

Mørteldatering og kirkearkæologi

Kulstof-14-analyse bruges normalt til at datere organisk materiale som træ eller knogler. De seneste tiår er metoden blevet udviklet, så den også kan bruges på mørtel og dermed hjælpe med at bestemme alderen på bygninger.

Sunds kirke på Ålandsøerne. Denne kirke er fra 1200-tallet.
Foto: Augusto Mendes

Forfatterne

Åsa Ringbom er professor emeritus Åbo Akademi, Finland
aringbom@abo.fi

Jan Heinemeier er lektor ved Institut for Fysik og Astronomi Aarhus Universitet
jh@phys.au.dk

Alf Lindroos er forsker, ph.d. Åbo Akademi
alf.lindroos@abo.fi

På Ålandsøerne i Finland findes 12 stenkirker fra middelalderen. Kirkerne har de seneste årtier været genstand for en større videnskabelig diskussion om, hvor gamle de egentlig er. Der findes ikke skriftlige kilder, der fortæller, hvornår de blev bygget, og derfor må man udrede kronologien på anden måde.

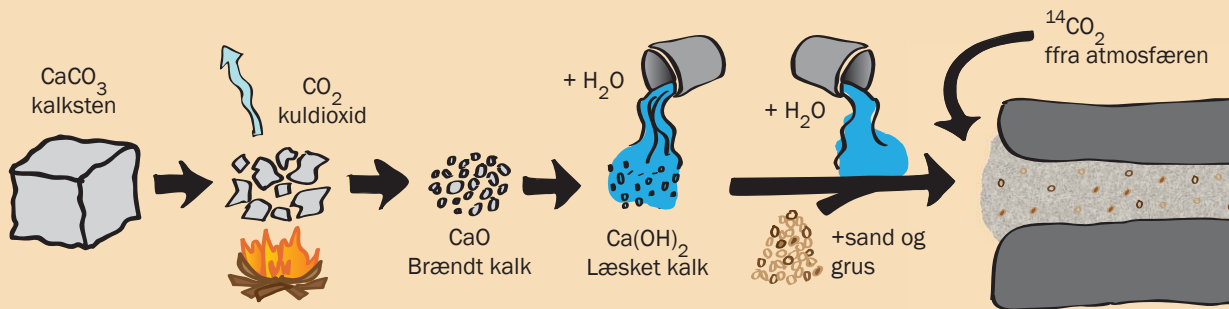
Omkring 1990 var der blandt historikere, kunsthistorikere og arkæologer vidt forskellige meninger om Ålandskirkernes alder. Landskabsarkæologen Matts Dreijer hævdede fx, at kirkerne var blevet bygget i 1100-tallet – ja, han mente endda, at nogle af dem var endnu ældre. De fleste forskere mente dog, at de første kirker blev bygget i den seneste halvdel af 1200-tallet.

I 1994 præsenterede arkæologen Markus Hiekkanen i sin doktorafhandling om finske stenkirker en helt ny kronologi for kirkerne på Ålandsøerne. Med undtagelse af en enkelt (Jomala kirke som han henførte til 1200-tallet) daterede han alle øvrige kirker til 1300-1400-tallet. Dette baserede han på sammenlignende klassificering af forskellige bygningsdetaljer og stilistiske træk ved bygningerne.

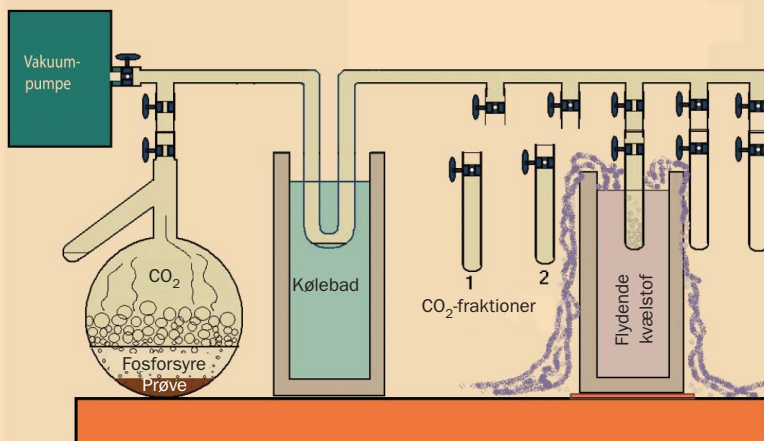
Mørtel med kulstof-14

I slutningen af 1980'erne var den traditionelle kulstof-14-analyse blevet udviklet til at kunne bruges på mørtel. Det var derfor oplagt at forsøge at inddrage denne metode til at få styr på de ålandske kirkers kronologi.

Mørtel og CO₂

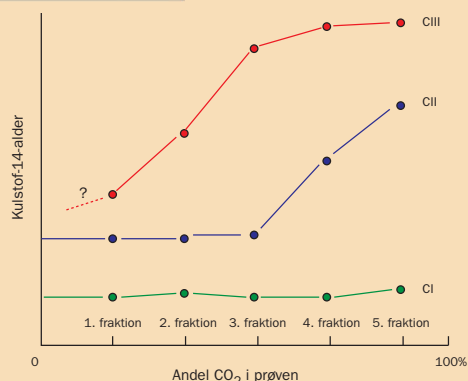


Princippet i fremstilling af kalkmørtel. Når mørtelen hærder fixeres atmosfærens indhold af kulstof-14 i mørtelen.



Figuren viser princippet i kemisk separering af CO₂-fraktioner fra en mørtelprøve. De første 2 fraktioner udtages meget hurtigt i processen (efter få minutter), mens de sidste fraktioner udtages efter flere timer.

Grafen viser skematisk forskellige typer af aldersprofiler for en mørtel baseret på analyse af fem forskellige fraktioner af CO₂ indsamlet, når man opløser mørtelprøven med fosforsyre. Hvis datering af de fem fraktioner viser en aldersprofil som CI eller CII er resultatet meget troværdigt, og analysen kan bruges som selvstændig dateringsmetode. Hvis prøven derimod viser en aldersprofil som i CIII, må resultatet kontrolleres af andre dateringsmetoder.



Kulstof-14-analyse kan bruges på mørtel fordi mørtel optager CO₂ fra atmosfæren mens den hærder. Mørtel laves ud fra brændt kalk der laves ved at opvarme kalk (calciumcarbonat, CaCO_3) til mindst 900 °C. I denne proces frigøres CO₂ og man får brændt kalk (calciumoxid, CaO). Når denne siden slæmmes med vand får man læsket kalk som i næste skridt blandes med vand og typisk sand. I hærtningsprocessen reagerer den læskede kalk med atmosfærisk kuldioxid og der dannes igen calciumcarbonat. Den CO₂ der indbygges i mørtelen under hærdeningen afspejler altså atmosfærens indhold af kulstof-14 på det tidspunkt hvor hærdeningen foregår.

Normalt bruger man kulstof-14-analyse på organisk materiale, og man havde da også forsøgt at datere

bjælker i kirkernes loftskonstruktion med kulstof-14 og såkaldt dendrokronologi (datering vha. analyse af årringe i træet). Problemet var dog, at disse analyser gav forskellige aldre fra træbjælke til træbjælke. Konklusionen var simpelthen den, at bjælkerne løbende var blevet skiftet ud, og derfor gav de ikke pålidelige aldre for, hvornår kirkerne oprindeligt var bygget. Dele af murværket kunne man derimod være sikker på faktisk stammer fra den tid, kirken blev bygget.

Bedre dateringer med atomaccelerator

De første kulstof-14-analyser på mørtel fra kirkerne blev udført med den traditionelle metode, som kræver store prøvemængder (omkring et kilo mørtel). Resultaterne varierede dog meget – og ofte med alt for store fejlmarginer.



Jan Heinemeier og Alf Lindroos i færd med at udtage mørtelprøver til analyse fra Kumlinge kirke på Ålandsøerne.

Foto: Åsa Ringbom

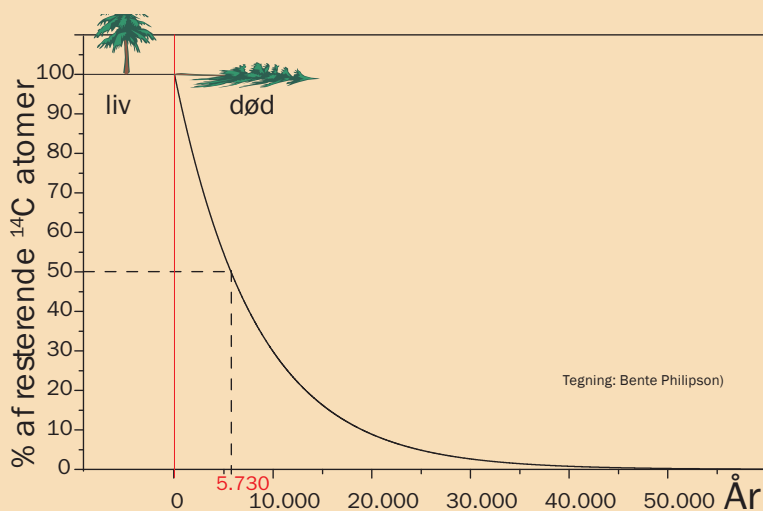
Kulstof-14-analyse

I atmosfæren findes der et enkelt kulstof-14-atom for hver 1.000 milliarder almindelige kulstof-12-atomer. Kulstof-14-atomer dannes i den øverste del af atmosfæren, hvor stråling fra verdensrummet omdanner nitrogenatomer til den

radioaktive isotop kulstof-14. Disse finder hurtigt sammen med ilt og bliver til $^{14}\text{CO}_2$ -molekyler, der med luftstrømmene spredes til hele atmosfæren. Herfra optager planter det i deres væv ved fotosyntesen – og herfra havner det også i organismer der spiser planter, fx i vores knogler. Koncentrationen af kulstof i levende organismer er dermed i ligevægt med atmosfærens kulstof-14.

Når en organisme dør, vil mængden af kulstof-14 i dens jordiske rester gradvist forsvinde, fordi kulstof-14 er radioaktivt med en halveringstid på 5.730 år. Ved at måle hvor meget kulstof-14, der er tilbage i fx en knogle, vil man kunne anslå dens alder, da atmosfærens koncentration af kulstof-14 er nogenlunde konstant.

Den traditionelle kulstof-14-analyse går ud på at brænde prøven af, hvorved der frigives CO_2 . Herefter måler man henfaldet af kulstof-14 med en geigertæller, idet der udsendes beta-partikler ved dette henfald. Da et sådant henfald er en sjælden begivenhed skal der store prøvemængder til for at få tællinger nok til at give et statistisk sikkert resultat.



Det blev meget bedre, da vi i 1994 gik over til at udføre kulstof-14-analysen ved hjælp af en atomaccelerator. Fordelen er, at man skal bruge en meget mindre mængde prøvemateriale. Vi kunne således nøjes med en håndfuld mørtel pr. analyse – og det er endda kun en del af prøven, der er nødvendig til selve analysen, resten kunne gemmes i en databank til senere brug.

Samtidig besluttede vi ikke længere at bruge resultaterne fra konventionel datering med kulstof-14. Dermed repræsenterede år 1994 en metodologisk nystart for mørteldatering ved hjælp af kulstof-14.

Grundige forberedelser

Udfordringen i at få nøjagtige dateringer af mørtel med kulstof-14-metoden er bl.a. at være meget omhyggelig med udvælgelsen af prøvematerialet. Særligt er det vigtigt at undgå, at der i prøvematerialet er små klumper af ubrændt kalk (som der uundgåeligt vil være i mørtel), da ubrændt kalk vil give alt for høje aldre.

For at undgå den slags fejlkilder præparerer vi prøverne både mekanisk og kemisk. Når man knuser mørtel vil den rene mørtel knuses meget lettere end de mere kompakte, ubrændte kalkklumper. Derved kan man altså hurtigt lave en grovsortering af prøven.

Til den kemiske præparering bruges 85 % fosforsyre til at opløse prøven og derved frigøre CO₂. Da mørtel opløses hurtigere end ubrændt kalk, vil den

første CO₂, der frigøres, derfor stamme fra mørtelen i prøven. Ved gentagne gange at opsamle prøver af CO₂ i opløsningsprocessen får man altså et antal (4-5) fraktioner af CO₂, som kan analyseres særskilt. Resultatet bliver et aldersprofil, der afspejler opløsningsprocessen: De første CO₂-fraktioner antages at stamme fra ren mørtel og burde derfor give den rigtige alder. De efterfølgende fraktioner vil give højere og højere aldre i takt med at fosforsyren efterhånden opløser klumper af ubrændt kalk i prøven.

Kirkekronologi

Samlet har vi foretaget over 1.000 dateringsmålinger på forskellige kemiske fraktioner af ca. 200 mørtelprøver fra kirkerne på Ålandsøerne. Resultaterne viste en kronologi for kirkerne på Ålandsøerne, hvor de store hovedkirker på øerne er fra slutningen af 1200-tallet, mens de mindre kirker på de ydre skærgårdsøer er fra 1300-tallet. Enkelte kapelkirker i sten er fra 1400-tallet.

Det er altid vigtigt at kunne vurdere en dateringsmetodes pålidelighed ud fra uafhængige kontroldateringer. For ca. halvdelen af mørtelprøverne kunne vi sammenligne med resultater fra dendrokronologi eller fra historiske kilder. Og i 96 % af disse tilfælde ramte kulstof-14-dateringen plet.

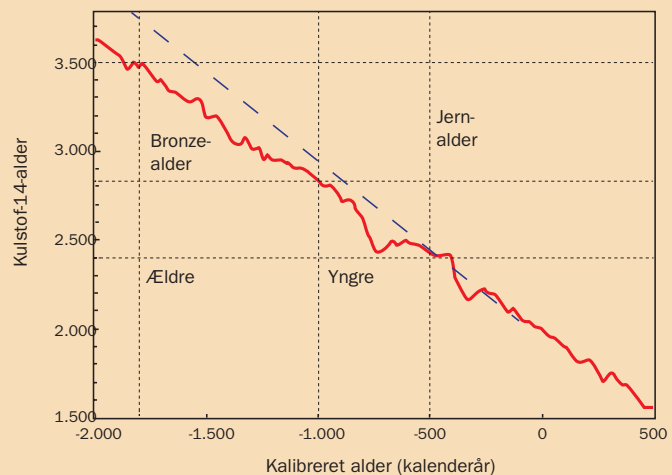
Det var en vigtig bekræftelse af mørtel-dateringens pålidelighed, og projektet gav os værdifuld erfaring omkring mørteldatering, som vi har kunnet anvende i andre sammenhænge i hele Europa.

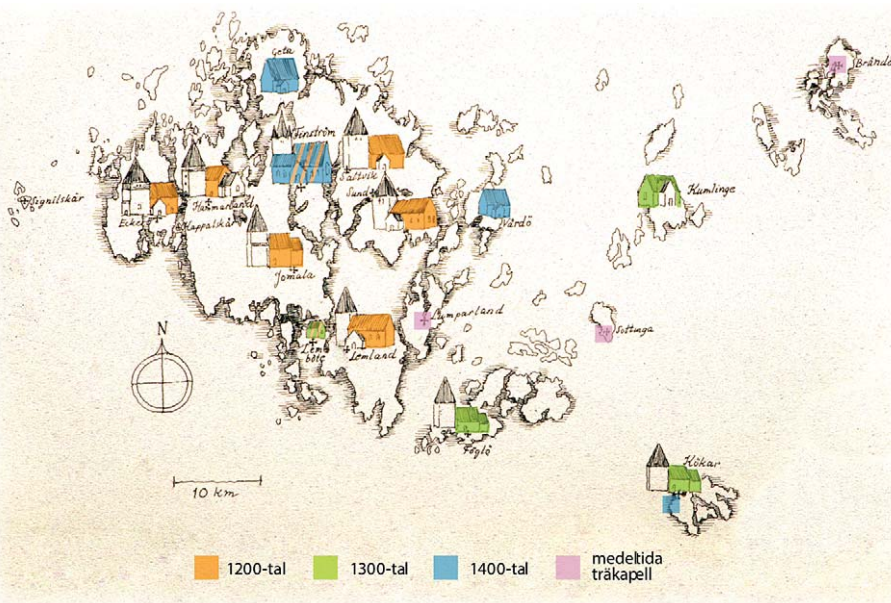
Med accelerator-metoden går man mere direkte til værks, idet man her måler det faktiske indhold af kulstof-14 i prøven. Det gøres ved at sortere kulstofatomerne i en prøve efter masse – kulstof-14 er tungere end dens fætre kulstof-13 og kulstof-12. Det foregår ved at give atomerne en elektrisk ladning og derefter sætte dem i fart og lade dem passere en elektromagnet, der afbøjer deres bane. De lette kulstofatomer vil afbøjes mest, og kun kulstof-14 vil ramme detektoren. Med denne metode kan man nøjes med prøvemængder, der er tusind gange mindre end med den traditionelle metode.

Fra kulstof-14-år til kalenderår

Koncentrationen af kulstof-14 i atmosfæren varierer i praksis med tiden. Derfor har det været nødvendigt at lave en kalibreringskurve, som kan omsætte målte kulstof-14-aldre til kalenderår – en slags facitliste om man vil. Denne kurve er lavet ved at analysere og måle kulstof-14 i træringe på ældgamle træer og fossilt træ. Til sammen har man kunnet stykke en kalibreringskurve sammen, der rækker næsten 50.000 år tilbage i tiden.

Kulstof-14-dateringernes nøjagtighed afhænger af hvor man rammer på denne kalibreringskurve. Desværre findes der et ret fladt stykke omkring 1300-tallet som er et vigtigt tidspunkt i nordisk middelalder. Det betyder at man ofte må nøjes med at henføre en genstand til det rette århundrede.





Dateringer af mørtel fra kirkerne på Ålandsøerne viser kronologien i hvornår de blev bygget.

Forslag til videre læsning
www.kyrkor.ax
www.mortardating.com

Fra Ålandsøerne til Rom

Siden projektet med datering af de ålandske kirker er metoden med held blevet brugt på andre bygninger med kalkmørtel fra middelalderen i Skandinavien – bl.a. på Gotland og i Skåne.

Og metoden er også blevet testet på andre typer af mørtel – fx til at aldersbestemme det ældste romerske bygningskompleks på den Iberiske halvø, Torre de Palma i Portugal. Her gav mørteldatering nøglen til at kunne bestemme kronologien i byggeriet af det store kompleks, som strakte sig over en lang periode fra ca. år 100 – 650 e.kr.

En særlig udfordring, som vi stadig arbejder med den dag i dag, har været at teste metoden på såkaldt pozzolana-mørtel i Rom. En af hemmelighederne ved holdbarheden i romersk cement er, at den er baseret på vulkansk aske, der bl.a. indeholder silikat og aluminium. Til forskel fra kalkmørtel kan pozzolana-mørtel endda hærde under vand.

Denne type mørtel optager ikke nødvendigvis CO_2 fra atmosfæren under hærden. Derfor var vi indstillet på, at det næppe kunne lade sig gøre at datere pozzolana-mørtel med kulstof-14, da vi i 1998 begyndte at tage prøver i Rom. Men det lykkedes alligevel at datere ca. halvdelen af de bygninger, vi tog prø-

Forskergruppen foran Colosseum i Rom. Resultaterne af mørtelanalyser fra dette bygningsværk viser en alder, som er tilsvarende, hvad man kender fra historiske kilder, ca. 80 e.kr. Fra venstre ses Lynne Lancaster, Jan Heinemeier, Åsa Ringbom og Alf Lindroos.



ver fra – heriblandt Colosseum og Trajanus Marked. Lige så ofte fik vi dog resultater der var ubrugelige eller svære at tolke. Fx mislykkedes konsekvent alle prøver taget i Pompeji og Herculaneum, og vi er nu sammen med forskere fra bl.a. universitetet i Napoli ved at udrede årsagerne til dette. En mulighed er at mørtelen løbende har optaget CO_2 fra vulkanen Vesuv.

Vigtige kalkklumper

I arbejdet med pozzolana-mørtel opdagede vi, at en særlig type kalkklumper i mørtelen kan være nøglen til en pålidelig datering. Sådanne klumper er opstået under processen, hvor man har blandet den brændte kalk med vand. Under omrøringen kan der dannes klumper af kalk, der ikke bliver ordentlig opblandet med vandet (ligesom mel kan finde på at gøre, når man rører det ud i vand). Disse kalkklumper vil i dateringssammenhæng repræsentere “den rene vare” og ikke på samme måde som resten af mørtelen være forurenset med mørtelens andre komponenter, der kan forstyrre dateringen.

Da vi indså disse kalkklumpers potentielle betydning indledte vi en systematisk analyse af kalkklumper, som vi havde i vores arkiv over mørtel. Indtil videre har vi dateret 32 sådanne kalkklumper, og af dem er det kun to, der konsekvent er slået fejl – nemlig fra Pompeji og Herculaneum. For en sikkerheds skyld analyserer vi kalkklumperne i to CO_2 -fraktioner for at afgøre om klumperne kan have været dårligt brændte. Det sker nemlig, at anden fraktion bliver en anelse ældre end første. Men som regel ender analyserne med at give samme resultat.

Vi har derfor grund til forsigtig optimisme mht. at analyser af kalkklumper kan være løsningen for datering af pozzolana-mørtel. Analyser af kalkklumper har yderligere den fordel, at de er billigere at udføre, da det kræver analyse af færre CO_2 -fraktioner end de fem, som bruges til andre prøver. Til gengæld kan man ikke altid være sikker på at finde egnede kalkklumper i mørtelprøver.

Tværfagligt samarbejde

Siden vi for 19 år siden indledte projektet om metodeudvikling af kulstof-14-analyse til datering af ålandske kirker, har vi redegjort for mere end 600 mørtelanalyser fra forskellige egne i Europa. I øjeblikket tilpasses metoden til brug i 16 lande i Europa, og der er i den forbindelse etableret et værdifuldt, tværfagligt netværk af forskere, som tilsammen videreudvikler metoden.

Selv udforsker vi for tiden betydningen af analyse af kalkklumper i datering af mørtel sammen med Gianluca Pesce fra universitetet i Bath, Storbritannien. Det bruger vi bl.a. til analyse af kalkklumper fra ålandske prøver i vores databank i forbindelse med projektet med kirkerne på Åland, som nu nærmer sig sin afslutning. ■