

Anvendelse af iltisotoper i klimaforskning

Carsten Israelson

Hvad er isotoper?

Atomkerner består af positivt ladede **protoner** (Z) og neutrale **neutroner** (N). Atomkernerne er omringet af en sky af negativt ladede **elektroner**. Atommassen (A) er defineret som summen af protoner og neutroner:

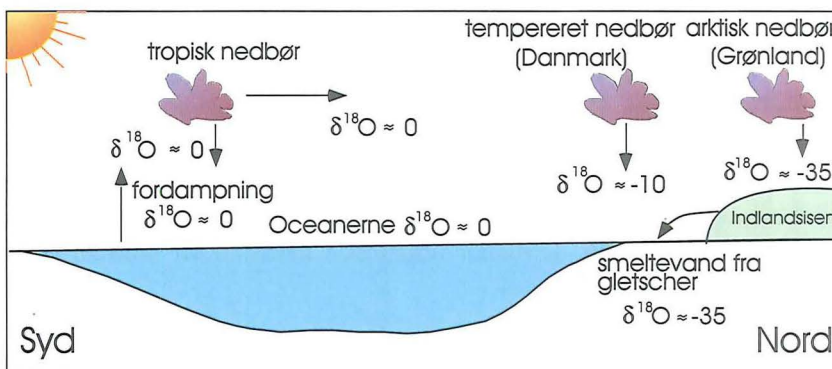
$$A = Z + N$$

Et grundstof er karakteristisk ved antallet af protoner, som definerer dets plads i det periodiske system. Antallet af neutroner kan imidlertid variere og grundstoffer med samme antal protoner, men forskelligt antal neutroner, kaldes **isotoper**. Studiet af isotoper har stor betydning i geologi, fordi der i naturen forekommer **fraktionering** af forskellige isotoper af det samme grundstof. Fraktionering mellem forskellige mineral-, gas- og vandfaser skyldes, at visse - termodynamiske - processer er afhængige af massen af atomerne. Fraktionering er derfor først og fremmest temperaturafhængig, og forholdet mellem forskellige isotoper i et mineral, en gas- eller vandfase kan således fortælle noget om oprindelsen og dannelsesstemperaturen.

Da Harold C. Urey i 1934 fik Nobelprisen for opdagelsen af brintisotopen deuterium, var det starten på en udvikling, der senere skulle få stor betydning for geologien. Urey og kollegaer identificerede i 40'erne iltisotoperne og foreslog for første gang, at der kunne være fraktionering af isotoper ved udfældning af kalciumkarbonat fra en vandfase. **Isotopgeologi** er nu en gren af den mere traditionelle geologi og et vigtigt værktøj i tolkningen af geologiske processer. Massespektrometre til måling af isotopforhold i grundstoffer er blevet bedre og billigere i løbet af de sidste 25 år, og dette har betydet en rivende udvikling indenfor isotopgeologien. Især indenfor klimaforskning og hydrologi har anvendelsen af iltisotoper, som denne artikel handler om, betydet et gennembrud.

Ilt (eller oxygen) er nok det grundstof, som er bedst studeret med hensyn til dets isotopiske sammensætning. Den indlysende grund er, at

det er det mest almindelige grundstof på jorden, og at det indgår i vand og mange vigtige mineraler. Grundstoffet ilt (O) har plads nummer 8 i det periodiske system, hvilket betyder, at det har 8 protoner i sin atomkerne. Der findes 3 naturligt forekommende iltisotoper med atommasserne 16, 17 og 18, hvilket vil sige, at deres atomkerne indeholder henholdsvis 8, 9 og 10 neutroner. Af disse udgør ^{16}O 99,63% medens ^{17}O og ^{18}O kun udgør henholdsvis 0,0375% og 0,1995%.



Skematisk syd-nord profil af det hydrologiske kredsløb og iltisotopsammensætning.

Iltisotoper i det hydrologiske system

Ilt findes i mange naturligt forekommende forbindelser, hvoraf vand (H_2O) er den mest almindelige. Fraktionering af iltisotoper i vand sker gennem fordampning og ved kondensation af vanddamp.

Medens iltisotopsammensætning af havvand stort set er den samme overalt, udtrykt som $\delta^{18}\text{O} = 0$, er $\delta^{18}\text{O}$ værdierne i nedbør negative (se indsat boks). Fraktionering af iltisotoper i nedbør sker gennem fordampning og kondensation. De tre vigtigste faktorer der påvirker iltisotopsammensætningen af nedbør er **temperatur-, højde- og breddegradseffekten.**

Iltisotopforholdet beskrives ofte som en såkaldt delta-funktion (δ). Delta defineres som en promille - ‰ - forskel i forholdet $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ af en standard:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{prøve}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \right] / \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \times 1000$$

For vand udtrykkes den isotopiske sammensætning som promille af standarden **SMOW** som står for 'Standard Mean Ocean Water'. SMOW standarden har et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ forhold tæt på havvand, og en havvandsprøve vil derfor have en $\delta^{18}\text{O}$ værdi tæt på 0. En prøve som er relativt beriget i ^{16}O i forhold til havvand, som f.eks. en regnvandsprøve, vil have negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier.

Iltisotopsammensætningen af karbonater beskrives som promille af standarden **PDB** (Pee Dee Belemnite). Den kretassiske belemnit, der var den oprindelige standard, er forlængst brugt op, men alle karbonatanalyser refereres stadig i forhold til den. En kalkskallet organisme eller anden karbonat udfældet i havvand vil normalt have $\delta^{18}\text{O}$ værdier mellem 0 og +4.

Højde- og breddegradseffekten er begge et resultat af den såkaldte 'rain-out effekt'. Nedbør, der kondenserer fra en vanddamp, vil nemlig være beriget i den tunge ^{18}O isotop (positive $\delta^{18}\text{O}$ værdier), hvilket igen betyder, at $\delta^{18}\text{O}$ værdien i den resterende vanddamp vil være mere negativ (beriget i ^{16}O). Nedbøren bliver derfor mere ^{18}O fattig (mere $\delta^{18}\text{O}$ negativ) jo længere væk fra dens oprindelsessted den falder. Eftersom det meste vanddamp dannes i troperne, hvor temperaturen og dermed fordampningen er størst, får nedbøren mere negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier, jo længere nordpå den falder. Det samme gør sig gældende, når regnskyer driver ind over en bjergkæde eller en anden topografisk forhøjning og tvinges til at afgive sit vand. Det sidste vand i regnskyen, som falder højst oppe i bjergene, vil have mest negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier.

I praksis betyder højde- og breddegradseffekten, at nedbøren i troperne har $\delta^{18}\text{O}$ værdier omkring 0, mens nedbøren i Danmark har $\delta^{18}\text{O}$ værdier omkring -10. Nedbør med de mest negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier findes højst mod nord. Sne med $\delta^{18}\text{O}$ værdier helt ned til -50 er målt på toppen af den grønlandske indlandsis, hvor både breddegradseffekten og

højdeeffekten virker optimalt. Smeltning af sne og is fra store gletschere som den grønlandske indlandsis kan have stor betydning for den isotopiske sammensætning af overfladevandet i de nordlige havområder. Overfladevandet i Norskehavet og Grønlandshavet har således $\delta^{18}\text{O}$ værdier mellem 0 og -4.

Temperatureffekten betyder, at forskellen i isotopisk sammensætning mellem nedbør og vanddamp er afhængig af temperatur, således at fraktioneringen er mindre jo højere temperaturen er. Nedbør, som falder det samme sted og som er påvirket af den samme højde- og breddegradseffekt, vil have forskellige $\delta^{18}\text{O}$ værdier afhængig af lufttemperaturen. Nedbøren vil være mest negativ om vinteren, hvor lufttemperaturen er lavest og mindre negativ om sommeren, hvor lufttemperaturen er højest. Opdagelsen af temperatureffekten har betydet et gennembrud for studiet af klimaet gennem den sidste mellemistid-istid-mellemistids cyklus. Den meste berømte lokalitet for disse studier er den grønlandske indlandsis. Sneen, som senere er blevet til indlandsisen, er et 'lager' af nedbør fra de sidste 250.000 år. Eftersom højdeeffekten og breddegradseffekten stort set har været den samme for perioden, er variationer i sneens iltisotopforhold først og fremmest et udtryk for variationer i lufttemperaturen, da sneen faldt.

Iltisotoper i karbonat

Et andet vigtigt system, hvor iltisotoper har fundet anvendelse, er udfældning af kalciumkarbonat (CaCO_3) fra en vandfase. Dette er især vigtigt, når man studerer fossiler med karbonatskal. To faktorer styrer den isotopiske sammensætning af kalkskallede organismer: 1) $\delta^{18}\text{O}$ værdien i vandet som dyrene har levet i og 2) temperaturen. Forholdet mellem temperatur og isotopværdierne i vand og karbonat kan beskrives i palæotemperaturrelationen:

$$t (^{\circ}\text{C}) = 16,9 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_{\text{karbonat}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{vand}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{karbonat}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{vand}})^2,$$

hvor t er dannelsesstemperaturen for karbonaten. Dette betyder, at man kan bestemme palæovandtemperaturer ved at måle $\delta^{18}\text{O}$ værdien i fossiler, forudsat at man kender vandets $\delta^{18}\text{O}$ værdi (d.v.s. det vand dyret har levet i). Kender man derimod vandets temperatur eller kan

man antage, at den har været konstant gennem tiden, kan man bruge $\delta^{18}\text{O}$ værdien af karbonat til at bestemme variationer i vandets $\delta^{18}\text{O}$ værdi. Den sidste metode har fundet stor anvendelse ved studier af bentoniske (bundlevende) foraminiferer (mikrofossiler). I de tropiske oceaner kan man tilnærmelsesvis antage, at temperaturen ved havbunden har været den samme gennem Kvartærtiden. Variationen i $\delta^{18}\text{O}$ værdien af bentoniske foraminiferer er derfor udelukkende et resultat af variationer i oceanernes $\delta^{18}\text{O}$ værdi, som er direkte relateret til mængden af ^{16}O 'oplagret' i de polare iskapper. Variationen i den isotopiske sammensætning af bentoniske foraminiferer gennem tiden er derfor et udtryk for volumen af de polare iskapper. Volumen af ismasserne er styret af klimaet, og studierne af den isotopiske sammensætning af foraminiferer er derfor særdeles vigtig i klimastudier.



Figur 1: Det franske boreskib 'Marion Dufresne II' under det første IMAGE togt i GIN-havet i sommeren 1995. Skibet er udstyret med en moderne 'Piston'-prøvetager, der gør det muligt at tage uforstyrrede sedimentkerner af op til 50-60 meters længde.