. Aus diesem Grund gab es

kaum Bemühungen zur Steigerung der Druckfestigkeiten. Mit dem zunehmenden Einsatz von Lehm bei modernen Hausbauten stiegen auch die ästhetischen Ansprüche an den Baustoff. In diesem Zusammenhang gewann eine bisher weniger beachtete Lehmeigenschaft zunehmend an Bedeutung - die Kantenfestigkeit. Besonders bei filigraneren Gestaltungselementen, die mit Lehm gut realisierbar sind, ist eine hohe Kantenfestigkeit, welche direkt von der Druckfestigkeit abhängig ist, unabdingbar [2].

Einleitend muss gesagt werden, dass bei Lehm wie bei kaum einem anderen Baustoff der Feuchtigkeitsgehalt einen entscheidenden Einfluss auf die Druckfestigkeit hat. Wenn im Weiteren von Druckfestigkeit die Rede sein wird, ist damit die Trockendruckfestigkeit des Lehms gemeint.

Die Druckfestigkeit eines Lehms ist von folgenden Faktoren abhängig:

- **Korngrößenverteilung des Lehms**
- **Wassergehalt des Lehms**
- **Art und Intensität der statischen bzw. dynamische Verdichtung**
- **Herstellung des Lehmbauteils**
- **Art des Tones**

Sind diese Aspekte beim Bauen mit Lehm optimiert, kann eine weitere Festigkeitssteigerung nur über Zusatzstoffe erreicht werden. Eine einfache und schon recht alte Methode ist der Zusatz von feinen Fasern. Bereits in vergangenen Jahrhunderten setzten die Menschen dem Lehm Tier- oder Menschenhaare zu. Das Ergebnis war eine gesteigerte Zugfestigkeit und damit die Reduzierung von Schwindrissen. Gleichzeitig wirkt sich die erhöhte Zugfestigkeit positiv auf die Druckfestigkeit der Bauteile aus, da die Zerstörung eines Bauteiles immer durch Zug- und nicht durch Druckspannungen geschieht. Weitere schon vor Jahrhunderten verwendete Zusätze sind Rinderblut, Rindergalle, Teer, Magerquark, Knochenleim und Kalk, die jedoch in erster Linie die Wasserbeständigkeit erhöhen und nur unwesentlich zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit beitragen [2].

Nicht alle Tonminerale haben gleiche Bindungskräfte. So haben kaolinitreiche Tone weniger Bindevermögen als montmorillonitreiche. Deshalb führt eine Anreicherung mit Montmorillonit (Bentonit) bei kaolinitreichen Tonen zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. Eine weitere Möglichkeit ist die Zugabe von mineralischen Stoffen wie Kalk oder Zement. Bei fetten Lehmen (Lehme mit hohem Anteil an bindigen Tonmineralen) wirkt sich Kalk und bei mageren Lehmen Zement stabilisierender aus. Ebenso muss nach der Art der vorhandenen Tonminerale unterschieden werden. Während bei kaolinitreichen Tonen Zement eine höhere Druckfestigkeit bewirkt, ist bei montmorillonitreichen Kalk wirksamer. Allerdings stellt sich bei steigenden Zugabemengen dieser beiden Zusätze anfänglich eine Absenkung der Druckfestigkeit ein. Erst bei Zugaben um 7 Ma.-% erreicht man die Festigkeitswerte des unverfestigten Lehms. Erhöht man die Zugabemengen weiter, wird die angestrebte Verfestigung er-

reicht. Dieses Verhalten rührt daher, dass zuerst ein Verdünnungseffekt erzielt wird. Erst bei größeren Mengen macht sich die verfestigende Wirkung des jeweiligen Bindemittels bemerkbar [2].

Eine weitere Möglichkeit Lehm durch einen künstlichen Versteinerungsprozess zu verfestigen, fand Owen G. Ingles an der University of New South Wales in Australien. Nach Einstellung eines alkalischen Milieus wird dem Lehm Eisenoxid (Fe_2O_3) zugegeben. Dadurch bildete sich ein unlösbares Eisensilikat. Nach sieben Tagen konnte eine Trockendruckfestigkeit gemessen werden, welche die des Ausgangsmaterials um das Vierfache übertraf. Sie war höher als bei Zugabe von 10 Ma.-% Zement zu dem gleichen Lehm. Erfolgte eine thermische Behandlung bei 500°C wurde die Verfestigung beschleunigt und verstärkt [3, 4, 5].

Zur Erhöhung der Druckfestigkeit von kaolinitreichen Tonen ist nach Weiß (1963) die Zugabe von Harnstoff und Ammoniumacetat sinnvoll. Dabei sollen die Wasserstoffbrücken zwischen den Silikatschichten gesprengt und die Biegezugfestigkeit um das 10-20fache erhöht werden [6].

Eine weitere Möglichkeit zur Modifikation von Lehm und besonders zur Erhöhung seiner Wasserbeständigkeit ist der Zusatz von Polymerdispersionen. Untersuchungen hierzu wurden von der Universität Siegen in Zusammenarbeit mit der BASF AG Ludwigshafen durchgeführt. Während das Einbringen von Polymerdispersionen zusammen mit anderen Stoffen in einigen, vor allem japanischen, Patenten [7, 8, 9, 10] geschildert wird, beschäftigte man sich in Siegen mit der alleinigen Nutzung der Kunststoffe. Verschiedenen Lehm- bzw. Tonmaterialien wurden bis zu 3,5 Ma.-% Polymerdispersion zugesetzt. Es standen neun Dispersionen zur Verfügung. Mit der zugegebenen Menge an Polymerdispersion konnten Festigkeitssteigerungen um das 5-10fache im Vergleich zu unmodifiziertem Lehm erreicht werden. Schon ab 0,5 Ma.-% Dispersionszugabe stieg die Wasserbeständigkeit stark an. Nach 6tägiger Unterwasserlagerung von Probekörper mit 1,5 Ma.-% Kunststoffdispersion konnten keine Zerfallserscheinungen festgestellt werden [11].

An der Bauhaus-Universität Weimar wurden Untersuchungen zur Verfestigung von Schaumtonen durchgeführt. Hierbei wurden ebenfalls Geopolymere eingesetzt. Dabei konnten signifikante Festigkeitssteigerungen erreicht werden. Damit war die Eignung von Geopolymeren zur Stabilisierung von Tonen nachgewiesen [12, 13]. Da Lehm die selben Mineralphasen wie Ton aufweist und sich lediglich durch einen erhöhten SiO_2-Gehalt aufgrund der Sandfraktion von ihm unterscheidet, war der Einsatz von alumosilikatischen Polymerbindern zur Verfestigung von Lehm naheliegend.

3 Geopolymerbinder

Zur Erzeugung eines Geopolymerbinders benötigt man im wesentlichen zwei Komponenten. Zum einen wird ein Feststoff eingesetzt, welcher aus reaktionsfähigen, aluminatischen und silikatischen Verbindungen besteht. Diesem wird eine alkalische Lösung als Aktivator zugegeben. Beide Komponenten bilden in einer Polymerisationsreaktion anorganische Polymere.

Die Reaktionsfähigkeit des Feststoffanteils beruht auf einer energiereichen, amorphen Struktur. Als Feststoff wird meist Metakaolin eingesetzt. Die energiereiche Struktur erhält man durch Brennen des Kaolins bei niedrigen Temperaturen (ca. 750°C), wobei dieser dehydroxiliert und sich stark gestörte Kristallstrukturen bis hin zu amorphen Strukturen bilden [1]. Diesen Vorgang nennt man auch thermische Aktivierung. Grundsätzlich können auch andere Tonminerale durch thermische Aktivierung in eine reaktive Form überführt werden [14]. Hochofenschlacken, Flugaschen und vergleichbare Materialien mit einem hohen Anteil Glasphase eignen sich ebenfalls als reaktiver Feststoff für Geopolymerbinder [15, 16].

Als alkalische Lösung verwendet man häufig Natriumhydroxid. Die entstehende Natronlauge erzeugt eine starke Alkalizität, mit der selbst schwach reaktive Feststoffe zur Geopolymerisation angeregt werden können. Durch die alkalische Lösung werden in der reaktionsfähigen Feststoffphase nach und nach die Si – O und Al – O-Bindungen zerstört. Die dabei entstehenden silikatischen und alumosilikatischen Monomere schließen sich durch eine Kondensationsreaktion zu alumosilikatischen Netzwerken zusammen. Die Geopolymere sind dabei dreidimensional vernetzt und werden auch als Polysialate bezeichnet. Sialate ist eine Abkürzung für Silizium-oxo-aluminate [17]. Sie bestehen aus verbundenen $[SiO_4]$- und $[AlO_4]$-Tetraedern. Die Verbindung entsteht durch die gemeinsame Nutzung aller Sauerstoffatome. Da das Al^{3+}-Ion in Viererkoordination eine negative Ladung bewirkt, müssen auch positive Ionen im Netzwerk vorhanden sein. Möglich sind zum Beispiel Na^+, K^+, Ca^{2+}, Ba^{2+}, NH_4^+, H_3O^+. Es kann allgemein folgende empirische Formel angeben werden:

$$M_n \left\{ \left(SiO_2 \right)_z - AlO_2 \right\}_n wH_2O$$

Dabei steht M für das Kation, wie zum Beispiel Kalium, Natrium oder Calzium. «n» gibt den Grad der Polymerisation an. «z» kann die Werte 1,2 oder 3 annehmen [18, 19, 20,].

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Verwendete Lehme und Charakterisierungsmethoden

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier Lehme verschiedener Anbieter charakterisiert um Kennwerte im Einsatz befindlicher Lehme aufzuzeigen und einen geeigneten Lehm für die weiteren Untersuchungen zur Festigkeitssteigerung auszuwählen.

Lehm 1	Lehmgrube Firma Schneider, Kleinfahner
Lehm 2	CASADOBE, Mühlacker
Lehm 3	JOKI Haustechnik GmbH, Wittenberge
Lehm 4	KARPOSIT Lehmbau AG, Peißen

Die Charakterisierung erfolgte mittels chemischer Analyse, Differential-Thermo-Analyse, Röntgendiffraktometrie und Korngrößenanalyse.

Die chemische Analyse wurde im Labor der Professur Bauchemie nasschemisch mit üblichen Methoden der Silikatchemie durchgeführt.

Die Differentialthermoanalyse wurde mit Hilfe der „Simultanen Thermoanalysenapparatur Setsys 16/18“ bestimmt.

Die Korngrößenanalyse bedurfte mehr als eines Verfahrens, da Lehme einen relativ breiten Kornbereich aufweisen. Während die Sandfraktion (2-0,63mm) mittels Nasssiebung bestimmt werden konnten, bot sich für die Ermittlung der Verteilung der Schluff- und Tonfraktion eine Sedimentationsanalyse an. Tone werden vor allem in der keramischen Industrie eingesetzt. Daher wurde das dort häufig genutzte Sedigraph-Messverfahren genutzt. Die Analysen wurden an der Professur „Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung“ mit einem "SediGraph 5000 ET" durchgeführt.

Die Röntgendiffraktometrie wurde mit Hilfe eines „Röntgendiffraktometers XRD 3003 TT“ an der Professur Bauchemie vorgenommen. Die quantitative Zusammensetzung wurde mit einem Rietveldprogramm ermittelt. Damit konnten die mineralogischen Bestandteile der Lehme qualitativ und quantitativ bestimmt werden.

4.2 Herstellung der Probekörper

Zur Herstellung der Lehm/Geopolymer-Mischung wurden zuerst Lehm und Geopolymerbinder in der Konsistenz angepasst, um eine gute Homogenisierbarkeit beim Mischen zu erreichen. Dazu wurde die Zähigkeit der vorgegebenen Geopolymermischung mittels Ausbreitversuchs auf dem Schocktisch bestimmt. Anschließend wurde der Wassergehalt am Lehm variiert, und die Konsistenz auf die des Binders eingestellt. Der Lehm wurde 3 Tage vor Mischbeginn mit diesem Wassergehalt

eingesumpft. Bei diesen Versuchen wurde eine zähflüssige Konsistenz eingestellt, um bei der Probekörperherstellung eine gute Verdichtung und Entlüftung zu gewährleisten.

Zur Herstellung des Geopolymers wurden Metakaolin, Natrium-Wasserglas und Natronlauge verwendet. Folgende zwei Geopolymermischungen standen zur Verfügung (GP1 und GP2):

Tabelle 1 Zusammensetzung der Geopolymerbindermischungen

GP 1		GP 2	
Metakaolin	100	Metakaolin	100
NaOH	28	NaOH	23
Na-Wasserglas	14	Na-Wasserglas	57
Wasser	63	Wasser	30
Angabe in Masseteilen			

Der Binder GP2 war demnach wesentlich wasserglasreicher als der Binder GP 1.

Die Natronlauge wurde durch Lösen von festem Natriumhydroxid in Wasser hergestellt. Da der Lösungsvorgang stark exotherm abläuft, wurde die Lösung in einem hitzebeständigen, geschlossenen Laborgefäß durch Wasserkühlung in einem Wasserbad unter Rühren mittels Magnetrührer auf 20°C abgekühlt.

Für die Herstellung der Lehm/Geopolymer-Mischung wurde der folgende Arbeitsablauf eingehalten:

- **Abwiegen von Natriumhydroxid, Wasser, Natrium-Wasserglas, Metakaolin und gesumpften Ton**
- **Lösen des Natriumhydroxids in Wasser unter ständigem Umrühren und Kühlen**
- **Zugabe des Natrium-Wasserglases**
- **Unterrühren des Metakaolins**
- **Zugabe dieser Mischung zu dem gesumpften Lehm und Verrühren mit dem Handrührgerät**
- **Einfüllen der fertigen Mischung in die geölten und mit Teflonspray präparierten Formen, dabei Vibrationsverdichtung mit niedriger Amplitude**
- **Endverdichtung durch mehrfaches Schocken**
- **Abziehen überstehenden Materials mit einem Stahllineal**

Gemäß Versuchsplan wurden Mischungen mit einem Geopolymeranteil von 0, 10, 20, 30, 40 und 50 Ma.-% hergestellt. Die Ma.-%-Angaben verstehen sich als die Trockenmasse des Metakaolins, als Hauptbestandteil des Geopolymerbinders, bezogen auf die Trockenmasse des Lehms. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da vor dem Mischen sowohl dem Lehm als auch dem Geopolymerbinder Wasser zugegeben wird. Nach dem Mischen beider Fraktionen kann dieses Wasser aber durch die chemischen Reaktionen keiner Komponente mehr zugeordnet werden. Ebenso sind die Menge des Wasser, wie

auch die Menge und Art der alkalischen Anregungslösung variabel und können bei großtechnischen Prozessen oder weiteren Versuchen durchaus anders geartet sein. Aus diesen Gründen wurde für die vorliegende Arbeit der genannte Bezug gewählt.

Nach dem Abziehen der Formen wurden diese in Kunststoffbeutel verpackt, um einen Wasserverlust durch Abdampfen am Beginn der Erhärtung zu vermeiden. Die Lagerung der Proben erfolgte bei 40°C sieben Tage im Trockenschrank. Nach einem Tag wurden die Kunststoffbeutel leicht geöffnet, sodass die Proben langsam trocknen konnten. Die Proben mit 0 und 10 Ma.-% Geopolymer blieben bis zum 5. Tag verschlossen, da Vorversuche zeigten, dass es sonst zu starker Rissbildung aufgrund Trockenschwindung kommt. Nach sieben Tagen erfolgte die Umlagerung in Exsikkatorschränke. In diesen wurde eine relative Luftfeuchte von 58 ± 1 % über einer übersättigten Natriumbromidlösung eingestellt. Diese Feuchtigkeit entspricht etwa der gängigen Luftfeuchtigkeit in Wohnräumen. In diesem Klima verblieben die Probekörper bis zur Prüfung.

4.3 Bestimmung der Festigkeit

Da es Ziel dieser Arbeit ist, Untersuchungen zur Erhöhung der Druckfestigkeit des Lehms mittels Zusatz von Geopolymerbindern anzustellen, wird diese im Laufe der Versuche sowohl am unbehandelten wie auch am modifizierten Lehm ermittelt. Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte unter Ausgleichsfeuchte bei realitätsnahen Bedingungen (siehe Lagerung der Probekörper). In diesem Zusammenhang wurde auch die Biegezugfestigkeit ermittelt. Diese ist beim bisher im Bauwesen eingesetzten Lehm nur wenig betrachtet worden.

Die Biegezug- sowie die Druckfestigkeit wurden analog der Prüfung von Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 an Normprismen durchgeführt. Für die Vorversuche wurden Kleinstprismen hergestellt. Mit der DIN EN 196-1 liegt ein genormtes Baustoffprüfverfahren vor, welches bei den geringeren Festigkeiten von Lehm geeignet ist, jedoch gleichzeitig mögliche Erhöhungen der Festigkeiten aufzeigen kann. Günstig an diesem Verfahren ist auch, dass Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit nacheinander an denselben Probekörpern ermittelt werden können.

4.4 Bestimmung der Rohdichte, der Reindichte und der Porosität

In Vorversuchen sollte eine geeignete Geopolymerbindermischung ausgewählt werden. Dazu sollten neben den Festigkeiten die Rohdichte, Reindichte und Porosität bestimmt werden.

Die Ermittlung der Reindichte erfolgte mit dem Helium-Ausgleichspyknometer-Verfahren. Die Messung wurde mit einem „AccuPyc 1330“ durchgeführt.

Zur Ermittlung der Rohdichte ist die Anwendung des Unterwasserwäge-Verfahrens nicht möglich, da Lehm wenig wasserbeständig ist. Daher wurde sie mit dem „Geo Pyc

1360“ bestimmt. Hierbei wird als Prüfmedium keine Flüssigkeit, sondern ein feinpulvriger Stoff eingesetzt, der sich gegenüber Lehm und Geopolymer während der Messung inert verhält.

Die Porosität wurde entsprechend folgender Formel aus der Roh- und Reindichte ermittelt:

$$Porosität = \frac{\text{Reindichte} - \text{Rohdichte}}{\text{Reindichte}} \cdot 100\%$$

4.5 Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusion erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 12572. Es wurde das Feuchtraumverfahren gewählt, was bedeutet, dass im Probebehälter eine höhere Luftfeuchte eingestellt wird als in der Umgebung. Im Konkreten wurde im Probebehälter über einer übersättigten NaBr-Lösung eine relative Luftfeuchte von etwa 58 % und in der umgebenden Luft im Klimaschrank mittels Silicagel eine Luftfeuchte nahe 0 % realisiert.

Zur Prüfung wurden je Mischungszusammensetzung drei scheibenförmige Probekörper mit einem Durchmesser von ca. 90 mm und einer Dicke von ca. 25 mm wie oben beschrieben hergestellt. Nach der Wärmebehandlung wurden die Probekörper solange im Ausgleichklima (20°C und 58 % relative Luftfeuchte) gelagert, bis sie Massekonstanz aufwiesen. Die Ränder des Probekörpers (Mantelflächen) wurden mit PVC-Isolierband abgedichtet, um eine Diffusion über diese Flächen zu vermeiden.

In den Vorratsbereich im unteren Teil des Probebehälters wurde übersättigte NaBr-Lösung so weit eingefüllt, bis sie etwa 2cm unterhalb des Probeauflagers stand. Dann wurden die Scheiben zentriert in den Probebehälter eingelegt und der umgebende Spalt bis zur Oberfläche des Probekörpers mit Silikon ausgefüllt (Abb. 1).

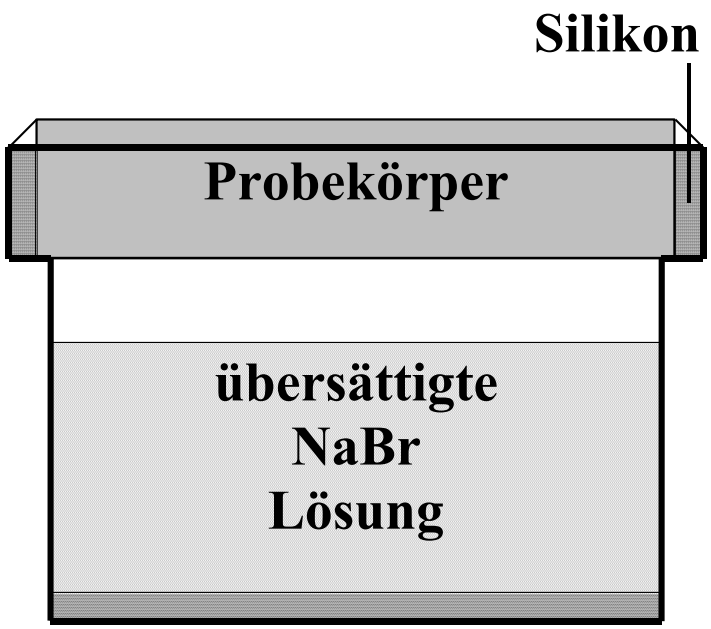

Abb. 1 Probebehälteraufbau beim Wasserdampfdiffusionsversuch

Die Probebehälter selbst wurden in einen Klimaschrank gestellt. In diesem standen auf dem oberen und unteren Boden Schalen mit Silicagel, welches eine Luftfeuchte im Klimaschrank nahe 0 % realisiert werden konnte (Abb. 2).

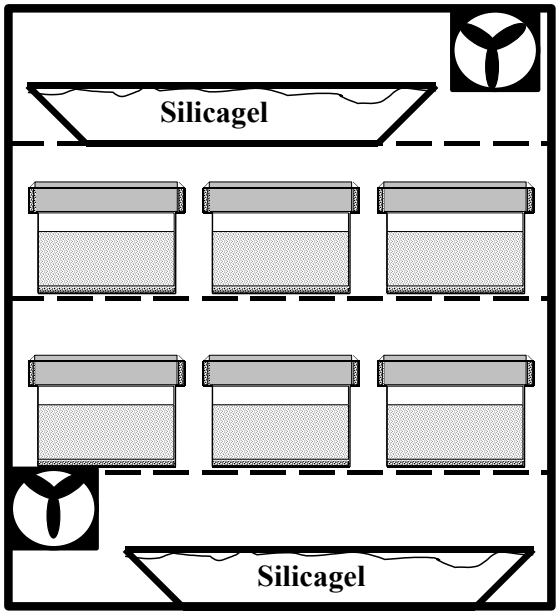

Abb. 2 Lagerung der Probebehälter im Klimaschrank

Ventilatoren in zwei entgegengesetzten Ecken des Schrankes sollten eine gleichmäßige Umwälzung der Luft und Anströmung der Probekörperoberflächen gewährleisten. Die Proben wurden täglich gewogen. Im Anschluss an den Wägevorgang wurde das Silicagel ausgetauscht um sicherzustellen, dass dessen Wasseraufnahmekapazität und damit auch die Wasseraufnahmerate nicht nennenswert sinken.

Der Diffusionsstrom wurde mit Hilfe der zeitlichen Gewichtsabnahme über 21 Tage beobachtet. Die Auswertung erfolgte entsprechend der in DIN EN ISO 12572 genannten Vorgehensweise.

4.6 Bestimmung der Sorptionsfeuchte

Als Sorptionsfeuchte wird die Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet, welche ein Material bei einer bestimmten Umgebungsfeuchte annimmt. Das Verfahren zur Bestimmung der Sorptionsfeuchte ist in der DIN EN ISO 12571 genormt. Die Materialausgleichsfeuchte wurde deshalb in Anlehnung an diese DIN ermittelt. Es wurden in vier Glaskästen mit Hilfe übersättigter Salzlösungen konstante relative Luftfeuchten von 43 % (über K_2CO_3), 58 % (über NaBr), 75 % (über NaCl) und 81 % (über KBr) bei 20°C eingestellt. Die Auswahl der Salzlösungen und der damit korrelierenden Feuchten erfolgte unter dem Gesichtspunkt der Simulation der realen Situation in Wohnräumen.

Die Probekörper wurden bis zur Massekonstanz getrocknet. Dann erfolgte die Lagerung in Klimakästen bis zur Massekonstanz bei gleichmäßiger Temperatur (Abb. 3). Nach Einstellung der Massekonstanz wurde die Sorptionsfeuchten in Ma.-% errechnet. Dazu wurde die Masseänderung auf das Trockengewicht bezogen.

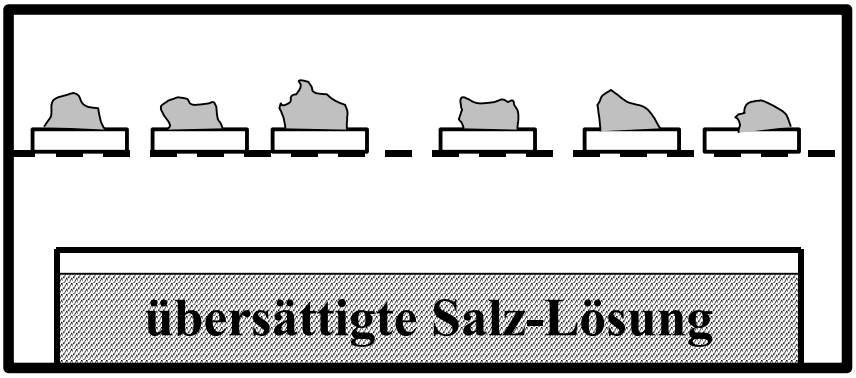

Abb. 3 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Sorptionsfeuchte

4.7 Bestimmung der Wasserbeständigkeit

Durch die starke Verdrängung des Baulehms zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch andere Baustoffe, liegen heute kaum gültige Normen zur Prüfung desselben vor. Besonders zur Beurteilung der Wasserbeständigkeit fehlt ein genormtes Verfahren. In der Literatur sind unterschiedliche mehr oder weniger subjektive Beurteilungsversuche zu finden. In Ermangelung eines für verfestigte Lehme anwendbaren Verfahrens war es notwendig, für die vorliegenden Proben eine eigene Vorgehensweise zu erarbeiten. Dazu wurden zwei Versuchsaufbauten erstellt.

In einem ersten Test wurde die Wasserbeständigkeit bei vollständiger Unterwasserlagerung ermittelt. Dazu wurde in einem Glaskasten je ein Probekörper der Mischungen mit

0, 20, 30, 40, 50 Ma.-% Geopolymer mit Silikonkleber stehend befestigt. Der Glaskasten wurde mit Wasser gefüllt und die Prismen in bestimmten Zeitabständen fotografiert. Damit konnte der Zustand der Probekörper über sieben Tage optisch dokumentiert werden.

Mit einem zweiten Versuchsaufbau wurde die Wasserbeständigkeit unter fließendem Wasser simuliert. Die Zielstellung hierbei war herauszufinden, ob fließendes Wasser durch Auslaugungs- und Abwaschvorgänge zu anderen Ergebnissen führt als der erste Test. Zu diesem Zweck wurden Prismen auf einer schrägen Rinne liegend befestigt. Am oberen Teil der Rinne wurde Wasser aufgegeben, welches dann die schiefe Ebene hinunterlief und dabei die Probekörper umspülte. Dabei war die Strömung so eingestellt, dass die Prismen nur auf etwa halber Höhe umspült werden, um Abwaschungen besser erkennen zu können. Die Prüfung wurde über 24 Stunden durchgeführt. Danach wurden die Probekörper visuell, verbal beurteilt.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Charakterisierung der Lehme

Die chemische Zusammensetzung der vier Lehme ist in Abb. 4, Abb. 6, Abb. 8 und Abb. 10 dargestellt. Die Hauptbestandteile wurden dabei in einem Kreisdiagramm ersichtlich gemacht. Rechts davon wurden die Nebenbestandteile in einem zweiten Kreisdiagramm aufgeschlüsselt. Parallel dazu wurden die Ergebnisse der Differenz-Thermo-Analyse in Abb. 5, Abb. 7, Abb. 9 und Abb. 11 aufgezeigt. Die rote Linie in diesen Diagrammen spiegelt die energetischen Effekte wieder. Positive Peaks stehen für exotherme und negative Peaks für endotherme Effekte. Die blaue Linie gibt die Masseabnahme wieder.

Im Prinzip kann sind in allen vier DTA-Diagrammen fünf Effekte zu beobachten, die je nach Lehmzusammensetzung mehr oder weniger stark zum Tragen kommen. Der erste Effekt ist endotherm und ist bei Temperaturen zwischen 50°C-90°C beobachtbar. Er geht mit einer relativ starken Masseabnahme einher. Dieser Effekt resultiert aus der Austreibung physikalisch gebundenen Wassers. Darauf folgend ist in den Diagrammen ein exothermer Effekt zu sehen, der sich als „Berg“ mit einigen kleineren Peaks zeigt und von einer langsamen aber stetigen Masseabnahme begleitet wird. Dies ist die Verbrennung organischer Bestandteile. Sie findet etwa zwischen 150°C und 500°C statt. Die folgenden zwei endothermen Effekte (ein geringer und ein größerer) sind mit einer erst geringen dann aber schnell stärker werdenden Masseabnahme verbunden und zwischen 550°C und 800°C zu beobachten. Hierbei überlagert sich die Kristallwasserabgabe der Tonminerale (Dehydroxilation) mit der Entsäuerung des Calciumcarbonats. Der Hauptmasseverlust ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der CO_2-Abgabe zuzuschreiben.

Der letzte endotherme Effekt kann vermutlich einer Umkristallisierung in den Silikatphasen zugeschrieben werden.

Betrachtet man die chemische Zusammensetzung aller vier Lehme, findet man als Hauptbestandteil immer Siliziumoxid, da dieses sowohl im quarzigen Sand, im Feldspat als auch in den Tonmineralen enthalten ist. Wie aus der Zusammensetzung der Tonminerale zu erwarten war, ist Aluminiumoxid durchweg die zweithäufigste Komponente. Im Diagramm (Abb. 4) sieht man, dass bei Lehm 1 ein erhöhter Anteil an Calciumoxid vorliegt. Deshalb ist auch der Masseverlust bei der Entsäuerung am höchsten (Abb. 5).

Lehm 2 hat von den analysierten Lehmen den geringsten Glühverlust. Dies lässt auf eine geringe Summe von Calcit und organischen Bestandteilen schließen, da beide Komponenten zu einem Masseverlust beim Glühen führen. Weiterhin wird Kristallwasser ausgetrieben. Einen genaueren Aufschluss kann nur die DTA-Aufnahme geben. Dieser Lehm zeigte beim Verbrennungseffekt einen durchschnittlichen Masseverlust, wodurch die These geringer organischer Bestandteile wiederlegt wird. Da auch der Calcitanteil der chemischen Analyse folgernd nur geringfügig niedriger ist als bei Lehm 1, ist der geringe Glühverlust wohl eher in einer nur schwachen Kristallwasserabgabe zu suchen. Dieser Lehm hat weiterhin mit über 65 Ma.-% den größten Anteil an Siliziumoxid (Abb. 6).

Die chemische Analyse von Lehm 3 ergab gegenüber den anderen Lehmen eine durchschnittliche Zusammensetzung (Abb. 8).

Lehm 4 zeichnet sich durch einen geringeren Anteil an Siliziumoxid aber eine höhere Menge an Aluminiumoxid aus. Weiterhin ist der Anteil an Magnesiumoxid mit 5,6 Ma.-% wesentlich höher als bei den anderen Lehmen. Über den starken Glühverlust von über 10 Ma.-% kann man schließen, dass dieser Lehm den höchsten Anteil an organischen Stoffen oder anorganischem Kohlenstoff aufweist. Eine weitere Erklärung für den Glühverlust kann in der Abspaltung von chemische gebundenem Wasser gesehen werden (Abb. 10).

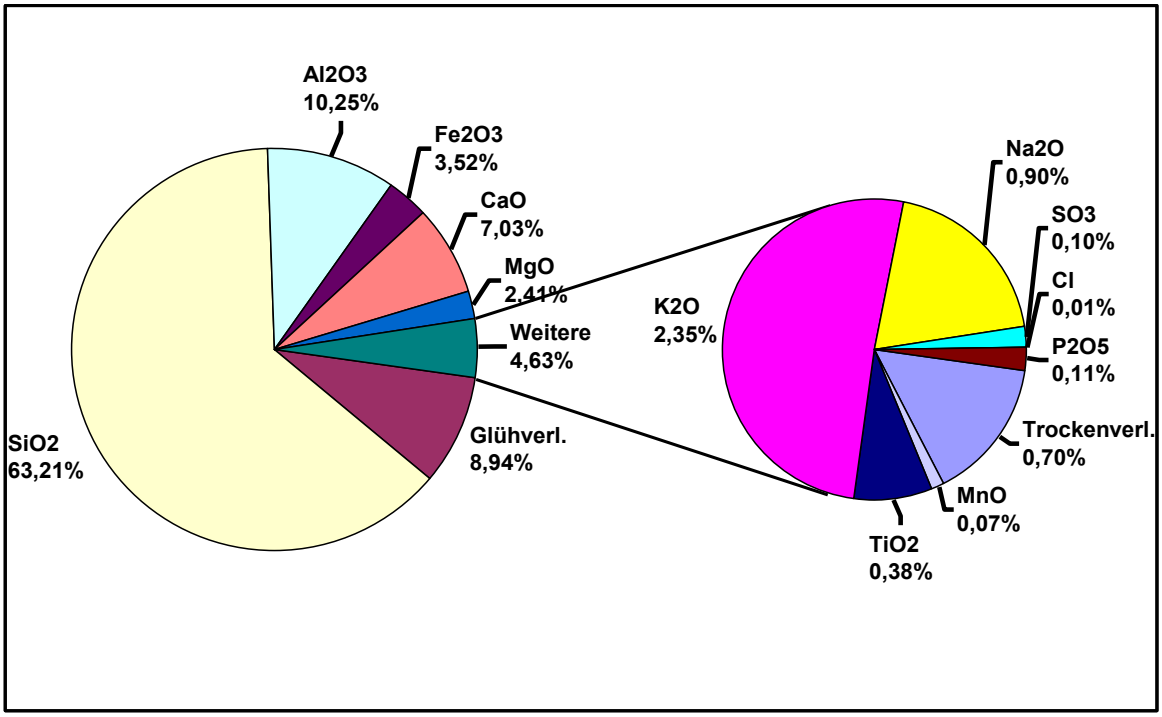

Abb. 4 Chemische Analyse -Lehm 1

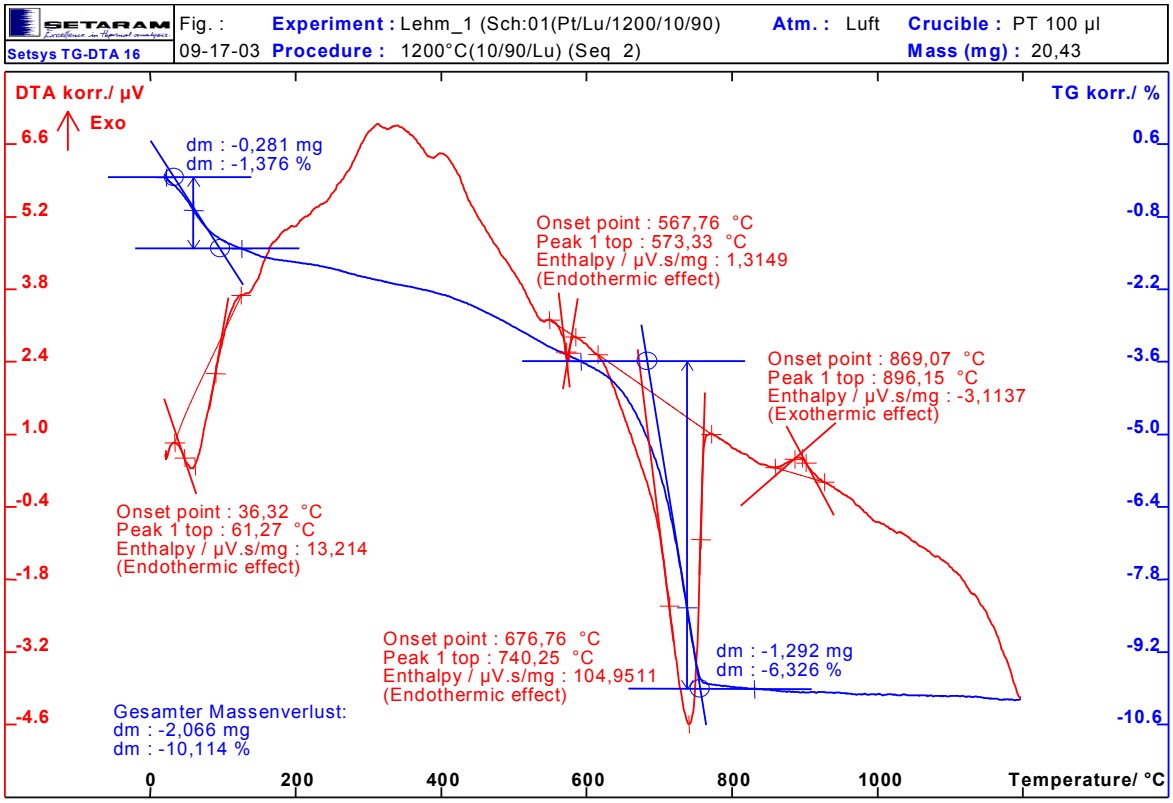

Abb. 5 DTA-Diagramm - Lehm 1

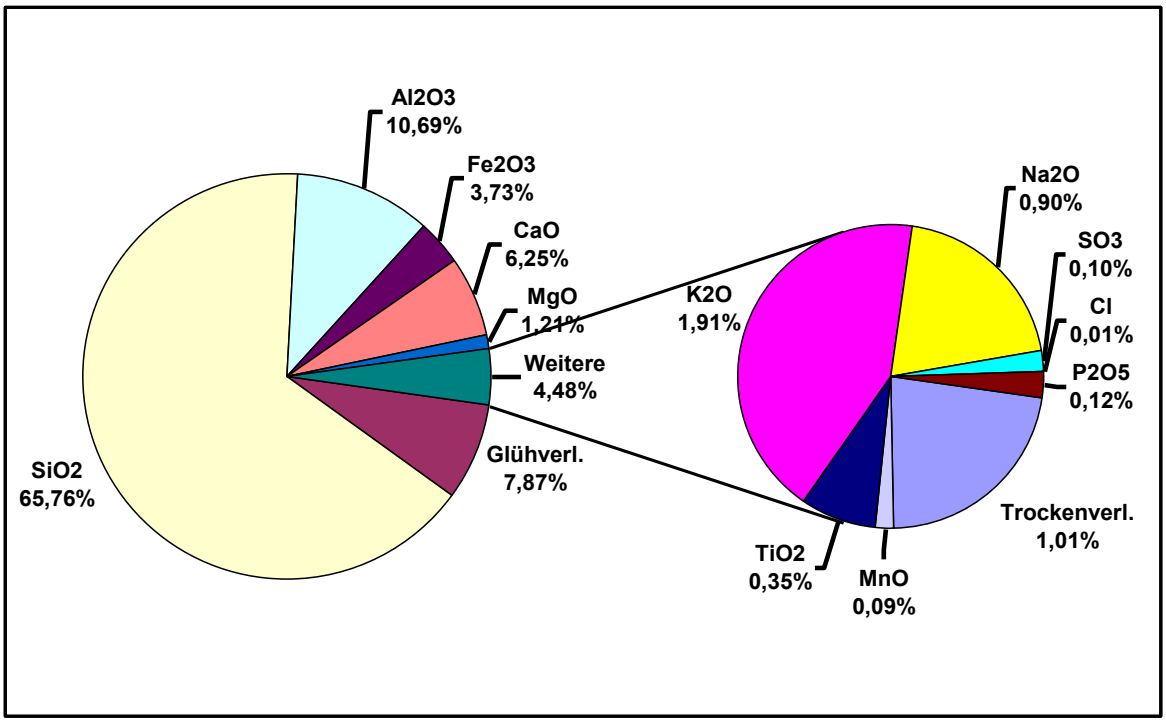

Abb. 6 Chemische Analyse - Lehm 2

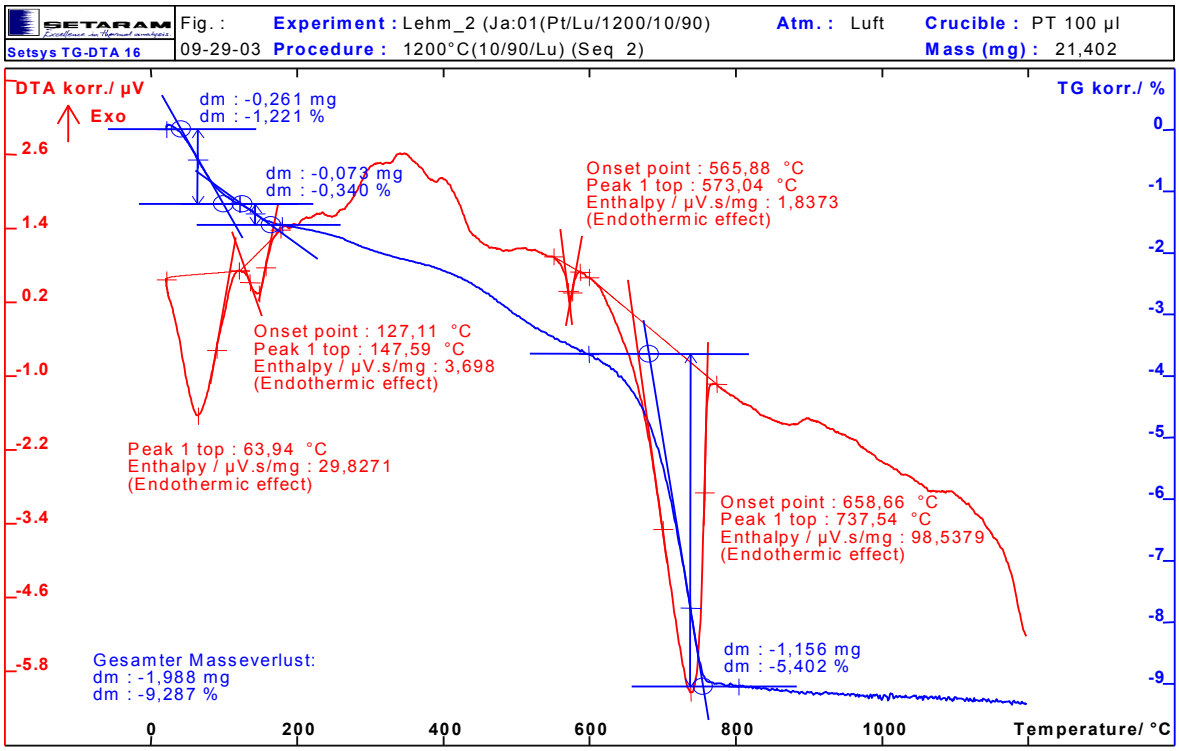

Abb. 7 DTA-Diagramm - Lehm 2

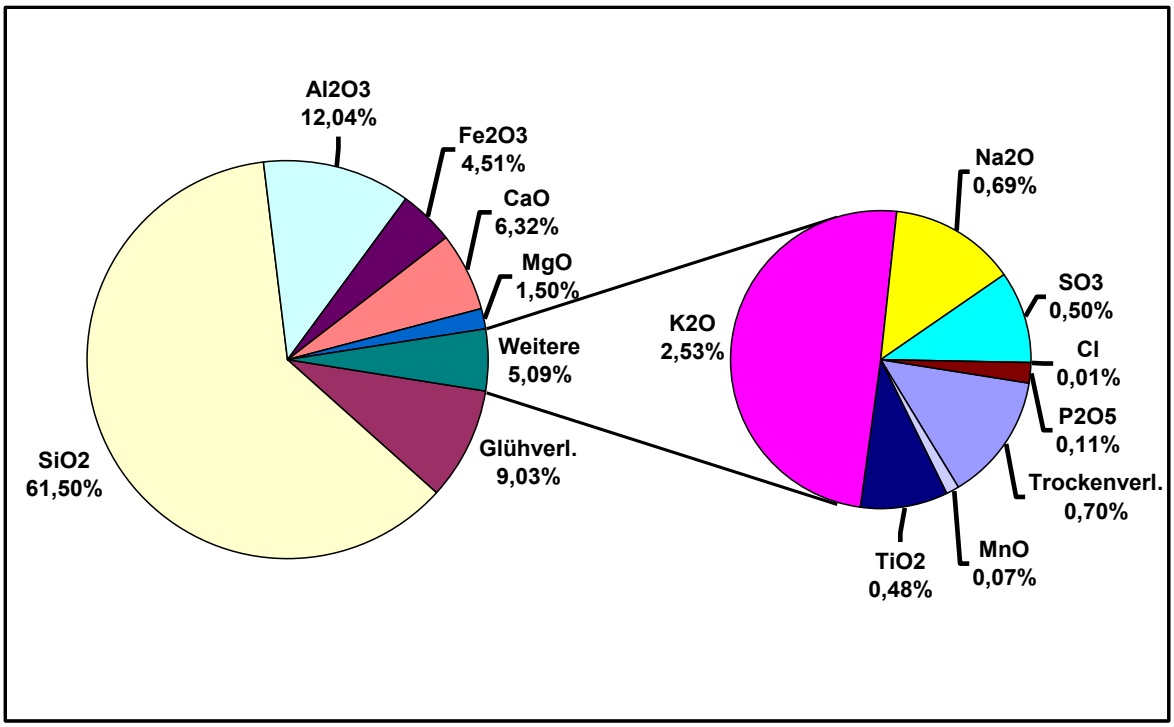

Abb. 8 Chemische Analyse - Lehm 3

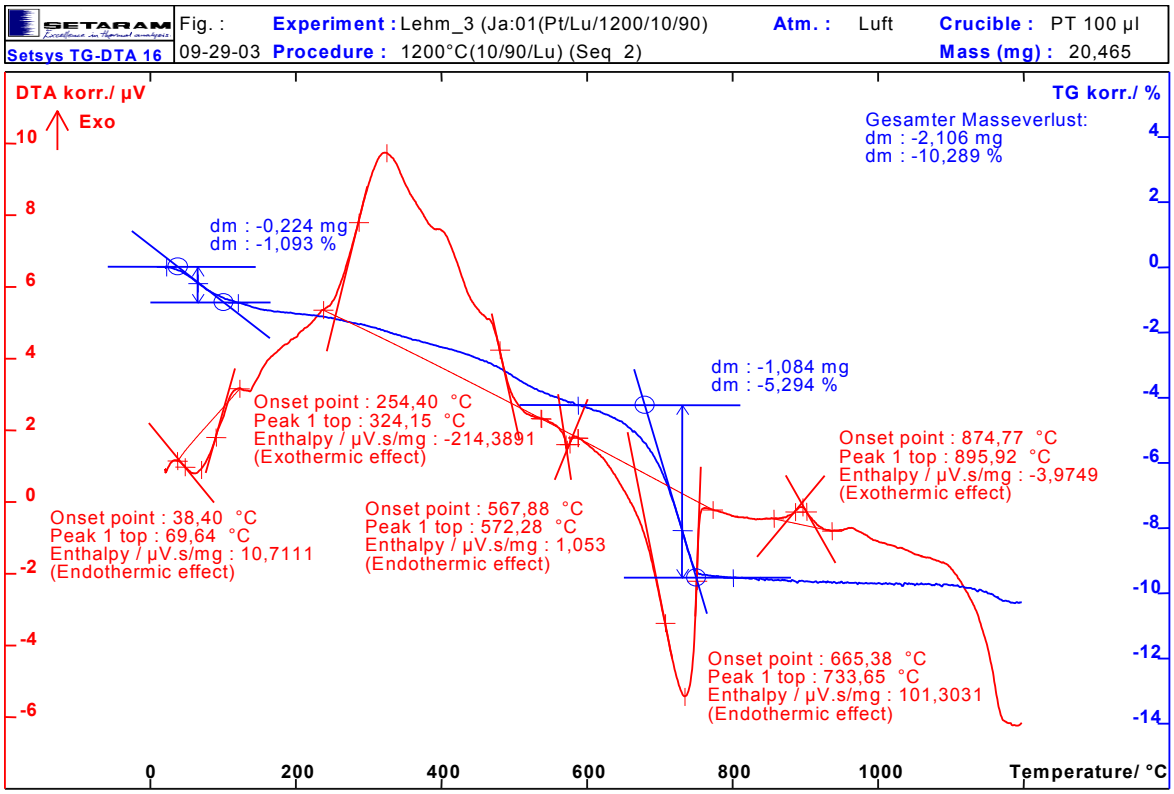

Abb. 9 DTA-Diagramm - Lehm 3

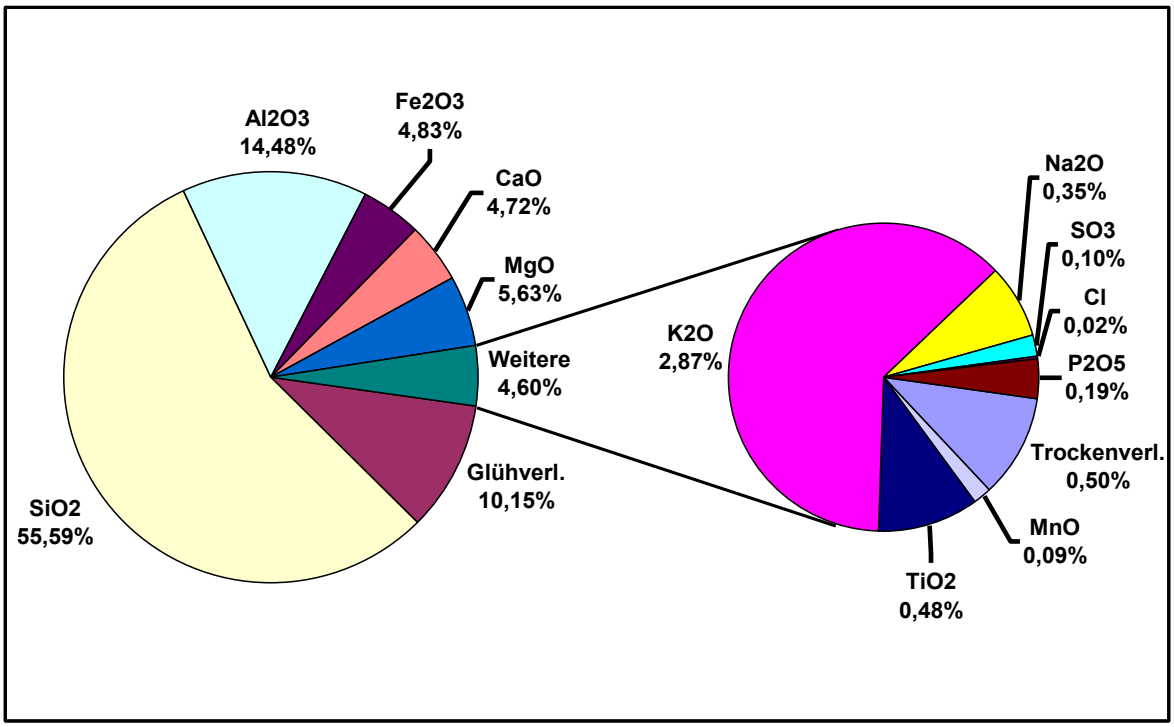

Abb. 10 Chemische Analyse - Lehm 4

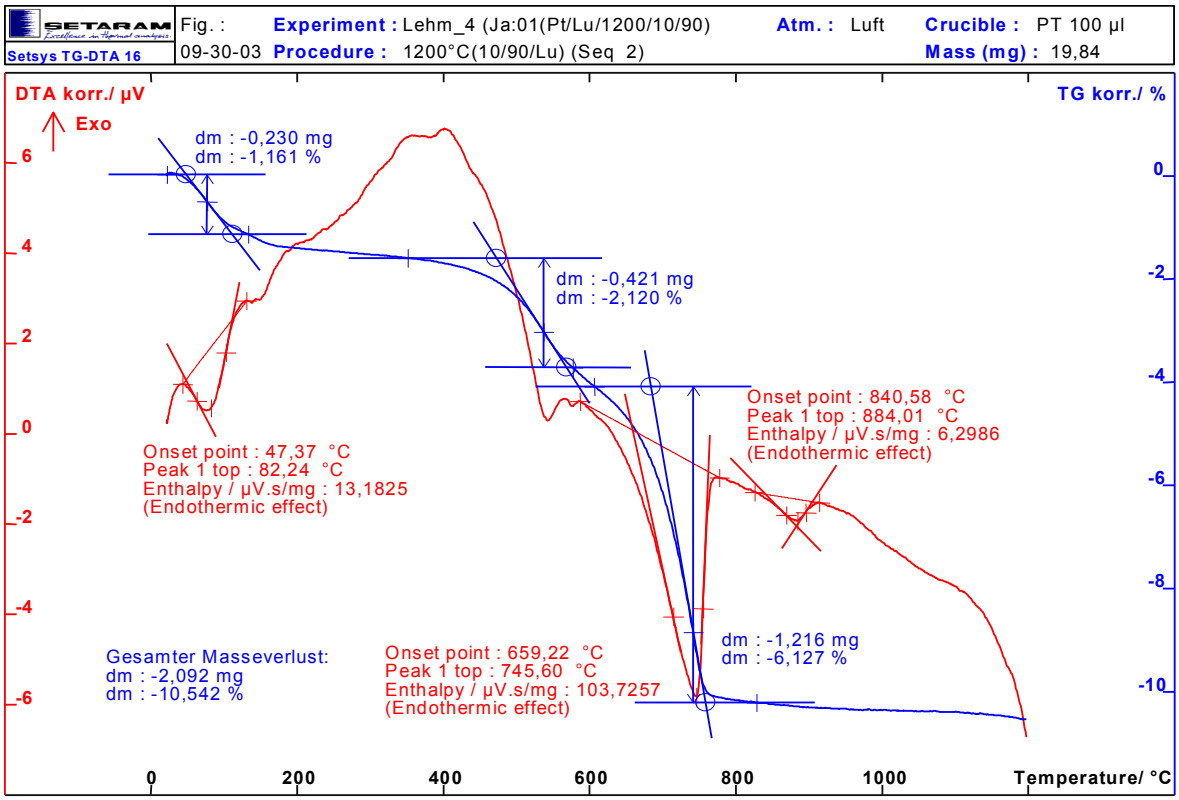

Abb. 11 DTA-Diagramm - Lehm 4

Für die Eigenschaften des Lehms ist jedoch weit weniger seine chemische Zusammensetzung als vielmehr die Art und der Gehalt an Tonmineralien entscheidend. Aus diesem Grund wurde eine **Bestimmung der Mineralphasen** durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Die Spektrogramme sind im Anhang zu finden

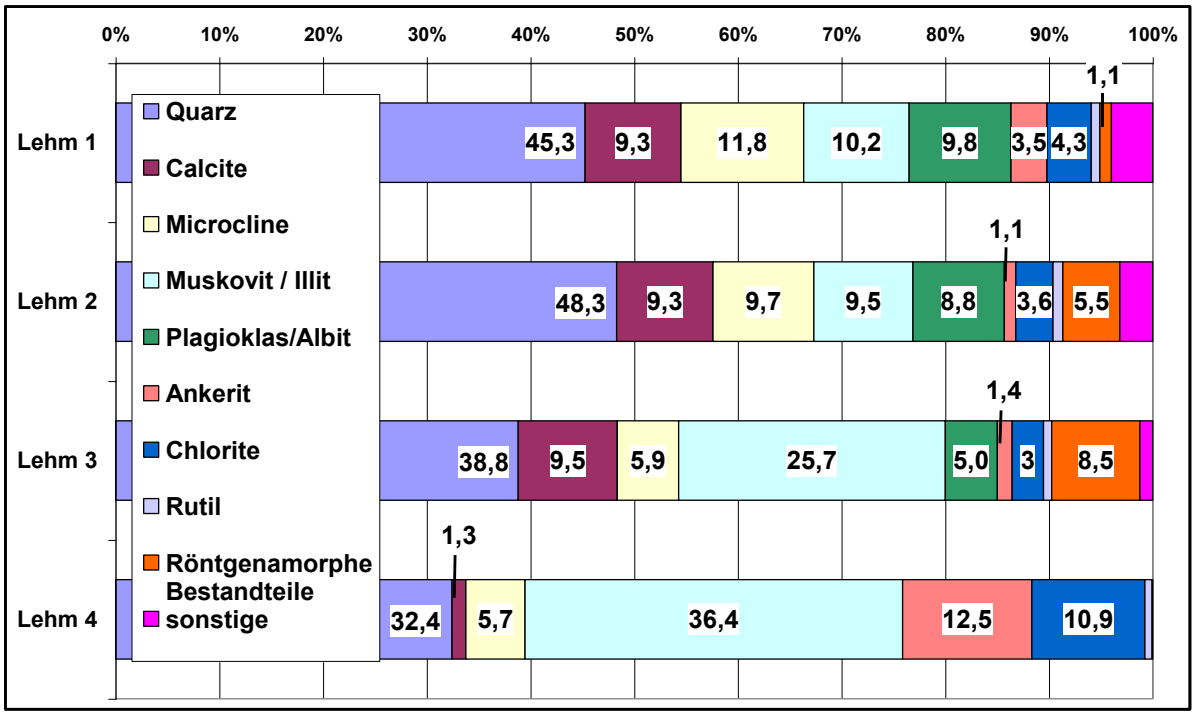

Abb. 12 Mineralogische Zusammensetzung der 4 Lehme

Da das Glimmermineral Muskovit und das Tonmineral Illit röntgenographisch nicht zu unterscheiden sind, handelt es sich bei den angegebenen Muskovitanteilen vermutlich um eine Mischung aus diesen beiden Mineralen. Es ist anzunehmen, dass Illit der größere Teil ist. Auffällig ist in erster Linie, dass das weit verbreitete Tonmineral Kaolinit nicht einzeln dargestellt ist. Der Kaolinitanteil in den untersuchten Lehmen betrug < 1,5 Ma.-% und ist in den sonstigen Bestandteilen enthalten. Die Lehme 1 und 2 zeichnen sich durch hohe Quarzanteile (> 40 Ma.-%) aus. Auch in den Anteilen an Microcline heben sie sich von den Lehmen 3 und 4 ab. Dagegen sind die masseprozentualen Mengen an Muskovit/Illit weitaus geringer als bei Lehm 3 und 4. Lehm 4 ist mit Abstand am reichsten an Muskovit/Illit. Diese Mineralien sind hier häufiger vorhanden als Quarz. Auch die Masseanteile an Ankerit und Chlorit übersteigen die der anderen 3 Lehme. In Lehm 4 konnte jedoch kein Plagioklas gefunden werden, der in den Lehmen 1-3 vorkam. Auch röntgenamorphe Bestandteile konnten in diesem Lehm nur in geringsten Mengen detektiert werden.

Da für die bildsamen Eigenschaften des Lehms nur die Tonmineralien von Bedeutung sind, wurden die einzelnen Mineralphasen in Abb. 13 in die Gruppen Tonmineralien

(Muskovit/Illit+Chlorit), Feldspäte (Plagioklase+Microcline) und andere Bestandteile eingeteilt.

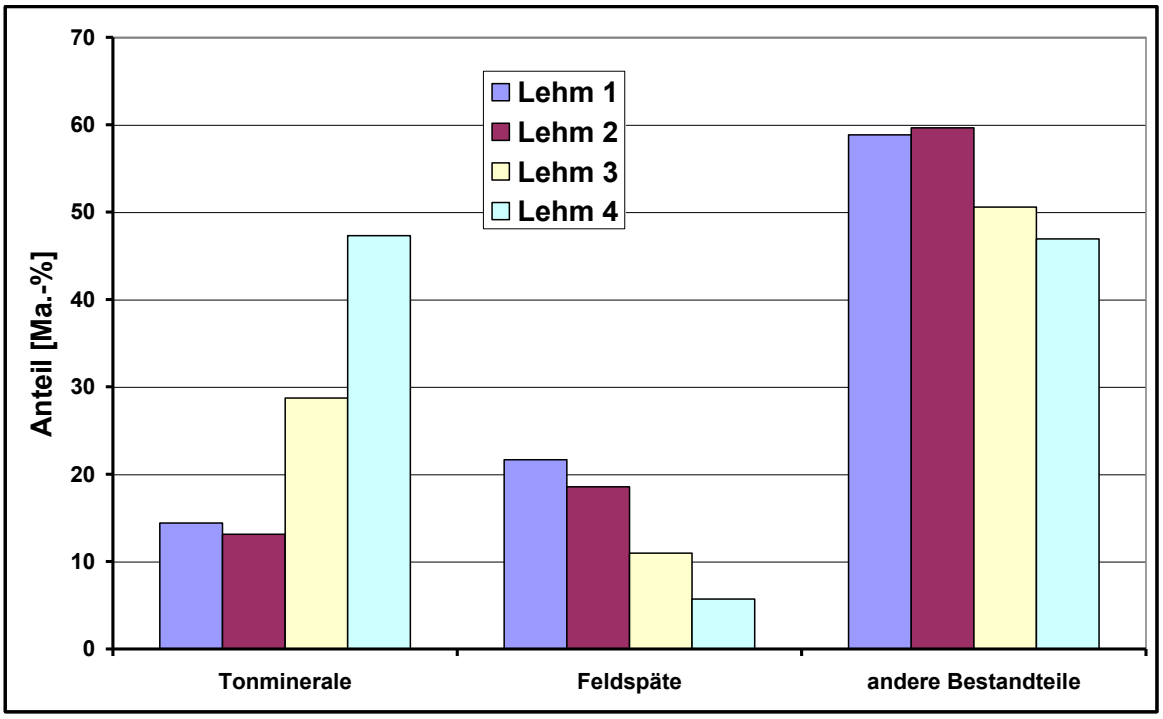

Abb. 13 Gruppierte mineralogische Zusammensetzung der 4 untersuchten Lehme

Hierbei weist Lehm 4 die höchsten Mengen an Tonmineralien auf. Der genaue Wert ist jedoch aufgrund der Nichtunterscheidbarkeit von Muskovit und Illit unsicher. Trotzdem kann bei diesem Lehm davon ausgegangen werden, dass der Anteil an Tonmineralien am höchsten ist.

Als eine weitere Methode zur Charakterisierung der Lehme wurde die **Korngrößenanalyse** durchgeführt. Das Diagramm in Abb. 14 zeigt die Ergebnisse als Durchgangskennlinien. Bei der Sedimentationsanalyse wird die Partikelgröße als Durchmesser von Kugeln ermittelt, die in der gleichen Geschwindigkeit sedimentieren wie die vorliegenden Teilchen. Über diesen Korngrößen wurde der Durchgang in Ma.-% aufgetragen, der sich bei Aufgabe des charakterisierten Stoffes auf ein Sieb mit der äquivalenten Siebmaschenweite ergeben würde. Wie man den Kennlinien entnehmen kann, ist Lehm 2 der grobkörnigste. Entscheidend für die Haupteigenschaften des Lehms ist, wie in 2.1 bereits erwähnt, der Ton. Da die bindigen Bestandteile im Ton vor allem Korngrößen kleiner 2 µm aufweisen, ist dem Diagramm weiterhin zu entnehmen, dass Lehm 1 den höchsten, Lehm 3 und 4 einen niedrigeren und Lehm 2 den geringsten Anteil an bindigen Tonteilchen aufweisen.

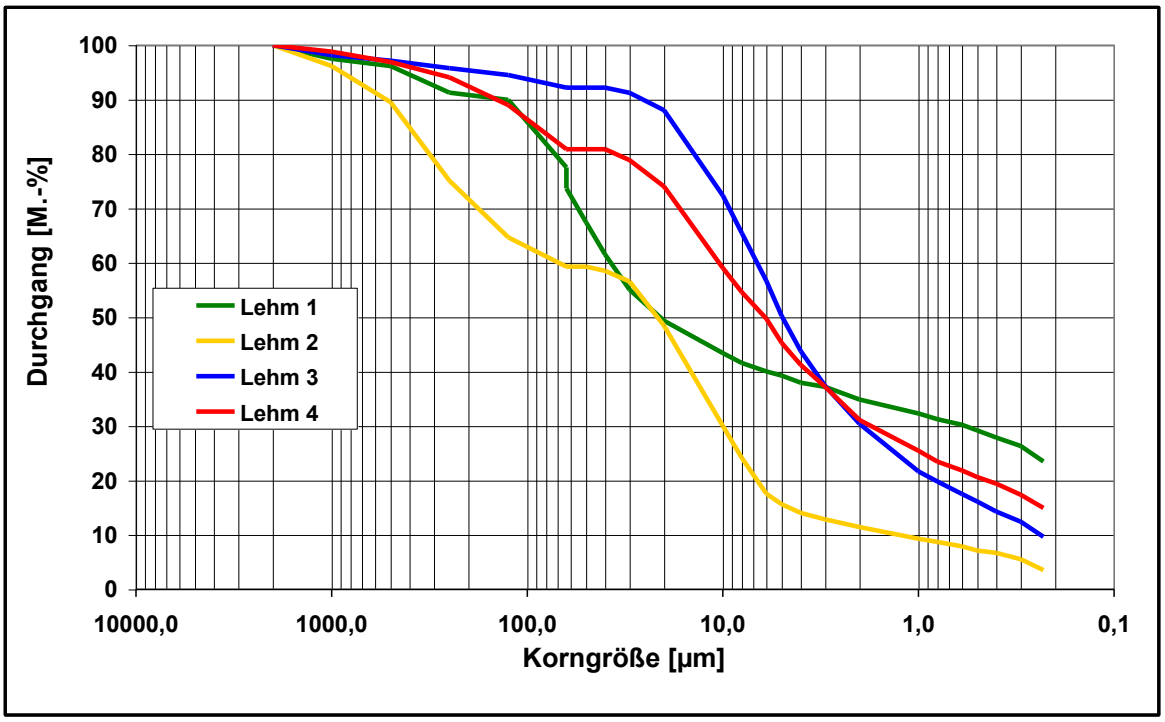

Abb. 14 Durchgangskennlinien der 4 Lehme

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen wurde Lehm 1 für die Probekörperherstellung und die weiteren Versuche ausgewählt. Dieser Lehm bildet mineralogisch ein gutes Mittel der in Deutschland vorgefundenen und von Lehmbaufirmen eingesetzten Tone und verspricht gleichzeitig durch seinen ausreichend hohen Anteil bindiger Tonteilchen eine erfolgreiche Probekörperherstellung. Durch den recht hohen Quarzanteil sind Schwindrisse weniger wahrscheinlich.

5.2 Auswahl des Geopolymerbinders (Vorversuche an Kleinstprismen)

5.2.1 Bestimmung der Dichten und Porositäten der Mischungen

An den Kleinstprismen sollte der Einfluss von Geopolymergehalt und -art auf die Dichte und Porosität ermittelt werden. Es zeigte sich, dass es einen funktionellen Zusammenhang zwischen der Reindichte bzw. der Rohdichte und dem Geopolymergehalt der Mischung gibt. Man kann erkennen, dass bei beiden Mischungen mit zunehmendem Anteil an Geopolymer die Rohdichte zuerst stark dann schwächer absinkt. Bei der wasserglasreichen Mischung steigt sie jedoch ab einem Gehalt von etwa 30 Ma.-% wieder leicht an (Abb. 15).

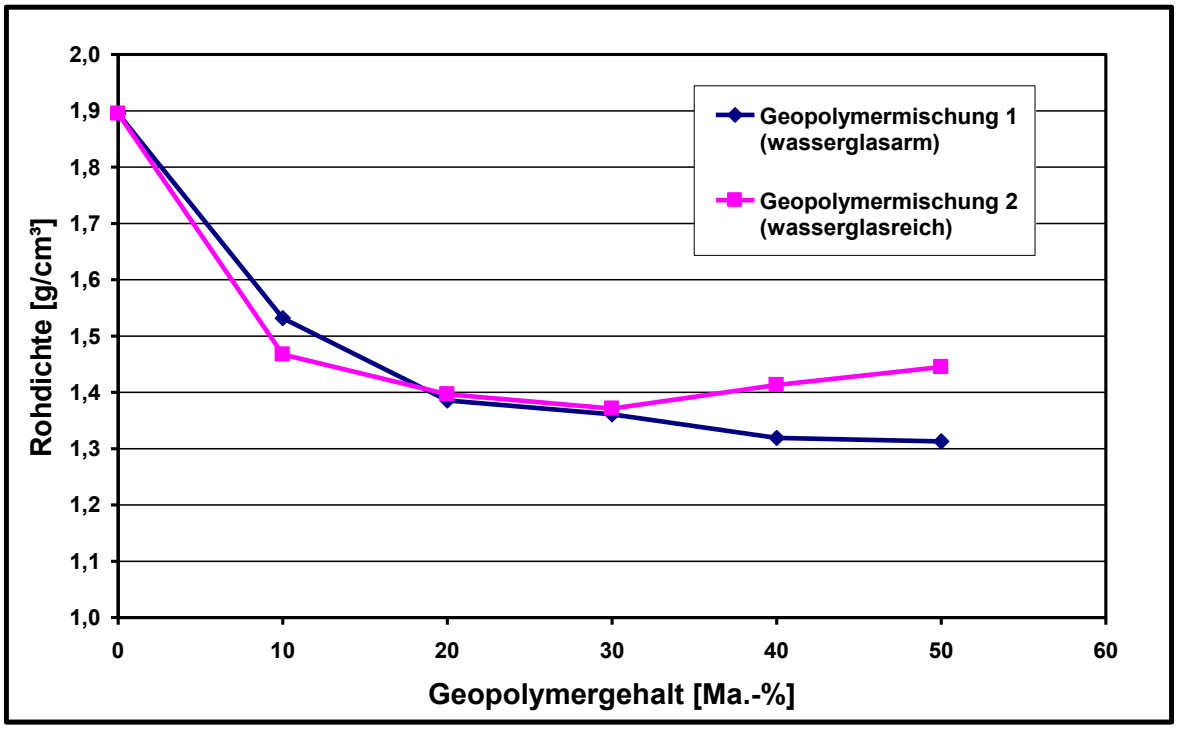

Abb. 15 Abhängigkeit der Rohdichte vom Geopolymergehalt der Mischung

Ähnliches kann auch bei der Reindichte beobachtet werden. Diese sinkt ebenfalls mit steigendem Geopolymergehalt. Der Abfall verläuft bis zu 50 Ma.-% grob linear (Abb. 16).

Verändern sich Roh- und Reindichte nicht gleichmäßig, muss es auch Veränderungen in der Porosität geben. Tatsächlich steigt diese mit zunehmendem Geopolymergehalt beginnend bei 30 Vol.-% des reinen Lehms anfangs stark an. Der Anstieg verringert sich jedoch schnell und bei der wasserglasreichen Geopolymermischung 2 ist nach 30 Ma.-% ein Abfall der Porosität festzustellen (Abb. 17).

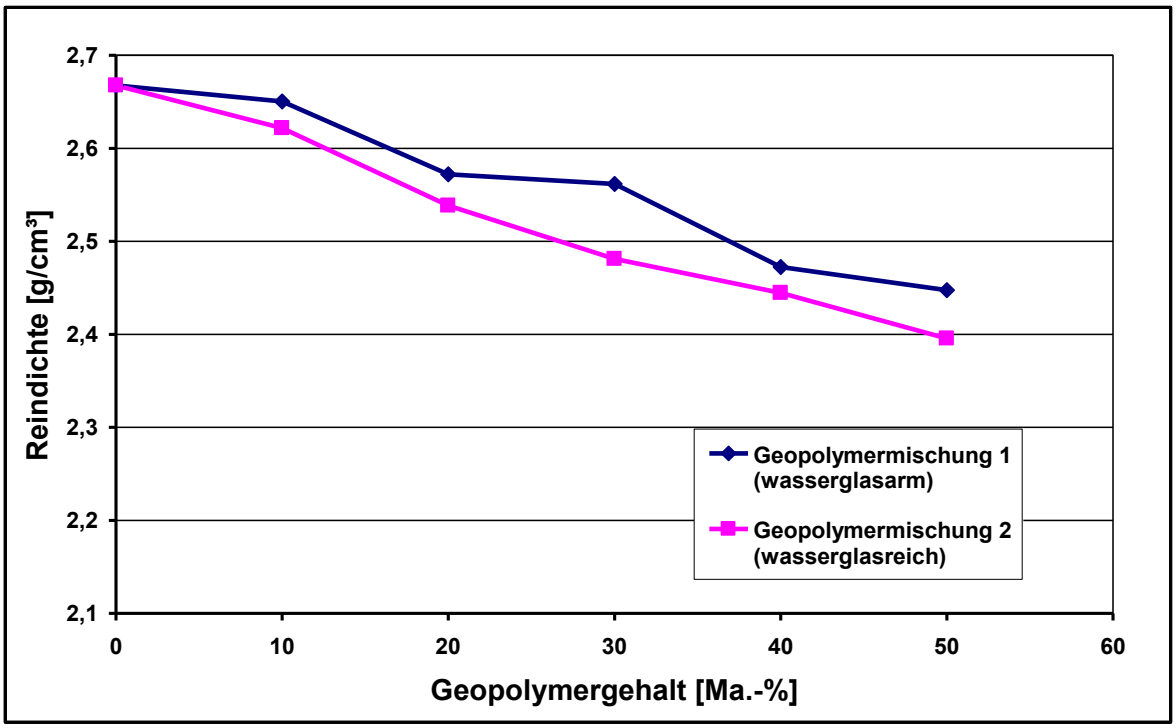

Abb. 16 Abhängigkeit der Reindichte vom Geopolymergehalt der Mischung

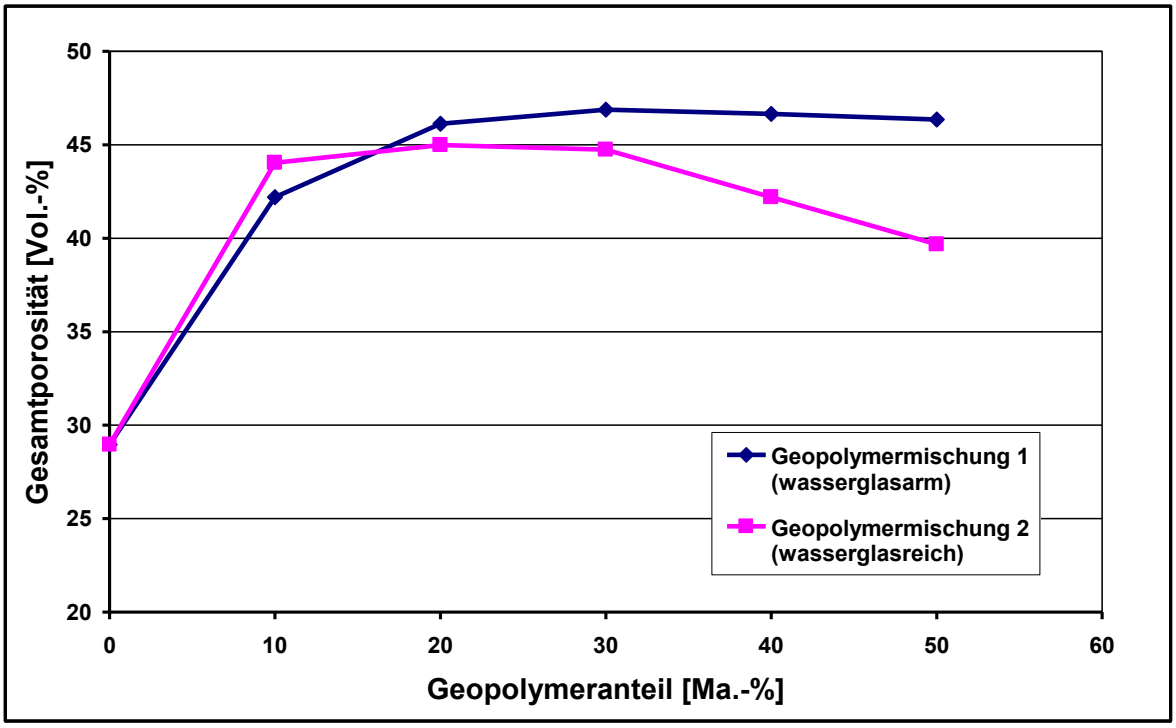

Abb. 17 Abhängigkeit der Porosität vom Geopolymeranteil der Mischung

Die anfänglich stark steigende Porosität kann mit einer Verdünnung der Tonstruktur erklärt werden. Das eingebrachte Geopolymer lagert sich weiterhin zwischen die Tonplättchen und schirmt die im Ton vorherrschenden Bindungskräfte ab. Diese Abschirmung führt zu einem Zerfall der Struktur. Die Tonteilchen lagern sich lockerer. Die

entstehenden Hohlräume werden vom Geopolymer nicht aufgefüllt. Bei größeren Zugabemengen schafft das Geopolymer in relevantem Maße neue Verbindungen zwischen den Tonteilchen und baut eine Struktur vergleichbar einer Zeolithstruktur auf.[22] Dieses Verhalten kann für die Anwendung eines geopolymerstabilisierten Lehms in der Praxis von besonderer Bedeutung sein, da eine Erhöhung der Porosität bei sonst gleichen Eigenschaften meist eine Erniedrigung der Wärmeleitung bewirkt.

5.2.2 Ergebnisse der Druck-/Biegezugfestigkeitsprüfung

Die ermittelten Werte aus der Biegezugfestigkeitsprüfung an Kleinstprismen sind im Diagramm (Abb. 18) in Abhängigkeit vom Geopolymergehalt aufgetragen. Es wurde festgestellt, dass die Mischungen mit Geopolymerbinder 2 die höheren Werte aufwiesen.

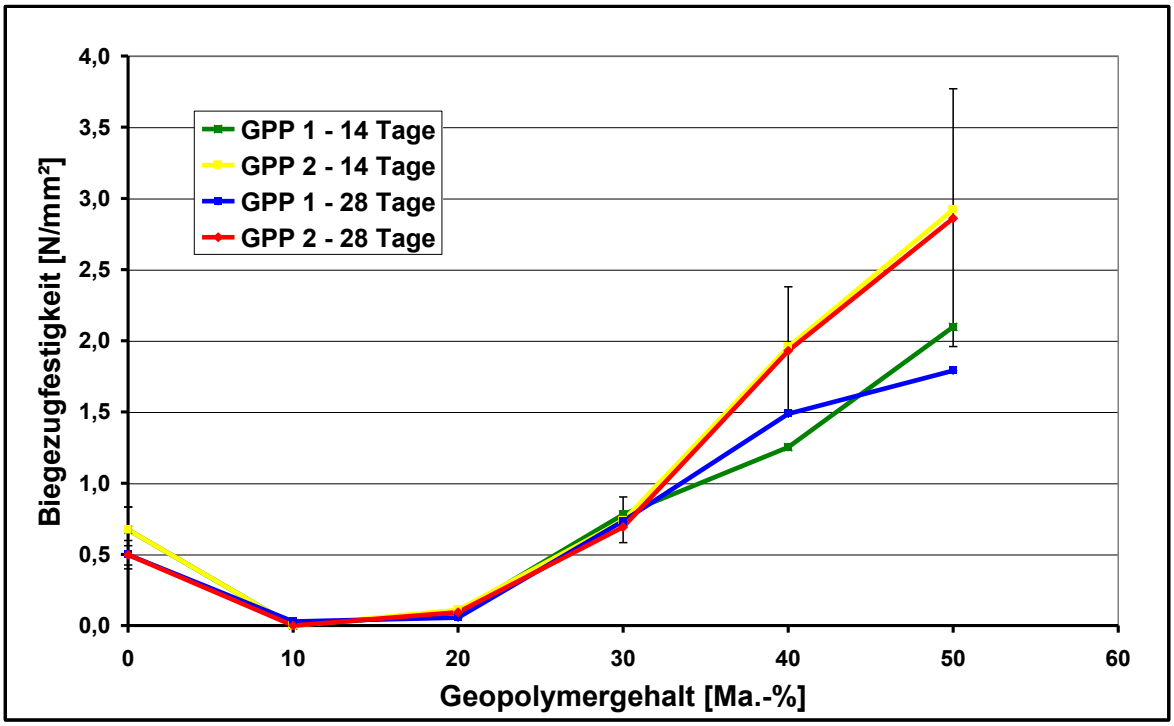

Abb. 18 Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit vom Geopolymergehalt der Mischung

Bemerkenswert ist, dass es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den 14- und den 28-Tage-Werten gibt. Offensichtlich ist der Erhärtungsvorgang aufgrund des Trocknungsprozesses bereits nach sieben Tagen abgeschlossen. Die Biegezugfestigkeiten sinken bei beiden Mischungen mit zunehmendem Geopolymergehalt erst ab, steigen dann bei 30 Ma.-% etwa wieder auf den Wert des reinen Lehms an und nehmen weiter zu. Mit dem wasserglasreichen Geopolymeransatz erreicht man bei 50 Ma.-% Zugabe schon Biegezugfestigkeiten von über 2,5 N/mm². Die Streuungen wurden nur für eine der Funktionen dargestellt, sind aber bei den anderen Kurven ähnlich. Die relativ hohe Schwankungsbreite erklärt sich aus der Geometrie der Kleinstprismen. Inhomogenitäten

oder Fehler in der Struktur wirken sich bei kleinen Probekörpern wesentlich stärker auf die Biegezugfestigkeit aus als bei großen.

Ähnliche Kurvenverläufe wie bei den Biegezugfestigkeiten sind auch bei den Druckfestigkeiten zu beobachten. Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den 14- und den 28-Tagewerten festzustellen (Abb. 19).

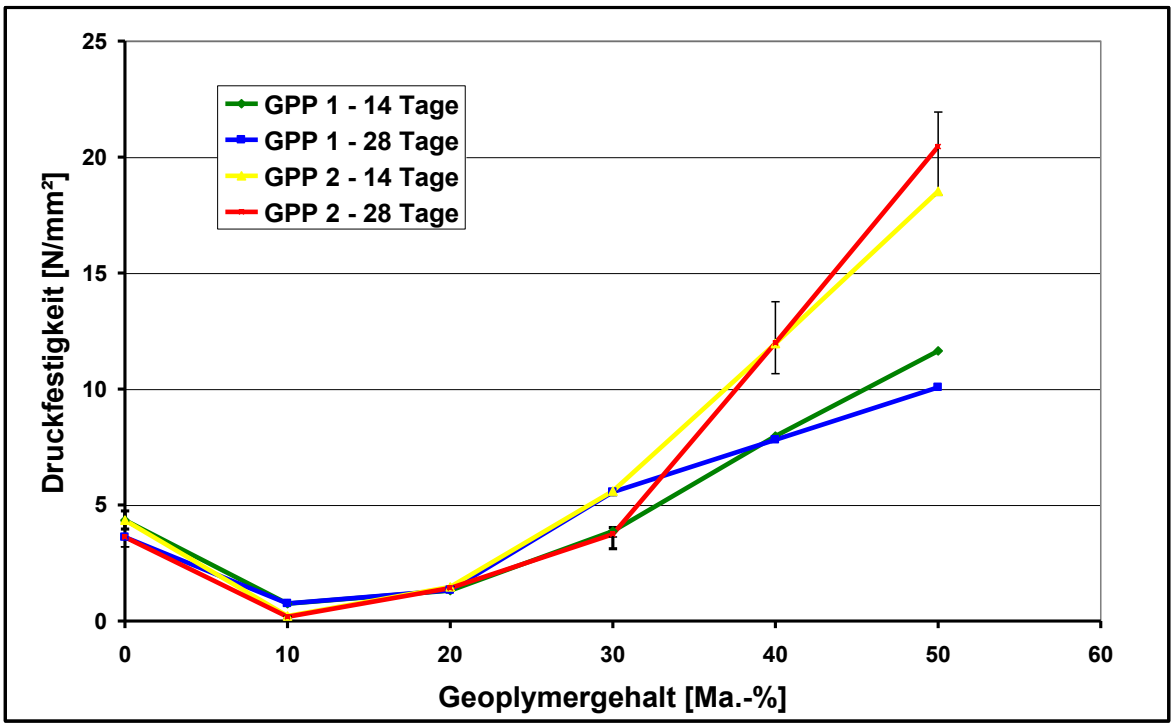

Abb. 19 Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Geopolymergehalt der Mischung

Der Verlauf der Druckfestigkeitskurve liegt in den selben Ursachen begründet, da Druck- und Zugfestigkeit sich gegenseitig bedingen. Die Druckfestigkeit nimmt ebenfalls mit steigendem Geopolymeranteil in der Mischung ab, steigt anschließend wieder an und erreicht bei etwa 30 Ma.-% dem Lehm vergleichbare Werte. Danach steigt sie auf Werte bis zu etwa 20 N/mm² an. Auch hier sind die an einer Kurve aufgetragenen Streubreiten den anderen bei den anderen Kurvenverläufen ähnlich, jedoch wirkten sich offensichtlich bei den Druckfestigkeitswerten Inhomogenitäten relativ gering auf die Festigkeit aus.

Da die wasserglasreiche Geopolymermischung GP2 die weitaus höheren Festigkeitszuwächse brachte, wurde diese Mischung für die Probekörperherstellung bei allen weiteren Versuchen verwendet.

5.3 Eigenschaften der verfestigten Lehmformlinge

5.3.1 Festigkeit

Normprismen wurden hergestellt und nach 28 Tagen geprüft. Die Werte der ermittelten Druckfestigkeiten sind im folgenden Diagramm (Abb. 20) in Abhängigkeit von der Geopolymermenge dargestellt. Vergleichend dazu sind ebenfalls die Werte der Kleinstprismen mit Geopolymerbinder 2 aus den Vorversuchen hinzugefügt. Obwohl beide Prismenarten unterschiedliche Geometriefaktoren aufweisen, sind keine merklichen Unterschiede zwischen den Festigkeitswerten erkennbar.

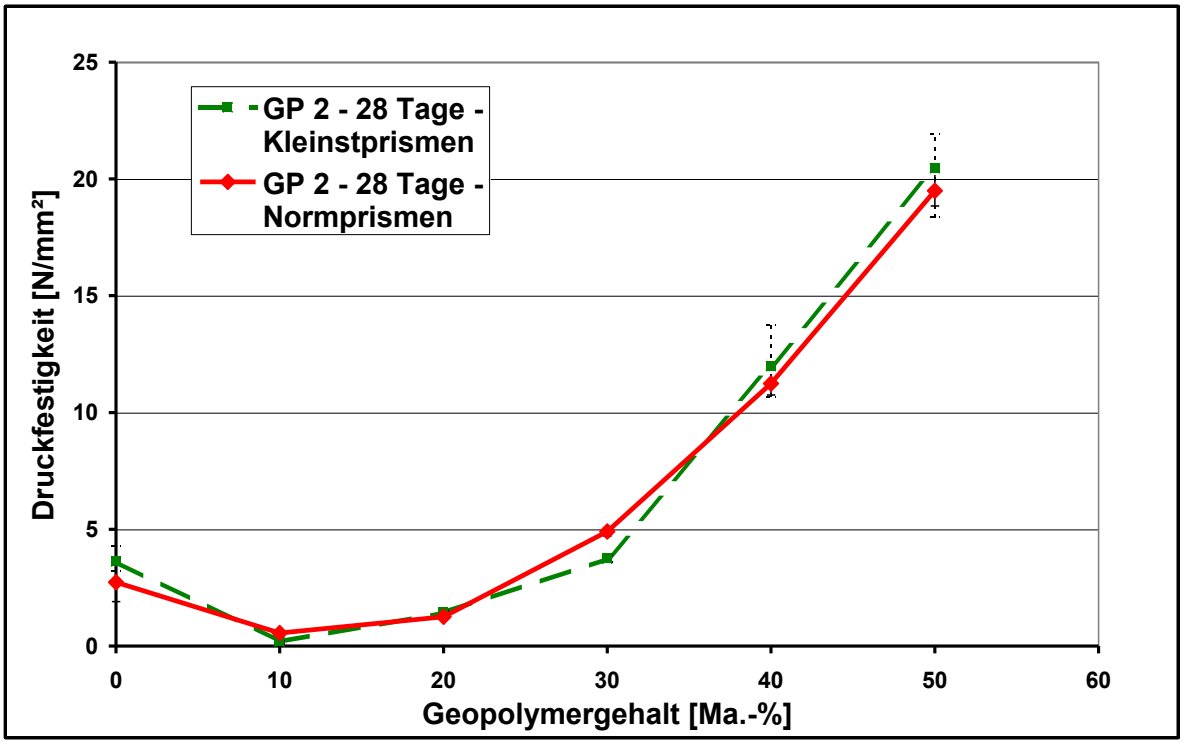

Abb. 20 Abhängigkeit der Druckfestigkeit von Normprismen von dem Geopolymergehalt der Mischung und Vergleich zu den Werten der Kleinstprismen

Ähnliche Ergebnisse zeigt das Diagramm zur Biegezugfestigkeitsprüfung (Abb. 21). Die Unterschiede zu den Werten der Kleinstprismen liegen wahrscheinlich in den hohen Schwankungsbreiten der Werte begründet. Wie man an den unterschiedlichen Streuweiten der Werte im Diagramm erkennen kann, spielt der Geometriefaktor bei der Biegezugfestigkeit eine größere Rolle als bei der Druckfestigkeit. Eine weitere Erklärung für die großen Streubreiten liegt in der Genauigkeit der Prüfmaschinen. Da diese bei kleinen Probekörpern nur sehr kleine Kräfte aufwenden müssen, um einen Bruch zu erzeugen, arbeiten sie in Bereichen mit höherer Fehlerbreite. Da bei der verwendeten Konsistenz und dem genutzten Trockenprozess keine geeigneten Biegezugprobekörper

hergestellt werden konnten, fehlt im Diagramm der Wert für 0 Ma.-% Geopolymerbinder.

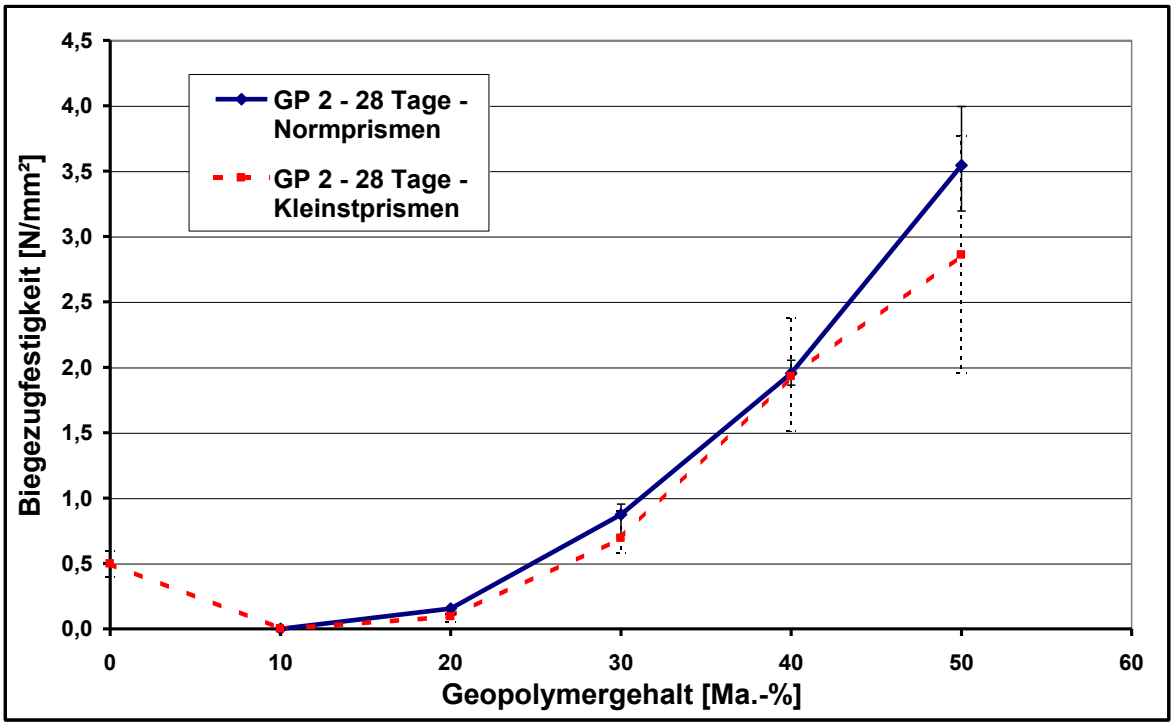

Abb. 21 Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von Normprismen von dem Geopolymergehalt der Mischung und Vergleich zu den Werten der Kleinstprismen

5.3.2 Wasserbeständigkeit

Die **Wasserbeständigkeit in stehendem Wasser** erwies sich bei allen Mischungen (Abb. 22) mit Geopolymer als wesentlich höher als bei reinem Lehm. Das Lehmprisma brach schon nach einer Minute vollkommen in sich zusammen (Abb. 23). In den folgenden Minuten zerfielen die Fragmente und der Lehm lag sedimentiert am Boden des Glasbehälters (Abb. 24). Die mit Geopolymer versetzten Prismen zeigten auch nach einem Tag im Wasser keine optischen Veränderungen. Erst nach drei Tagen trat an den Probekörpern mit 20 und 30 Ma.-% Geopolymer jeweils ein Riss durch die obere Stirnfläche auf. Am vierten Tag weiteten sich diese Risse noch etwas auf und das Prisma mit 20 Ma.-% Geopolymer zeigte einen weiteren Riss in der Nähe der unteren Stirnfläche.

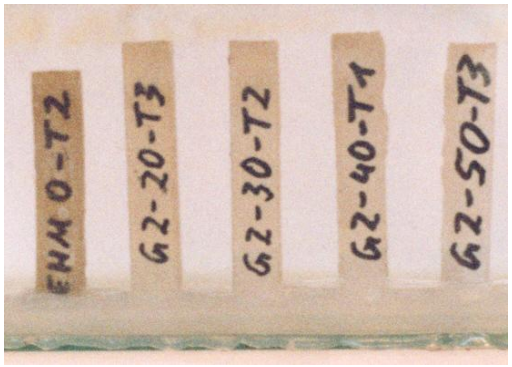

Abb. 22 Wasserbeständigkeit in stehendem Wasser - Prismen zu Versuchsbeginn

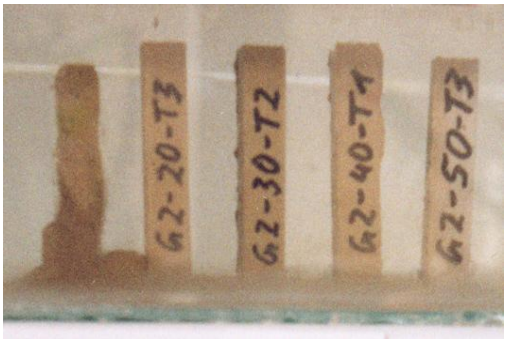

Abb. 23 Wasserbeständigkeit in stehendem Wasser - Prismen nach 30 Sekunden

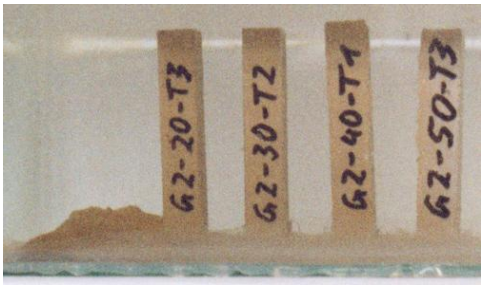

Abb. 24 Wasserbeständigkeit in stehendem Wasser - Prismen nach 2 Minuten

Die **Wasserbeständigkeit in fließendem Wasser** zeigt ähnliche Ergebnisse. Hier war der Probekörper aus reinem Lehm schon nach drei Minuten vollkommen weggespült. Die mit 20, 30, 40 und 50 Ma.-% Geopolymer modifizierten Probekörper zeigten auch nach 24 Stunden keine Abwaschungen oder Auflösungserscheinungen. Es traten jedoch ebenfalls Risse auf (Abb. 25).

Abb. 25 Wasserbeständigkeit unter fließendem Wasser - Prismen nach 24 Stunden

Bei genauerer Untersuchung der Probekörper fiel auf, dass die Risse durch Inhomogenitäten im Probekörper bedingt waren. Brach man die Probekörper an den Rissen auseinander, konnte man größere Partikel an reinem Lehm finden, die offensichtlich bei der Aufbereitung nicht homogenisiert werden konnten. Bei der Wasseraufnahme während der Unterwasserlagerung konnten diese Partikel stark quellen und damit im Probekörper an einigen Stellen Risse erzeugen. Dies zeigt die Bedeutung der Aufbereitung bei der Herstellung der Probekörper. Trotz der Risse bleibt jedoch die Struktur der Probekörper weitgehend erhalten, was bei Bauteilen aus einer solchen Mischung einen erhöhten Sicherheitsfaktor bedeuten würde. Die Versuche müssten mit großformatigeren Probekörpern, etwa in der Größe eines Lehmsteines wiederholt werden um praxisrelevantere Aussagen treffen zu können.

5.3.3 Wasserdampfdiffusionswiderstand

Zur Wasserdampfbestimmung wurden Probekörper wie unter 4.2 beschrieben hergestellt und die Messung wie unter 4.5 geschildert drei Wochen durchgeführt. Die Werte für den errechneten Wasserdampfdiffusionswiderstand wurden in Abb. 26 in einem Diagramm über dem zugehörigen Geopolymeranteil aufgetragen. Es ist festzustellen, dass der Wasserdampfdiffusionswiderstand µ bei der Zugabe von Geopolymer anfangs sinkt. Bei Zugabemengen über 10 Ma.-% steigt er wieder an, erreicht bei etwa 35 Ma.-% die Werte des reinen Lehms und steigt dann kontinuierlich bis 50 Ma.-% weiter an.

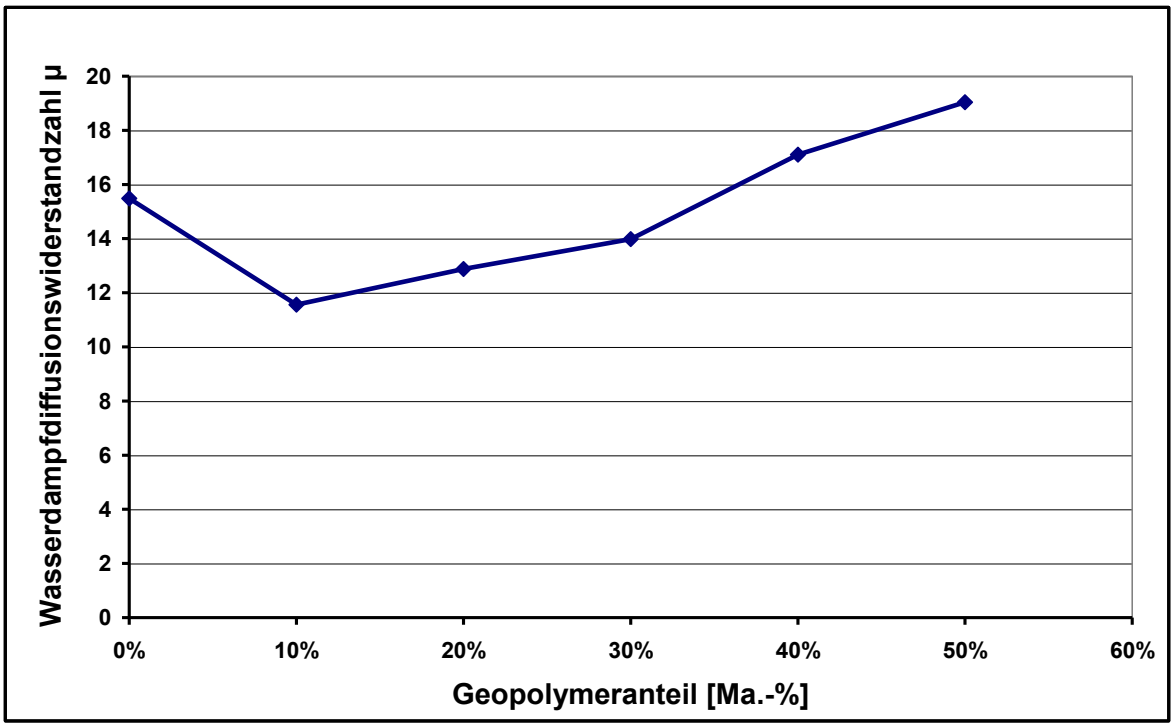

Abb. 26 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl µ in Abhängigkeit vom Geopolymergehalt der Mischung

Die im Diagramm dargestellte Kurve zeigt Ähnlichkeiten zum Verlauf der Festigkeitsentwicklung. Der Grund für diesen Verlauf könnte in der Porosität der Probekörper liegen (Abb. 17). Es ist zu vermuten, dass durch die steigende Zugabemenge von Geopolymerbinder und die Reaktionen desselben mit dem Lehm offene Poren, die einen nahezu ungehinderten Wasserdampftransport ermöglichen, mehr und mehr geschlossen werden. Dadurch steigt der Diffusionswiderstand an. Den Einbruch der Kurve bei 10 Ma.-% kann man auf den Verdünnungseffekt in der Lehmstruktur durch die Geopolymerzugabe zurückführen. Die Struktur wird aufgeweitet und es bilden sich zusätzliche offene Poren. Diese werden erst bei höheren Zugabemengen durch die Polymerisationsreaktion zunehmend geschlossen.

5.3.4 Wasserdampfspeicherung

Die Bestimmung der Sorptionsfeuchte zeigte, dass mit steigendem Gehalt an Geopolymer die aus der Luft aufgenommene Menge an Wasser zunimmt. Bei 50 Ma.-% Zugabe adsorbierten die Probekörper mehr als die doppelte Menge Wasser verglichen mit den Probekörpern des reinen Lehms (Abb. 27).

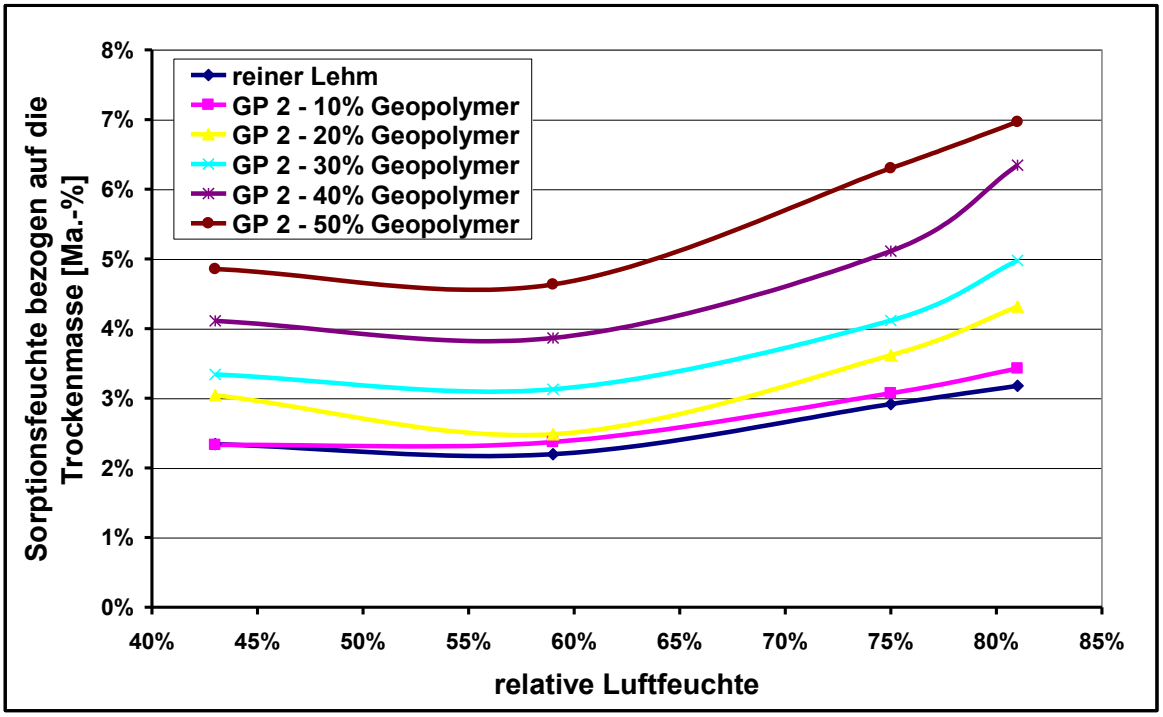

Abb. 27 Sorptionsfeuchten des modifizierten Lehms in Abhängigkeit von der relativen Umgebungsluftfeuchte

Um eine Erklärung dieses Verhaltens zu finden, muss man die physikalischen Vorgänge betrachten die mit dem Begriff Sorption beschrieben werden. Für die Wasserdampfaufnahme aus der Luft sind folgende Vorgänge verantwortlich:

- **Kapillarkondensation**[1]
- **Adsorption**[2]
- **Absorption**[3]

In der Praxis lassen sich diese drei Vorgänge kaum voneinander trennen. Bezieht man sie auf den vorliegenden Fall, kommen für das Sorptionsverhalten des modifizierten Lehms verschiedene Erklärungen in Betracht [21]. So könnte die Zugabe von Geopolymer zu einer Veränderung der Porenradienverteilung in der Art führen, dass statt weniger grober Poren im reinen Lehm viele feine Poren in der modifizierten Mischung vorliegen. Dadurch würde der Vorgang der Kapillarkondensation verstärkt, was eine höhere Wasseraufnahme bewirken würde. Weiterhin könnten auch die freien Oberflächenbindungskräfte beim Geopolymer weitaus größer sein. Diese Möglichkeit lässt sich mit der Strukturveränderung erklären. Die Tonminerale im Lehm bilden vorwiegend Schichtstrukturen aus, die an der Oberfläche weitgehend abgesättigt sind, während die Struktur des röntgenamorphen Geopolymergels in der Nahordnung auf einer kubischen Elementarzelle der Struktur des Zeoliths [22] beruht und somit Oberflächen weitgehend nicht abgesättigt sind. Um genauere Aussagen zur Ursache des Sorptionsverhaltens zu machen, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Insbesondere wurde die Porenstruktur des reinen Lehms im Vergleich zum mit Geopolymer modifizierten Lehm untersucht. In Abb. 28 sieht man elektronenmikroskopische Strukturaufnahmen des mit 50 Ma.-% modifizierten Lehms (links) und des reinen Lehms (rechts). Die Bilder wurden bei 2000facher Vergrößerung aufgenommen. Weitere Aufnahmen, auch bei anderen Vergrößerungen, sind im Anhang zu finden.

---

[1] Unter **Kapillarkondensation** versteht man die Aufnahme und Bindung von Wasserdampf in den Kapillaren eines Stoffes unter Bildung eines Kondensates. Die Kondensatbildung beruht auf der Verminderung des Dampfdruckes über den Flüssigkeitsmenisken unter dem Einfluss von kapillaren Kräften. Die Kapillarkondensation kommt erst in sehr kleinen Poren mit einem Durchmesser von <0,1µm zum Tragen.

[2] Die **Adsorption** bezeichnet die Anreicherung eines Materials an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen, wie zum Beispiel die Verdichtung von Wasserdampf an der Oberfläche fester Körper. Die Ursachen hierfür liegen in der Absättigung freier Oberflächenbindungskräfte des adsorbierenden Materials. Die Feuchtigkeit lagert sich dabei als verdichteter Dampf an der Oberfläche an.

[3] Saugt ein fester Körper oder eine Flüssigkeit Gase oder Dämpfe auf, so bezeichnet man diesen Vorgang als **Absorption**. Die Absorption ist häufig mit einer Quellung des aufsaugenden Materials verbunden. [21]

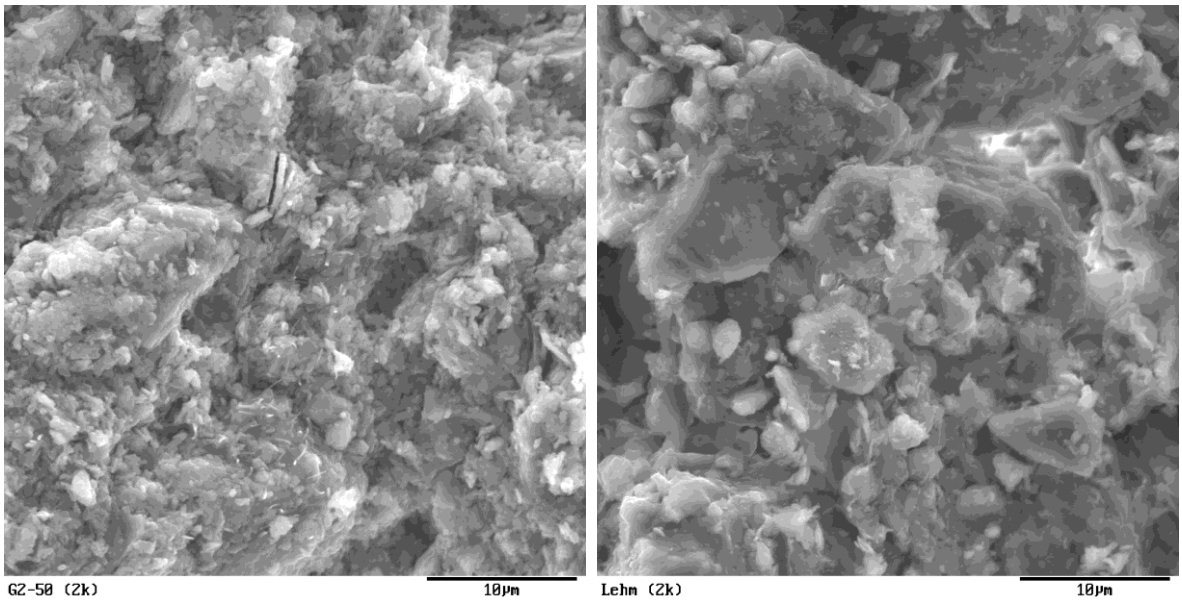

Abb. 28 Elektronenmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines Kleinstprismas des mit 50 Ma.-% modifizierten Lehms (links) und des reinen Lehms (rechts) bei 2000-facher Vergrößerung

Man sieht deutlich, dass sich die Struktur des modifizierten Lehms wesentlich feinkörniger darstellt. Während man rechts die plättchenförmigen Tonteilchen vor allem in Größenordnungen zwischen 2 und 8 µm erkennt, wird die modifizierte Lehmstruktur links von gedrungenen Partikeln kleiner 3 µm dominiert, welche die ursprüngliche Lehmstruktur überwachsen, sich also zwischen den Lehmteilchen eingelagert haben. Es ist naheliegend, dass sich dadurch in der Mischung mit Geopolymer eine feinere Porenverteilung und eine größere innere Oberfläche des Materials ausbildet.

Um diese Hypothese zu überprüfen wurde eine Untersuchung der Porengrößenverteilung mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie am unbehandelten, wie auch am mit 50 Ma.-% modifizierten Lehm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 29 dargestellt.

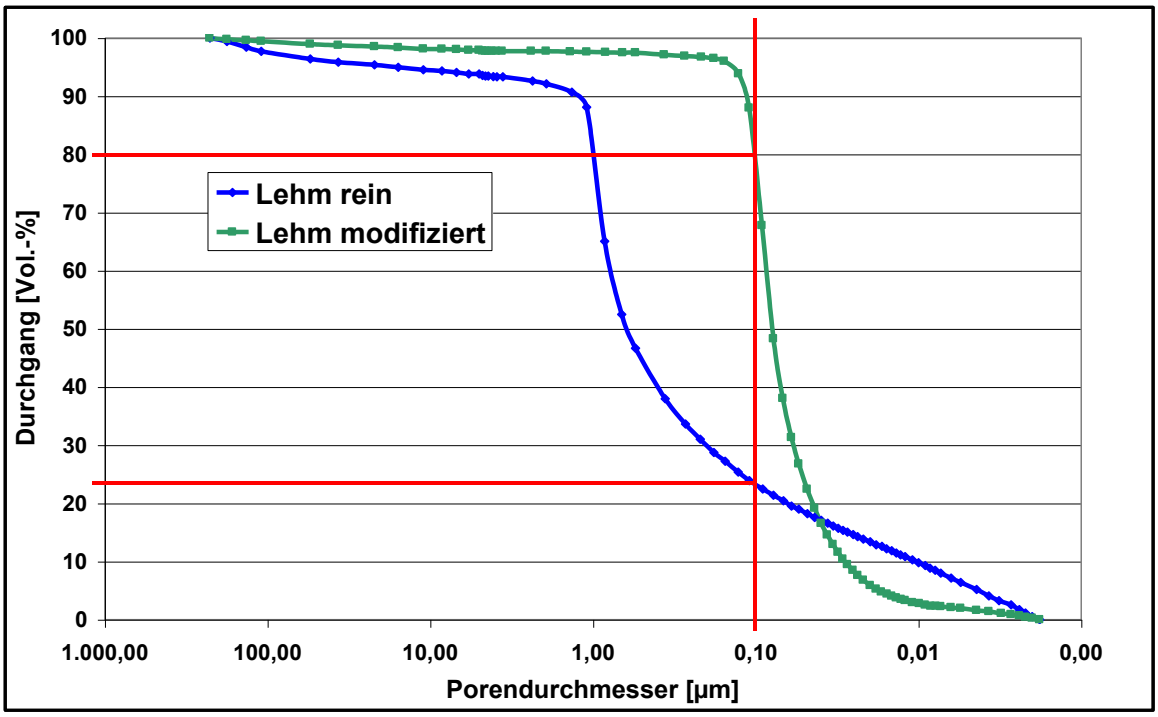

Abb. 29 Porengrößenverteilung im reinen und im modifizierten Lehm

Zur besseren Vergleichbarkeit der Kurven wurde bei einer Porengröße von 0,10 µm eine Hilfslinie eingezeichnet. Dies ist der Porendurchmesser unterhalb dem der Vorgang der Kapillarkondensation eine entscheidende Rolle bei der Wasserdampfaufnahme eines Baustoffes aus der Umgebungsluft spielt. An dieser Linie kann man ablesen, welcher Anteil an Poren kleiner dieser kritischen Größe ist. Für den unmodifizierten Lehm beträgt dieser Wert etwa 24 Vol.-%, für den modifizierten hingegen fast 80 Vol.-%. Dies unterstützt die oben genannte These, dass die erhöhte Wasserdampfaufnahme des mit Geopolymer modifizierten Lehms zu einem Großteil auf dem Vorgang der Kapillarkondensation beruht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Eignung von alumosilikatischen Polymerbindern zur Steigerung der mechanischen Festigkeit von Lehm zu untersuchen. Dazu wurden vier Lehme charakterisiert und einer davon für die Modifizierung ausgewählt.

In Voruntersuchungen an Kleinstprismen wurden eine wasserglasarme und eine wasserglasreiche Geopolymermischung auf ihre festigkeitssteigernde Wirkung hin überprüft. Es konnte festgestellt werden, dass die wasserglasreiche Mischung höhere Verfestigungen ermöglichte. Mit dieser Mischung und dem ausgewählten Lehm wurden Normprismen erstellt und an diesen die Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich mit Zugabe von Geopolymer anfangs durch Verdünnungseffekte die Festigkeit des Lehms verringerte. Bei Zugabemengen ab 30 Ma.-% erreichte die Festigkeit wieder die Werte des unmodifizierten Lehms und stieg mit weiterer Zugabe an. Bei 50 Ma.-% wurden Druckfestigkeiten um 20 N/mm² und Biegezugfestigkeiten um 3,5 N/mm² erreicht.

Ebenso erhöhte sich die Wasserbeständigkeit erheblich. Im Versuch sowohl mit stehendem wie auch mit fließendem Wasser konnte beobachtet werden, dass schon mit 20 Ma.-% Geopolymer modifizierter Lehm tagelang nicht vom Wasser angegriffen werden konnte, während Probekörper aus unmodifiziertem Lehm bereits nach wenigen Minuten völlig zerstört bzw. fortgewaschen waren.

Im weiteren war festzustellen, wie sich die erreichte Verfestigung auf die bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms auswirkt. Dazu wurden Wasserdampfdiffusionswiderstand und Sorptionsfeuchte an Probekörpern mit verschiedenen Gehalten an Geopolymerbinder bestimmt.

Es zeigte sich, das der Wasserdampfdiffusionswiderstand sich analog der Festigkeit verhält. Nach anfänglichem Absinken steigt er mit zunehmendem Geopolymergehalt an. Bei 50 Ma.-% Geopolymerbinder zeigten die Probekörper Wasserdampfdiffusionswiderstandwerte von $\mu \approx 19$. Es kommt somit zu einer geringfügigen Abdichtung bzw. Diffusionswegverlängerung des Baustoffes für den Durchtransport von Wasserdampf. Dies könnte auch durch Quellung des Polymergels eintreten.

Die Bestimmung der Sorptionsfeuchte zeigte, dass die Materialausgleichsfeuchte mit zunehmendem Geopolymergehalt steigt. So ist der mit 50 Ma.-% Geopolymer modifizierte Lehm in der Lage etwa doppelt so viel Wasser aufzunehmen wie der unmodifizierte Lehm. Damit konnte diese als sehr positiv eingestufte bauphysikalisch Eigenschaft des Lehms durch die Zugabe alumosilikatischer Polymerbinder weiter verbessert werden.

Somit ist festzustellen, dass Geopolymerbinder zur Verfestigung von Lehmen gut geeignet sind. Die Festigkeiten und Wasserbeständigkeit kann durch diese erhöht werden, ohne dass die hier untersuchten bauphysikalischen Eigenschaften negativ beinflusst werden. Lediglich die Wasserdampfdiffusion wurde geringfügig verringert.

Weitere Untersuchungen könnten zum Beispiel den Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit und die Schalldämmwirkung des modifizierten Lehms klären.

Es ist weiterhin zu überprüfen, inwieweit die hier ermittelten Ergebnisse Praxisrelevanz besitzen. Die vergleichsweise hohen Beschaffungskosten für den alkalischen Anreger führen zu höheren Produktionskosten geopolymermodifizierter Bauteile im Vergleich zu Bauteilen aus reinem Lehm. Hingegen kann man durch den Einsatz von dehydroxiliertem Ton das ebenfalls recht teuere Metakaolin ersetzen. Es könnte der vor Ort beim Lehmproduktthersteller verwendete Lehm genutzt werden, um in einem Niedertemperaturbrennprozess das Kristallwasser auszutreiben und damit eine reaktive Struktur zu erzeugen. Ein geeignetes Aggregat hierfür könnte ein Drehrohrofen sein. Die erforderlichen Brenntemperaturen können aus Differenzthermoanalysen ermittelt werden. Für den hier verwendeten Lehm wäre zum Beispiel eine Temperatur von ca. 800°C ausreichend.

Somit hätte man die Möglichkeit, die positiven Eigenschaften eines mit alumosilikatischen Polymerbinders modifizierten Lehmes mit überwiegend lagerstätteneigenen Rohstoffen in die Tat umzusetzen.

7 Literaturquellen

[1] Lagaly, G.; Köster, H.M.: *Tone und Tonminerale.* in: Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt / Jasmund, K.; Lagaly, G. (Hrsg.), Steinkopff-Verlag, Darmstadt, 1993

[2] Minke, G.: *Das neue Lehmbauhandbuch – Baustoffkunde Konstruktionen Lehmarchitektur.* 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg, Deutschland, 2001

[3] Ingles, O.G.; Lim, N.W.: *Ferroclay – A New Method for the Stabilization of Soils.* in: Proceedings, Conferencia International de Mecanica de Suelos, Mexico City, 1982

[4] Ingles, O.G.; Metcalf, J.B.: *Soil stabilization.* Sydney 1972

[5] Ingles, O.G.: *Soil Stabilization.* in: Bell. F.G. (ed): Ground Engeneer's Reference Book, Chapter 31, Sydney 1983

[6] Weiß, A.: Angewandte Chemie 75 (1963), S.755-762

[7] US-Patent 4243563

[8] Japanisches Patent 49099719

[9] Japanisches Patent 08310851

[10] Japanisches Patent 58190864

[11] Böttger, K.G.; Knöfel, D.; Sandor, M.; Dreher, S.; Pakutsch, J.; Schuler, B.: *Kunststoffmodifizierter Lehm.* in 5. Internationales Kolloquium „Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen- MSR ´99", Esslingen, Nov./Dez. 1999, Seite 207-218 AEDIFICATIO Publishes, Freiburg

[12] Buchwald, A.; Hohmann, M., Kaps, Ch.: *Stabilisierung von Schaumtonmassen mit Geopolymerbindern für die Herstellung hochwärmedämmender Ziegel*. Ziegeljahrbuch, (2004) 104-114

[13] Tretau, A.: *Stabilisierung porosierter Ziegelmassen mit alumosilikatischem Polymerbinder.* Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar (2003)

[14] Kaps, Ch.; Buchwald, A.: *Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay.* Geopolymer 2002, Melbourne, Australia

[15] Hohmann, M.; Buchwald, A.; Kaps, Ch.: *Zur Reaktivität von Recycling-Materialien in alkali-aktivierten Bindersystemen.* Recycling 2001, 12.10.01, Weimar

[16] Buchwald, A.; Kaps, Ch.; Hohmann, M.: *Alkali-activated binders and pozzolan cement binders – compete binder reaction or two sides of the same story?* Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), Durban, South Africa (2003) 1238-1246

[17] Davidovits, J.: *Chemistry of geopolymeric systems, terminology.* in: Davidovits et al. (ed): Proceedings of the second international conference geopolymere ´99, (1999) S. 9-40

[18] Davidovits, J.: *GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and Resulting Development of Very Early High Strength Cement.* J. Materials Education Vol. 16 (2&3), S. 91-139, 1994

[19] Davidovits, J.: *Synthesis of New High-Temperature Geo-Polymers for Reinforced Plastics/Composites.* SPE PACTEC '79, Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, USA, S.151-154, 1979

[20] Buchwald, A.; Hohmann, M.; Kaps, Ch.: *Stabilisierung von Schaumtonmassen mit Geopolymerbindern für die Herstellung hochwärmedämmender Ziegel.* in: Ziegeljahrbuch 2004 (im Druck), 2004

[21] Lustig-Rössler, Ursula: *Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Lehm als Baustoff.* Inaugural-Dissertation, Gesamthochschule Kassel, Universität, 1992

[22] Buchwald, A.; Kaps, Ch.; Hohmann, M.; Zellmann, H.D.: *Zur Kondensation mineralischer Polymere in unkonventionellen Bindersystemen.* Proceedings 4. Bauchemie 2002 in Weimar, S. 39-44, 2002

Anhang

Mineralogische Analysen

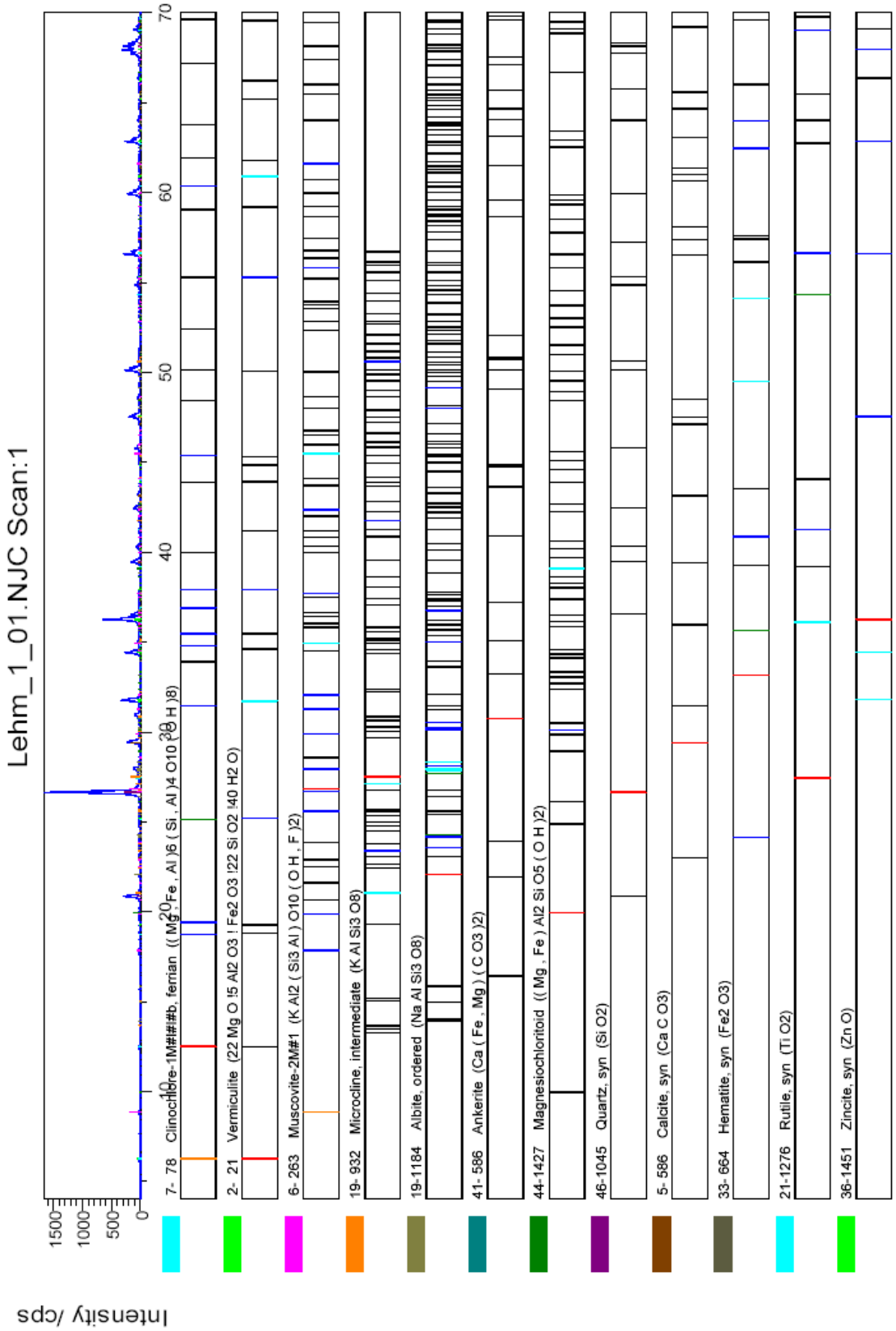

Abb. 30 Röntgenspektrogramm - Lehm 1

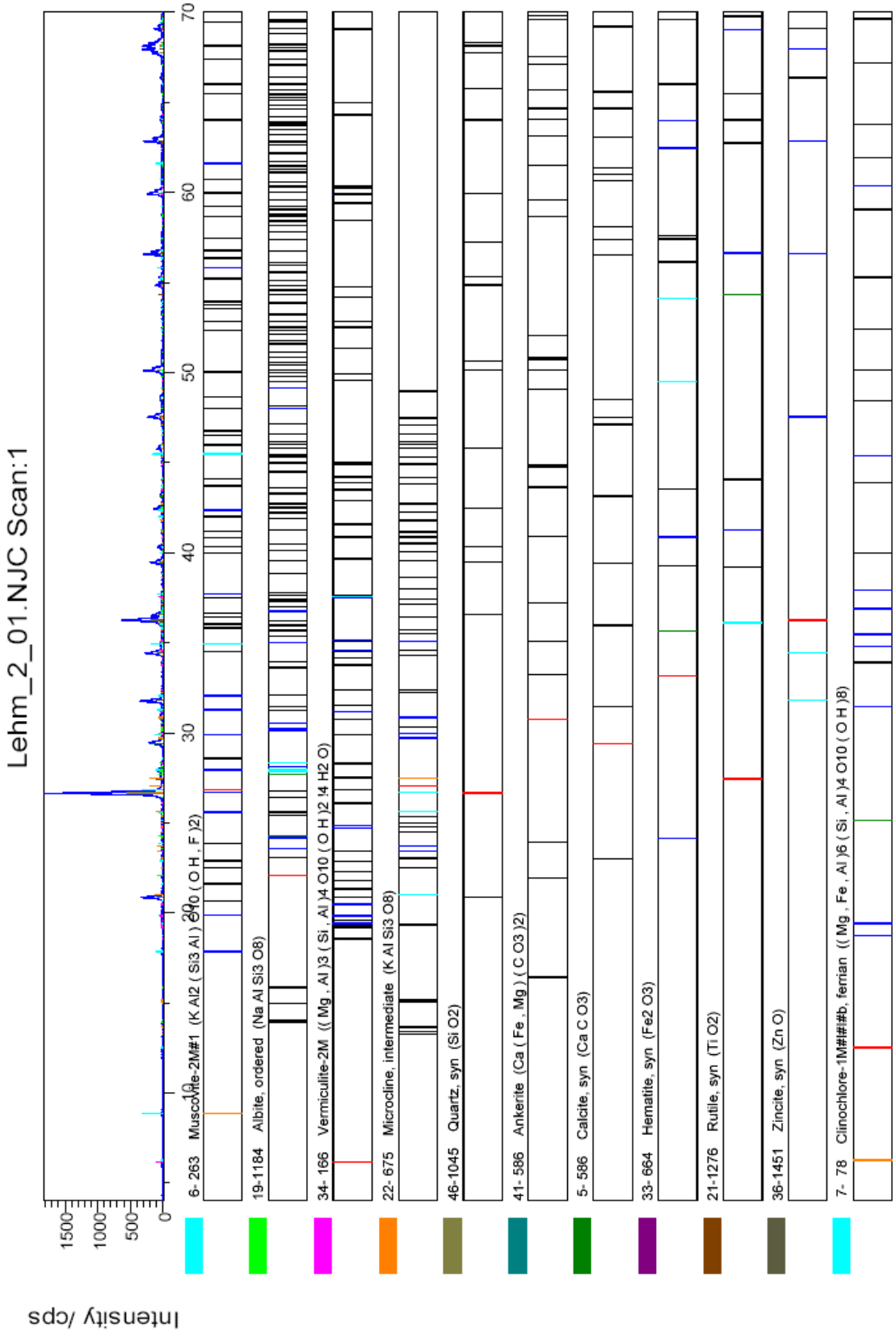

Abb. 31 Röntgenspektrogramm - Lehm 2

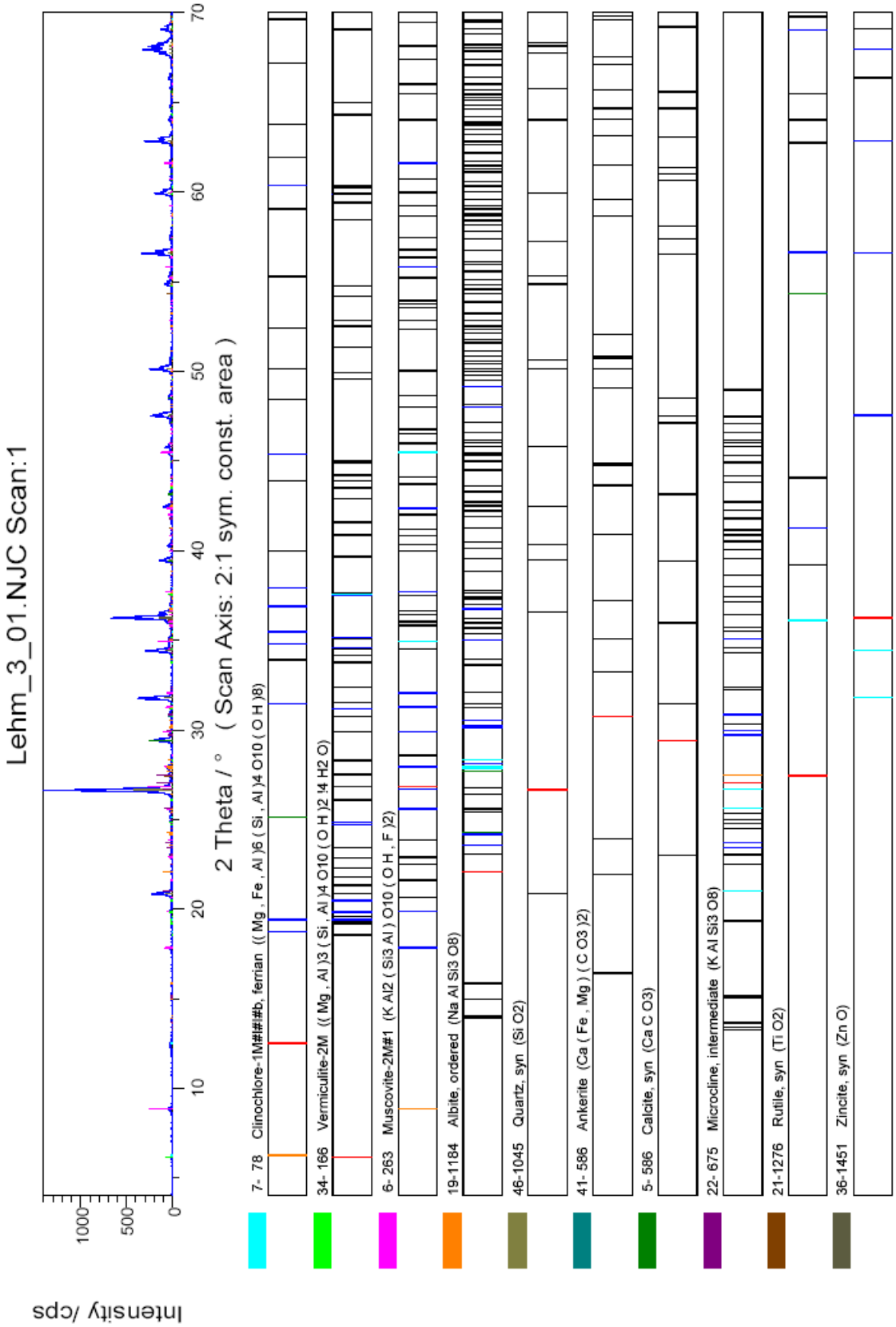

Abb. 32Röntgenspektrogramm - Lehm 3

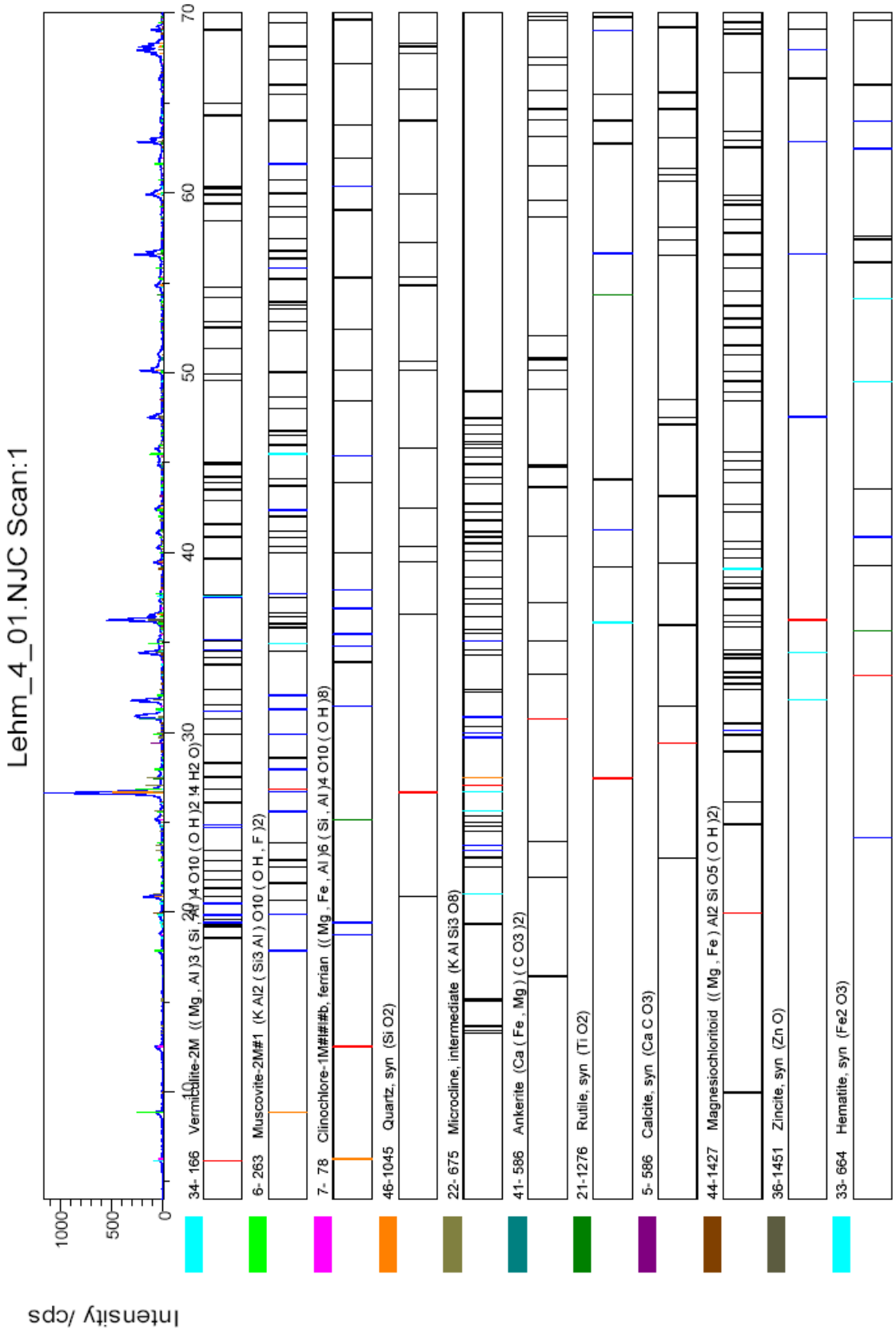

Abb. 33 Röntgenspektrogramm - Lehm 4

Job: Lehm_1_01.NJC Scan:1
Scan Axis: 2:1 sym. const. area 4.000° ... 70.000°
Radiation: Cu = 0.15405980nm
Database: Set 1-49 in directory c:\programme\rayflex\pdf2
Number of PDF-2 phases : 82511
Number of ICSD phases : 42053
Total number of phases : 124564

Results:
Peaks: 269 matched: 263
Phases: 12 accepted: 12

	46-1045	Quartz, syn
	36-1451	Zincite, syn
	5- 586	Calcite, syn
	2- 21	Vermiculite
	21-1276	Rutile, syn
	7- 78	Clinochlore-1M#I#I#b, ferrian
	6- 263	Muscovite-2M#1
	19-1184	Albite, ordered
	19- 932	Microcline, intermediate
	44-1427	Magnesiochloritoid
	41- 586	Ankerite
	33- 664	Hematite, syn

Settings:
Method: 2 Strongest Lines
Deleted Phases: not used
Long Search
Error Window: 0.2° *(1+sin(Theta))
Theta Shift: 0.000°
Max Proposals: 600
rel. Intensity Level: 60%
Intensity Threshold: 0%
Database: Set 1-49 complete database

Job: Lehm_2_01.NJC Scan:1
Scan Axis: 2:1 sym. const. area 4.000° ... 70.000°
Radiation: Cu = 0.15405980nm
Database: Set 1-49 in directory c:\programme\rayflex\pdf2
Number of PDF-2 phases : 82511
Number of ICSD phases : 42053
Total number of phases : 124564

Results:
Peaks: 176 matched: 171
Phases: 11 accepted: 11

	46-1045	Quartz, syn
	36-1451	Zincite, syn
	5- 586	Calcite, syn
	21-1276	Rutile, syn
	6- 263	Muscovite-2M#1
	19-1184	Albite, ordered
	22- 675	Microcline, intermediate
	34- 166	Vermiculite-2M
	41- 586	Ankerite
	33- 664	Hematite, syn
	7- 78	Clinochlore-1M#I#I#b, ferrian

Settings:
Method: 2 Strongest Lines
Deleted Phases: not used
Long Search
Error Window: 0.2° *(1+sin(Theta))
Theta Shift: 0.000°
Max Proposals: 600
rel. Intensity Level: 60%
Intensity Threshold: 0%
Database: Set 1-49 complete database

Abb. 34 Röntgenanalysen - Lehm 1 und Lehm 2 - Zusammenfassung

Job: Lehm_3_01.NJC Scan:1
Scan Axis: 2:1 sym. const. area 4.000° ... 70.000°
Radiation: Cu = 0.15405980nm
Database: Set 1-49 in directory c:\programme\rayflex\pdf2
Number of PDF-2 phases : 82511
Number of ICSD phases : 42053
Total number of phases : 124564

Results:
Peaks: 175 matched: 168
Phases: 10 accepted: 10

	5- 586	Calcite, syn
	36-1451	Zincite, syn
	46-1045	Quartz, syn
	21-1276	Rutile, syn
	41- 586	Ankerite
	6- 263	Muscovite-2M#1
	19-1184	Albite, ordered
	34- 166	Vermiculite-2M
	22- 675	Microcline, intermediate
	7- 78	Clinochlore-1M#I#I#b, ferrian

Settings:
Method: 2 Strongest Lines
Deleted Phases: not used
Long Search
Error Window: 0.2° *(1+sin(Theta))
Theta Shift: 0.000°
Max Proposals: 600
rel. Intensity Level: 60%
Intensity Threshold: 0%
Database: Set 1-49 complete database

Job: Lehm_4_01.NJC Scan:1
Scan Axis: 2:1 sym. const. area 4.000° ... 70.000°
Radiation: Cu = 0.15405980nm
Database: Set 1-49 in directory c:\programme\rayflex\pdf2
Number of PDF-2 phases : 82511
Number of ICSD phases : 42053
Total number of phases : 124564

Results:
Peaks: 149 matched: 137
Phases: 11 accepted: 11

	36-1451	Zincite, syn
	46-1045	Quartz, syn
	5- 586	Calcite, syn
	21-1276	Rutile, syn
	7- 78	Clinochlore-1M#I#I#b, ferrian
	6- 263	Muscovite-2M#1
	41- 586	Ankerite
	34- 166	Vermiculite-2M
	33- 664	Hematite, syn
	22- 675	Microcline, intermediate
	44-1427	Magnesiochloritoid

Settings:
Method: 2 Strongest Lines
Deleted Phases: not used
Long Search
Error Window: 0.2° *(1+sin(Theta))
Theta Shift: 0.000°
Max Proposals: 600
rel. Intensity Level: 60%
Intensity Threshold: 0%
Database: Set 1-49 complete database

Abb. 35 Röntgenanalyse - Lehm 3 und Lehm 4 - Zusammenfassung

Elektronenmikroskopische Aufnahmen

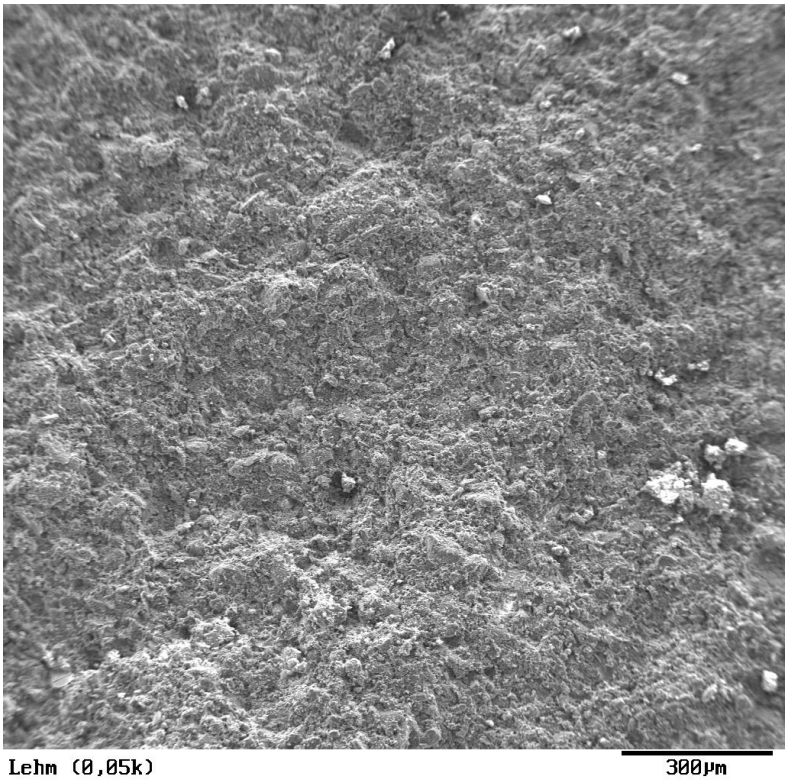

Abb. 36 reiner Lehm bei 50-facher Vergrößerung

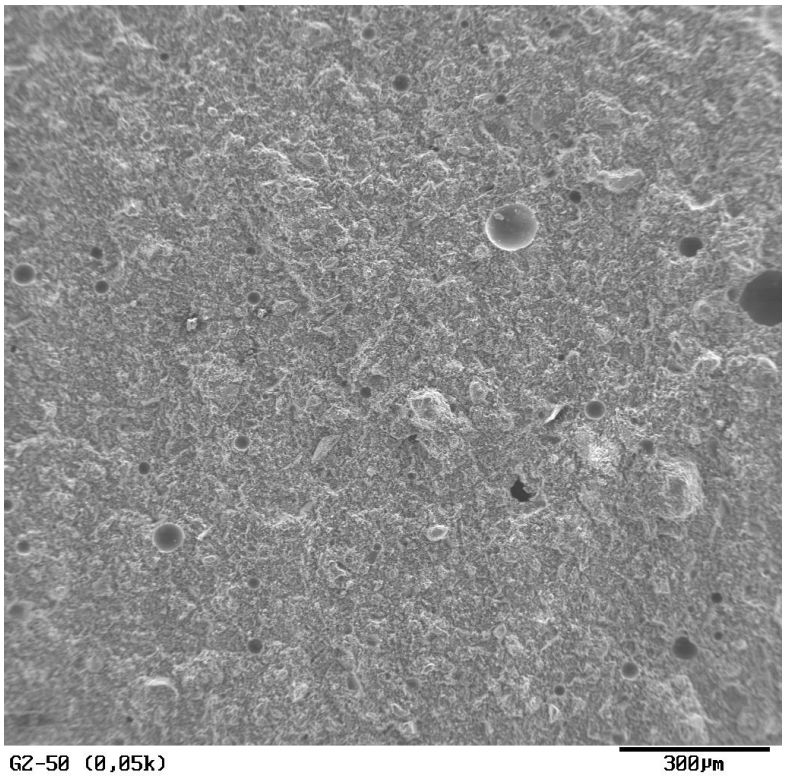

Abb. 37 Mit 50 Ma.-% Geopolymer modifizierter Lehm bei 50-facher Vergrößerung

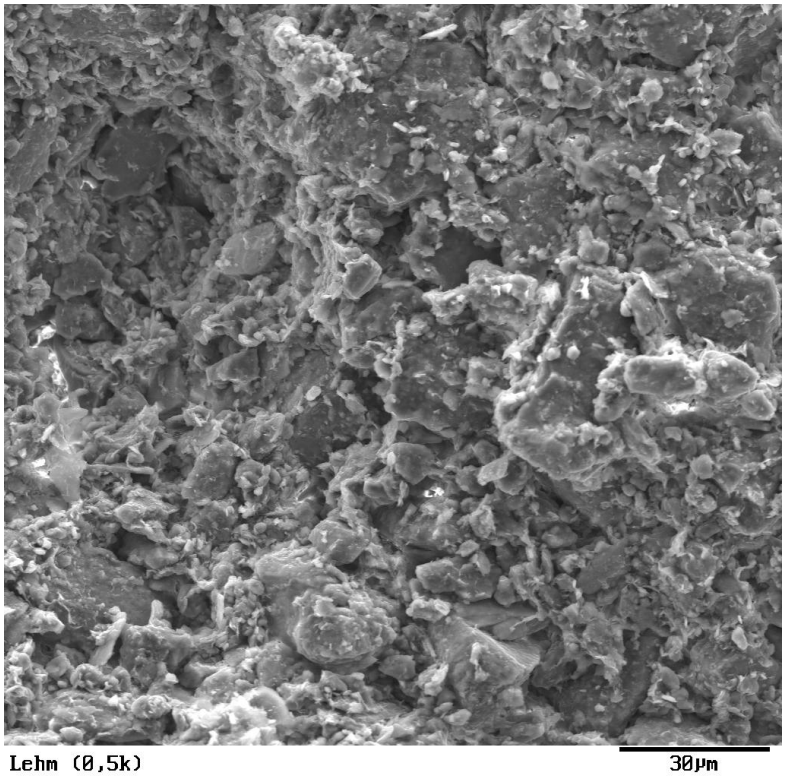

Abb. 38 reiner Lehm bei 500-facher Vergrößerung

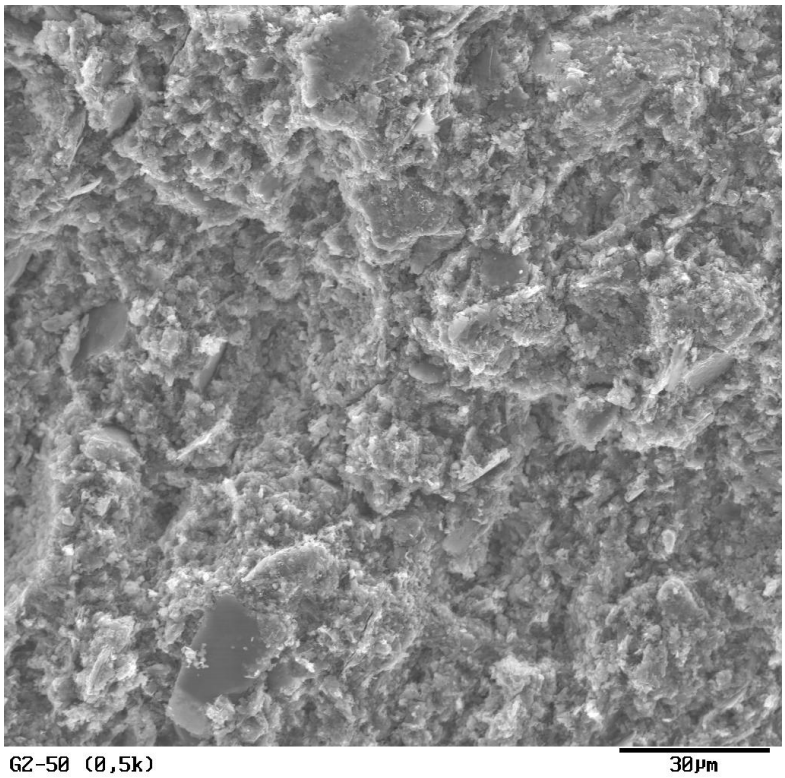

Abb. 39 Mit 50 Ma.-% Geopolymer modifizierter Lehm bei 500-facher Vergrößerung

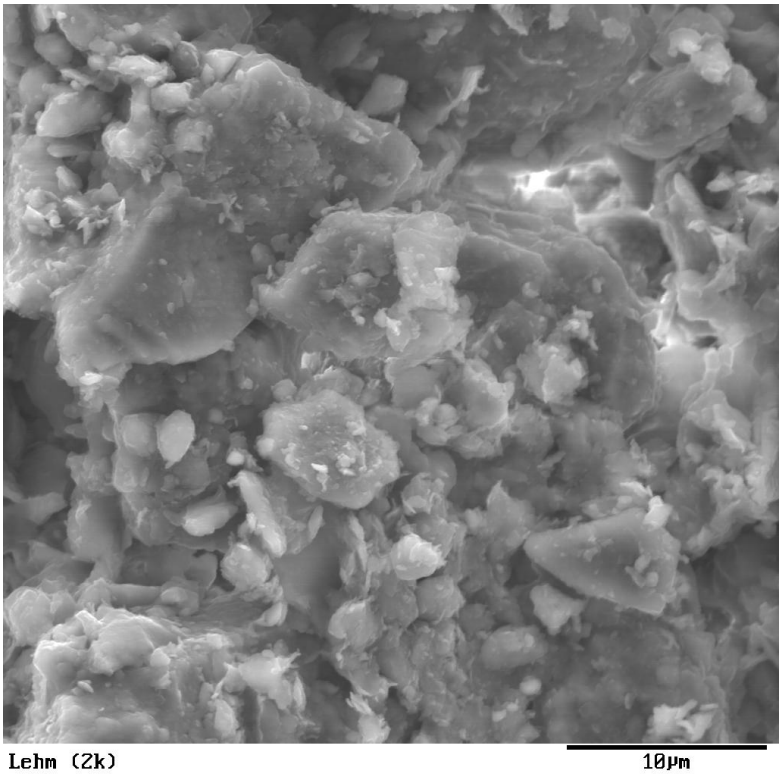

Abb. 40 reiner Lehm bei 2000-facher Vergrößerung

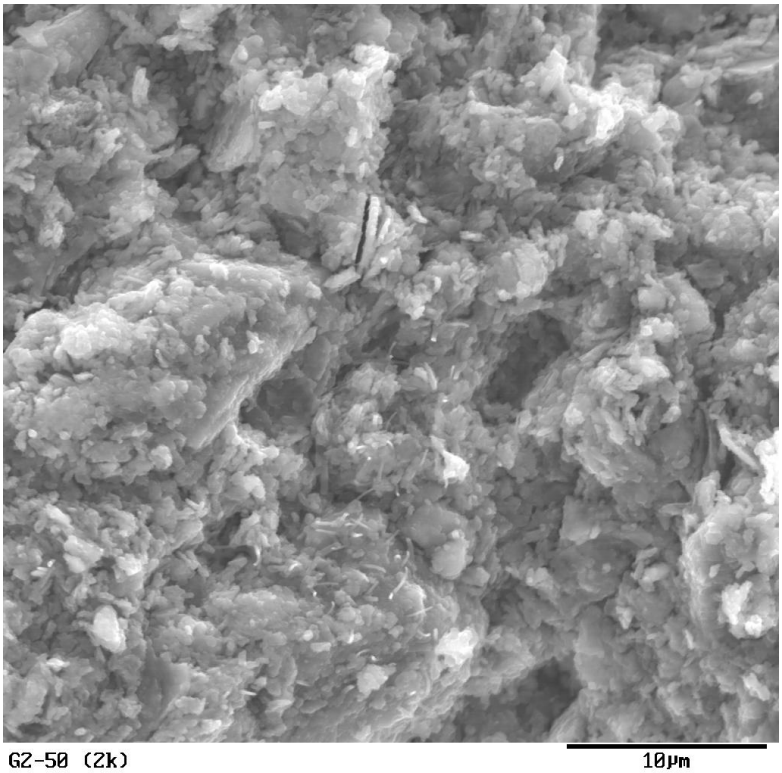

Abb. 41 Mit 50 Ma.-% Geopolymer modifizierter Lehm bei 2000-facher Vergrößerung

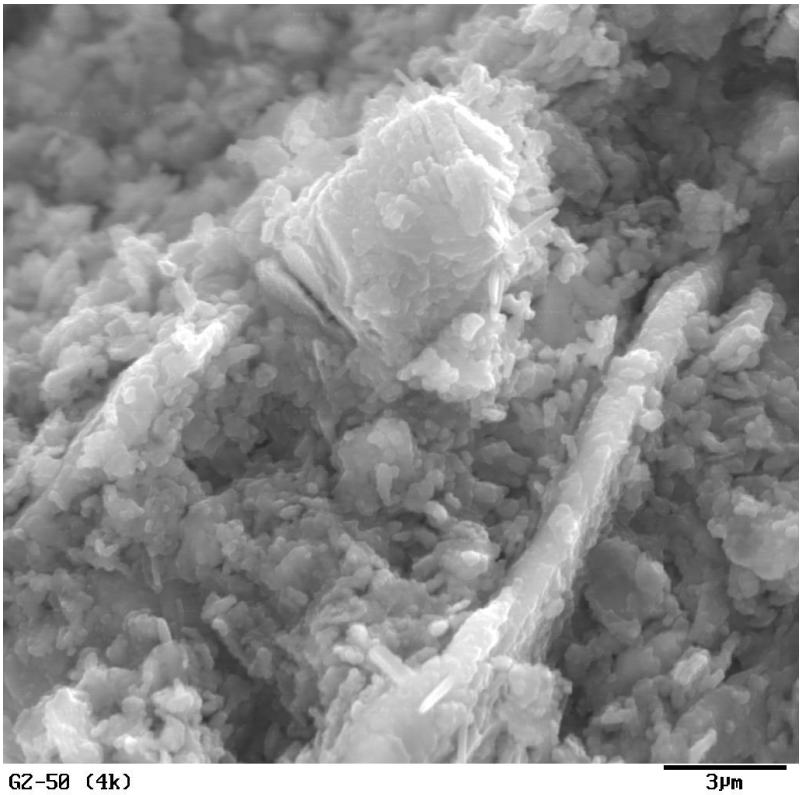

Abb. 42 Mit 50 Ma.-% Geopolymer modifizierter Lehm bei 4000-facher Vergrößerung

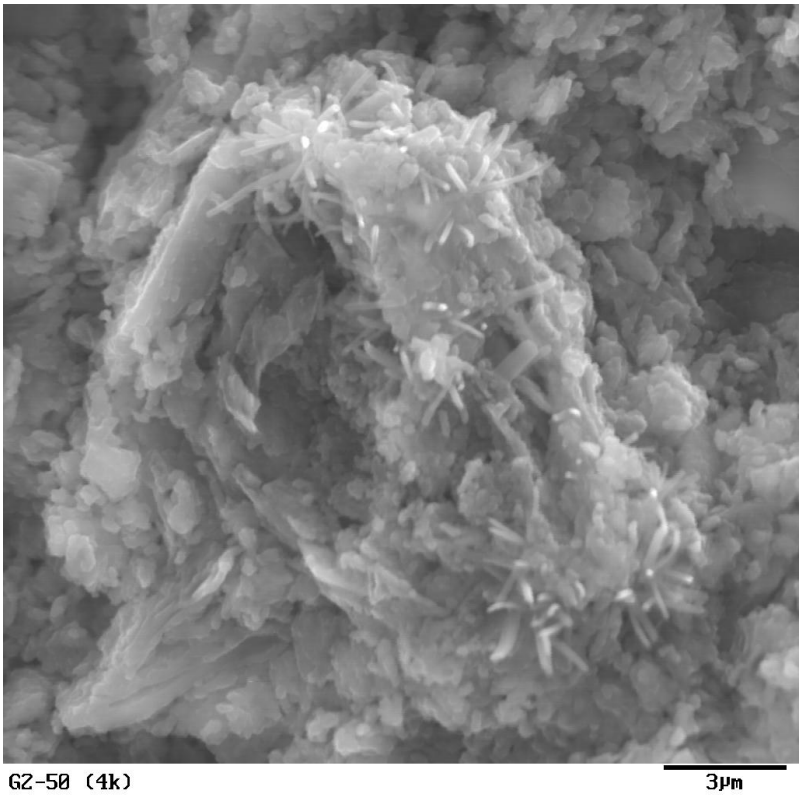

Abb. 43 Mit 50 Ma.-% Geopolymer modifizierter Lehm bei 4000-facher Vergrößerung

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Nutzung anderer als der hier angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt habe.

Weimar, den 03.03.2004