

# Thema Frühgeschichte

## Geobeton - Haben die frühgeschichtlichen Baumeister Steine gegossen?

Wilfried Augustin

Wer sich mit Frühgeschichte befasst, kommt immer wieder zu Deutungen der Schulwissenschaft, die Zweifel auslösen. So bei Bautechnik und Alter frühzeitlicher und antiker Bauwerke, insbesondere in Südamerika und Ägypten.

Die offizielle Archäologie kennt als langlebiges und heute noch erhaltenes Baumaterial ungebrannte und gebrannte Ziegel sowie natürliche Steine und natürliche behauene Steine. Besonders Letztere machen Schwierigkeiten, wenn man an den Transport vieler Tonnen schwerer Objekte denkt oder an die Logistik, einige Hunderttausende behauener Steine bereitzustellen, zu transportieren und in das Bauwerk einzufügen.

Wie war es möglich, hundert Tonnen schwere Teile aus einem Steinbruch herauszubringen und viele Kilometer weit zur Baustelle zu transportieren? Räder, Kräne und Maschinen gab es noch nicht. Nur Seile, Hebel und die menschliche oder tierische Kraft standen zur Verfügung. Selbst heute würden Sie sicher eine Absage erhalten, wenn Sie bei führenden Transportunternehmen ein Angebot etwa zum Anheben der Steine von Baalbek einholen würden.

Oder denken Sie an die Pyramiden in Ägypten. Millionen Steine, exakt behauen und auf das Bauwerk transportiert, wie soll das möglich gewesen sein? Oder die Inkamauern in Südamerika, wo tonnenschwere Steine aus weit abgelegenen Steinbrüchen über tiefe, steile Täler hinweg herantransportiert worden sein sollen.

Die Schulwissenschaft kennt keine oder nur wenig glaubhafte Erklärungen. Was die fehlenden Beweise zur Logistik und Baumethode angeht, würde man die Bauwerke am liebsten ignorieren. Aber da stehen sie nun mal, man kann sie nicht wegdiskutieren, ein Beweis für die Hilflosigkeit der Altertumsforscher.



*Bild 1: Die Nordseite der Mykerinos-Pyramide in Gizeh.*



*Bild 2: Hier eine Reparaturstelle. Es wurde gemörtelt (Mykerinos-Pyramide, Gizeh).*

Es ist meine feste Überzeugung, dass wir die Rätsel nur lösen, wenn wir alternativ an die Sache herangehen.

Ein Ansatzpunkt dazu ist die Denkweise, dass die Steine ganz oder zum Teil gar nicht behauen und transportiert, sondern vor Ort aus Beton gegossen wurden. Das würde die Logistik erheblich vereinfacht haben. Auch die Formgebung wäre einfacher, schneller und ökonomischer gewesen.

Wenn ich hier von Beton spreche, meine ich nicht den heute üblichen Beton aus Zement und Sand, wie er für Wohn- und Geschäftsbauten, Autobahnen und Brücken verwendet wird. Ich meine ganz allgemein eine keramische Masse, hergestellt aus Füllstoff und Bindemittel. Beide werden gemischt und durchlaufen einen weichen oder flüssigen Zustand, in dem die Formgebung stattfindet. Anschließend erfolgt eine (zeit- und temperaturabhängige) Verfestigung. Danach liegt ein fester, harter keramischer Formkörper vor, der steinähnlich ist. Ich glaube, viele von uns haben schon einmal betoniert oder Fliesen gegossen. So ungefähr funktioniert das. Nur, dass das Bindemittel eben nicht Zement in heute gebräuchlicher Art ist.

Ich möchte für diese gemeinte Art Beton den Begriff „Geobeton“ vorschlagen.

Wo liegt denn der Unterschied zwischen natürlichem Stein und Geobeton? Außer in der Formgebung gibt es eigentlich keinen!

Beide sind keramisch, beide bestehen aus Substrat (Füllstoff) und Matrix (Bindemittel). Nehmen Sie z. B. einen Sandstein. Sandstein besteht aus natürlichem Sand als Substrat und natürlichem silikatischen Bindemittel. In einer bestimmten Periode der Erdgeschichte hat sich Sandstein so gebildet. Genauso gut könnte man aber ein sandsteinartiges Produkt auch mit den Methoden der modernen Chemie künstlich herstellen, mit einem keramischen Bindemittel und natürlichem Sand.

Sandstein ist nur ein Beispiel. Wir könnten auch z. B. Kalkstein nehmen, wie es das Geopolymer-Institut in Frankreich macht. Sie erzeugen künstliche Kalksteine, die wie echt aussehen und auch als echt „natürlich“ eingestuft wurden. Ich zitiere aus [www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org):

*„People think that because we use chemicals, it is very easy to find these ingredients in the final product. This is wrong. Thanks to the geopolymer chemistry, the chemical reaction generates natural elements, minerals that can be analysed as*

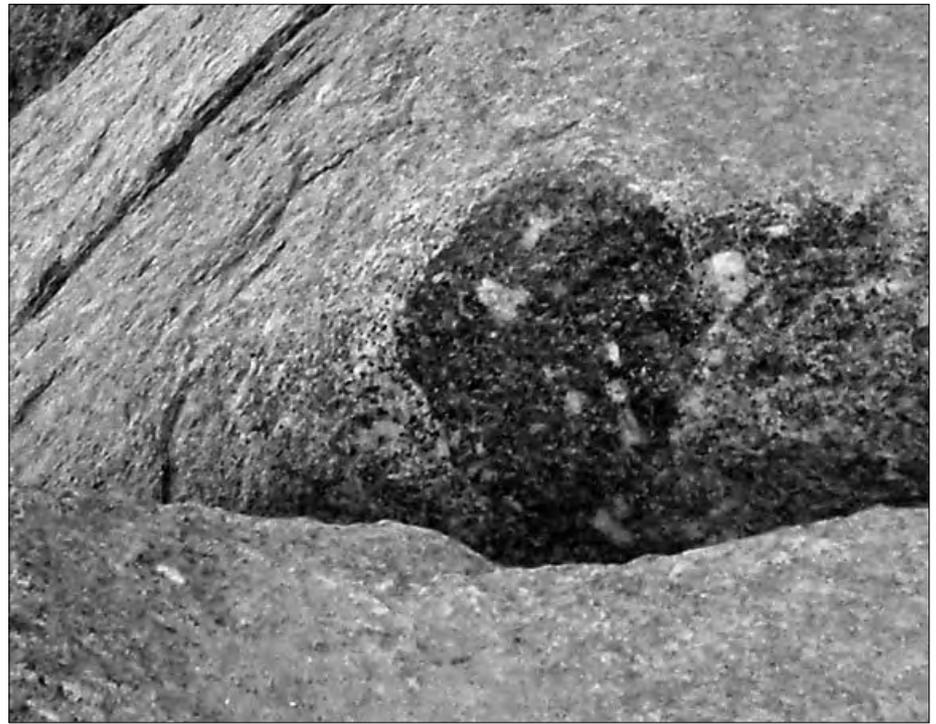


Bild 3: Auch hier eine Reparaturstelle mit Mörtel! (Mykerinos-Pyramide, Gizeh).

*natural if scientists are not aware of their artificial nature.”*

Übersetzung: Die Leute denken, weil wir Chemikalien verwenden, es sei sehr leicht, diese Stoffe im Endprodukt zu finden. **Das ist falsch.** Dank der Geopolymer-Chemie erzeugt die chemische Reaktion natürliche Produkte, Mineralien, die als natürlich analysiert würden, wenn die Wissenschaftler nicht über die künstliche Beschaffenheit Bescheid wüssten.

Sie sehen, Sie würden den Unterschied sicher auch nicht feststellen, wenn Sie Archäologe wären und einen künstlich gegossenen Formkörper auf Ihrer Ausgrabungsstätte gefunden hätten. Sie hätten den künstlichen Stein insbesondere deswegen nicht erkannt, weil die Frage danach gar nicht gestellt wurde und wird. Hier liegt das Problem der Archäologie: Am Dogma wird nicht gerüttelt.

Also lassen Sie wenigstens **uns** einmal alternativ denken.

Im SYNESIS-Magazin Nr. 5/2011 hatten wir schon die Frage bezüglich Inkamauern in Südamerika gestellt: „Weiche Steine - Inkamauern: Stein oder Beton“. Es ergaben sich Indizien, dass Inkasteine nicht aus natürlichem behauenen Fels bestehen. Es könnten weich gemachte Steine verformt worden sein, oder aber es wurde mit Geobeton-guss gearbeitet. Letzteres Verfahren sehe ich als das wahrscheinlichere an.

In einem Artikel in SYNESIS Nr. 1/2000 schrieb Eugen Gabowitsch darü-



Bild 4: Senkrechte Trennfuge. Es sieht so aus, als würden hier zwei behauene Blöcke aneinanderstoßen (Cheops-Pyramide, Gizeh).

ber, dass Beton in der Antike bei Griechen und Römern bekannt war und möglicherweise auch bei den Ägyptern.

In dem Artikel „Was stimmt nicht mit der Pyramiden-Evolution?“ von



Bild 5: In der Vergrößerung zeigt sich, dass die Trennfuge doch nicht so eindeutig ist. Kristalle scheinen von einem Block in den anderen überzugehen.

Gernot L. Geise im SYNESIS-Magazin Nr. 5/2011 zeigt er auf Seite 31 Blöcke der Chephren-Pyramide, die mit Mörtel verarbeitet wurden. Also doch, die alten Ägypter konnten mit Mörtel umgehen. Daraus folgt für mich: Wer Mörtel kennt, kann auch mit Geobeton arbeiten. Es ist nur ein Unterschied in der Menge, ob ich eine Fuge dicht mache, oder eine größere Menge Mörtel mit einer größeren Menge Füllstoff ansetze und einen Block gieße!

Nachfolgend möchte ich einige Bilder zeigen. Die stellen selbstverständlich keinen Beweis dar. Sie sollen nur zum Nachdenken anregen.

Bild 1: Die Nordseite der Mykerinos-Pyramide in Gizeh. Das sollen Verkleidungssteine sein. Sehen die aus wie ehemals behauene Steine? Ich finde, das sieht eher aus wie Betonguss, der an manchen Stellen nicht ganz homogen gemischt war.

Bild 2: Hier eine Reparaturstelle. Es wurde gemörtelt. Wann? Wer?

Bild 3: Auch hier eine Reparaturstelle mit Mörtel!

Bild 4 zeigt eine senkrechte Trennfuge an der Cheopspyramide. Es sieht so aus, als würden hier zwei behauene Blöcke aneinanderstoßen.

Bild 5: In der Vergrößerung zeigt sich jedoch, dass die Trennfuge doch nicht so eindeutig ist. Kristalle scheinen von einem Block in den anderen überzugehen.

Bild 6: Das vorherige Bild ist nicht so ganz eindeutig. Aber sehen Sie einmal dieses Bild aus dem Chephren-Tempel an. Das soll eine Trennfuge zwischen zwei Granitblöcken sein. Man sieht andeutungsweise eine Grenzlinie.

Bild 7: Wenn Sie die Grenzlinie vergrößert sehen, erkennen Sie, dass gar keine Trennung besteht. Es sieht so aus, als ob der obere Stein auf den unteren gegossen wurde.

Bilder 8-10: Diese Aufnahmen stammen aus den Ruinen von Puma Punku in Bolivien. Sie sehen Steine, die wie gegossen aussehen. Ich kann mir nicht vorstellen, dass diese Teile mit primitiven Mitteln behauen worden sind. Man sieht keinerlei Spuren von Schlagwerkzeugen. Die Teile sehen aus wie technische Funktionsteile. Bisher habe ich keinerlei vernünftige Erklärung für Sinn und Zweck dieser Steine gefunden, auch nicht über Alter und Baumeister.

Natürlich muss man diese Bilder diskutieren. Wir müssen uns auch mehr und andere Bauwerke ansehen. Es geht mir hier jedoch darum, die **Möglichkeit** einzubeziehen, dass Blöcke und Steine aus Geobeton gegossen worden sein könnten.

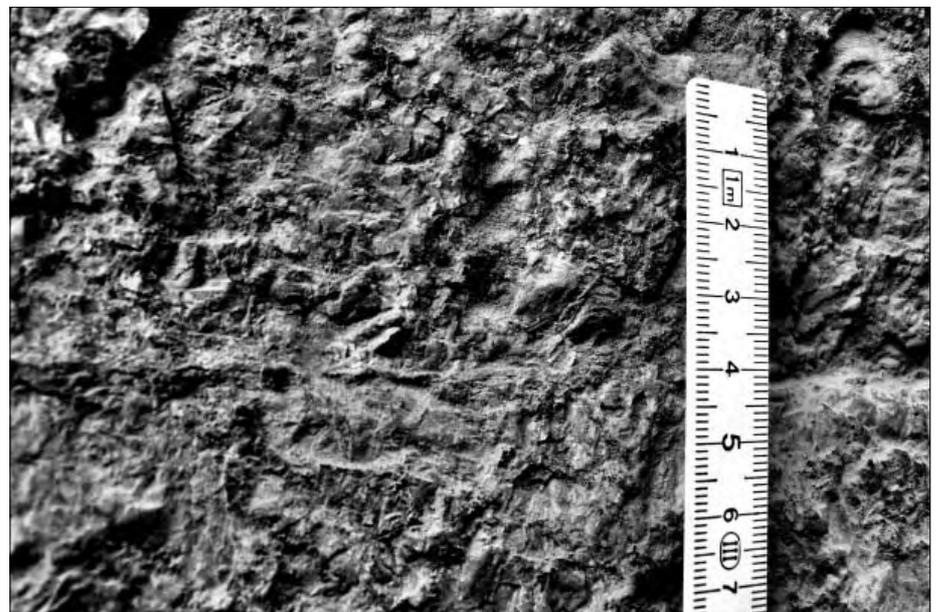


Bild 6: Das vorherige Bild ist nicht so ganz eindeutig. Aber sehen Sie einmal dieses Bild an. Das soll eine Trennfuge zwischen zwei Granitblöcken sein. Man sieht andeutungsweise eine Grenzlinie (Chephren-Tempel, Gizeh).

Ich stehe gar nicht so allein da mit meiner Meinung. Ich zitiere hier einen Internetz-Beitrag der „geopolymer.org“:

<http://www.geopolymer.org/news/artificial-pyramid-stone-new-analysis-2>

*News and Conferences*  
*Artificial Pyramid Stone: new analysis.* Posted by: Editor on Jul 14, 2011 | No Comments

„A new scientific analysis demonstrates the artificial nature of Egyptian Pyramid stone. The article titled: “Were the casing stones of Senefru’s Bent Pyramid in Dahshour cast or carved? Multinuclear NMR evidence” was published in *Materials Letters*

*65 (2011) 350–352, by an international team of scientists involving Kenneth J. D. MacKenzie (MacDiarmid Institute for Advanced Materials and Nanotechnology, Victoria University of Wellington, New Zealand), Mark E. Smith, Alan Wong, John V. Hanna (Department of Physics, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, UK), Bernard Barry (Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, New Zealand) and Michel W. Barsoum (Department of Materials Science and Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA).*

The abstract reads: „A comparison was made of the solid-state  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{27}\text{Al}$  and  $^{43}\text{Ca}$  MAS NMR spectra of the outer casing stone from Senefru’s Bent Pyramid in Dahshour, Egypt, with two quarry limestones from the area. The NMR results suggest that the casing stones consist of limestone grains from the Tura quarry, cemented with an amorphous calcium-silicate gel formed by human intervention,

by the addition of extra silica, possibly diatomaceous earth, from the Fayium area.”

Übersetzt steht in der Zusammenfassung Folgendes:

Es wurde ein massenspektroskopischer Vergleich von den äußeren Verkleidungssteinen der Snofru-Knickpyramide in Dahshur mit zwei Kalksteinen von Steinbrüchen in der Umgebung gemacht. Das Ergebnis der Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) zeigt, dass die Decksteine aus Kalkstein-Granulat aus dem Tura-Steinbruch stammen, gebunden mit einem amorphen Kalzium-Silikat-Gel, das durch den Zusatz

von extra Kieselsäure, vermutlich Diatomeenerde aus dem Gebiet von Fayum künstlich hergestellt wurde.

Hier liegt also eine wissenschaftliche Analyse vor, die aussagt, dass die äußeren Steine der Knickpyramide in Dahshur nicht aus dem Steinbruch gehauen, sondern mithilfe eines Bindemittels, Kalksteinen und Diatomeenerde künstlich hergestellt wurden.

Jetzt müssen wir uns die Frage stellen, ob denn das im Prinzip in der damaligen Zeit technisch möglich war.

Um das zu klären, müssen wir an dieser Stelle über „Geopolymere“ sprechen.

„Geopolymere“ ist der Begriff für eine neue Klasse mineralischer Werkstoffe auf Basis von künstlich hergestellten Aluminosilikaten als Bindemittel.

Der Name stammt von J. Davidovits und wurde um 1970 geprägt. Ursprünglich bezog er sich auf Polymere aus Reaktionen von Metakaolin in alkalischen Medien. Die Vorsilbe „Geo“ wurde verwendet, um die chemische Verwandtschaft zu natürlichen Gesteinen und Mineralien zu verdeutlichen.

Diese Stoffe enthalten dreidimensionale polymere Alkali-(Erdalkali)-Aluminosilikate mit einer Struktur, die amorph, semikristallin bis nanokristallin sein kann. Sie entstehen durch Copolymerisation von gelösten siliziumdioxid- und aluminiumoxidhaltigen Rohmaterialien. Die Reaktion läuft bei hohen pH-Werten (sehr stark alkalisch, z. B. Natronlauge) ab. In ihrer chemischen Zusammensetzung ähneln sie den gesteinsbildenden Mineralien, wie sie z. B. in Feldspat oder Tonen vorkommen. D. h., die Bindemittel der natürlichen Gesteine sind den neuen Geopolymer Bindemitteln sehr ähnlich.

Wie oben schon angesprochen, werden zur Formung von natürlichen oder künstlichen Gesteinen immer eine Matrix (das Bindemittel) und ein Substrat (der Füllstoff oder das Füllstoffgemisch) benötigt. Liegt ein natürliches Gestein vor, haben wir ein natürlich gebildetes Aluminosilikat vorliegen mit z. B. Muschelkalk als Substrat. Das hätten wir z. B. bei einem Kalkstein aus einem antiken Steinbruch.

Liegt ein künstliches Gestein vor, haben wir ein künstlich hergestelltes Aluminosilikat und auch wieder einen Muschelkalk oder ein anderes Gesteinsgemisch, das in einem Gießverfahren zu Formkörpern verbunden wurde. Dieses wäre nach aktueller Terminologie ein Geopolymer.

Die Unterschiede in Aussehen und physikalischen Eigenschaften der künst-



*Bild 7: Wenn Sie die Grenzlinie vergrößert sehen, erkennen Sie, dass gar keine Trennung besteht. Es sieht so aus, als ob der obere Stein auf den unteren gegossen wurde (Chephren-Taltempel, Gizeh).*



*Bild 8: Stein, der wie gegossen aussieht (Puma Punku, Bolivien).*



*Bild 9: Stein, der wie gegossen aussieht (Puma Punku, Bolivien).*

lichen Gesteine, und der Geopolymere hängt natürlich von dem Bindemittel ab, aber auch in besonderer Weise vom Füllstoffgemisch. Nehmen wir Muschelkalk als Füllstoff, erhalten wir relativ weiches Kalkgestein. Nehmen wir z. B. hartes Vulkangestein, erhalten wir harte, feste Formkörper. Nehmen wir Quarzsand, ergeben sich z. B. künstliche Sandsteine. Die Wahl der Füllstoffe hängt sicher von den Gegebenheiten in der Umgebung der Baustelle ab, der Verfügbarkeit bestimmter Mineralien. So wird man in Ägypten mehr auf weichen Kalkstein zurückgreifen. In Südamerika könnte ich mir gut die Verwendung von Vulkanasche und vulkanischem Gestein vorstellen. Mit einem geeigneten Bindemittel würden sich viel härtere und festere „Geopolymere“ bilden als bei den weichen Kalksteinen in Ägypten.

Die Entwicklung der heutigen (aber

auch antiken) Geopolymere setzt also (vereinfacht) zwei Arbeitsstufen voraus:

1. Die Entwicklung des aluminoosilikatischen Bindemittels (Matrix, Flüssigkeit).
2. Die Entwicklung von Füllstoffgemischen (Substrat, Feststoff).

Antike Chemiker in Ägypten oder Sachkundige im alten Südamerika scheinen das erfolgreich gemeistert zu haben. Die Sache ist so gut gelungen, dass unsere offizielle Altertumswissenschaft bis heute noch nicht darauf gekommen ist.

Wie sieht das Ganze denn nun praktisch aus:

Hierzu sehen Sie bitte die nebenstehende Darstellung (Bild 11). Diese Darstellung stammt von der Internetseite der Uni Leipzig (<http://www.uni-weimar.de/projekte/geton/deutsch/geopolymere.htm>).

Es ist natürlich nur ein Schema aus der Sicht der heutigen Chemie – und hier werden auch keine Mischungsverhältnisse genannt. Wir sollten daher das Schema nur beispielhaft sehen, dass mit Naturprodukten und angewandter Chemie eine besondere Steintechnologie möglich ist. Vielleicht haben die früheren Chemiker anders gedacht, vielleicht aber auch nicht. Manche Zusammenhänge sind naheliegend, so dass heutige und damalige Chemiker auf die gleiche Arbeitsweise und Rohstoffe kommen. Demnach hätten unsere Vorfahren durchaus das Wissen gehabt haben können, das unsere Industrie erst jetzt wiederentdeckt hat.

In diesem beispielhaften Fall entwickelt sich in dem Gemisch von von Metakaolin, Schlacke, Flugasche und aktiviertem Ton durch Zusatz einer wässrigen Aktivatorlösung ein Geopolymer-Binder, der das ganze Gemisch zu einem Formkörper abbinden lässt. Der Aktivator ist eine wässrige Lösung von Natron-/Kalilauge und Natron-/Kaliwasserglas. Der entstehende Formkörper ist rein mineralisch und sicherlich schwer von natürlichem Gestein zu unterscheiden – wenn man nicht genau danach sucht und nicht die entsprechenden Analysemethoden verwendet.

Folgende Rohstoffe werden genannt:

- Metakaolin
- Schlacke
- Flugasche
- Aktivierter Ton
- Alkalilauge
- Wasserglas

Lassen Sie uns einmal betrachten, ob diese Rohstoffe **theoretisch** im alten Südamerika oder Ägypten überhaupt

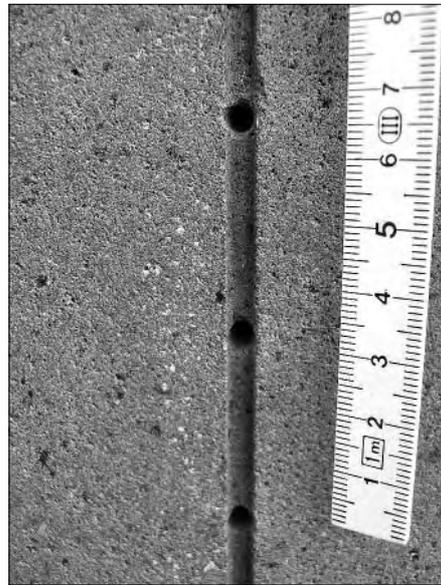


Bild 10: Stein, der wie gegossen aussieht (Puma Punku, Bolivien).

produkte (Schmelzen) aus der Metallgewinnung verstehen, aber auch Lava in verschiedenen Verwitterungszuständen. Auf jeden Fall, beides war als Rohstoff vorhanden.

### Flugasche

Hierunter versteht man den staubförmigen Anteil, der bei Verbrennung von festen Produkten mit den Rauchgasen frei wird. Es könnten auch Aschen von Holzfeuer sein. In jedem Fall handelt es sich um pulverförmige, feindisperse Materialien mit großer reaktiver Oberfläche. Auch diese Stoffe sollten leicht verfügbar gewesen sein, denn Holzfeuer für Metallgewinnung und Keramikbrand waren Stand der Technik. Also fiel auch Flugasche an. Letztendlich hätte man auch einfach Holz zur Aschegewinnung verbrennen können.

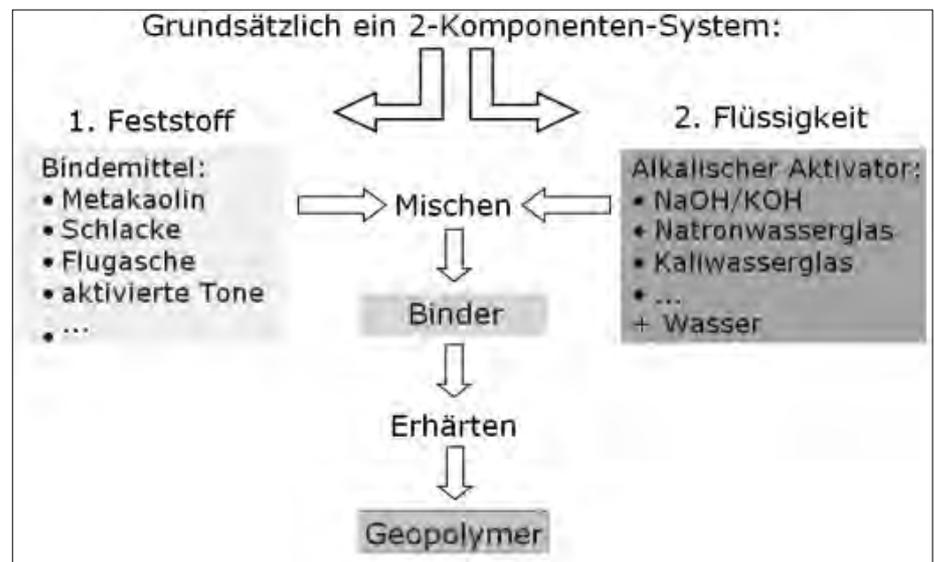


Bild 11: Uni Leipzig (<http://www.uni-weimar.de/projekte/geton/deutsch/geopolymere.htm>)

zur Verfügung standen, wenn man das Know-how gehabt hätte.

### Metakaolin

Metakaolin ist dehydroxiliertes (entwässertes) Ton. Die Umwandlung geschieht in zwei Stufen. Bei 100-200° C verliert der Ton sein absorbiertes Wasser. Zwischen 500 und 800° C kalzinierter Ton, d. h., er verliert chemisch gebundenes Wasser. Der Prozess ist endotherm, d. h., man muss eine ganze Menge Energie aufwenden, um Metakaolin aus Tonmineralien herzustellen. Trotzdem, 800° C sind mit Holzkohle erreichbar, also energetisch kein Problem für die Baumeister. Und Ton war selbst in frühesten Zeiten bekannt.

### Schlacke

Schlacke ist ein sehr allgemeiner Begriff. Man könnte darunter die Abfall-

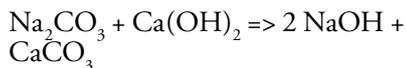
### Aktivierter Ton

Der Begriff ist zu oberflächlich, um zu sagen, was exakt damit gemeint ist und ob so etwas zur Verfügung gestanden hätte. Die Frage ist auch, ob aktivierter Ton, in welcher Form auch immer, ein wesentlicher Bestandteil gewesen sein könnte. Ich könnte mir gut vorstellen, dass statt dessen auch Kieselgur oder Diatomenerde verwendet wurde. Diese Erden sind natürliche amorphe Erden, die aus der Verwitterung fossiler Kieselalgen entstanden sind. Es sind leichte Erden mit großer Oberfläche, ideal, um als Zusatzstoff das Fließverhalten und die Festigkeit von Gießmassen zu verbessern. Diese Erden sind uralte, daher ohne weiteres im Altertum verfügbar.

### Alkalilauge

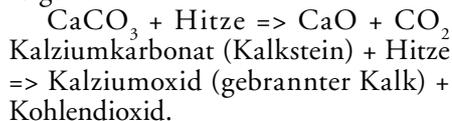
Hierunter verstehen wir wässrige

Lösungen von Natrium- oder Kaliumhydroxid. Diese Laugen sind sehr stark alkalisch und ätzend. Die Herstellung ist ein chemischer Prozess, der eines gewissen Know-hows bedarf. Hier die Formeln:

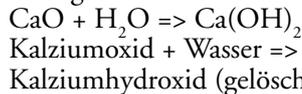


Natriumkarbonat (Soda) + Kalziumhydroxid (gelöschter Kalk)  $\Rightarrow$  Natriumhydroxid (Natronlauge) + Kalziumkarbonat (Kalk/Kreide).

In Wasser gelöste Soda könnte aus Salzseen zur Verfügung gestanden haben. Zur Umsetzung mit Kalziumhydroxid hätte gebrannter Kalk zur Verfügung gestanden haben. Die Reaktion ist wie folgt:



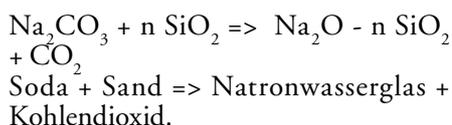
Kalkstein kann bei 900-1200° C zu Kalk gebrannt werden.



Die Verarbeitung von Kalkstein zu gebranntem Kalk gehört zu den ältesten Technologien der Menschen. Schon in Göbeli Tepe, Anatolien, konnte in den 11.000 Jahre alten Ruinen diese Technik nachgewiesen werden. Also, dann dürfte das im „modernerem“ Ägypten oder Südamerika doch wohl Stand der Technik gewesen sein.

## Wasserglas

Wasserglas erscheint mir für den Prozess der Geopolymere die wichtigste Chemikalie zu sein, denn damit bringen wir eine reaktive polymere Struktur ein, die dem Formkörper Festigkeit und eine gewisse Elastizität gibt. Die für die Herstellung von Wasserglas benötigten Chemikalien sind Kalziumkarbonat (Kalkstein) und Siliziumdioxid (Quarzsand). Beides stand in großer Menge zur Verfügung. Beides muss bei 1100-1200° C miteinander verschmolzen werden. Die Formel:



Der Buchstabe n steht für den durchschnittlichen Anteil an SiO<sub>2</sub> je Natriumoxid. Normalerweise liegt n bei 3-4. Für die Weiterverarbeitung wird die Schmelze mit heißem Wasser ausgelaut. Das Wasserglas liegt heutzutage in einer dickflüssigen Lösung vor. Für die Geopolymerbildung im Altertum muss das aber nicht so gewesen sein. Für die Reaktion im Brei mit den Füll-

stoffen wäre eine verdünnte Lösung auch ausreichend gewesen.

Wir haben gesehen, wenn Imhotep oder sein Pendant in Südamerika viele Jahrhunderte später, gewusst haben, wie man Geobeton herstellt, hätte die Rohstoffbeschaffung kein echtes Problem dargestellt. Alles war vorhanden. Energieträger und Reduktionsmittel Holzkohle aus der Verkokung von gewachsenem Holz, Alkalien aus den Rohstoffen der Salzseen und Mineralien und Tone aus der Erde, sowie Vulkanerden und Schlacken aus vulkanischen Gegenden.

Das Problem wäre bei einigen Rohstoffen gewesen, das Material so zu zerkleinern, dass es in wirksamer Korngröße zur Verfügung stand, oder Quellen zu finden, wo dieses oder vergleichbares Material bereits fein verteilt vorlag. Daher gehe ich davon aus, dass zwar die heutige Geopolymerindustrie mit obigen Werkstoffen arbeitet, weil das Brechen von Gestein für uns kein Problem ist, aber die Rohstoffe im Altertum andere waren. Die Chemie war ähnlich, aber die Rohstoffe verschieden, entsprechend den verfügbaren Ressourcen.

Sehen wir uns einmal ein Experiment des Geopolymer-Instituts an, in dem versucht wird, den Betonguss von Steinen nachzuvollziehen, die beim ägyptischen Pyramidenbau für die inneren Steine verwendet wurden. Siehe: <http://www.geopolymer.org/archaeology/pyramids/pyramids-3-the-formula-the-invention-of-stone>. Der Versuch zeigt die einzelnen Verfahrensschritte bis zum fertigen gegossenen Block, so wie es unter ägyptischen Verhältnissen zur Zeit des Pyramidenbaus möglich gewesen wäre.

### 1. Schritt:

In einem Steinbruch mit **weichem** Kalkstein wird das Gestein mit Wasser aufgeschlämmt. Dabei separieren grobe Festkörper und größere Muschelschalen. Es entsteht so ein Kalziumkarbonat/Tonschlamm. Für den Versuch wurde dieser Schlamm in ein großes Becken gefüllt.

### 2. Schritt:

Jetzt wird Natriumkarbonat hinzugegeben. Das Salz findet man in der Wüste, speziell im Wadi-el-Natron.

### 3. Schritt:

Es wird Kalk (CaO, gebrannter Kalk) zugesetzt. Der Kalk wird durch Brennen von Kalkstein oder Dolomit erzeugt. In dem Reaktionsgemisch wird durch diese Kalkzugabe Natronlauge entwickelt. Die ist das eigentliche starke Agens, Alumi-

nosilikate (z. B. Tone) in ein Betonbindemittel umzuwandeln. Es entsteht auf diese Weise die wässrige Aufschlämmung, die mit Zusatzstoffen vermischt einen Geobeton bilden kann.

### 4. Schritt:

In die Wanne werden jetzt Kalksteinschotter, fossile Muschelschalen aus Steinbrüchen und Nilschlamm eingearbeitet, bis sich ein Brei bildet, wie wir ihn vom noch flüssigen Beton oder Mörtel her kennen.

### 5. Schritt:

Der Betonbrei wird in hölzerne Formen gefüllt, die vorher mit einem Trennmittel aus ranzigem Öl bestrichen wurden. Die Masse wird in die Formen hineingestampft, um ein dichtes, festes Steingefüge zu erreichen. Anschließend werden die gefüllten Formen zum Trocknen und Härten aufgestellt. Nach einer Aushärtezeit ist der Stein fertig und kann entformt werden.

Dieser Versuch wurde erfolgreich durchgeführt und dokumentiert, und zeigt, dass mit einfachen Mitteln unter damaligen altägyptischen Bedingungen Pyramidensteine hätten gegossen werden können.

Dieser Versuch gilt für altägyptische Verhältnisse. Für das alte Südamerika wäre das Verfahren auch möglich gewesen, allerdings muss man von anderen Rohstoffen ausgehen, die dort leicht verfügbar waren. Wenn wir die Gussteile von Puma Punku ansehen, die als Andesit bezeichnet werden, kann sicherlich nicht Kalkstein als Zuschlagmaterial verwendet worden sein, sondern ein festeres, härteres Gestein. Es bleibt jedoch die Gesteinsbindung über Tone, Kalk und Alkalilauge, die ohne Probleme auch in Südamerika durchgeführt werden konnte. Es war also nur eine Frage des Know-hows.

Trauen wir unseren Vorfahren also das Wissen zu? Ich denke, das können wir getrost, denn die konnten immerhin Pyramiden und Zyklopenmauern bauen. Wir können das heute offenbar nicht mehr! Warum sollten die damaligen Baumeister dann nicht Geobeton eingesetzt haben? Warum Blöcke für den Pyramidenbau und Festungsmauern mühsam mit weichen Kupfermeißeln zurechthauen, wenn man sie auch formgießen kann? Warum in Südamerika Zyklopensteine transportieren und noch mühsamer mit unzureichenden technischen Mitteln behauen, wenn man vor Ort Geobeton verformen kann?

Geben Sie sich selbst die Antwort, oder besser: Fragen Sie einen Archäologen! ■