

# Bygningen af Keops pyramide

**En af menneskehedens store bedrifter – bygningen af Keops pyramide beroede på et stort kendskab til mineral kemi. De gamle egyptere udviklede faktisk en proces til fremstilling af beton**

Af Erik Larsen, Kemisk Institut, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole

*Bør et dannet menneske vide, hvordan Keops pyramide blev bygget?*

Det synes jeg bestemt, og så er det et problem, at så få ved det. I begyndelsen af 1980'erne læste jeg om pyramidebyggeriet, og derefter fortalte jeg hvert år i min forelæsning om silicater - den sande historie om den vanskelige proces. En dag ønskede en studerende de præcise henvisninger til de videnskabelige afhandlinger. Det kostede mig en del arbejde at genfinde litteraturen, selv om jeg fik stor hjælp af professor Torben C. Hansen, Laboratorium for Bygningsmaterialer, DTU. Da det for nylig skete endnu en gang, føler jeg mig godt opdateret om emnet.

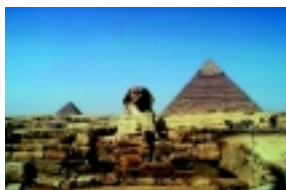
## Tilgængelige egyptiske redskaber

Keop var den farao, som byggede den største pyramide, der ligger nær Giza. Den stod færdig ca. år 2600 f.v.t., altså for knap 5.000 år siden eller ca. 1.000 år efter vore egne, store stendysser blev bygget. Det var før den egyptiske bronzevalder. Altså i den egyptiske stenalder på overgangen mod en kobberalder, og man kunne tilvirke kobbergenstande. Man fandt ofte kobbermalm forurenet med arsenminerale og lærte at udnytte kobber-arsenlegeringens gode egenskaber, så man kunne lave relativt hårde økser, der dog mest var til ornamentalt brug. Jern var formentlig allerede på dette tidlige tidspunkt kendt som »himmelfalden jern«, fordi det var så iøjnefaldende med en jernmeteorit landet på ørkensandet. Det har dog været uhyre sjældent og blev ikke brugt til redskaber, men alene som smykkemetal.

Først i år 1200-1000 f.v.t. begyndte en egentlig jernproduktion, og da blev redskaber naturligvis stærkt forbedrede. Det betyder, at pyramiden ikke kan være bygget ved at udsave eller tilhugge natursten for dernæst at stable de op til 60 tons store sten oven på hinanden. Det er for resten interessant, at nogle af de største sten synes at være anbragt nær pyramidens top.

## Beton der holder

Stenene er faktisk støbt på stedet vha. nogle simple forskalninger. De var udformet som to på hinanden vinkelrette træplader, der blev sat op mod tidligere støbte sten og støttet med pæle sat skråt mod forskalningen. Det er derfor stenene ligger så tæt på hinanden, at »det end ikke er



*Figur 1. Den største af pyramiderne ved Giza, Keops pyramide med Sphinxen i forgrunden. Stenblokkene er støbte, og Sphinxen er støbt som en, stor blok - dog i mange lag, der forvirrer uens. Corel Gallery.*

muligt at føre et knivsblad mellem dem«, som jeg lærte det i skolen.

Det er svært at forstå, at der blev lavet beton for ca. 5.000 år siden; beton som giver et produkt, der ligner en natursten, og som stadig består. Vi kender jo allesammen moderne betonbyggeriers tendenser til at smuldre bort.

Lad mig først nævne hvad der virkede umiddelbart overbevisende på mig. Jeg læste i Concrete International Dec. 1987, side 30, om, at Stanford Research Institute forsøgte at finde nye gange og kamre i pyramiden vha. radar. Det mislykkedes, fordi al radarstråling blev absorberet. Det skyldtes, at materialet selv efter 5.000 år i den solrige ørken er »vådt«, og den anvendte radarstråling benyttede en bølgelængde, der absorberes af vand. Naturklipperne nær Giza absorberer ikke radarstråler med samme intensitet. Jeg mener i øvrigt i min studietid at have hørt, at også mørtlen i Christiansborgs tykke kælder mure er våd endnu.

## Gammel teori

Påstanden, om at stenene kan være støbt på stedet, er ikke helt ny. Faktisk beskæftigede le Chatelier sig med statuer fra pyramider. Ved at studere tyndslib med mikroskop opdagede han, at der var flest store partikler nederst, og han så, at der var luftbobler i materialet. Det var nok til, at han erkendte, at der var tale om et kunstigt materiale og ikke udskåret natursten.

På et tidspunkt hvor man kun havde sten- og kobberredskaber, var det nyttigt at kunne støbe i stedet for at udhugge figurer. Den store Sphinx er således også støbt, og som den mange andre kunstgenstande. Deres værdi som kunstværker bliver ikke mindre af den grund, men deres tilblivelse i sten-/kobberalderen bliver forståelig.

## Selve betonudstøbningen

Nu kommer vi til betonudstøbningen. Den kan eftergøres i dag, og man kan støbe sten, så de er uskelnelige fra pyramidens. Det er vigtigt at vide, at det ørkensand, der danner jordsmon i Giza-området, består af calcit. Det er simpelthen pulveriseret kalksten. Den nærtliggende Nil har et rigt mudderlag med både sand (kvarts), ler (aluminater) og phosphatholdige salte. Man kan forresten stadig ane, at en kanal fra Nilen til Giza har eksisteret i pyramidebyggeperioden. Det var altså en smal sag at få vand til støbningen, og man kunne let fragte sedimenten fra Nilens hovedløb til støbestedet.

Man kan godt støbe en sten af de to komponenter, ørkensand og Nilens bundfald, men produktet er ikke stærkt. Der

mangler en komponent, fordi småsten skal kittes sammen af en uorganisk polymer.

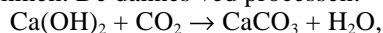
Den sidste komponent er fra Sinai. Fra de tidligste tider har Egypten udnyttet Sinais undergrund. Se f.eks.: <http://www.geographia.com/egypt/sinai/serabit.htm> og <http://www.reshafim.org.il/ad/egypt/timelines/topics/mining.htm>. Det var her, man først fandt sodaholdige salte (trona), tyrkisk kobberminerale og arsenminerale. De sidste blev med flintredskaber hakket fri fra sandstensformationerne som mindre knolde, der kunne knuses yderligere for at give pulver. Mineralernes tidligste brug har været til emalje, og udnyttelsen har sikkert ført til en række højuddannede kemikere. Noget af det vigtigste, de lærte, var at sænke smeltepunkter for diverse smelter. Her bliver man godt hjulpet ved at bruge naturens trona, soda osv., for disse minerale er ikke rene. De indeholder også natriumchlorid, gips, borax og andre gode sager.

Som vi alle ved, har blandinger lavere smeltepunkter end rene stoffer. Selv emaljer, der som rene stoffer ville kræve langt højere temperaturer, blev smeltet. Det giver en stor praktisk fordel, nemlig at flusmidlets smeltepunkt sænkes betragteligt, så man kan bruge et almindeligt bål til fremstillingen af blå, grønne, gule og røde emaljer ved opløsning af passende metalforbindelser i flusmidlet. Måske har man allerede på dette tidspunkt benyttet et blæserør og lavet smukfarvede perler af boraxglas. Blæserørsanalyseteknikken er efter min overbevisning opstået på eller nær ved Sinai, og de fundne emaljarbejder indikerer, at det er sket ca. 3.000 år f.v.t. Disse arbejder har også ført til de første synteser af kunstige zeolither (ordet zeolith er græsk for kogesten), der blev brugt til at kitte mineralkorn sammen i støbte kunstgenstande allerede århundreder før pyramidebyggeriet.

## Tidlig kalkning

Når man tænker på, at en del af kemien foregik ved, at man dannede bålplads med kalksten, er det ikke underligt, at man også lærte at lave brændt kalk, calciumoxid, ved processen. Man kunne derfor kalke og lave kalkmørtel. Det er værd at nævne, at Nationalmuseet i 1955 første gang konstaterede en tilsvarende udnyttelse af dansk kalk i den nu fjernede jættestue Lundevej på Møn. Dateringen for Lundevej's jættestue er jeg lidt usikker på, men den var næppe yngre end Keops pyramide. (Johannes Brøndsted i *Danmarks Historie*, Vol I, Politikens Forlag, 1963, side 144).

I vor egen kalkmørtel kitter nydannede krystaller af  $\text{CaCO}_3$ -sandskorn sammen. De dannes ved processen:



hvor carbondioxid fra atmosfæren reagerer med den opslemmede/opløste calciumhydroxid.

## Kemiens vugge

Jeg prøver med de foregående afsnit at vise, at kemiens vugge



Figur 2. Dette er guden Knum (Khenum), der altid blev afbildet med vædderhoved. Knum var gud for kemi og teknologi og præsteskrabet var smede, metallurjer, smykkemagere og stenmagere.

stod i Egypten omkring farao Keops' tid. Nogle mener endog, at ordet kemi har sin oprindelse i Khenum-viden. Khenum var en dominerende gud på Keops' tid, og det var gudens anvisninger, der førte til vellykkede balsameringer ved brug af f.eks. natron. Khenums præsteskrabet kunne også lære befolkningen, hvordan man udvandt kobber, og hvordan man lavede kunstige sten, der så ud som basalt eller diorit, der er en hård granitlignende sten. Disse kunstige sten blev f.eks. støbt som store vaser, og de har aftvunget kunstkere stor respekt for egypternes arbejdsomhed, idet man har ment, at en vasekunstner i sit liv højst kunne udhugge og file en enkelt vase så fint til, at forarbejdningssmærker ikke kunne ses. Det er stadig imponerende, at man kunne støbe mellem en indre kerne formentlig af voks og en ydre skal formentlig af gips. Det er ikke almindeligt erkendt og dermed heller ikke anerkendt af arkæologer, at det gik sådan for sig.

## Zeolith ZK-20

I støbeprocessen, der førte til de kalksten, som udgør Keops pyramide, er der tale om en helt anden reaktionstype, end den vi kender fra vores kalkmørtel. Her har silicater reageret med aluminater for at danne en limende film af natrium-kalium-calcium-silicoaluminat, endog gerne med fosfat/arsenat-grupper indbygget. Produktet svarer til en zeolith, der kan købes under navnet ZK-20. Med det ret reaktive mudder fra Nilens bund, med læsket kalk og med »sandet« bestående af calcit samt enten pulveriseret zeolith fra Sinai eller pulveriseret aske fra kobberfremstillingen (mest natriumarsenat) tager det nogle timer at lave en »fast beton« ved stedets »stuetemperatur«. Stenen ligner efter hærkning en kalksten, og selv ved kemiske undersøgelser skal man se nøje efter for at finde den lille mængde aluminat, silicat og fosfat samt tilhørende kationer, der ikke findes i naturlige kalksten, men som er vigtige for at danne »zeolith-limen«. Limen er et tredimensionalt, anionisk netværk. Det er stærkt og kan kaldes for en geopolymer. Sikker alle kender det, når jeg nævner de smukke badeværelsesplader med indbygget håndvask mm. De kan ligne granit, basalt, alabask, marmor m.fl. De er ikke udsvævet af natursten, selv om de til forveksling ligner, de er støbt.

Det er interessant, at manden, der har løst Keop-pyramidens hemmeligheder og skrevet en bog om det, også har skabt et stort firma for geopolymerproduktion. Bogen er af *Joseph Davidovits* and Margie Morris, *THE PYRAMIDS, An Enigma Solved*. Dorset Press, New York 1988.

Emnet kan også studeres på nettet, f.eks. på adressen: [www.geopolymer.org/](http://www.geopolymer.org/)

Det er muligt at finde andre og mere åndelige forklaringer på Keop-pyramidens bygning, end der her gengives fra Davidovits.

En Asterix-bog giver klare indikationer for, at en overnaturlig gudedrik også kunne være nyttig, og på nettet findes megen litteratur, som bygger på de overnaturlige evner, man tillægger gamle egyptere. Denne litteratur findes let ved hjælp af Google-søgemaskinen.

Davidovits forklaringer er mest tiltalende, fordi de viser, at det var menneskeligt muligt at bygge denne enorme konstruktion for relativt få stenalderarbejdere i løbet af relativt få år.

I deres bog (s. 240) citerer Davidovits og Morris Schopenhauer for at sige »Der er tre trin i åbenbaringen af enhver sandhed: Først bliver den latterliggjort, i andet trin er der modstand, og endelig på tredje trin er sandheden selvindlysende«.

Hvilket trin er du på nu?

Og alt dette er jo kemi samt sikkert og vist!

E-mail-adresse:  
Erik Larsen: [erik@kvl.dk](mailto:erik@kvl.dk)