



ROMAS BELIGGENHET, VULKANER OG BETONG

INGVAR BOTNEN

Landskapet rundt og i byene Roma og Napoli er sterkt preget av vulkanske utbrudd.¹ At byen Roma, som det romerske imperiet vokste ut fra, hadde en slik beliggenhet er en stor tilfeldighet. Men at det var slik fikk store følger for byggeskikken i byen, og kanskje også for det kommersielle samkvemmet i det romerske imperiet. Sentralt i dette sto byggematerialet betong. Og det er viktige sammenhenger mellom det som skjer i vulkaner og hvordan betongen blir produsert i våre dager.

Dagens betong begynner som en grå, grøtaktig masse som tømmes i forskalinger, og som størkner til en steinaktig konsistens i løpet av noen få dager (men det kan ta noen måneder før den når sin endelige fasthet). Grøten er en blanding av *sement*, som gjerne kommer i femti kilos sekker, et *tilslag* (engelsk: *aggregate*) av knust stein og grus som øker volumet til betongen uten å koste så mye, og *vann*. Når sementen kommer i kontakt med vann, blir den til et lim som klistrer bestanddelene i tilslaget sammen, og som altså, etter at det hele har størknet, holder fasongen i lang tid.

Våre dagers sement kalles gjerne portlandsement. Den ble oppfunnet i 1824, etter at betong som byggemateriale hadde gått mer eller mindre ut av bruk etter slutten av den vestromerske keisertiden.²

Oppskriften på portlandsement er slik at det blir bestemte mengder av forskjellige stoffer i sluttresultatet i prosessen. Den lages ved at kalkstein

1. Soldati (2017), kap. 25, 26 og 33.

2. Elsen s. 308.

og andre materialer, som for eksempel leire, leirskifer, sandstein, feltspat og/eller kvarts, varmes opp i roterende ovner til 14-1500 °C. Med de høye temperaturene følger varmestråling og voldsomme molekylbevegelser. Dette fører til at litt kompliserte molekyler slås i stykker og blir til enklere stoffer. Noen av disse stoffene er faste ved romtemperatur, noen av de enkle molekylene er rett og slett vann, mens andre er gasser av forskjellig slag, som for eksempel CO₂.³ Den massen som er igjen i ovnen når vann og gasser er drevet ut er smeltet og deigaktig. Når den størkner, blir den til harde klumper. Disse må knuses og finmales for å bli til den sementen vi kjenner.

Betongen er det alminneligste byggematerialet i dag, men betongproduksjonen er også en av de mest miljøødeleggende aktivitetene vi har: Det blir sluppet ut ett tonn CO₂ for hvert tonn portlandsement som produseres. Utslippene fra dette utgjør 8 % av det samlede CO₂-utslippet i verden. I tillegg kommer energien som trengs for å varme opp ovnene etc.⁴

Vulkansk

Vulkaner og de prosessene som leder fram til vulkanutbrudd har mye til felles med prosessen som leder fram til den ferdige portlandsementen. Temperaturene der de ulike stoffene og gassene vulkanene spyr ut kommer fra er omtrent som den inne i de roterende ovnene, og ingrediensene i disse stoffene og gassene kan ha samme opphav: De kan komme fra kalkstein, leire og så videre.

Her er en forklaring som består av tre elementer:

Temperaturen stiger med 25 til 30 grader Celsius for hver kilometers dybde under jordoverflaten. Derfor er temperaturen omtrent lik den i sementovnene, 1500 °C, på ca. 60 kilometers dyp.

Masse fra jordoverflaten kan skyves ned til ca. 60 kilometers dyp gjennom en prosess som kalles *subduksjon* (se nedenfor).

3. For eksempel: Kalkmolekylet, som kalksteinen består av, er et molekyl med kjemisk formel CaCO₃ – det vil si, det består av ett kalsiumatom (betegnelse Ca), ett karbonatom (C) og tre oksygenatomer (O₃). Ved høy temperatur slås det i stykker: Det blir til molekylet CaO (som kalles brent kalk) pluss molekylet CO₂.

4. Seymour (2023) s. 1.

De letteste stoffene på planeten vår er gjerne nærmest jordoverflaten. Dersom slike lette elementer subduseres til dybder der temperaturen er høy nok, vil de smelte. Da kan de flyte opp gjennom de tyngre stoffene i omgivelsene, og til slutt smelte seg fram til de er ganske nær jordoverflaten. Det er når de bryter fram gjennom jordoverflaten at vi får det vi kjenner som vulkaner.

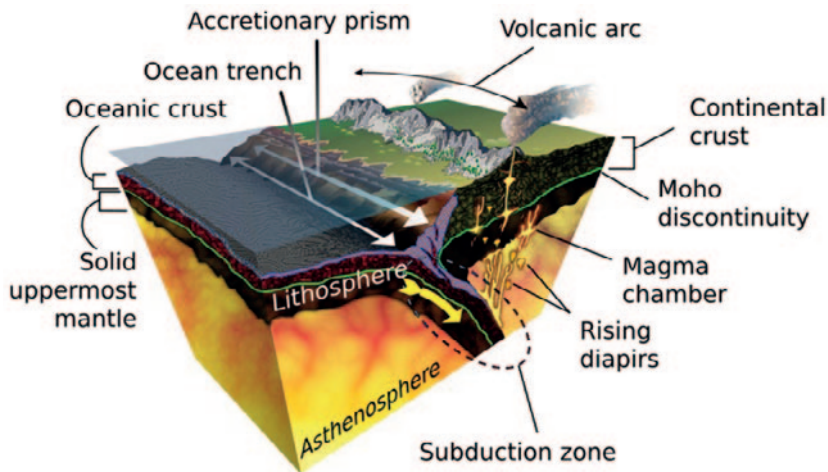
Og, som vi nå vet fra prosessene i sementovnene som er beskrevet ovenfor: det kan være både gasser og smeltede stoffer i vulkanene.

For oss mennesker fortøner landskapet rundt oss seg som uforanderlig, men hvis vi kunne se det over en periode på mange millioner år, er det ikke slik: Vi ville blant annet se fjellkjeder bygge seg opp, og hav åpne og lukke seg, som en følge av *platetektonikk*. Jordoverflaten består nemlig av deler, kalt plater, som beveger seg i forhold til hverandre med en fart opptil omtrent den farten neglene vokser med. Disse bevegelsene skaper spenninger i jordoverflaten, og når disse får bygget seg opp over lang nok tid, utløses de gjerne plutselig i form av det vi kjenner som jordskjelv. Afrika er en slik plate, Europa vest for Ural en annen, og Pyreneene, Alpene og Apenninene er eksempler på fjellkjeder som har bygget seg opp som følger av platetektonikken i og rundt Middelhavet.

Når fjellkjeder bygger seg opp, er det også noe som skyves ned under dem, og det er denne nedskyvningsprosessen som går under navnet subduksjon. Prosessen vises på figur 1, som likner på den italienske vestkysten og Apenninene øst for denne.⁵ Legg spesielt merke til området som kalles «Accretionary prism», der stoffer samles og kan subduseres. Her finnes ulike materialer fra havbunnen og slikt som kommer fra den kontinentale skorpen innenfor: slam fra elvene og stein og grus, som kan inneholde mye av det samme som sementovnene: leire, leirskifer, sandstein, feltspat og kvarts.⁶ De platetektoniske bevegelsene fører dette ned i dypet og til økende temperaturer, der det kan smelte og komme opp igjen via vulkaner.

5. USGS: *Subduction* gir lenker til mange relevante nettsider. Se også Wikipedia: *Subduction*.

6. Marshak (2012), s. 85.



Figur 1: Havbunnens litosfære, det vil si et lag av lettere fast stein, subduseres under landmassens ditto. Under litosfærene ligger astenosfæren, som er et lag av noe tyngre, smeltet stein. Når materiale fra de lettere massene nær land følger med subduksjonen nedover, kan det smelte og stige oppover til det samles i magmakammere i den kaldere steinen lenger oppe. Materialet kan bryte ut gjennom overflaten i vulkaner, og kalles da gjerne lava. Lavaen kan ha en svært variert sammensetning. Fra wikipedia.

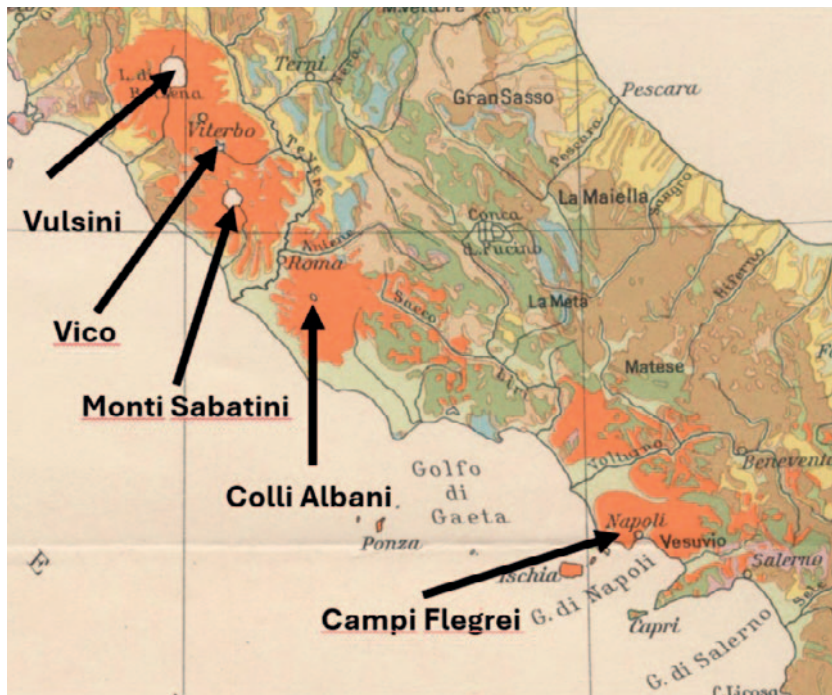
Vesuv er det italienske vulkanutbruddet som er best kjent i vår tid, men for utviklingen i bruken av betong og byggekultur er det ikke viktig: Utbruddet var i år 79, mens de utbruddene som resulterte i de materialene romerne kunne prøve ut skjedde lenge før det. I de etruskiske områdene nordvest for Roma - områdene ved Vulsini, Vico og Monti Sabatini - var det vulkansk virksomhet for 800 000 til 100 000 år siden. Sørøst for Roma - i Latium ved Colli Albani - var det vulkanutbrudd fra to millioner og fram til 80 000 år siden.⁷ De vulkanene som skapte materialene ved Napoli ligger i området Campi Flegrei vest for byen, og de viktigste utbruddene skjedde for 60 000 til 4 000 år siden, men det siste store utbruddet var så sent som i 1538,⁸ og det er ennå litt vulkansk aktivitet i området.⁹

7. Soldati (2017) s. 295 og s. 303. Marra (2020) s. 1. Jackson (2007) s. 25.

8. Soldati (2017) s. 392-393.

9. Gandolfi (2025).

Et viktig trekk ved vulkanismen i det sentrale Italia er at lavaen skapte tunge skyer av gass, aske og størknende materiale, såkalte *pyroklastiske flommer*, som spredte seg utover landskapene rundt utbruddene.¹⁰



Figur 2: Geologisk kart over det sentrale Italia, med navnene på viktige vulkaniske områder. De oransje områdene er dominert av materialer av vulkansk opprinnelse som har spredt seg utover som pyroklastiske flommer. Fra wikipedia.

Når det smeltede materialet var på vei opp av vulkanen, inneholdt det mye gass, og derfor ble det mange gassbobler i det når det spredte seg utover og størknet. Disse boblene er tydelige i de vulkanske materialene i disse områdene, og kalles vesikler.

10. Marshak (2012) s. 262, Soldati (2017) kap. 25. Se også gjerne søkeresultatene for *pyroclastic flow* på YouTube.

Det som kommer ut av en vulkan er ikke ensartet, slik som det som kommer ut av sementovnene. Det kan variere mye i sammensetning og konsistens, det er alt fra vanndamp og gasser via små klumper av pimpstein og glass til tung lava som størkner og blir til basalt. Denne variasjonen gir mye å prøve ut for den/de som har tid, ressurser og vilje!¹¹



Figur 3: Denne centimeterstore pimpsteinen som en gang ble blåst ut av Vesuv er et eksempel på hva slags materialer de vulkanske prosessene kan gi. Den inneholder mange vesikler. Disse gir steinen en større overflate og gjør den lettere enn en vanlig småstein. Tykke lag av slik pimpsten og vulkansk aske kan være tilgjengelig som sand i grustak. Lagene blir til steintypen tuff når de får ligge uforstyrret i noen tusen år. Foto: Ingvar Botnen.

Kalk og pozzolan

Innledningsvis nevnte jeg at det går kalkstein og andre materialer, som for eksempel leire, leirskifer, sandstein, feltspat og/eller kvarts inn i sementovnene, og at dette varmes opp til omkring 14-1500 °C. Men det går an å lage en enkel sement ved å brenne kalkstein, det vil si å varme den opp til 900-1100 °C. Da blir den til et hvitt pulver som er kjent som *brent*, eller *ulesket*, kalk.¹² Dersom kalken tilsettes vann får vi *lesket* kalk. Den kan brukes som bindemiddel, eller lim, i *mørtel* og *puss*. Begge har gjerne et tilslag av sand.

Mørtel og puss med lesket kalk som lim og inert tilslag (det vil si, tilsetninger av stoffer som ikke reagerer kjemisk med stoffer i miljøet rundt det) bruker lang tid på å størkne, fordi kalken må ha CO₂ fra atmosfæren for å bli stiv, og det tar tid for CO₂-molekylene å komme fra atmosfæren og inn til de innerste lagene i mørtel og puss.

11. Marshak (2012) kap. 6: *Up from the Inferno: Magma and Igneous Rocks*.

12. Dix (1982) s. 331.

Romertidens by Puteoli, som i dag heter Pozzuoli og ligger vest for Napoli og Vesuv, befant seg i vulkanområdet Campi Flegrei. Den har, på grunn av de vulkanske stoffene i området, gitt opphav til et viktig faguttrykk i dagens betongteknologi, nemlig *pozzolan*. For det er slik at noen vulkanske materialer inneholder stoffer som ikke er inerte, men *pozzolaniske*, det vil si at de reagerer kjemisk med den leskede kalken, slik at den stivner på mye kortere tid, og uten at CO₂ fra atmosfæren trengs. Og når den ikke trenger luft rundt seg for å stivne, kan den også stivne under vann – den er det som på fagspråket kalles *hydraulisk*.¹³

I sitt verk *De architectura* skrev den romerske arkitekten og ingeniøren Vitruvius dette om valg av materialer til betong:¹⁴

For strukturer av betong må vi først undersøke om sanden passer til å bli blandet inn i materialet, og om det er blandet inn jord i den. Det fins følgende slag sand fra sandtak: svart, hvit, rød og kullholdig. Av disse er de best som lager en gnisselyd når de gnis i hendene. Når det er jord i sanden, er den ikke så ru. Man kan også tulle den inn i et hvitt klede og banke på den. Hvis det ikke sitter jord igjen når sanden deretter er ristet ut, er den velegnet.

Men hvis det ikke finnes sandtak som sand kan hentes fra, kan den tas fra elver, siktes ut av grus, eller tas fra strender ved havet. Men slik sand, brukt til bygging, har disse svakhetene: Den har vondt for å stivne, den tåler ikke belastning over lengre tid, og den er uegnet i hvelv.

Man vet nå, etter undersøkelser med moderne metoder, at de typene sand som ble brukt i bygg før eller mens Vitruvius levde var pyroklastisk materiale fra utbrudd av vulkanen i Colli Albani i tiden fra 470 000 til 355 000 år siden. Navn som brukes i vår tid på disse sandtypene er *pozzolane rosse*, *pozzolane nere* og *pozzolanelle*.¹⁵

Litt lenger ute i *De architectura* skriver Vitruvius at

13. Lancaster (2009) s. 3.

14. Vitruvius, 2.4., oversatt av artikkelforfatteren.

15. Jackson (2007) s. 25.

Det fins også et pulver med naturlige egenskaper som gir bemerkelsesverdige resultater. Det har sitt opphav i kommunene i områdene rundt Baiae, som ligger nær Vesuv-fjellet. Når pulveret blandes med kalk og pukk gir det ikke bare bygg som er sterkere enn andre, men det størkner også under vann når det brukes til å lage moloer med. Dette ser ut til å komme av at under disse fjellene finnes både glovarm grunn og tallrike kilder, og disse ville ikke vært der hvis det ikke langt nede brant svært sterke flammer av svovel, alun eller tjære. Som en følge av dette trenger ild og gass opp gjennom sprekker og gjør jorden lett, og tuffen som kommer fram der er uten fuktighet. Derfor, når tre stoffer blandes sammen som har til felles at de er dannet av ekstrem ild, binder de seg sammen og herdes så snart det tilsettes vann, og hverken bølger eller vann kan løse dem fra hverandre.



Figur 4. Vulkansk tuff fra en etruskisk grav i Lazio. Materialet er porøst og fullt av vesikler. Slikt materiale, tilhugget som her eller i knyttnevestore biter som pukk, og som kan ha pozzolaniske egenskaper, var tilgjengelig som murstein og tilslag i betong for romerske ingeniører og arkitekter. Fra wikipedia.

Her viser Vitruvius en forståelse av hvordan pozzolan blir til som er nokså samsvarende med den moderne kunnskapen om vulkaner som er sammenfattet i denne artikkelen.

Betong

Arkitekter, ingeniører og håndverkere i Roma hadde altså, på grunn av byens svært heldige beliggenhet, tilgjengelig stein, pukk og sand med pozzolaniske egenskaper. De hadde også brent kalk, ulike inerte steintyper som kan hogges til ønskede fasonger og størrelser, murstein og tegl som var tilvirket lokalt, samt amforaer og liknende som også kunne brukes som tilslag.

De pozzolaniske materialene som de brukte var til å begynne med hentet fra inne i byen Roma selv og fra områdene like rundt den. Dette gjelder for eksempel Porticus Aemilia, som ble bygd i 193 fvt, og andre bygg.¹⁶ Senere, når de hadde tilgang til større landområder, brukte de grus og stein fra forskjellige steder i Latium.¹⁷

Romernes vanlige metode for å lage vegger var ikke å tømme flytende betong i forskalinger slik man gjør i dag. Isteden lagde en ganske tørr mørtel med brent kalk, pozzolanisk sand og vann. Med denne og murstein eller tilhagd stein lagde de to murvegger et stykke fra hverandre. I mellomrommet mellom disse pakket de tilslag – pukk av vanlig stein, vulkansk pimpstein med pozzolaniske egenskaper, knuste amforaer og tegl osv. – sammen med mørtelen,¹⁸ slik at de fikk en masse som kan sammenlignes med moderne betong. Et veggmaleri viser arbeidsmåten i mer detalj: På stillaser på hver side av murveggen sto to murere som fortløpende lagde de ytre mursteinsmurene, for så å fylle mellomrommet mellom dem med nokså tørr mørtel og tilslag av keramikk og annet.¹⁹

De lagde også buer og hvelv med disse materialene, pluss forstøtninger av tre som de kunne legge tilhagd vanlig stein og murstein inn mot, og de begynte å bruke forskalinger inn mot betongen i stedet for teknikken med

16. Marra (2016) s. 193.

17. Jackson og Marra (2006) s. 6-7.

18. Lancaster (2009 b) s. 263.

19. DeLaine (2021) s. 195, fig. 5.



Figur 5. Dette byggverket finner vi i Villa dei Quintili, som ligger i nærheten av Roma, og som ble besøkt av NKF's ekskursjon i 2021. Muren til høyre viser en vanlig romersk byggeteknikk: Mellom to vegger av murstein er det fylt opp med mørtel og et mer eller mindre uryddig tilslag av teglstein. Foto: Ingvar Botnen.

vegger av murstein for å holde den på plass.²⁰ Med slike teknikker ble de mest kjente antikke byggene i Roma, og andre steder som Ostia og Baiae, bygd. Eksempler i Roma er Colosseum, Trajans marked og Pantheon.²¹

Innskriften under gavlen på Pantheon forteller at byggherren var Augustus' svigersønn Marcus Agrippa, men det vi ser i dag er bygget av keiser Hadrian etter at det eldre templet ble ødelagt av brann i 110.²² Pantheon er kanskje det antikke bygget som har bevart mest av sitt opprinnelige utseende opp gjennom tidene. En viktig grunn til at Pantheon er så godt bevart er at bygget ble omgjort til kirke på 600-tallet, noe som førte til at det ble vedlikeholdt. Selv om det gikk fra være viet til alle de romerske gudene til å bli viet til Jomfru Maria og martyrene (Sancta Maria ad martyres), ble det gjort få endringer innvendig.²³

Pantheon viser hvor langt den romerske betongbruken hadde utviklet seg på flere måter. Kuppelen er verdens største spenn i uarmert betong, altså betong som ikke er forsterket med armeringsjern: Diameteren er 43,3 meter, som er litt mer enn både Peterskirkens kuppel og Brunelleschis kuppel på domkirken i Firenze.²⁴ Det er brukt gradvis lettere tilslag fra fundamentet for rotunden og opp til toppen av kuppelen.²⁵ På utsiden av bygget og i deler av kuppelen er det brukt murstein, mens innerveggen og kuppelen på innsiden har mange nisjer og detaljer som antakelig bare kan lages med forskalinger.²⁶

Men Pantheon viser også at de romerske ingeniørenes forståelse av sine byggemetoder var begrenset. I 1934 falt noen fragmenter ned på golvet fra kuppelen. Undersøkelser etter dette avdekket mange sprekker i betongen.²⁷ Mye tyder på at disse sprekkene har vært der siden kuppelen ble bygget.

20. Lancaster (2009 a), kap. 2.

21. Se gjerne YouTube på søkeordene *Colosseum*, *Trajan's market* og *Pantheon* for å finne videoer fra rundturer i disse byggene. Omtaler finnes også i artiklene om *Romas arkitekturhistorie* i SNL og på navnene til de forskjellige byggene på Wikipedia.

22. Hetland (2015) s. 97-98.

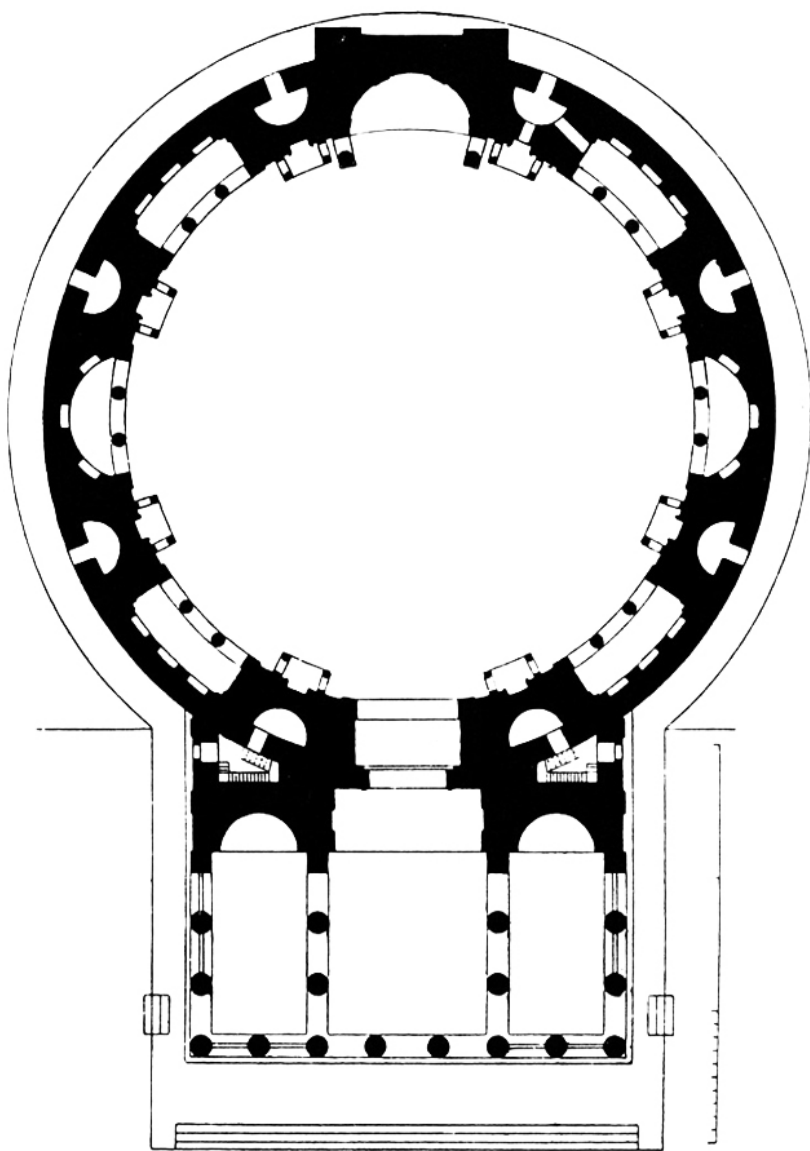
23. Thunø (2015) s. 233 og 241.

24. Masia (2018) s. 588.

25. Marder (2015) s. 20, Masi (2018) s. 590, Wilson (2015) s. 197.

26. Lancaster (2009 a) kap. 1, s. 20, 44 m. fl.

27. Masia (2018) s. 588 ff. Denne artikkelen bygger sine konklusjoner på numeriske simuleringer med en svært detaljert tredimensjonal modell av kuppelen.



12. ROM: PANTHEON.

Figur 6. Grunnriss av Pantheon. Nederst den firkantede tempelfronten med søyler, øverst den sirkelformede rotunden. Fra wikipedia.

En grunn til at de har oppstått er at når betong størkner, trekker den seg litt sammen. Så hvis kuppelen bygges med ny betong oppå rotundevegger som alt har størknet og trukket seg sammen, oppstår det strekk der kuppelen og rotunden er føyd sammen, og sprekker kan oppstå. Andre grunner kan være temperaturendringer mens betongen størknet og etterpå, setninger i undergrunnen, og problemer som hadde med konstruksjonen å gjøre.²⁸

Et selvreparerende materiale

Men, uansett: Romersk betong, slik den ble brukt i bygg i og rundt Roma, har tålt tidens tann bedre enn moderne betongkonstruksjoner – der er nok av eksempler på at bygg kollapser, og forventet levetid for det som er laget av moderne portlandsement og forsterket med armeringsjern er mindre enn



Fig. 7. Tross noen svakheter i konstruksjonen, har Pantheon stått i bortimot to tusen år. Byggene rundt Pantheon-kuppelen er antakelig ikke like bestandige. Foto: Wikipedia.

28. Jones s. 73-74.

hundre år.²⁹ Dette mens gamle bygg som Pantheon, Colosseum og Trajans marked ennå er mer eller mindre intakte.

Holdbarheten til klassiske romerske bygg skyldes de pyroklastiske tilslagene i mørtel og betong, og dannelsen av det plateaktige mineralet stråtlingsitt som en følge av dette har fått mye av æren for det. Stråtlingsitten binder sammen elementene i mørtelen, og hindrer sprekker i å forplante seg.³⁰ Men i 2023 oppdaget man enda en egenskap.

Lenge hadde man sett små hvite klumper, eller klaster, av brent kalk i mørtelen i romersk betong, og tenkt at dette var noe som kom av at kalkovnene og prosessene knyttet til dem ikke var perfekte. Men nå fant man at disse klumpene, som i seg selv er svakere og mer porøse enn resten av betongen, har en viktig oppgave. Det at de er svake betyr at når betong sprekker, går sprekken gjerne gjennom dem. Og når så vann trenger inn gjennom sprekken, oppløses den brente kalken i det og flyter videre ut i betongen, der den reagerer med omgivelsene og blir til et fast stoff igjen – som tetter og dermed reparerer sprekken. Dette kan kanskje bli til en teknikk som kan anvendes i moderne betong, og forlenge levetiden til våre dagers betongbygg.³¹

Betong under vann

Vitruvius nevner i sitatet tidligere i denne artikkelen *pulvis puteolanus*, det vil si støvet, eller sanden, fra områdene rundt Baiae ved Napoli-bukten, brukt som tilslag som ikke bare gir gode resultater i bygg på land, men som også er velegnet for bruk under vann, det vil si i strukturer som moloer og havneanlegg ved havet. Slike strukturer blir utsatt for store påkjenninger fra naturens side i form av bølger, men det viser seg at den romerske betongen i dem også har tålt påkjenningene de har blitt utsatt for gjennom de to tusen årene som har gått siden de ble bygget, og det kanskje vel så godt

29. Collepari s. 3. Noen nylige eksempler på konstruksjoner som kolliderer kan du finne ved å søke på nett etter disse artikkeloverskriftene: *Novi Sad railway station canopy collapse*, *Genoa bridge collapse: Designer warned of corrosion risk nearly 40 years ago*, *Engineer Warned of 'Major Structural Damage' at Florida Condo Complex*.

30. Jackson (2007) s. 24.

31. Seymour (2023), se referat i Bjørnstad (2023).

som i byggene på land.³²

Grunnen til at den maritime betongen med råstoffer fra Baiae har klart seg så godt er at når det er saltvann i sementen, utvikler det seg stoffer, der natrium fra sjøvannet inngår, som er litt elastiske, og som binder sammen de pozzolaniske komponentene i betongen. De kjemiske reaksjonene er vanskelige å kartlegge, men stoffet tobermoritt ser ut til å være en nøkkel.³³

Byen Roma hadde ikke gode havnemuligheter – Tiberen var farbar for små båter, men førte også med seg skiftende sandbanker, som gjorde havnebyen Ostia ved utløpet mindre egnet for omlasting fra store skip. Derfor fikk Scipio Africanus i 194 fvt. bygget en ny havn for omlasting av varer til Roma i Puteoli, altså i det vulkanske området Campi Flegrei, der også Baiae ligger. Varer fra rundt om i imperiet ble fraktet til Puteoli på større skip, og lastet om til mindre båter for frakt videre opp langs kysten til Tiberen og Roma – veitransport måtte eventuelt gjøres med kjerrer trukket av okser, og det ville være mye dyrere enn båter. Puteoli fungerte som omlastingshavn fram til en ny havn, Portus, ble bygget noen kilometer nord for Tiberens utløp i tidlig keisertid.³⁴

Ballast

Skipene hadde seil, og var avhengige av last i lasterommet for å være stabile i sidevind. Derfor trengtes ballast, det vil si materiale som hadde nødvendig vekt, men som ikke var handelsvarer, for mange av skipene som dro ut fra Puteoli etter å ha levert varene sine. Puteoli hadde et laug av *saburrarii*, folk som sørget for sand som ballast til skipene, og en del av ballastsanden var tydeligvis den typen sand som Vitruvius nevner, for betongen som er brukt i Portus og andre havner i Italia og rundt Middelhavet har denne *pulvis* som tilslag.³⁵

Denne trafikken kan ha hatt et betydelig omfang. Til å bygge havnen i Caesarea i det som nå er Israel ble det brukt 52 000 tonn, eller 24 000 m³,

32. Oleson (2004) 199-203, og Jackson: *Unlocking the secrets of Al-tobermorite* ... s. 1669.

33. Jackson (2013) 1681.

34. Brandt (2006) 26 og 38.

35. Oleson (2004) 202, Jackson (2017) 1436. Oleson (2011) 112.

pulvis puteolanus.³⁶ Hvis vi antar at de sjøgående skipene i Middelhavet kunne ta en nyttelast på 150 tonn, så trengtes det omkring 350 båtlaster av *pulvis* for å få bygget denne havna³⁷. Men den gjorde det lettere å eksportere produkter fra områdene rundt, siden veitransport av varer var mye dyrere enn sjøveis transport. Dette gjaldt selvfølgelig for alle de stedene der det ble bygget havner.³⁸

Å dømme etter dateringer av skipsvrak som er funnet, var det en topp i skipstrafikken på Middelhavet i de to hundreårene rundt vår tidsregnings begynnelse.³⁹ Det er vanskelig å bedømme om dette skyldes havnebyggingen, men det er i alle fall fristende å tenke at de romerske ingeniørenes oppdagelse av egenskapene til det vulkanske materialet rundt Puteoli kan ha bidratt til å øke handelen over Middelhavet. Gjennom dette har det eventuelt også vært med på å gi Romerriket mer av felles kultur og samfunnsnormer, og gjennom det faktisk også fredeligere samfunnsforhold enn det ville hatt uten handelen.

Å se tilbake på framstillingen og sammensetningen av den romerske mørtelen og betongen, som har klart seg så godt i 2000 år, kan være med på å inspirere til utvikling av moderne miljøvennlige materialer, materialer som kan erstatte den energiintensive Portland-sementen som gir så store utslipp av CO₂. Det foregår mye forskning og utvikling av miljøvennlig betong i våre dager,⁴⁰ og inspirasjonen fra fortiden er tilstede i dette, kanskje særlig innen marin betong.⁴¹ Et romersk knep som kan komme til anvendelse i vår tids konstruksjoner har allerede vært nevnt, nemlig det med å la det være klumper av brent kalk i betongen, slik at sprekker kan reparere seg selv.

Byen Roma, som utviklet seg til å bli hovedstad i antikkens viktigste stormakt, lå i et vulkansk område som var rikt på råstoffer til mørtel og be-

36. Oleson (2011) 110.

37. Brandt (2006) 34.

38. Brandt (2006) 37.

39. Wilson (2011) 33.

40. Her er det mye å finne. En lenke til noe på World Economic Forum, som organiserer Davos-møtene: <https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/>. Se også «Islandsk pozzolan til salgs i Sverige, Norge med omfattende produkttesting» på <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/VPI>.

41. Cf. Elsen.

tong som kunne størkne fort, til og med under vann. Dette ga romerske arkitekter, ingeniører, byggmestre og byggherrer mulighet til å eksperimentere med former og byggemetoder som ingen tidligere hadde hatt. Disse mulighetene brukte de til å lage nye, dristige og svært varige former for byggverk i byen selv, og ditto havner. Særlig havnene kan ha vært med på å fremme handel, levestandard og kulturelt fellesskap rundt om i riket, sammen med akvedukter og veier.

I hvilken grad de romerske betongteknikkene har levd videre som bestanddeler i ingeniør- og arkitektmessig kunnskap som har gått i arv er mer usikkert. Mørtel og betong av brent kalk med pozzolanisk tilslag gikk nokså fullstendig ut av bruk da det vestromerske riket gikk i oppløsning. På sytten- og attenhundretallet var det noe bruk av annen kalkbasert mørtel og noe som ble kalt «romersk sement», men dette ble det slutt på da Portlandsementen kom i vanlig bruk mot slutten av attenhundretallet.⁴²

Vitruvius' skrifter var viktige for arkitekturen, men lite tyder på at hans beskrivelse av bruken av *harenae fossicae* og liknende har blitt plukket opp. Dog: det latinske ordet *caementum* (utilhogd stein, steinfliser, pukk) har gått via gammelfransk *ciment* (sement, mørtel, tjære) til våre dagers *sement*, så litt sammenheng kan det være.⁴³

Litteratur

- Bjørnstad, Lasse. «Romersk betong kan ha selvreparerende evner». *Forskning* 09.01.2023.
- Brandt, Johann Rasmus. «‘The Warehouse of the World’. A Comment on Rome’s Supply Chain during the Empire», *Orizzonti - Rassegna di archeologia* 6 (2006).
- Collepardi, M. «Ordinary and Long-Term Durability of Reinforced Concrete Structures», *Canmet/ACI Conference on Durability of Concrete*, Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute (2000).

42. Elsen s. 302.

43. Etymonline: *Cement*, Roggen s. 130.

- DeLaine, Janet, «Production, transport and on-site organisation of Roman mortars and plasters», *Archaeological and Anthropological Sciences* 13 (2021) 195.
- Dix, Brian, «The manufacture of lime and its uses in the western roman provinces». *Oxford Journal of Archaeology* 1 (1982).
- Elsen, Jan; Jackson, Marie D.; Ruiz-Agudo, Encarnación. «Historic Concrete Science: Opus Caementicium to ‘Natural Cements’», *Elements* 18 (2022), 301–307.
- Etymonline, på nettadressen <https://www.etymonline.com> i august 2025.
- Gandolfi, A. «‘The ground keeps breaking and deforming’: life in Italy’s volcanic Phlegraean Fields», *The Guardian* 21/3 2025. Lenke: <https://www.theguardian.com/artanddesign/2025/mar/21/the-ground-keeps-breaking-and-deforming-life-in-italys-volcanic-phlegraean-fields>
- Graßhoff, Gerd, Michael Heinzelmänn og Marcus Wäfler (red.) *The Pantheon in Rome. Contributions. Bern, november 9-12, 2006*. Bern 2009.
- Hamada, Hussein et al. «Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review», *Case Studies in Construction Materials* 19 (2023).
- Hetland, Lise M. «New Perspectives on the Dating of the Pantheon», kap. 3 i Marder og Jones (2015).
- Jackson, M. og Marra, Fabrizio, «Roman Stone Masonry: Volcanic Foundations of the Ancient City». *American journal of archaeology* 110 (2006) 403-436.
- Jackson, M. et al. «Geological observations of excavated sand (*harenae fossilicae*) used as fine aggregate in Roman pozzolanic mortars», *Journal of Roman Archaeology* 20 (2007) 25–53.
- Jackson, M. et al. «Unlocking the secrets of Al-tobermorite in Roman seawater concrete», *American Mineralogist* 98 (2013).
- Jackson, M. et al. «Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete», *American Mineralogist* 102 (2017).
- Jackson, M. et al. «Extreme durability in ancient Roman concretes», *American Ceramic Society Bulletin* 97 (2018).
- Jones, Mark Wilson, «The Pantheon and the Phasing of its Construction», i Graßhoff, Heinzelmänn og Wäfler (2009).

- Jones, Mark Wilson, «Building on Adversity: The Pantheon and Problems with its Construction», Kap. 7 i Marder og Jones (2015).
- Lancaster, Lynne, *Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome: Innovations in Context*. Cambridge University Press 2009.
- Lancaster, Lynne, «Roman Engineering and Construction». Kap. 10 i *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World*, Oxford University Press 2009.
- Marder, Tod A. og Jones, Mark Wilson (red.), *The Pantheon from Antiquity to the Present*, Cambridge University Press 2015.
- Marra, F. et al. «Monti Sabatini and Colli Albani: the dormant twin volcanoes at the gates of Rome», *Scientific reports* 10 (2020).
- Marra, F. et al. «Petrochemical Identification and Insights on Chronological Employment of the Volcanic Aggregates Used in Ancient Roman Mortars», *Archaeometry* 58 (2016) 177-200.
- Marshak, Stephen. *EARTH. Portrait of a planet*. New York: W. W. Norton & Company 2012. (Dette er en lesverdig grunnbok i geologi.)
- Masia, F. et al. «On the origin of the cracks in the dome of the Pantheon in Rome», *Engineering Failure Analysis* 92 (2018).
- Oleson, John Peter et al. «The ROMACONS Project: a Contribution to the Historical and Engineering Analysis of Hydraulic Concrete in Roman Maritime Structures». *The International Journal of Nautical Archaeology* 2004.
- Oleson, John Peter et al. «Technology, innovation and trade», kap. 6 i Robinson og Wilson (2011).
- Ostia Anticas nettsted, på nettadressen <https://www.ostia-antica.org/index.html> i juni 2025.
- Robinson, Damian og Wilson, Andrew (red.). *Maritime Archaeology and Ancient Trade in the Mediterranean*. Oxford Centre for Maritime Archaeology: Monograph 6. School of Archaeology, University of Oxford 2011.
- Roggen, Vibeke et al. *Latinsk ordbok*, Cappelen Damm, Oslo 2015
- Seymour, Linda M. et al. «Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete», *Science Advances* 9 (2023).
- Soldati, Mauro; Marchetti, Mauro (red.) *Landscapes and Landforms of Italy*, Springer International Publishing AG, Cham i Sveits 2017.

Stanislao, Corrado et al. «Contribution to the knowledge of ancient Roman seawater concretes: Phlegrean pozzolan adopted in the construction of the harbour at Soli-Pompeipolis (Mersin, Turkey)», *Periodico di Mineralogia*, 80 (2011).

Thunø, Erik, «The Pantheon in the Middle Ages», kap. 8 i Marder og Jones 2015.

USGS (U.S. Geological Survey), på nettadressen <https://www.usgs.gov> i juni 2025. Se gjerne artiklene under søkeordet *Subduction*.

Wilson, Andrew, «Developments in Mediterranean shipping and maritime trade from the hellenistic period to AD 1000», kap. 2 i Robinson og Wilson 2011.