

Hvad isotoperne fortæller om de forsvundne vikinger på Grønland

Jan Heinemeier og Niels Rud, AMS ^{14}C Dateringslaboratoriet, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Grønland blev i vikingetiden koloniseret af norske og islandske bønder, der grundlagde bygder med gårde, kirker og klostre, der bestod i henved et halvt årtusind. Men engang i 1400-tallet affolkedes kolonierne og forsvandt. Hvorfor bukkede nordboerne under, medens eskimobefolkningen trivedes og bredte sig? Det er en af de store gåder i europæisk historie. Der har været gjort mange forsøg på at løse gåden og forklare hvorfor nordbokolonierne måtte give op, uden at spørgsmålet er blevet endeligt afklaret. I det følgende fortælles om en naturvidenskabelig tilgang til problemet, som kom i stand ved et tværfagligt samarbejde mellem antropologen Niels Lynnerup fra Panum Institutet, arkæologen Jette Arneborg fra Nationalmuseet, geologen Árny E. Sveinbjörnsdóttir fra Islands Universitet og fysikerne Niels Rud og Jan Heinemeier fra AMS ^{14}C Dateringslaboratoriet, Aarhus Universitet.

Danmark råder over en enestående samling af skeletrester fra nordbograve, fremdraget ved Nationalmuseets udgravninger i kirkegårde i de gamle kolonier i Grønland, der har stået på gennem 80 år. Dette knoglemateriale er nu blevet underkastet en omfattende isotopanalyse, der har kunnet afgøre hvilken type føde, hver enkelt individ har indtaget, samtidig med at knoglerne er blevet ^{14}C -dateret ved hjælp af accelerator-massespektrometri (AMS). Vi kan ikke hævde, at målingerne har ført til en løsning af spørgsmålet om nordboernes forsvinden, men de har gjort det muligt at udelukke nogle hypoteser. Isotopmålingerne har således påvist, at nordboerne langsomt men sikkert har ændret kostvaner. I Landnamtiden omkring år 985 bestod kosten af 80% landbrugsprodukter og 20% føde fra det omgivende hav, men efterhånden spillede havets produkter en større og større rolle, således at billedet henimod slutningen af perioden var vendt helt om – i 1400-tallet levede nordboerne af 80% marin føde. Lidt forenklet udtrykt: De startede som bønder, men endte som fiskere. Det har været hævdet af amerikanske arkæologer, at nordboerne bukkede under, fordi de var kulturelt ufleksible og ikke kunne eller ville tilpasse sig. Den hypotese kan nu afvises.

Nordbokolonierne

I følge sagaerne førte Erik den Røde år 985 eller 986 en lille gruppe vikinger til sydvestkysten af Grønland for at grundlægge en europæisk bondekoloni. Området foran de grønlandske gletschere kunne naturligvis kun give grundlag for en agerbrugsøkonomi, der var baseret

Box 1. Kulstof – 14 metoden

Kulstof-14 datering af materiale af biologisk oprindelse er baseret på måling af materialets indhold af den radioaktive kulstofisotop ^{14}C , der produceres i atmosfæren af kosmisk stråling og derfra via planternes fotosyntese indgår i alle fødekæder på landjorden og i havene. Produktionen af ^{14}C opretholder en kvasi-stationær ligevægt i atmosfæren og i de levende organismer, hvor isotopforholdet $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ er ca. $1,2 \times 10^{-12}$. Når en organisme dør, brydes ligevægten og ^{14}C koncentrationen aftager med halveringstiden 5730 år. Måling af den aktuelle ^{14}C koncentration fører til en bestemmelse af alderen, dvs. den tid, der er gået siden organismens død. Da atmosfærens $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ forhold har varieret betydeligt (op til 10%) gennem tiderne, er den eksponentielle henfaldslov uanvendelig til beregning af alderen, som i stedet bestemmes ved sammenligning med nøjagtige målinger af ^{14}C i årringe i træ med dendrokronologisk bestemt alder. Denne såkaldte træingskalibrering rækker ca. 10.000 år tilbage i tiden. Da ^{14}C i træringe ikke aftager strengt monotont med alderen, vil usikkerheden på den kalibrerede alder for en given ^{14}C -måleusikkerhed variere afhængigt af hvor på kalibreringskurven man befinder sig. Dateringer kan foretages 30–40.000 år tilbage, dog må man for målinger i det ukalibrerede område angive en såkaldt "konventionel ^{14}C alder" baseret på en antagen standardværdi for atmosfærens $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -forhold.

på husdyrhold. Men til trods for de ugæstfri omgivelser og den fjerne beliggenhed havde denne europæiske forpost gode forbindelser tilbage til Europa – der var regelmæssig sejlads mellem Grønland, Island, Norge og resten af Europa. Det var vikinger, der fra baser i Grønland opdagede Amerika næsten 500 år før Columbus' historiske opdagelsesrejse i 1492.

Kolonien begyndte at gå i opløsning i midten af 1300-tallet, da den nordligste del, Vesterbygden, blev opgivet og de grønlandske nordboer synes at være helt forsvundet, også fra det sydligere Østerbygden, på et tidspunkt i 1400-tallet. Hvad der egentlig skete, er stadig en gåde og har i tidens løb været genstand for heftig debat. Der har været nævnt årsager som forvær-

ret klima, overgræsning, epidemier, indavl, engelske sørøvere, fjendtlige eskimoer, fremmed konkurrence på handelen, bortfald af eksportmarkedet for hvalrostand – eller en kombination af dem alle.

Hidtil har kendskabet til den norrøne kulturs udvikling i Grønland hovedsageligt været baseret på skrevne kilder og udgravninger af ruinerne af nordboernes bygder (bygninger, gårde) og kirkegårde. Resultaterne af udgravninger af nordbogårdernes møddinger fortolkes som vidnesbyrd om en økonomi baseret på husdyrhold og sælfangst, men det er svært at udlede kvantitative resultater, da der altid vil være usikkerhed om, hvor stor en del af knoglerne fra de forskellige fødeemner, der er endt på møddingen, og i hvilket omfang de er bevaret. Et eksempel er fiskeben, der hurtigt forvitrer i arkæologiske lag, hvis de overhovedet når frem – de er skattede fødeemner for f.eks. fugle, hunde og grise. Den kendsgerning, at netop fiskeben mangler i fund fra møddingerne, har fået især amerikanske arkæologer til at hævde, at nordboerne ikke kunne overleve, fordi de ikke udnyttede havets ressourcer. Som vi skal se senere, er der faktisk en simpel forklaring på de manglende fiskeben.



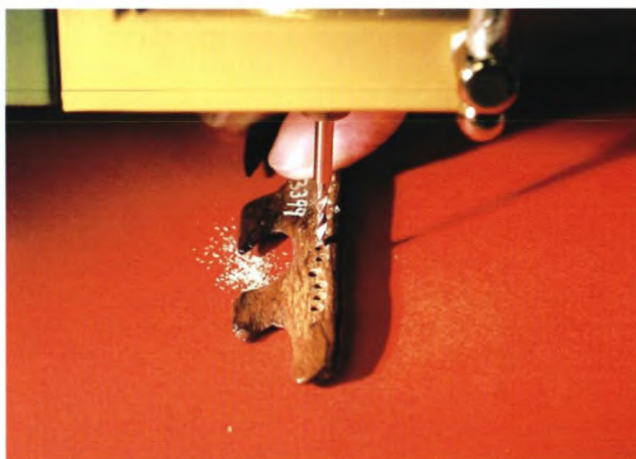
Figur 1. Et helt ribben af spædbarn ved siden af et knoglefragment, der repræsenterer den stofmængde, der er tilstrækkelig til en ^{14}C -datering med acceleratormetoden. I hele barnets skelet ville der ikke være nok materiale til en traditionel ^{14}C -datering.

Endnu sværere er det at se, om der har været tale om en udvikling i fødeunderlaget, f.eks. som tilpasning til ændrede livsbetingelser – ikke mindst fordi de arkæologiske dateringer er indirekte, baseret på de skriftlige kilder og identifikation af de enkelte ruiner ved sammenligning med beskrivelserne i kilderne.

Naturvidenskabelige dateringer og isotopundersøgelser

Der har således været hårdt brug for en mere direkte og naturvidenskabelig tilgang. Af gennemgående daterbart materiale har der næsten kun været menneskeknogler til rådighed, da gravgaver ophører med kristen-

dommens indførelse kort efter Landnam. Da der til en traditionel ^{14}C -datering (se Box 1 og 2) medgår mindst 1 gram kulstof fra knoglens kollagen, altså det meste af f.eks. et lårben fra et voksent menneske, har man stort set afstået fra at foretage dens slags dateringer på den enestående samling af nordboknogler (dele af skeletter fra 450 mennesker), som findes på Panum Institutet. Knoglematerialet er resultatet af Nationalmuseets udgravninger, som Poul Nørlund startede i 1921 og som stadig pågår. Samlingen giver en enestående dækning af en hel kultur, fordi stort set alle kirkegårde kendt fra de skriftlige kilder er repræsenteret.



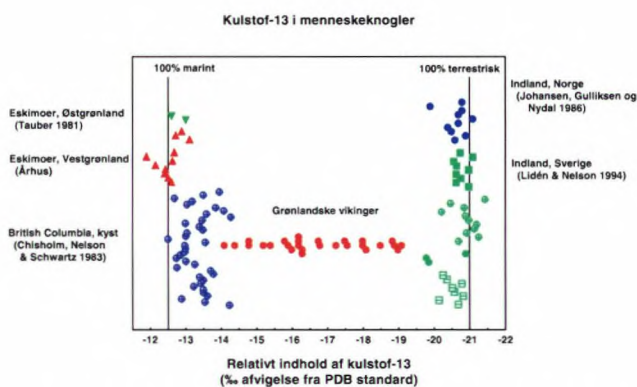
Figur 2. Prøveudtagning til AMS ^{14}C -datering og analyse for stabile isotoper af en harpunspids af ben ved udboring med 2 mm bor. Prøver af knogler udbores på samme måde. Kollagen udtrækkes af knogleprøven og forbrændes til kuldiioxid, som analyseres. Erfaringen har vist, at forholdet mellem kulstofisotoper bevares intakt i kollagenet.

Indførelsen af den nye AMS-teknik til ^{14}C datering (se Box 2 og [1]) har medført et gennembrud for knogledatering, idet der til hver datering med AMS-metoden medgår mindre end en tusindedel af den prøvemængde, der kræves til en traditionel ^{14}C datering. Der kan altså laves dateringer på selv ganske små knoglefragmenter (100 mg) med under 1 mg kulstof fra kollagen (figur 1) og der kan endda opnås en meget høj grad af sikkerhed ved flere dateringer på den samme knogle uden at der ødelægges nævneværdigt af det uerstattelige arkæologiske materiale (figur 2).

For AMS Laboratoriet var det faktisk en af de hidtil største udfordringer, da vi fik henvendelse fra Niels Lynnerup og Jette Arneborg om et dateringsprojekt og isotopundersøgelser på vikingeknogler fra den norrøne periode i Grønland. Målet var at dække nordboperioden tidsmæssigt og med en vis geografisk (Østerbygd/Vesterbygd) og social variation. Til formålet var udvalgt 27 menneskeknogler, 6 tekstiler og en enkelt koknogle.

Vanskelighederne var indlysende: Der stilles meget høje krav til præcision i dateringerne, når der skal fastlægges en kronologi inden for den korte koloniserings-

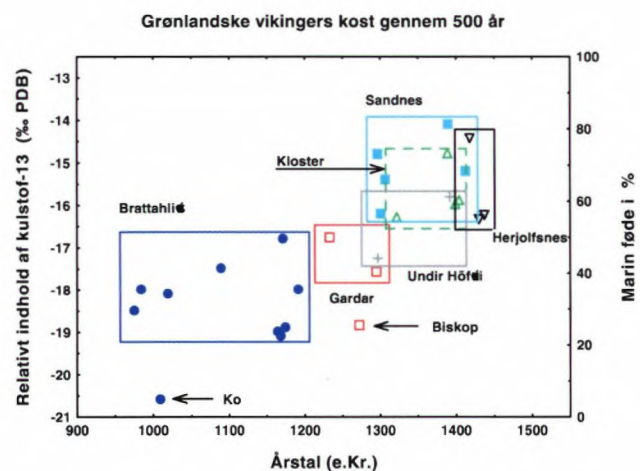
periode på bare 400–500 år. Ved dateringer af mennesker, der har haft adgang til føde fra havet, ligger der yderligere en principiel vanskelighed i at den marine fødekæde har en tilsyneladende ^{14}C -alder, der er omkring 400 år højere end den tilsvarende (samtidige) terrestriske, fordi kulstofets residens i verdenshavene er meget større end i atmosfæren og biosfæren. Det vil sige, at knoglerne af en viking, der måtte have levet udelukkende af sæl og fisk fra havet, vil se ca. 400 år ældre ud i en ^{14}C -datering end en tvilling, der har levet udelukkende af fårekød og mælk. Hvis vi ikke kender forholdet mellem den marine og den terrestriske fødeandel, kan en meget "marin" nordbo fra slutningen af perioden komme til at se ud, som om han er fra Landnamstiden.



Figur 3. Figuren viser, hvor tydeligt $\delta^{13}\text{C}$ (x-aksen) kan skelne mellem mennesker, der har spist henholdsvis landføde og havføde (y-aksen bruges kun til gruppering af de enkelte dataserier). Forhistoriske mennesker fra indlandet i Norge og Sverige ligger helt til højre på figuren med en meget "terrestrisk" $\delta^{13}\text{C}$ -værdi på -21 promille, mens grønlandske eskimoer og indianere fra Canadas vestkyst ligger langt til venstre med de mest marine $\delta^{13}\text{C}$ -værdier omkring $-12,5$ promille. Vikingerne i Grønland dækker næsten hele det mellemliggende område. Det tolker vi som at befolkningens marine fødeandel strækker sig fra 20% og helt op til 80% marin føde – en enestående spændvidde i kostvaner for en befolkning, der er så koncentreret geografisk, kulturelt og tidsmæssigt.

Ud over anvendelse af gentagne ^{14}C -målinger på den enkelte knogle for at opnå høj præcision og sikkerhed i dateringerne lå løsningen i at måle forholdet $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ mellem de stabile kulstofisotoper. Dette forhold angives af praktiske grunde som $\delta^{13}\text{C}$, der udtrykker isotopforholdets relative afvigelse fra en standard (se Box 3). At $\delta^{13}\text{C}$ -værdien er forskellig for den terrestriske og den marine fødekæde blev tidligt erkendt af Henrik Tauber (leder af ^{14}C Laboratoriet ved Nationalmuseet gennem mange år) og anvendt til en omtrentlig vurdering af den marine fødeandel for arkæologiske menneskekogler [2,3].

For at gennemføre projektet var det en nødvendig forudsætning, at det faktisk er muligt at gennemføre en detaljeret, kvantitativ beregning af den marine fødeandel ud fra den målte isotopsammensætning af kulstoffet i knoglernes kollagen og dermed beregne den nøjagtige korrektion (den såkaldte reservoirkorrektion) af ^{14}C alderen på grund af den "gamle" havføde. "Du er hvad du spiser" skal altså gælde helt bogstaveligt, hvad angår isotopsammensætningen.



Figur 4. $\delta^{13}\text{C}$ -værdier i grønlandske vikingeskeletter som funktion af dødstidspunktet, bestemt ved hjælp af ^{14}C . På den højre akse er $\delta^{13}\text{C}$ oversat til det beregnede procentvise marine indhold i personens kost. Symbolerne referer til resultater fra de enkelte (indrammede) kirkegårde. Figuren viser, at de store forskelligheder i kostvaner svarer til en markant stigning i udnyttelsen af ressourcer fra havet i løbet af tiden i Grønland. Skelettet fra Gardar, der er mere terrestrisk end de øvrige, er en biskop (begravet med sin stav), der formentlig stadig er præget af kosten fra sit hjemland, Norge.

At to mennesker, der har de samme kostvaner, virkelig får ens $\delta^{13}\text{C}$ -værdier, antydes af en sammenstilling af $\delta^{13}\text{C}$ -værdier på arkæologiske knogler, målt af internationale laboratorier og AMS Laboratoriet i Århus (figur 3). De "terrestriske" mennesker fra det indre af Norge og Sverige har en meget snæver, entydig $\delta^{13}\text{C}$ -fordeling omkring -21 promille, mens eskimoer, der er sammenfaldende tidsmæssigt og geografisk med nordboerne i Grønland, har en snæver, "marin" $\delta^{13}\text{C}$ -fordeling omkring $-12,5$ promille, i overensstemmelse med en arkæologisk begrundet forventning om en (næsten) rent marin levevis. På figuren ses, at kystindianere fra British Colombia, der også er meget marine, udviser en større spredning i $\delta^{13}\text{C}$ som følge af, at de har haft større adgang til terrestrisk føde. Spredningen afspejler individuelle forskelle i valget af føde.

Kulstof-13 og vikingernes kost

På samme diagram (figur 3) ses $\delta^{13}\text{C}$ -målingerne på de grønlandske vikinger. Målingerne er foretaget med høj præcision af Árný E. Sveinbjörnsdóttir med massespek-

Box 2. Kulstof – 14 datering med tandem-accelerator

Ved den traditionelle ^{14}C -metode bestemmes ^{14}C -koncentrationen ved tælling af betapartikler fra ^{14}C i en gastæller. Metoden blev opfundet og udarbejdet i årene 1947–51 af Libby i USA. Det første land uden for Amerika, der indførte metoden, var Danmark, der oprettede et ^{14}C -laboratorium på Nationalmuseet i 1951 – iøvrigt kraftigt støttet af Niels Bohr. Den lange halveringstid (5730 år) for ^{14}C gør radioaktivitetsmåling meget ineffektiv, idet der kræves prøver på mindst 1 gram kulstof samt lange måletider. Imidlertid lykkedes det for fysikere i Canada og USA i 1977 at måle $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -forhold ved direkte massespektrometri ved hjælp af en tandemaccelerator, hvorved effektiviteten kan reduceres så meget, at kravet til prøvestørrelsen kan reduceres til 0,1 mg. Metoden betegnes accelerator-massespektrometri (AMS). Massespektrometrisk måling af ekstremt lave $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -forhold i området 10^{-12} – 10^{-15} forudsætter en fuldstændig elimination af urenheder på massetal 14 (som f.eks. ^{14}N og molekylerne $^{14}\text{CH}_2$, ^{13}CH og Li_2), som kun kan opnås med en tandemaccelerator. Usikkerheden i en AMS-måling kan bringes ned på 0,2%, svarende til 20–30 ^{14}C -år. Tandemacceleratoren på Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet har siden 1984 udgjort den instrumentelle basis for AMS ^{14}C dateringslaboratoriet, som er et tværfagligt projekt finansieret af Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd (SNF) og Det Naturvidenskabelige Fakultet. Der udføres dateringer på fortrinsvis arkæologiske og geologiske prøver. Interessen for dateringer har oversteget alle forventninger, idet der for tiden dateres ca. 1000 prøver om året. Tandemacceleratoren er en veteran i dansk fysik, som i 1958 indkøbtes til Niels Bohr Instituttet og blev i 1973 overtaget og forbedret af Fysisk Institut i Århus. Der har vist sig voksende problemer med driften af den gamle og nedslidte maskine, hvorfor muligheden for anskaffelse af en moderne, automatiseret accelerator til laboratoriet i øjeblikket undersøges.

trometeret på Science Institute i Reykjavik som led i et fast etableret dateringssamarbejde med AMS Laboratoriet i Århus. Resultatet er slående: Vikingerne dækker næsten hele området mellem de terrestriske mennesker i Norge og Sverige og de marine eskimoer på Grønlands sydvestkyst. Oversat til fødesammensætning svarer det til hele intervallet fra 20% til 80% i marin fødeandel.

Der er tale om en helt usædvanligt stor variation i fødeunderlag for én kultur i en meget begrænset tidsperiode. Det kunne skyldes individuelle præferencer evt.

i forbindelse med social lagdeling, eller der kunne være tale om en tidsudvikling, f.eks. som følge af den stadige forringelse af det regionale klima gennem perioden, som den seneste danske iskerneforskning har vist [4]. For at løse spørgsmålet kræves nøjagtige ^{14}C dateringer, der er korrigeret for reservoir-effekten af det beregnede indhold af "gammel" marin føde for hvert individ.

Kulstof-13 og nøjagtige ^{14}C dateringer

Her er vi blevet hjulpet af et helt usædvanligt heldigt fund fra kirkegården ved det, der er blevet identificeret som Herjolfsnes – den sydligste af de norrøne bosættelser, etableret af handelsmanden Herjolf, og som forventes at være en af de seneste bebyggelser i funktion. Ved udgravningen i 1921 blev der sammen med tre skeletter tæt ved hinanden fundet de uldklæder, der var brugt ved begravelsen af mangel på træ til kister, og som tydeligvis var bevaret af permafrosten. Klæderne giver en enestående mulighed for at kontrollere den korregerede ^{14}C -alder af knoglerne. ^{14}C -datering af et enkelt par uldtråde fra hver dragt viser at gravene er samtidige som forventet ud fra den indbyrdes placering.

Da fåreuld er terrestrisk er der ikke brug for reservoirkorrektion og alle tre grave er dermed dateret til 1430 e.Kr. med en usikkerhed på ± 15 år – faktisk foreløbigt den seneste sikre datering af nordboernes tilstedeværelse i Grønland. Ét af skeletterne, en ung kvinde (20–25 år), havde en ukorrigeret ^{14}C alder, der var 420 år ældre end klæderne, hvilket ville placere hendes død kort efter Landnam, mens de to andre skeletter, et barn og en ældre kvinde, var omkring 250 år ældre end klæderne. Imidlertid viste $\delta^{13}\text{C}$ -analyse af knoglerne et marint indhold på næsten 80% for den unge kvinde og ca. 55% for de to andre. Selv om beregningerne er mere komplicerede, er løsningen i forenklet form således: Ved at fratrække den tilsvarende brøkdel af en fuldt marin reservoiralder på 450 år for hvert af de tre individers ^{14}C dateringer, bliver de alle tre samtidige med klæderne. Da det marine indhold er meget forskelligt, giver det tillid til at metoden virker til detaljerede individuelle korrektioner.

Efter at parametrene hermed var lagt fast, kunne vi korrigere alle knogledateringerne i undersøgelsen på tilsvarende måde. De er afbildet, kalibreret i kalenderår, på x-aksen i figur 4, mens y-akserne viser henholdsvis den målte $\delta^{13}\text{C}$ -værdi og den heraf udledte marine fødeandel i procent.

Bemærk, at de tidligste dateringer af menneskeknogler netop ligger i Landnamstiden (der begyndte 985 eller 986 e. Kr. ifølge de skriftlige kilder). Knoglerne stammer fra kirkegården omkring et ganske lille anlæg, som arkæologerne har identificeret som resterne af den første kirke. Ifølge sagaerne blev den anlagt af Erik den Rødes kone Tjodhilde i nærheden af hans gård ved Brattahli og er dermed et af de tidligste norrøne anlæg i Grønland. Dateringen af en okseknogle (der jo som terrestrisk dyr ikke behøver nogen korrektion),

fundet i en grav på samme kirkegård, understøtter de tidlige menneskedateringer og sandsynliggør, at identifikationen af Tjodhildes kirke er korrekt. Selv om de tidlige menneskeknogler kun er omkring 20% marine, er det helt afgørende at anvende den tilsvarende reservoirkorrektion. Ellers ville dateringerne placere de første bosættere 150 år tidligere end de historiske oplysninger tillader.

Nordboerne skifter til føde fra havet

Nu hvor kronologien ligger fast, kan vi af figur 4 se, at de store forskelle i de undersøgte menneskeknoglers marine indhold repræsenterer en markant stigning i nordboernes afhængighed af havføde i løbet af perioden fra Landnam til bygderne affolkes 4–500 år senere. I begyndelsen er fødesammensætningen omkring 20% marin – nærmest som hos samtidige nordmænd. I slutningen af perioden er der sket en tilpasning til marine ressourcer – omend kun op til 80% af det niveau, vi ser for de samtidige eskimoer. Om denne dramatiske ændring i nordboernes levevis i løbet af nogle få hundrede år skyldes et pres fra et forværret klima må fremtidig forskning afgøre. Men denne undersøgelse kan under alle omstændigheder tilbagevise eksisterende spekulationer om, at nordboerne bukkede under, fordi de enten ikke kunne eller ikke ville tilpasse sig koldere tider ved at gå over til at udnytte havets rige ressourcer.

Fremtidig isotopforskning

Undersøgelsen har vist, at der er et væld af informationer og analysemuligheder i sådanne isotopundersøgelser. Det er også blevet klart for os, at en nærmere kvantitativ forståelse kræver undersøgelser af de stabile isotopers udvikling gennem fødekæderne – den marine og den terrestriske. Vi har derfor inddraget konservator Jeppe Møhl fra Zoologisk Museum i København og professor i arkæometri Erle Nelson, Vancouver, i et samarbejde, der støttes af Carlsbergfondet, om isotopundersøgelser af arkæologisk knoglemateriale fra nordboernes husdyr og fangst dyr ud over skeletter af nordboer og eskimoer. Dyreprøverne skal dække stort set hele fødeunderlaget for såvel nordboer som eskimoer og repræsentere en variation i tid, i lokalitet (Østerbygd/Vesterbygd), art (hest, ko, får, ged, svin, hund, rensdyr, hare, ulv, moskus, hvalros, flere hvalarter og de fem relevante særlarter) samt sociale forskelle i de gårde, som husdyrene har tilhørt. Knoglerne findes på Zoologisk Museum i København. Hvor $\delta^{13}\text{C}$ i knoglerne giver information om, hvilket reservoir kulstoffet stammer fra, forventes tilsvarende målinger af $\delta^{15}\text{N}$ (se Box 3) at give information om dyrets niveau i fødekæden. Populært sagt er det nøglen til at forstå om et menneske har levet af fisk eller af sæler, der selv æder fisk. Målingerne af $\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$ udføres for øjeblikket i henholdsvis på massespektrometrene i henholdsvis Reykjavik og Vancouver, men vil for fremtiden også kunne udføres på AMS ^{14}C Date-

lingslaboratoriet i Århus, der netop har indkøbt et nyt massespektrometer bevilget af Forskningsrådets program for kostbart udstyr.

Box 3. Stabile isotoper

Naturligt kulstof består af to stabile isotoper, ca. 99% ^{12}C og 1% ^{13}C . Isotopforholdet i en kulstofprøve udtrykkes konventionelt som en $\delta^{13}\text{C}$ -værdi, hvor $\delta^{13}\text{C}$ er defineret som den relative afvigelse af prøvens $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -forhold fra en standard (karbonatmineralet PDB). $\delta^{13}\text{C}$ udtrykkes sædvanligvis i promille. Masseforskellene betyder, at $\delta^{13}\text{C}$ undergår ændringer i kemiske reaktioner som f.eks. fotosyntesen (isotopfraktionering). Da fotosyntesen følger forskellige reaktionsskemaer for planter på land og i havet, vil fødekæderne i de to miljøer udvise forskellige $\delta^{13}\text{C}$ -værdier. Typiske værdier for humant knoglekollagen er $\delta^{13}\text{C} = -21$ promille for ren terrestrisk føde og $\delta^{13}\text{C} = -12,5$ promille for ren marin føde.

På analog måde udtrykkes isotopfraktionering af kvælstofisotoper ved $\delta^{15}\text{N}$ -værdien, den relative afvigelse af $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ -forholdet fra en standard (atmosfærisk luft).

Som en tidlig sidegevinst i dette projekt har $\delta^{13}\text{C}$ -målinger allerede vist, at nordboernes hunde har været endnu mere marine end deres herrer. Heraf kan man slutte, at de manglende fiskeben ikke blot kan skyldes bevaringsforholdene i møddingen – de er formentlig aldrig nået så langt.

En af de vigtige konsekvenser af isotopundersøgelserne kan blive en bedre teknik til reservoirkorrektion af ^{14}C dateringer af arkæologiske knogler af mennesker fra det danske område. Det er i virkeligheden sværere at håndtere end det grønlandske, fordi både fisk fra fjordområder og ferske søer kan have ekstremt høje reservoiraldre sammenlignet med åbne havområder, men indbyrdes forskellige $\delta^{13}\text{C}$ -signaler. Løsningen kan vise sig at ligge i en kombination af målinger af såvel $\delta^{13}\text{C}$ som $\delta^{15}\text{N}$.

De beskrevne arkæologiske anvendelser af isotopundersøgelser til præcise dateringer og fortolkninger af kostvaner er i virkeligheden rent fænomenologiske på empirisk basis. Det mest spændende ved den planlagte undersøgelse kan vise sig at være en langt mere grundvidenskabelig forståelse af de biologiske og økologiske processer, der er årsag til de observerede isotopsignaler.

Resultaterne af isotopmålingerne på nordboskeletterne er fremlagt i en artikel i fagtidsskriftet *Radiocarbon* [5].

Referencer:

- [1] J. Heinemeier, H. L. Nielsen og N. Rud (1992) "Kulstof-14 datering med accelerator", *Naturens Verden*, bind 10, side 371–379.
- [2] H. Tauber (1989) "Stabile isotoper sladrer om forhistoriske kostvaner", *Naturens Verden*, bind 7, side 258–265.
- [3] H. Tauber (1981) "¹³C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark", *Nature*, bind 292, side 332–333.
- [4] D. Dahl-Jensen, K. Mosegaard, N. Gundestrup, G. D. Clow, S. J. Johnsen, A. W. Hansen og N. Balling (1998) "Past temperatures directly from the Greenland ice sheet", *Science*, 282, side 268–271.

- [5] J. Arneborg, J. Heinemeier, N. Lynnerup, H. L. Nielsen, N. Rud og Árný E. Sveinbjörnsdóttir (1999) "Change of diet of the Greenland Vikings determined from stable carbon isotope analysis and ¹⁴C dating of their bones", *Radiocarbon*, bind 41, side 157–168. Artiklen kan rekvireres i pdf-format fra forfatteren, jh@ifa.au.dk. Den vil senere blive lagt ud på AMS ¹⁴C laboratoriets hjemmeside www.c14.dk

Om forfatterne:

Jan Heinemeier er lic. scient. og lektor i fysik. Han er leder af AMS ¹⁴C dateringslaboratoriet, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Niels Rud er cand. scient. og lektor i fysik, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

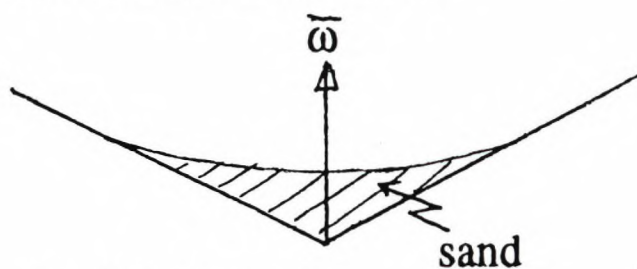
Breddeopgaver

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter.

Breddeopgave 5 og 6

Denne gang er der valgt to breddeopgaver ud. Opgave 5, som er fra sommereksamen 1996, hører til i den nemme afdeling. Opgave 6, som er fra sommereksamen 1999, er i modsætning hertil en af de matematisk besværlige inden for genren. De to opgaver bringes således sammen for at vise nogen om variationen i sværhedsgraden af opgaverne, som RUC's breddekursus er bygget op omkring.

Opgave 5 lyder: *Er modstanden størst i en 60 W's eller en 40 W's pære? Begrund svaret*



Figur 1. Tegning til opgave 6.

Opgave 6 lyder: *Hvor meget sand kan en glat roterende tragt (jvf. figuren) indeholde uden at der slyn- ges sand ud af tragten? Begrund svaret.*

Løsninger og kommentarer findes på side 26.

Dybfryseren i udhuset

I december-nummeret af KVANT stillede vi bredeop-

gaven (nr. 4):

Hvor mange gange større er strømforbruget om vinteren af en dybfryser placeret i køkkenet fremfor i udhuset? Begrund svaret.

Den udfoldede version af opgaven lyder:

Varmepumpen (kompressoren) i en dybfryser udfører pr. tidsenhed arbejdet A . Herved fjernes der pr. tidsenhed varmemængden Q_i fra dybfryserens indre, der har den absolutte temperatur T_i . Samtidigt afleveres der pr. tidsenhed varmemængden Q_o til omgivelserne, der har den absolutte temperatur T_o . Dybfrysertemperaturen T_i holdes konstant.

1) Hvor stor er A udtrykt ved Q_i og Q_o ?

Den størst mulige effektivitet af varmepumpen svarer til den situation, hvor entropien, der fjernes fra det indre af fryseren pr. tidsenhed, er lige så stor som entropien, der tilføres omgivelserne pr. tidsenhed.

2) Hvor stor er Q_o udtrykt ved Q_i , T_i og T_o i dette grænsetilfælde?

3) Hvor stor er A udtrykt ved Q_i , T_i og T_o i grænsetilfældet?

Varmemængden, der skal fjernes fra fryserens indre pr. tidsenhed, er lig med den varmemængde, der siver ind fra omgivelserne gennem isoleringen pr. tidsenhed. Denne antages at have størrelsen $K(T_o - T_i)$, d.v.s. proportional med temperaturforskellen mellem det indre og omgivelserne. Proportionalitetskonstanten K afhænger af isoleringen af dybfryseren.

4) Hvor stor er A udtrykt ved K , T_i og T_o ?

Størrelsen af $T_o - T_i$ er om vinteren ca. 40 grader, hvis dybfryseren er placeret i køkkenet, og ca. 20 grader, hvis dybfryseren er placeret i udhuset.

5) Hvad er forholdet mellem strømforbruget, eller rettere sagt A , ved de to placeringer?

Fortsættes side 26.