



„Geopolymere - ein „CO₂-armer“ Binder für Bau-Werkstoffe - Teil I“

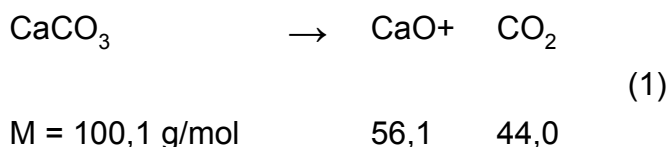
Christian Kaps

Chemie und Strukturbildung

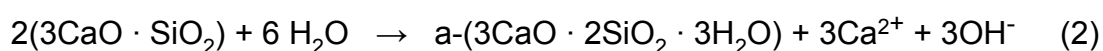
1. Bauchemie, Bindemittel und Ökologie

Eine wesentliche Aufgabe der Bauchemie ist die Entwicklung, Modifizierung und Optimierung von Bindemitteln für die Vielfalt der Werkstoffe des Bauwesens. Dabei sind neben mechanisch-konstruktiven und ökonomischen Aspekten auch Erfordernisse der ökologischen Herstellung und des Gesundheitsschutzes der Nutzergemeinschaft des Bauwerkes zu beachten.

Von den **traditionellen** Bindemitteln, d. h. kalt-härtenden Stoffsystemen, die bekanntermaßen nach Zugabe von Wasser eine mit der Zeit erstarrende Suspension („Binderleim“) bilden und die Gesteinskörnungen zu massiven, monolithischen Bauteilen binden, ist der Zement - vor Kalk und Gips - an erster Stelle zu nennen. Zemente sind Hochtemperatur-Produkte, die im Drehrohfen bei Temperaturen um 1450 °C aus **Kalkstein und Ton** erzeugt werden. Einerseits resultiert aus der Carbonatzersetzung des Kalksteins eine hohe CO₂-Emission und andererseits ist ein beachtlicher Energieaufwand erforderlich, um die hohen Temperaturen zu erzeugen. Gemäß Gl. 1 werden aus 1000 kg Kalkstein etwa 440 kg CO₂ freigesetzt.



Beim Brennen von Portlandzement (PZ), dem klassischen Zementvertreter, bilden sich in Hochtemperaturreaktionen aus der basischen Komponente CaO und der sauren Komponente SiO₂ des eingesetzten Tones vorzugsweise zwei Calciumsilicate (3CaO · SiO₂ und 2CaO · SiO₂, sogenannte **Klinkerphasen**). Diese kristallinen Calciumsilicate zeigen im abgekühlten, aufgemahlenem Brennprodukt (Zement) eine starke hydraulische Aktivität, wodurch sich bei Wasserzugabe ein Binder aus röntgenamorphen Calciumsilicat-Hydratphasen (C-S-H-Phasen) ausbildet. Die Binderwirkung auf die Gesteinskörnung entfaltet sich durch Erstarrung der Zementleim-Suspension und schließlich durch Verfestigung zum Zementstein. Die Gl. 2 steht beispielhaft für eine solche hydraulische Reaktion (Hydratation, a: amorph).



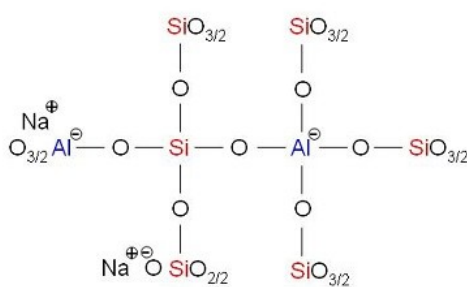
Um die ökologischen Nachteile, insbesondere den Energieaufwand, zu reduzieren sind in den letzten vier Jahrzehnten gezielt verschiedene Zementabmischungen (Portlandkompositzemente) durch Zusatzstoffe wie Hüttsande (aufgemahlene Hochofenschlacke), SiO₂-reiche Flugasche (aus der Kohleverbrennung) oder Kalksteinmehl entwickelt worden.

In der jüngsten Vergangenheit (5-8 Jahre) ist auf dem Gebiet bauchemischer Forschung für **alternative Bindermittel** das **Konzept der Geopolymere** verstärkt in den Blickpunkt gerückt, welches durch eine andersartige chemische Basis im Hinblick auf die genutzten, geogen gebildeten Rohstoffe als auch auf die Verfahrensschritte der reaktiven Aktivierung eine wesentliche CO₂-Emissionsminderung ermöglicht. Im Vergleich zur Zementchemie sollen die Geopolymere nachfolgend betrachtet werden.

2. Was sind Geopolymere und wie werden sie hergestellt?

Obwohl Davidovits [1, 2] bereits 1972 den Begriff „Geopolymere“ prägte und erste Anwendungen des mineralischen Polymerkonzeptes für Baustoffe aufzeigte, waren knapp 40 Jahre erforderlich, bis modifizierte Varianten des Konzeptes Gegenstand gezielter Baustoffforschung in der Industrie wurden. Offensichtlich sind die stetig wachsenden Zwänge zum umweltorientierten Einsparen von CO₂ wesentliche Beweggründe für diese Entwicklungstendenz.

Netzwerkausschnitt (ebene Darstellung)



Symbolik:

- SiO_{4/2} Tetraeder mit 4 Brücken-Sauerstoff
- O_{3/2}SiO[⊖] Tetraeder mit 3 Brücken-Sauerstoff und 1 geladenem Nichtbrücken-Sauerstoff

Räumliche Baugruppen

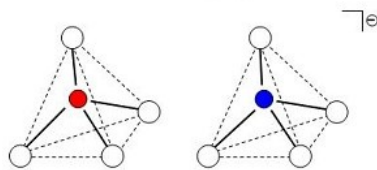


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines Aluminosilicat-Netzwerkes (Geopolymer)

Unter **Geopolymeren** versteht man amorphe Aluminosilicate, deren polymere Struktur durch **Raumnetze** ohne kristallographische Fernordnung beschrieben werden kann. Die Vorsilbe "Geo" der Bezeichnung weist auf den **anorganisch-mineralischen Charakter** der Komponenten hin. In Abb. 1 ist eine mögliche Anordnung von fünf Silicat-Tetraeder und zwei

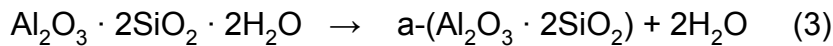
Aluminat-Tetraeder in vereinfachter ebener Darstellung wiedergegeben.

Der **abgeschätzte Kovalenzgrad** der Bindung des Raumnetzes ist mit 46 % (Si-O) bzw. 36 % (Al-O) beachtlich und bestimmt u. a. die mechanischen Eigenschaften des Geopolymerbinders. Die negativen Ladungen am Netzwerk (Nichtbrücken-Sauerstoff, lokalisierte Ladung bzw. Aluminat-Tetraeder, delokalisierte Ladung) werden durch Alkalionen (Na⁺ oder K⁺) in den Zwischenräumen ladungsmäßig kompensiert. Die Silicat-Tetraeder SiO_{3/2}O⁻, die auch in Schichtsilicaten auftreten, und die Silicat- SiO_{4/2} bzw. Aluminat-Tetraeder [AlO_{4/2}]⁻, die als Baugruppen in Feldspäten vorkommen werden durch sp³-Valenzzustände am Silicium bzw. Aluminium gebildet. Die Geopolymere können so in ihrer Struktur auch als „ungeordnete Zeolithe“ betrachtet werden.

Ausgehend vom Kaolin (Kaolinit: Al₂O₃ · 2SiO₂ · 2H₂O), dem „klassischen“ **Ausgangsmaterial** (2-Schicht-Tonmineral), sind zur Herstellung von Geopolymer-Bindemitteln **zwei Aktivierungsschritte** erforderlich.

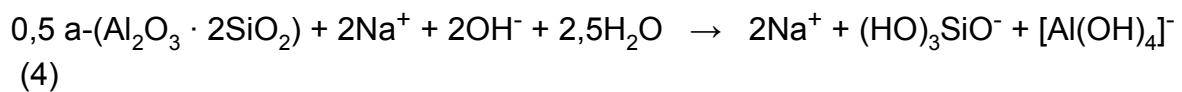
- I. Thermische Aktivierung bei Temperaturen unter 900 °C
- II. Chemische Aktivierung mit stark basischen Lösungen

Die moderate **Wärmebehandlung** (I.) des kristallinen 2-Schicht-Tonminerals bei Temperaturen um 750 °C führt über die Entwässerung gemäß Gl. 3 zur Ausbildung einer amorphen Struktur („Metakaolinit“).



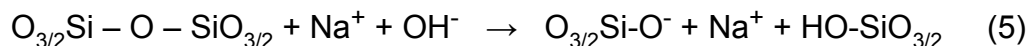
Diese Reaktion schließt zwei Vorteile ein: Einerseits ist der Energieaufwand (< 900 °C) im Vergleich zum Brennen von Klinkerphasen (> 1400 °C) wesentlich kleiner und andererseits wird bereits ein reaktives (energiereiches) Zwischenprodukt, das Metakaolin (Metakolinit) gebildet.

Die **alkalische Aktivierung** (II.) durch **Natron- oder Kalilaugenzusatz** (4 bis 8 M NaOH oder KOH) führt zu einem Löseprozess an der amorphen Metakaolin-Struktur mit der Bildung von Monomer- oder auch gelösten Oligomer-Spezies. Vereinfacht zeigt Gl. 4 die Lösereaktion zur Bildung von Natriumsilicat und -aluminat.



Bei der chemischen Aktivierung (II.) können auch definierte Mengen von Wasserglas-Lösungen (Stoffsystem: Na₂O – SiO₂ – H₂O) zugesetzt werden, wodurch sich bestimmte Al/Si- bzw. Na/Si- Molverhältnisse in den Reaktionsmischungen einstellen lassen, die gewünschte Geopolymer-Zusammensetzung (bzw. -Raumnetzstrukturen) ermöglichen. Hinsichtlich einer umfassenden ökologischen Bewertung der Geopolymer-Binder muss bemerkt werden, dass die Herstellung von Alkalilaugen und Wasserglas-Lösungen Energiebereitstellung erfordert und die Wasserglas-Erzeugung i. a. mit einer CO₂-Emission verbunden ist.

Als Folge der **Lösereaktion** am Metakaolin (s. Gl. 4) bzw. des Anlösens von silicatischen Gesteinskörnungen sinkt der pH-Wert der Bindersuspension, wie es Gl. 5 durch „Brückensprengung“ und Verbrauch von Hydroxidionen zum Ausdruck bringt.



An den gelösten Spezies stellen sich pH-abhängige Säure-Basen-Gleichgewichte ein und die Bindermischung zeigt nach 15 bis 20 h eine Erstarrung mit anschließender Verfestigung, die nach 14 Tagen durch eine Druckfestigkeit von 20 bis 40 MPa gekennzeichnet ist.

3. Chemische Aspekte der Geopolymer-Netzwerk-Bildung

Die Erstarrung und Verfestigung erfolgt durch Vernetzung der gelösten Monomere. Die **Polykondensation** unter Ausscheidung von Wasser mit den bekannten generellen Merkmalen einer Polymerbildung (zeitliche Folge von unabhängigen Reaktionsschritten für Kettenwachstum mit mehrfacher Verzweigung) stellt den Grundprozess dar. Die Abb. 2 verdeutlicht einen solchen Kondensationsschritt.

Da beide Monomer-Spezies ein unterschiedliches Deprotonierungsverhalten aufweisen, wirken auch schwache Säure-Base-Effekte bei der Reaktion. Der Unterschied im Säure-Base-Charakter ist jedoch so gering, dass keine spontane Fällung eines kristallinen, salzartigen Produktes entsteht. Die Geopolymer-Binderwirkung wird nicht durch die Bildung von Hydraten wie bei der Zementhydratation (s. Gl. 2) sondern durch die **Bindungsknüpfung unter Abgabe von Wasser** bewerkstelligt. Dadurch ist es einerseits nicht möglich, absolut porenfreie geopolymergebundene Werkstoffe zu erzeugen und andererseits aber – im Gegensatz zu Zement-Bindern (s. Gl. 2) – wird eine merkliche

Temperaturbeständigkeit der Materialien bis in den Hochtemperaturbereich bewerkstelligt. In dieser Hinsicht gibt es eine Analogie zu den durch Wärmebehandlung gebildeten **keramischen Bau-Werkstoffen**. Die Abb. 3 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme eines Geopolymer-Binders, welcher auf Metakaolin-Basis und NaOH/Na-Wasserglas hergestellt wurde.

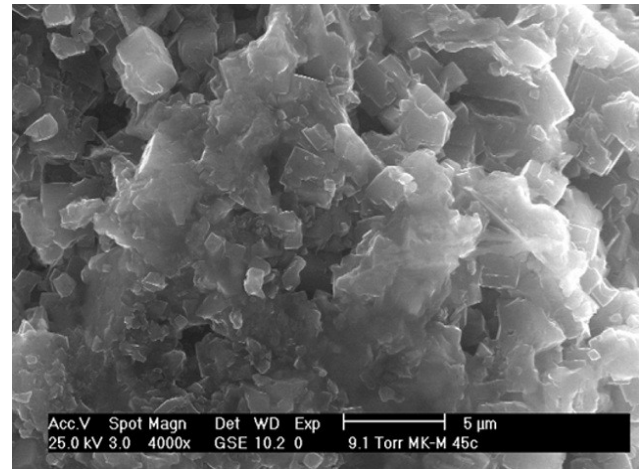
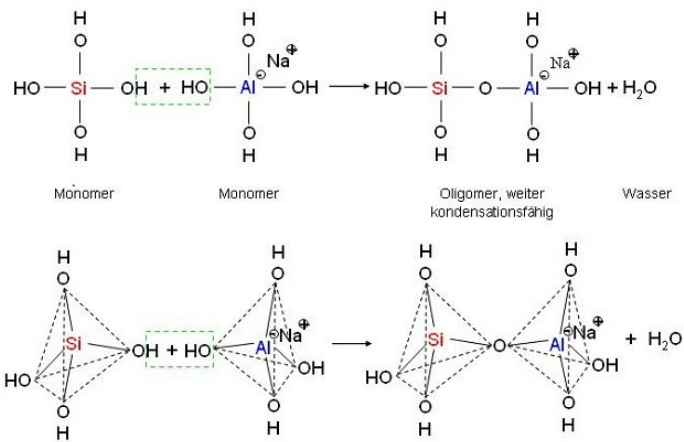


Abbildung 2: Kondensationsreaktion zur Netzwerkbildung

Abbildung 3: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Geopolymer-Binders, hergestellt aus Metakaolin

**„Geopolymere - ein „CO₂-armer“ Binder für Bau-Werkstoffe
- Teil II“**

Binderwirkung und Anwendungen in der Bauchemie
4. Geopolymere als bauchemisches Bindemittel

Ausgehend von einem hochkaolinitischem Ton erfolgt die Erzeugung der Geopolymer-Bindemittel über die zwei technologischen Schritte der moderaten Wärmebehandlung (I.) und der alkalischen Aktivierung (II.). Die Reaktivität bzw. das Potential zur Bindewirkung kann – wie in der Bauchemie üblich – anhand des zeitlichen Verlaufes der Wärmetönung in den Reaktionsmischungen (wässrige Feststoff-Suspensionen) bewertet werden.

In der Abb. 4 sind derartige Wärmeentwicklungen von Geopolymer-Bindern und Portlandzementen vergleichend dargestellt. In allen Fällen kommt es nach dem unmittelbaren Kontakt mit dem wässrigen Medium (alkalische Aktivierungslösung bzw. Zugabewasser) zu einer merklichen **Wärmefreisetzung** infolge von Benetzungs- und ersten Lösereaktionen, welche bei der alkalischen Aktivierung der Geopolymer-Reaktionsmischung (Abb. 4a) deutlich stärker ausgeprägt sein kann. Die **Zementsuspension** (Abb. 4b) zeigen danach in einem Zeitraum bis etwa 1-2 Stunden eine **relative Ruhephase (Dormante Periode)** mit minimaler Wärmeentwicklung ($\leq 0,5$ mW/g). Eine akzelerierte Reaktion mit einem Wärmefluss-Maximum im Bereich von 3 bis 6 mW/g in Zeiten von etwa 4 bis 18 h schließt sich an. Die ausgeprägte Ruhephase wird durch limitierte Grenzflächenreaktionen (Keim- und Produktschicht-Bildungen) bedingt und der sich anschließende Zeitraum beschleunigter Reaktion ist durch die gefügebepbestimmende Ausbildung von raumerfüllenden faserförmigen Hydrationsprodukten

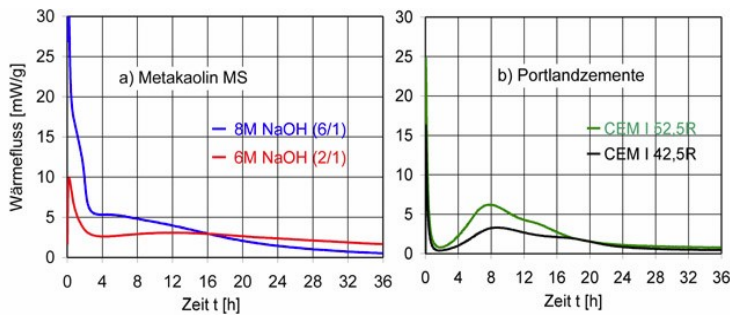


Abbildung 4: Wärmeentwicklung vom Metakaolin MS in alkalischer NaOH-Lösung (8 bzw. 6 M, Masseverhältnis: Lösung/Feststoff) bei 25 °C (a) und bei der Hydratation (w/z = 0,4) von Portlandzementen (b)

(C-S-H-Phasen, s. Gl. 1, Freisetzung von Ca^{2+} und 2OH^-) in dem sich generierenden Zementstein bestimmt.

In den **Geopolymer-Reaktionsmischungen** (Abb. 4a) liegen durch Zugabe der alkalischen NaOH-Aktivierungslösung bereits zu Beginn hohe Hydroxid-Konzentrationen vor, so dass unmittelbar nach Reaktionsbeginn ein merklicher Wärmefluss (z. T. $>30 \text{ mW/g}$) infolge der Lösereaktion am thermisch aktivierten Alumosilicat (Metakaolin, s. Gl. 4) zu

beobachtet ist. **Keine dormante Phase** mit ausgeprägtem Wärmefluss-Minimum, wie sie für Zementsuspensionen (PZ oder silicatische Klinkerphasen) charakteristisch ist, kann bei Geopolymer-Reaktionsmischungen festgestellt werden. Dennoch ist der Wärmeflussverlauf von alkalisch aktivierten Metakaolinen in Abb. 4a durch Zeitabschnitte mit anhaltend verstärktem Reaktionsgeschehen (flacher Verlauf bzw. leichter Anstieg) gekennzeichnet. Nach etwa 3 h ist der primäre Lösevorgang im wesentlichen abgeschlossen und es schließt sich mehr oder weniger unmittelbar die Polykondensation mit Netzwerkbildung als exothermer Wärmeeffekt wahrnehmbar an (Sol-Gel-Transformation). Dieser mit Erstarrung verbundene Vorgang kann sich bis zu Zeiten über 28 h erstrecken und mit einem leicht ansteigenden Wärmefluss verbunden sein.

Verständlicherweise hängt der quantitative Wärmeflussverlauf in Geopolymer-Bindemittelsuspensionen explizit von den eingesetzten Reaktionskomponenten, den Mischungsverhältnissen und den vorliegenden äußeren Bedingungen für das Abbinden ab. Im Einzelnen sind zu benennen: Phasenbestand des Ausgangsmaterials (Tonminerale), Temperatur/Zeit/Gasatmosphäre bei der thermischen Aktivierung (I.) sowie das Massenverhältnis von Aktivierungslösung zu Feststoff, Konzentration der alkalischen Lösung (NaOH oder KOH), der Wasserglas-Zusatz und die Temperatur bzw. Feuchterege lung in der Geopolymer-Suspension bei der alkalischen Aktivierung (II.).

Eine Zusammenstellung von **verarbeitungstechnischen Kennwerten und Werkstoffparametern** auf Basis von Geopolymerbindern, die ausgehend von vorzugsweise kaolinitischen (Metakaolin) aber auch illitisch/smektischen Tonen (Metatone) hergestellt wurden und zu anwendungsrelevanten Festigkeiten führen, ist in der Tabelle 1 gegeben.

Topfzeiten bzw. Erstarrungsbeginn (bei etwa 25 °C)

4 bis 18 h (kürzere Zeiten: Metakaolin)
(längere Zeiten: Metatone, besonders smektitische Tone)
(Erstarrungsende nach 6 bis 24 h)

Trocken-Rohdichte (nach 28 Tagen)

1800 bis 2000 kg/m^3 (Metakaolin ohne Wasserglas-Zusatz)
2000 bis 2400 kg/m^3 (Metatone mit Wasserglas-Zusatz)

Festigkeiten (nach 28 Tagen)

Druckfestigkeiten: 20 bis 80 MPa
Biegezugfestigkeiten: 5 bis 15 MPa

Tabelle 1: Übersicht zu verarbeitungstechnischen und werkstofflichen Kennwerten von Geopolymerbindern

Geeignete Geopolymermischungen werden i. a. mit Si/Al-Verhältnissen (molar) von etwa 1,5 bis ungefähr 6 unter Berücksichtigung aller Komponenten hergestellt, wobei für die sich einstellenden Bindereigenschaften die reale Löslichkeitssituation (gelöste Silicat- und Aluminat-Strukturen) von besonderer Bedeutung ist.

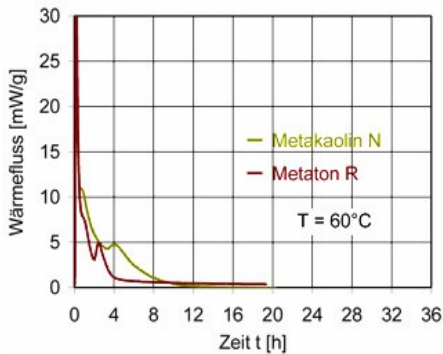


Abbildung 5: Wärmeentwicklungen in Reaktionsmischungen mit einem Metaton R bzw. einem Metakaolin N bei einer alkalischen Aktivierung bei 60 °C (8 M NaOH-Lösung, Masseverhältnis : Lösung/Feststoff = 6/1)

Die Abb. 5 zeigt den Wärmeflussverlauf in Geopolymer-Reaktionsmischungen nach einer **alkalischen Aktivierung bei 60 °C**. Man erkennt, dass die erhöhte Temperatur die Reaktionszeiten deutlich verkürzt und die Teilreaktionen stärker ausprägt (mit erneutem Anstieg des Wärmeflusses) sind. Eine Ruhephase (vgl. Portlandzemente, Abb. 4b) ist jedoch auch unter diesen Reaktionsbedingungen nicht feststellbar.

Bei dem Einsatz von Geopolymerbindern werden solche etwas erhöhten Abbinde Temperaturen (40 bis 60 °C) in Kombination mit **Maßnahmen gegen einen verfrühten Feuchteverlust** (Folienabdeckung bis zu 24 h) verschiedentlich angewendet, um eine gesteigerte Binderperformance zu erzielen. Aus Abb. 5 wird auch deutlich, dass der illitisch/smektitische Metaton R (mit Dreischicht-Tonmineralien) ein mit dem Metakaolin N durchaus vergleichbares Reaktionspotenzial aufweist. Durch

derartige Befunde wird der preiswertere Einsatz von „gewöhnlichen“ Tonen in Geopolymermischungen beachtlich forciert.

5. Entwicklungstrends zur Anwendung von Geopolymeren

Wegen des relativ hohen Preises für Kaolin haben sich in der jüngsten Vergangenheit verschiedene Modifizierungen des Geopolymer-Konzeptes herausgebildet, wobei die **Erweiterung der Rohstoffbasis** eine merkliche Dominanz hat. So vermittelt die Tabelle 2 einen Einblick über eingesetzte Rohstoffe für die Geopolymer-Herstellung und über Anwendungsfelder von Geopolymeren.

Aluminosilicatische Rohstoffe für Geopolymere	Anwendungen von Geopolymeren in Prozessen und Produkten
<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tone mit 3-Schicht-Tonmineralien oxidierend oder reduzierend thermisch aktiviert (s. Schritt I) • Ziegelmehle (aus der Produktion von Hochloch-Ziegeln) <p>Geopolymere →</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Leichtbau-Werkstoffe zur erhöhten Wärmedämmung (geschäumt oder mit Leichtzuschläge, s. Abb. 5) • Betonsteine (Pflaster) • Erhöhung der Wetterbeständigkeit von Trockenlehm-Ziegeln [3] (ökologische Lehm-Bau) • Mechanische Stabilisierung von extrudierten Formlingen der Hochlochziegel-Herstellung [4]
<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zumahlstoffe, wie für Zemente üblich <ul style="list-style-type: none"> ○ Flugasche (aus der Kohleverbrennung) ○ Hüttensande (aufgemahlene glasige Hochofen-Schlacke) 	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugung von Bodenfliesen mit thermischen Prozessen $T < 700^{\circ}\text{C}$ [5] • Immobilisierung toxischer und radioaktiver Reststoffe [6, 7]

Tabelle 2: Rohstoffe und Anwendungen

Das Bestreben zum Einsatz von geeigneten Tonen mit 3-Schicht-Tonmineralien (A) erscheint hinsichtlich einer preisgünstigen Erzeugung von Geopolymeren besonders attraktiv. Hierbei besteht das Bestreben, energie-moderat und mit verminderter CO_2 -Emission einerseits **Leichtbaustoffe** und andererseits auch massive Betonsteine zu entwickeln. Abb. 6 zeigt Wärmedämmwerkstoffe, die durch thermische Aktivierung von Tonen in unterschiedlichen oxidierenden bzw. reduzierenden Atomsphären (Bindemittelfärbungen) und unter Zusatz von **Blähglas-Granalien** zu Geopolymer-Bindern erzeugt wurden.

In der Abb. 7 ist ein **geschäumtes Geopolymer**, welches aus einem Metakaolin und alkalischer Wasserglaslösung hergestellt wurde, mit 0,5 bis 1,0 mm großen, kugelförmigen Blasen dargestellt. Die Schäumung erfolgte mit einem Tensidversatz.

Baustoffliche Entwicklungen zeigen, dass auch eine Kombination der anorganischen-mineralischen Geopolymere mit nachwachsenden Rohstoffen wie natürliche Geopolymeren in Komposit-Werkstoffen möglich, sinnvoll und ökologisch ist. Als Ergebnis einer solchen Entwicklung ist in Abb. 8 ein Verbundwerkstoff dargestellt, welcher aus

extrudierten Roggenmehl-Granulaten (expandiertes Biopolymermaterial) besteht, die mittels eines aus Metaton hergestellten Geopolymer gebunden wurden. Verständlicherweise besitzen plattenförmige Bauteile aus diesem hochporenenthaltigen Material sehr gute Wärme- und Schalldämmeigenschaften und weisen darüber hinaus auch die vorteilhafte Feuerwiderstandsklasse B1 (schwerentflammbar) auf.

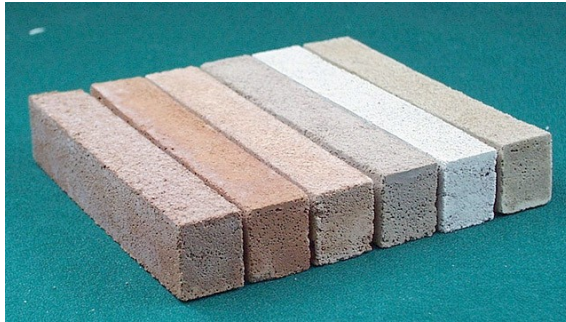


Abbildung 6: Probekörper eines geopolymergebundenen Leichtbau-Werkstoffes mit Blähglasgranalien

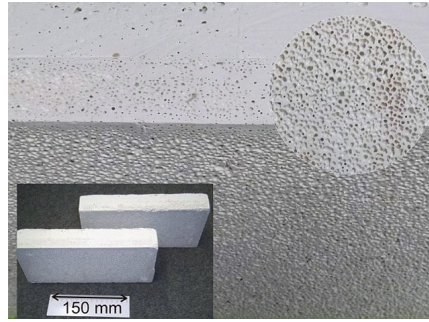


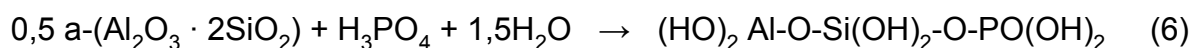
Abbildung 7: Geschäumtes Geopolymer, Geopolymer-platten mit Abmessungen (links unten) und geschlossen-porigem Gefüge (rechts oben)

Bei der Verwendung von CaO-haltigen Flugaschen und Hüttensanden (B, s. Tab. 2) bilden sich verständlicherweise auch C-S-H-Phasen (s. Gl. 2), in denen auch der Einbau von Aluminat-Baugruppen nachgewiesen wurde. So ergeben sich vorteilhafte Kombinationen mit Geopolymer-Bindern in Portlandzement-Arten (CEM II) und in den Kompositzementen (CEM V) mit verminderten Gehalten an Zementklinkern (s. Abs.1). Zusätzliche Aluminat-Komponenten für die Geopolymerherstellung können auch aus **Nebenprodukten** der Aluminiumerzeugung und der Veredelung von Aluminiumprodukten gewonnen werden. So wurden erfolgreich Restlösungen der anodischen Aluminiumoxidation (Eloxal-Verfahren)

eingesetzt [8]. In der Erzeugung von **keramischen Bauprodukten** besteht die Möglichkeit zur Optimierung von chemischen und mechanischen Eigenschaften. Sogar die **energie-moderate und CO₂-arme Erzeugung von Bodenfliesen** bei Brenntemperaturen unter 700 °C steht im Blickpunkt bauchemischer Forschung [5].

Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass Geopolymer-Binder auch durch eine **saure Aktivierung von Metakaolin** mittels Phosphorsäure erzeugt werden können [9] (vgl. Aktivierungsschritt II). Damit ist die stoffliche Basis der Geopolymere, aluminosilicatische Netzwerke, um Phosphat

erweitert. Die Kondensation aller drei Komponenten ist in Gl. 6 in einer stark vereinfachten Form wiedergegeben.

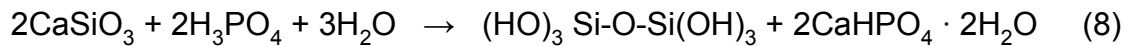
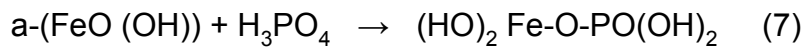


Die **Phosphorsäure** ist darüber hinaus in der Lage, aus mineralischen Rohstoffen Netzwerke aufzubauen bzw. zu initialisieren, die nachweislich attraktive Binderwirkungen - ohne weitere thermische Behandlungen bei höheren Temperaturen (> 200 °C) – entfalten.



Abbildung 8: Kompositwerkstoff aus extrudierten Biopolymer-Granalien mit Geopolymerbindung (links gebrochene Granalien)

Die Gln. 7 und 8 beschreiben entsprechende Reaktionen mit **amorphem Ferrihydrit** [10] bzw. **Wollastonit** [11].



Durch Erschließung neuer chemischer Konzepte für mineralische Bindemittel erbringt die Bauchemie einen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emission. Gleichzeitig werden durch Nutzung weiterer Reststoffe von Stoffwandlungsprozessen in der Industrie neuartige Bauwerkstoffe mit attraktiven Eigenschaftskombinationen für das Bauwesen bereitgestellt.

Kontakt:	Schlauer Fuchs
 <p>Prof. Dr. Christian Kaps Bauhaus-Universität Weimar Bau- u. Werkstoffchemie Coudraystraße 13C 99423 Weimar Tel.: +49 (0)3643 584793 E-Mail: christian.kaps@uni-weimar.de</p>	<p>Unsere Schlaue-Fuchs-Frage zu diesem Beitrag lautete:</p> <p>Teil I: Wie heißt das klassische Ausgangsmineral zur Herstellung von Geopolymer-Bindemitteln?</p> <p>Teil II: Welche guten und vorteilhaften Eigenschaften weist der in Abb. 8 dargestellte Kompositwerkstoff auf?</p>
<p>Bauhaus-Universität Weimar</p>	<p>http://www.uni-weimar.de/cms/bauing/organisation/bch.html</p>