

2011

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 4

GEOVIDENSKAB A

- NÅR JORDEN SKÆLVER
- JORDENS KLIMASYSTEM
- MODELLERING AF GRUNDVANDSSTRØMME
- JORDEN SOM VARMEKILDE

GEOVIDENSKABEN PÅ DAGSORDENEN

16. august 2011 var en skelsættende dag. Her blev et nyt fag i det almene gymnasium – Geovidenskab A – annonceret.

Geovidenskab er et fag på A-niveau med elementer fra gymnasiets to fag fysik og naturgeografi. Det vil give gymnasiet mulighed for at uddanne studenter med geovidenskabelig ballast, som er rustede til at føre samfundet gennem mange af dette århundredes naturbetingede kriser. Aldrig før har geovidenskaben betydet så meget for samfundet. Det gælder vore ressourcer: vand, energi, byggematerialer, mineraler og højteknologi, som vi hverken kan skabe, udnytte, forvalte eller forstå uden et godt fundament inden for geovidenskab.

De store katastrofer, medierne giver os indblik i, som jordskælv, tsunamier, orkaner, vandmangel og hungersnød, kan kun forstås gennem geovidenskaben. Det gælder også de højst ubehagelige, men dog mindre problemer, vi selv oplever, fx oversvømmelser, vand i kældre,

kraftige storme med afblæste tage og væltede træer, skred i kystklinerne eller manglen på vand til mark og have.

De naturgivne forhold danner også grundlag for menneskers tilpasningsmuligheder, bosættelse og migration og dermed for store ændringer i vore samfund.

Det nye fag er vigtigt, fordi alle må forholde sig til udviklingen i det globale såvel som vores lokale samfund. Geovidenskab er dermed en del af et moderne menneskes almindelige, et af gymnasiets vigtigste formål. Det er også et solidt udgangspunkt for senere at dygtiggøre sig inden for geovidenskab og gøre dette til sin karrierevej.

Geovidenskab A supplerer og udvider de muligheder, som de natur- og teknik-interesserede elever før kun havde inden for faget naturgeografi.

Vi, der underviser og uddanner elever eller aftager og beskæftiger studenter og kandidater inden for geovidenskab, hilser faget vel-

komment i gymnasiet og håber, at mange vil søge det.

Med dette nummer af Geocenter Danmarks blad Geoviden har vi – fra vores del af geovidenskaberne – søgt at give nogle smagsprøver på, hvad faget kan indeholde. Det er kun eksempler, da fagets indhold stadig er under udvikling og læseplanerne ved dette nummers tilblivelse er under udarbejdelse. Der er mange flere spændende geovidenskabelige historier på hylderne, som vi håber bladet giver indgang til.

Gefion Gymnasium har bofællesskab med Geocenter Danmark i København, og det giver mulighed for, at gymnasiet i det daglige kan eksperimentere med inddragelse af aftagere af faget. Denne understøttning af det nye fag vil vi gerne udbrede til alle gymnasier ved at stille vores viden og kommende erfaringer til rådighed.



JOHNNY FREDERICIA

Centerleder Geocenter Danmark



BIRGITTE VEDERSØ

Rektor Gefion Gymnasium

FAKTABOKS

Geovidenskab A er et naturvidenskabeligt fag på A-niveau i en studieretning i kombination med matematik på A-niveau og Kemi på B-niveau. Studieretningen giver direkte adgang til de fleste naturvidenskabelige, videregående uddannelser. Baggrunden for det ny fag er, at industri og forskningsinstitutioner i takt med samfundets udvikling efterspørger nye færdigheder hos nyuddannede. Derfor skal unges interesse for klima, energi, miljø og Jordens ressourcer styrkes. Fagets kerneområder forventes at omfatte:

- Jordens, livets og landskabernes udviklingsprocesser og udviklingshistorie
- Klima og klimaændringer. Natur- og samfundsmæssige faktorer, der påvirker klimaet
- Vand, vandressourcer og deres udnyttelse
- Produktion, teknologi og energiresourcer

GEOVIDENSKABELIGE HISTORIER – LIGE TIL AT TAGE NED FRA HYLDERNE

Jordens, livets og landskabernes udviklingshistorie:

- SOLSYSTEMET. Fra altings oprindelse til livets opståen (2006, 3)
- JORDENS INDRE. Dybe processer i Jordens indre; Jordens øvre kappe; Jordskælv som måleredskab (2005, 4)
- De ældste sten – det ældste liv (2002, 1)
- GULDFUND OG PLADETEKTONIK (1999, 3)
- VULKANER. Hvorfor smelter jorden nogle steder? Vulkaner i Nordatlanten og i Danmark; m.m. (2007, 4)
- DANMARKS GEOLOGISKE UDVIKLING FRA 1.450 TIL 2,6 MIO. ÅR FØR NU (2010, 2 og 3)
- DE SENESTE 150.000 ÅR I DANMARK. Istidslandskabet og naturens udvikling (2005, 2)
- LANDSKABETS UDVIKLING I DANMARK. Fra natur til kulturlandskab m.m. (2007, 1)
- VADEHAVET. Dannelse og processer; Barrierekysterne; Marsken; Udvikling ved stigende havspejl (2009, 1)
- SKAGEN ODDE – et fuldskala, naturligt laboratorium (2004, 1)
- BORNHOLM – SKÅNE REGIONENS TEKTONISKE UDVIKLING (2011, 1)
- LIVETS HISTORIE. Prækambrium og Phanerozoikum. Fra det tidligste liv til den moderne fauna (2008, 3 og 4)
- DARWIN. Bl.a.: 'Deep time' – Geologisk tid; Hvordan opstår atoller; Evolutionsteorien (2009, 4 og 2010, 1)
- RADON OG RADIOAKTIVITET I DANSKE BJERGARTER OG SEDIMENTER (2010, 4)
- SEKVENSTRATIGRAFI. En god metode til efterforskning af råstoffer (1998, 1)



Klima og klimaændringer. Natur- og samfundsmæssige faktorer, der påvirker klimaet:

- KLIMÆNDRINGER I FORTID OG NUTID (2011, 3)
- KLIMA. Klimaproblematikken og kulstofkredsløbet (2006, 2)
- VULKANER, IS OG KLIMA (2000, 4)
- FORTIDENS DRIVHUSVERDEN. Indsigt for fremtiden (2006, 4)
- OCEAN, IS OG KLIMÆNDRINGER. Verdenshavets "klima-maskine"; Grønlands Indlandsis og klimaet (2009, 3)
- Klimaændringer og fattigdom i Sahel (2008, 2)
- ISKAPPEN der forsvandt og genopstod (1998, 2)
- GEOLOGISK LAGRING AF CO₂ – et bidrag til fremtidens energipolitik (2004, 2)

Vand, vandressourcer og deres udnyttelse:

- Ressourcen vand (2008, 1)
- Fremtidens vandressourcer i Danmark (2009, 2)
- VANDRESSOURCER. Udnyttelse af vand i store flodbassiner (2006, 1)
- VANDRESSOURCER. Det 21. århundredes hovedproblem? (1997, 2)
- FERSKVAND. Samfundets vigtigste ressource (2001, 1)



Produktion, teknologi og energiressourcer:

- Ressourcer – bæredygtig brug af energi og råstoffer (2008, 1)
- Olieefterforskning i Vietnam – jagten på det sorte guld (2008, 2)
- OLIE OG GASEFTERFORSKNING I NORDSØEN (1996, 2+3)
- DEN SKJULTE GULDGRUBE. Råstoffer på havbunden (1998, 4)



Det hele kan findes på:

www.geocenter.dk/publikationer/geoviden

NÅR JORDEN SKÆLVER

Jordskælv er en vigtig og uundgåelig del af livet på Jorden. Årsagen til jordskælvne skal findes i bevægelser dybt nede i undergrunden, hvor stærke naturkræfter arbejder. Jordskælv kan ikke forudsiges, men ved at studere jordskælvenes forekomst og hyppighed, samt hvordan rystelserne dæmpes eller forstærkes af forskellige geologisk lag i undergrunden, kan vi beskytte os imod jordskælv og i høj grad forebygge humane katastrofer.

PLADER I BEVÆGELSE

De store litosfæreplader, som udgør Jordens ydre skal, bevæger sig i forhold til hinanden – i forskellige retninger og med forskellige hastigheder. Det er langs pladernes kanter, at de fleste og de største jordskælv finder sted. Hvis alle pladerne bevægede sig i samme retning og med samme hastighed, ville der ikke opstå de voldsomme sammenstød, som giver os kraftige jordskælv.

Pladerne er den øverste del af de varmestyrte strømninger, som foregår i Jordens kappe.

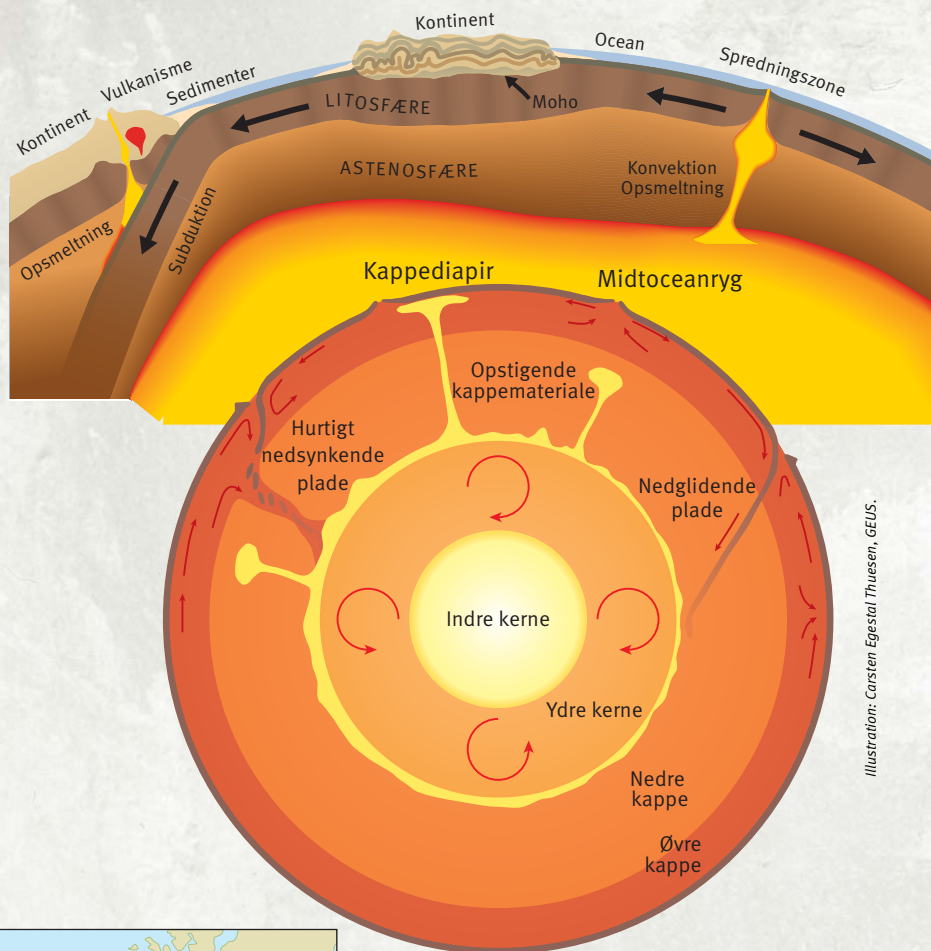
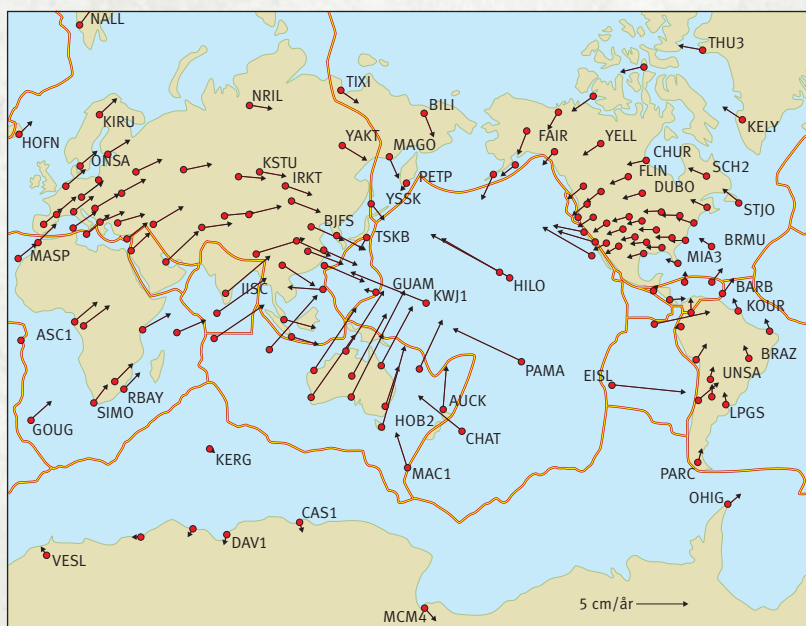


Illustration: Carsten Egesten Thuesen, GEUS.



De største og væsentligste litosfæreplader er indtegnet med rødt på kortet. Pladernes bevægelser kan måles direkte på et verdensomspændende netværk af GPS-stationer. Den målte pladehastighed er markeret med en hastighedsvektor ud for hver målestation.

Jordens indre lag er kortlagt ved hjælp af studier af jordskælvsbølger.

Der er en meget stor mængde varme i Jordens indre, som bevæger sig mod overfladen. Noget af varmen stammer fra dengang Jorden blev dannet for 4,6 mia. år siden. Resten af varmen kommer fra henfald af radioaktive elementer. Temperaturen i Jordens kappe er ikke høj nok til at smelte den, men det faste kappemateriale kan alligevel krybe ganske langsomt, med få centimeter pr. år. Strømningerne styres af termisk konvektion: varmt – og dermed let – materiale stiger opad, mens koldt (og tungt) materiale synker nedad. Litosfærepladerne er den kolde del af Jordens varmepumpe.

TINE B. LARSEN

Seniorforsker, GEUS
tbl@geus.dk

TRINE DAHL-JENSEN

Seniorforsker, GEUS
tdj@geus.dk

PETER H. VOSS

Seniorforsker, GEUS
pv@geus.dk

Pladerne kan ikke glide frit i forhold til hinanden. Der er en enorm gnidningsmodstand mellem de op til ca. 250 km tykke plader. De kræfter, som stammer fra strømningerne, skal overvinde gnidningsmodstanden før bevægelsen kan udløses, og ofte sker det ved at en forkastning nær pladegrænsen brister og forskydes, fordi den udgør det svageste område. Disse pludselige forskydninger er jordskælv.

TUSINDVIS AF JORDSKÆLV

Jorden rammes hvert år af tusindvis af jordskælv. De fleste jordskælv er små og kan kun registreres på fintfølende seismografer. Men der kommer også mange store jordskælv og antallet er nogenlunde stabilt fra år til år. Det er de færreste jordskælv, som kommer til offentlighedens opmærksomhed. Faktisk hører vi kun om de ganske få jordskælv, som har en negativ indvirkning på mennesker. Når flere jordskælv inden for kort tid har ramt tæt bebyggede områder med ringe byggestandard, kan det opleves som om antallet af kraftige jordskælv er i stigning.

Men det er ikke tilfældet. I gennemsnit rammes Jorden hvert år af ca. 15 jordskælv som er mindst 7,0 på Richterskalaen, og i gennemsnit registrerer vi hvert år et jordskælv som er mindst 8,0.

Jordskælv i gennemsnit pr. år siden 1900

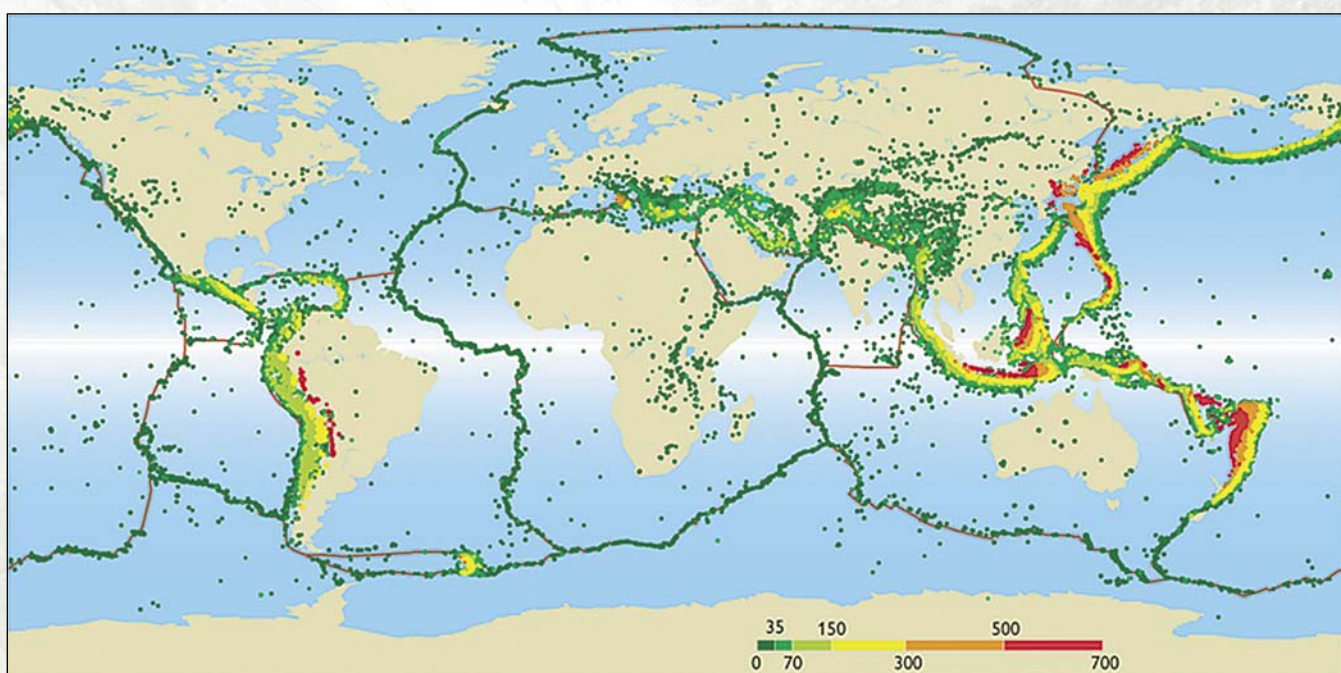
Jordskælv pr. år	Richtertal (M)
1	8 og større
15	7-7,9
134	6-6,9
1.319	5-5,9
13.000	4-4,9
130.000	3-3,9
1.300.000	2-2,9

Tal fra USGS

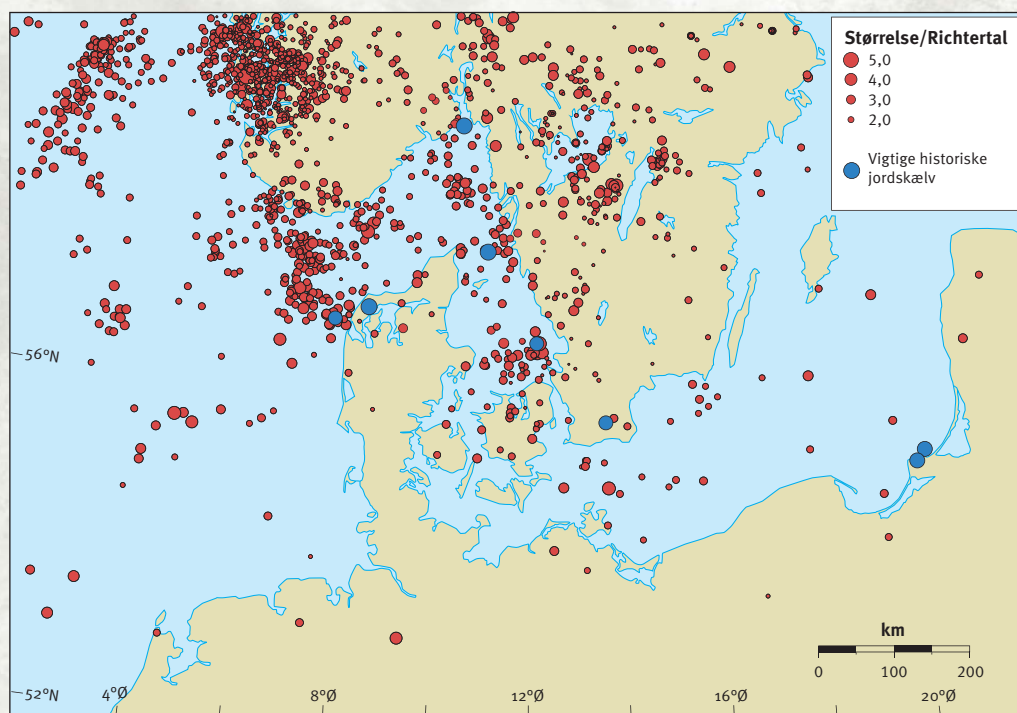
Det er de færreste jordskælv, som påvirker mennesker direkte, og det er forskelligt fra land til land, hvor kraftigt et jordskælv kan være uden at skabe problemer for befolkningen. Nogle lande, som fx Japan og USA er godt forberedte på kraftige jordskælv og har skrappe bygge-

standarder, som sikrer at huse enten bliver stående, eller falder sammen på en måde, der sikrer at flest mulige overlever, hvis uheldet skulle være ude. Det er dyrt at bygge med god jordskælvssikring, og derfor ses det største tab af menneskeliv i forbindelse med jordskælv i fattige lande, hvor byggestandarden er ringe. For eksempel kostede jordskælvet i Haiti d. 12. januar 2010 over 300.000 mennesker livet, selvom det kun målte 7,0 på Richterskalaen.

De mange jordskælv er udtryk for at planeten Jorden er dynamisk og levende. Den aktive pladetektonik sørger for at vedligeholde topografien på jordoverfladen med bjergkæder og dybhavsgrave. Hvis ikke pladetektonikken arbejdede og sørgede for løbende at presse bjergtinderne opad, ville erosion fra vind og vejr med tiden reducere dem til grusbunker. I sidste ende ville alle kontinenter blive slidt ned og kloden ville overalt være dækket af hav. Så selvom jordskælv kan være både farlige og generende, er de en del af processen, der er med til at opretholde livsbetingelserne på vores planet.



Et kort over alle registrerede jordskælv i en periode på tre måneder tegner et net, som tydeligt viser hvor pladegrænserne ligger. Prikkernes farve viser i hvilken dybde (km) jordskælvet epicenter ligger.



30 års jordskælvsaktivitet i og omkring Danmark.

Illustration: Peter Voss, GEUS.

OVERLEVELSE

Jordskælv kan forekomme overalt på Jorden, men der er stor forskel på, hvor kraftige jordskælv man vil forvente i forskellige områder. De kraftigste jordskælv udløses på eller nær pladegrænserne, hvorimod jordskælv langt fra de aktive zoner typisk både er mindre og sjældnere. For eksempel befinder Danmark sig langt væk fra de nærmeste pladegrænser, som ligger henholdsvis i Atlanterhavet og i Middelhavet. Det kraftigste jordskælv, vi har registreret på dansk område, målte således kun 4,7 på Richterskalaen. Det fandt sted i 1985 og havde sit epicenter i Kattegat.

Da det er dyrt at sikre bygninger mod kraftige jordskælv, er det vigtigt at kende jordskælvsrisikoen i et givet område så godt som muligt, så jordskælvssikringen svarer til de rystelser, der kan forventes. Der er mange faktorer at tage højde for. Først og fremmest skal *seismiciteten* - eller jordskælvshistorien - kortlægges. Det vil sige, at det skal undersøges hvor mange og hvor kraftige jordskælv, der tidligere har ramt et område. Pladetektonikken opererer over geologiske tidsskalaer, men vi har kun målte data fra de seneste ca. 100 år. Vi kan derfor ikke være sikre på, at målingerne giver det fulde billede af seismiciteten. Det er muligt at studere historiske beretninger ca. 1000 år tilbage og på den måde få kendskab til kraftige jordskælv over en lidt længere tidsskala. I nogle tilfælde efterlader jordskælv langtidsholdbare spor i geologien, så jordskælvshistorien kan beskrives endnu længere tilbage, men det kan være svært at afgøre

om en forstyrrelse, der kan aflæses i de geologiske lag, typisk en forkastning eller et stort jordskred, er sket pludseligt, altså i form af et jordskælv, eller om der er tale om langsomme bevægelser over længere tid.

Udover seismiciteten er det nødvendigt at studere undergrundens reaktion på rystelserne fra jordskælv. Nogle kombinationer af geologiske lag dæmper rystelserne fra jordskælv, hvorimod andre kombinationer af geologi for-

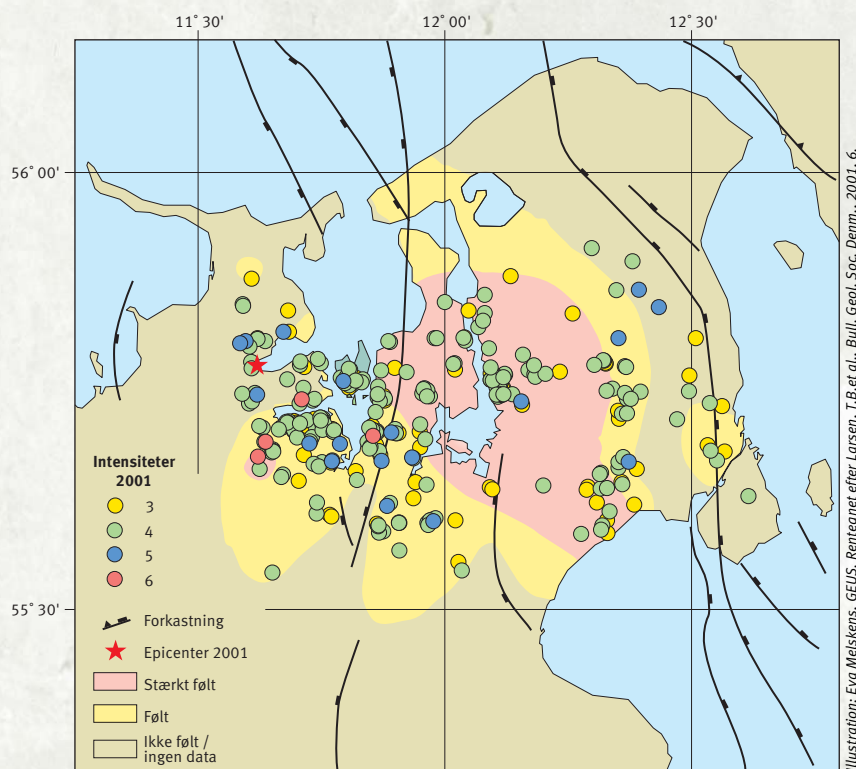


Illustration: Eva Malskens, GEUS. Rettegnet efter Larsen, T.B. et al., Bull. Geol. Soc. Danm., 2001, 6.

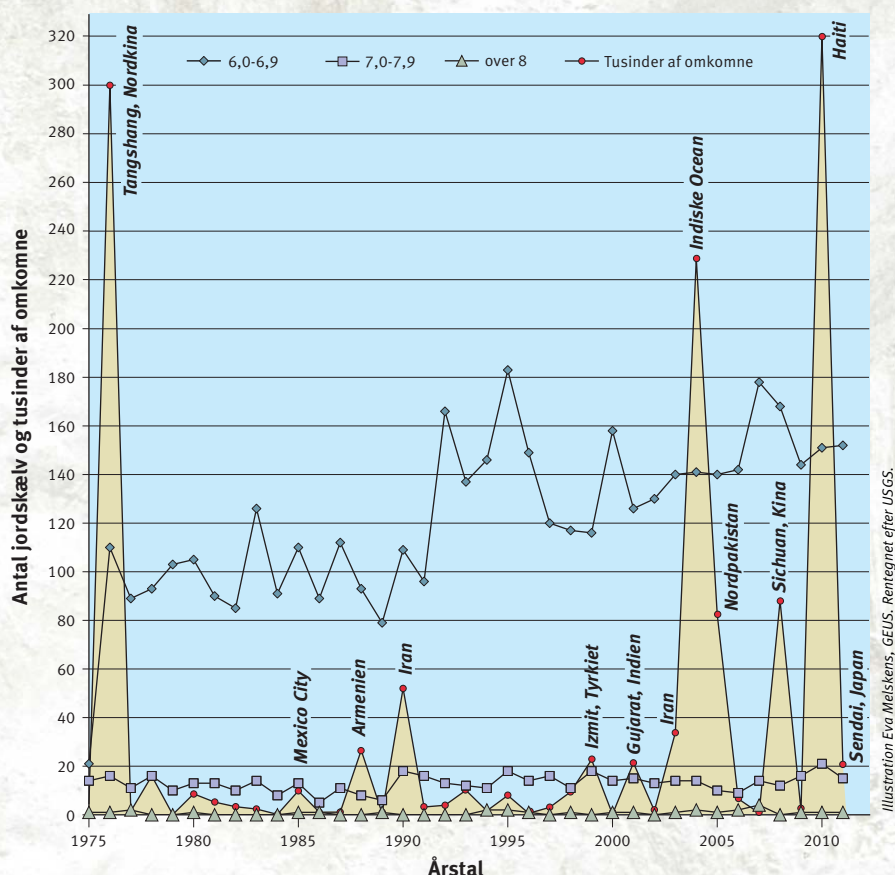
Undergrundens respons på to jordskælv, der ramte samme område af Sjælland i hhv. 1869 og 2001. Den gule og røde flade viser hvor jordskælvet i 1869 kunne mærkes, prikkerne viser hvor jordskælvet i 2001 kunne mærkes. Bemærk at der er en kile i den sydlige del af det berørte område, hvor ingen af jordskælvene kunne mærkes. Her dæmper undergrunden rystelserne.

stærker rystelserne. Det sidste er tilfældet både under Tokyo og Mexico City. Det er kompliceret at modellere rystelserne matematisk korrekt, men heldigvis er det muligt med hjælp fra offentligheden at kortlægge hvor kraftige rystelserne fra et jordskælv er i forskellige dele af et berørt område. Spørgeskemaundersøgelser er standard efter et jordskælv i de fleste lande, og ved at sammenligne, hvor meget husene knagede og løse genstande flyttede sig under et jordskælv, er det muligt at kortlægge rystelserne detaljeret uden brug af et fintmasket net af kostbare måleinstrumenter. Spørgeskemaundersøgelser er pt. den primære metode til kortlægning af undergrundens reaktion på rystelserne fra jordskælv i Danmark, hvorimod mere jordskælvsplagede lande som fx Japan er udstyret med et meget stort antal avancerede måleinstrumenter, fx accelerometre.

Jordskælvsforudsigelser har ikke vist sig at være brugbare til beskyttelse af menneskeliv og ejendom. Trods årtiers forskning i forudsigelser er der ikke sket et gennembrud på dette område. Der er jævnligt forskere som hævder, at de har fundet en forudsigelsesmetode, der fungerer, men når det kommer til stykket, er det helt tilfældigt om forudsigelserne holder stik eller ej. Derimod redder omhyggelige risikovurderinger af et område kombineret med fornuftige byggestandarder, ikke blot 10.000-vis af menneskeliv, men også hjem og arbejdspladser.

JAPAN 2011

Japan er et af de lande i verden som er bedst sikret mod jordskælv. Jordskælvsrisikoen i hele landet er nøje kortlagt, bygninger er sikret mod selv kraftige jordskælv, og høje diger langs kysterne bremser tsunamier. Alligevel gik det galt, da et meget kraftigt jordskælv, som målte 9,0 på Richterskalaen, ramte ud for Japans kyst d. 11. marts 2011. Risikovurderinger havde forinden konkluderet, at man maksimalt kunne forvente et jordskælv på 8,2 og at en tsunami ikke kunne overskylle digerne. Den undervurderede risiko udstiller svagheden ved de nuværende metoder til risikovurdering, som lægger megen vægt på seismiciteten det seneste århundrede, hvorfra vi har data målt med videnskabelige instrumenter. Siden har det vist sig at det samme område blev ramt af et tilsvarende kraftigt jordskælv og tsunami i år 869, men den oplysning var ikke tilstrækkeligt indarbejdet i risikovurderingerne.



Antallet af jordskælv er stabilt fra år til år, hvorimod antallet af omkomne varierer voldsomt alt efter hvor uheldigt jordskælvene rammer. Der er tilsyneladende et spring i antallet af jordskælv i størrelsen mellem 6,0 og 6,9 på Richterskalaen i begyndelsen af 1990'erne, men det skyldes ikke at der er kommet flere jordskælv. Det højere niveau af registrerede jordskælv i denne størrelsesklasse skyldes at der kom mange flere måleinstrumenter af bedre kvalitet fordelt over hele Jorden.

Til trods for den undervurderede risiko blev formodentlig 100.000-vis af menneskeliv reddet af den japanske jordskælvsikring. Bygningerne var i stand til at modstå de kraftige rystelser fra jordskælvet, således at menneskeliv kun gik tabt i de områder tsunamien overskyllede. Selv i de områder, hvor tsunamien hærgede, reddede mange mennesker livet fordi sirener advarede om vandets komme og fordi japanerne vidste præcis, hvad de skulle gøre, da alarmen gik. Ca. 20.000 mennesker mistede livet til tsunamien, men det kunne være gået meget, meget værre.

SEISMOLOGENS ARBEJDE

Seismologi er et meget internationalt fag. Rystelserne fra jordskælv respekterer ikke landegrænser, og traditionen med omfattende internationalt samarbejde går mere end 100 år tilbage. Jordens landoverflader er i dag dækket af tætte netværk af seismografer, der sender

data til internationale datacentre. Danmark bidrager til den internationale overvågning med seismografer i både Danmark og Grønland. Sammen med resten af verdens nationer er vi med til at sikre, at et større jordskælvs epicenter er beregnet inden for ca. 10 minutter, uanset hvor på kloden det er sket. På den måde kan nødstedte mennesker hurtigt få hjælp – også når den lokale infrastruktur og kommunikationslinjerne er brudt ned.

SUPPLERENDE LÆSNING

- **Den Dynamiske Jord**
(GEUS og Danmarks Rumcenter)
- **Tema: Jordskælv i Japan.**
Geologisk Nyt nr. 3, 2011

JORDENS KLIMASYSTEM

Jordens klima kan beskrives i forskellige skalaer, fx ud fra globale vindsystemer, regionale regntider eller lokale temperaturforhold. Processerne er i fysisk forstand de samme, men de arbejder uafhængigt af størrelsesforhold og kan have vidt forskellige konsekvenser for forskellige egne af verden. Føl-somme økosystemer såsom Arktis, med en be-grænset mængde sollys eller egne som Afrikas Horn, med en begrænset mængde nedbør, kan blive forholdsvis hårdere ramt af udsving i vejret og klimaet end mere robuste økosyste-mer, til tider med voldsomme følger for befolk-ningen i disse områder.

Ordet *klima* kommer fra græsk, hvor det hen-viser til Jordaksens hældning ift. Jordens bane omkring Solen. Når ordet klima benyttes i dag, henviser det til et gennemsnit af de fysiske for-hold i vores atmosfære et givent sted. Oftest tages gennemsnittet over en 30-årig periode, som efterfølgende kaldes en *normalperiode* – altså det normale klima i måleperioden. Af samme grund kan man ikke tale om klimafor-andringer, blot fordi Danmark har haft to kolde vintre i træk, som det var tilfældet i 2009–2011. De atmosfæriske forhold over kortere perioder kalder vi *vejret*.

Eftersom Solen er langt den vigtigste kilde til Jordens energi, er det også Solen, der påvir-ker Jordens klima mest. At Jorden hælder i for-hold til Solen betyder, at nogle områder til-føres mere energi per areal (fx ækvator) end andre (fx polerne), hvilket igen medfører tem-peraturforskelle mellem områderne. Imidlertid ville temperaturforskellen mellem polerne og ækvator være betydeligt større, hvis ikke So-lens tilførte energi blev fordelt rundt på kloden af strømninger i atmosfæren og oceanerne. Ud-over Solen, atmosfæren og oceanerne er Jor-dens iskapper og landmasser de mest afgøren-de faktorer for klimaet på Jorden.

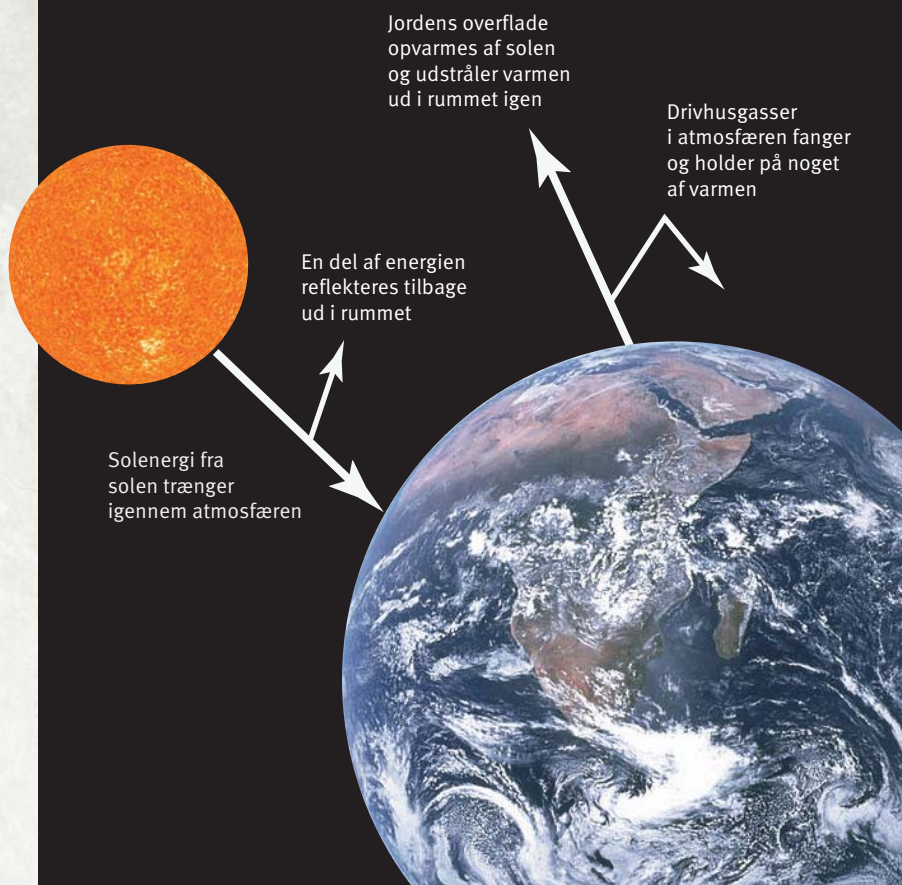
ATMOSFÆRISK CIRKULATION

Atmosfæren og drivhuseffekten er afgørende for, at Jorden har en temperatur, som muliggør at liv kan være til stede. Men hvis der ingen cir-

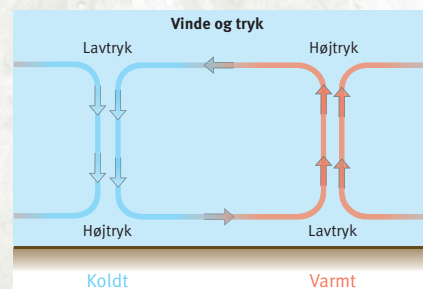
kulation var i atmosfæren, ville kulden og var-men være endnu mere skævt fordelt, end det er tilfældet nu. Uden atmosfærisk cirkulation vil-le gennemsnitstemperaturen ved polerne om vinteren fx være nærmere $\pm 100^{\circ}\text{C}$ end de $\pm 25\text{--}30^{\circ}\text{C}$, vi måler i dag.

I store træk opstår den atmosfæriske cirku-lation på to måder: dels ved temperaturfor-skelle på Jordens overflade, dels ved luftmas-sernes bevægelse i atmosfæren. De steder, hvor overfladen varmes mere op end andre ste-der, vil der opstå et underskud af luft ved jord-

Drivhuseffekten



Drivhusgasserne, hvoraf de mest betydningsfulde er vanddamp (H_2O), kuldioxid (CO_2), metan (CH_4) og latter-gas (N_2O), tillader Solens indkommende kortbølgede stråling at nå jordoverfladen. Her vil noget lys absorberes, og efterfølgende udsendes til atmosfæren som langbølget varmestråling. Drivhusgasserne holder fast på var-mestrålingen, og uden dem ville gennemsnitstemperaturen på Jorden være ca. 33°C koldere, og Jorden ubeboe-lig for mennesker. Den del af sollyset, der reflekteres tilbage uden at blive absorberet, varmer ikke atmosfæren op. Iskapper reflekterer størstedelen af lyset der falder på dem tilbage til rummet, og køler dermed kloden ned.



Skitse af atmosfærisk cirkulation, drevet af temperatur-forskelle. Luftmolekylerne i kold luft ligger tættere end i varm luft, hvorfor kolde luftmasser synker ned. Det modsatte gælder for varm luft.

ANDREAS WESTERGAARD-NIELSEN

Ph.d.-studerende, IGG

awn@geo.ku.dk

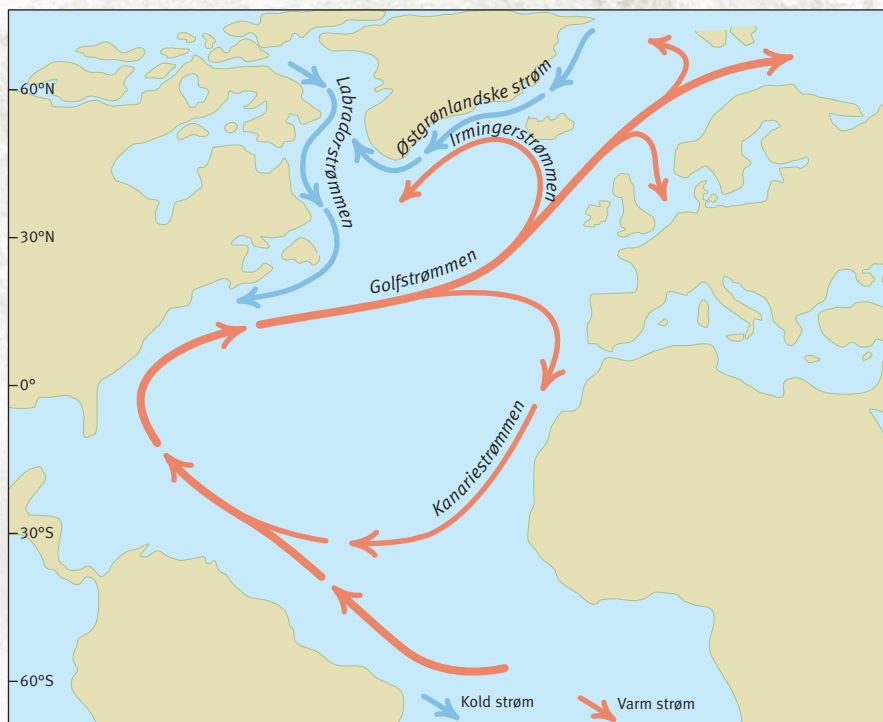


Illustration Eva Mølskens, GEUS. Kilde: DMI.

Havstrømme i Atlanten og Norskehavet. Røde pile er varmt overfladevand, mens de blå er kolde dybhavsstrømme.

overfladen, fordi varm luft stiger til vejrs og efterlader et undertryk (lavtryk). Det skabte lavtryk får omkringliggende køligere luftmasser til at strømme til ved jordoverfladen. I højden vil den opadstigende varme luft imidlertid danne et overtryk (højtryk) og presse luftmasser hen mod områder med lavere tryk i højden. Derved skabes cirkulation, eller *vind*. Det modsatte gør sig gældende over kolde overflader, hvor kold luft vil søge nedad. Det er derfor, at der kan opstå vinde i en stor lukket hal, hvis den fx varmes op i den ene ende. Den anden måde, hvorpå der opstår cirkulation, er når luftmasserne først er sat i bevægelse. Når luftmassen har fået bevægelsesenergi kan den danne høj- og lavtryk, der ikke er temperaturbestemte, men dannes af luftmassernes bevægelser, også kaldet deres dynamik. Fænomenet kan sammenlignes med det lavtryk, der opstår bag en bil i bevægelse.

Når cirkulationen er igangsat vil luftmasserne således fordele varmen og kulden rundt på kloden.

OCEANERNES PULS

Også oceanerne har en cirkulation, der drives af temperaturforskelle. Koldt vand synker til bunds fordi det har en højere massefylde end varmt vand. I stedet strømmer varmt vand til i

havets overflade for at opfylde det underskud af vand der opstår, når det kolde vand synker.

Havstrømmene er dog også påvirkede af forskel i saltindhold. Jo mere salt vandet indeholder, jo tungere bliver det. Et område med koldt vand og højt saltindhold synker således meget hurtigt, og kan trække store mængder varmere vand til i overfladen. Dette er tilfældet ud for Grønlands østkyst. Her pumpes op mod 100 millioner m³ vand rundt i sekundet, og pumpen hjælper bl.a. med at trække Golfstrømmen og dens varme vand fra Caribien op forbi Vesteuropa. De globale havstrømme er derfor afgørende for fordelingen af Jordens varme, og dermed vores klima. Hvis ikke varmen fra *Golfstrømmen* blev ledt forbi Danmark, ville vores gennemsnitstemperatur fx være ca. 5°C koldere, svarende til klimaet i Island.

ISKAPPER SOM REFLEKSER

En tredje vigtig faktor for det globale klima er områder dækket af sne og is. På land drejer det sig om gletsjere og iskapper og på havet om havis. Jorden opvarmes af det sollys, der kommer gennem atmosfæren, og som ikke forsvinder ud igen. Is og sne reflekterer en stor del af solindstrålingen tilbage til rummet, og på grund af atmosfærens og oceanernes fordeling af varme, køler iskapperne hele kloden

ned. Andelen af sollys, der reflekteres fra en given overflade, måles som fladens *albedo*. Lyse overflader har en høj albedo, mørke overflader såsom bar jord har en lav. Ren sne og is har en albedo mellem 0,70–0,95, dvs. at 70–95 % af lyset der rammer overfladen kastes tilbage til rummet.

Hvis en gletsjer smelter tilbage fordi atmosfæren bliver varmere, vil overfladens albedo falde idet jorden under gletsjeren blotlægges. En mindre andel af Solens lys kastes tilbage og bliver i stedet til varme i atmosfæren. Denne varme kan få gletsjeren til at smelte hurtigere, og derved skabes en selvforstærkende effekt, kaldet *feedback*. Forståelse af feedback-mekanismer er afgørende for vores viden om global opvarmning; vi mangler dog stadig viden om mekanismernes udbredelse og hastigheder, og derfor har man intensiveret forskningen på det område.

Udbredelsen af gletsjere og flerårig havis bliver globalt set mindre, hvilket har forskellige konsekvenser. Flere steder udgør gletsjere drikkevandsforsyning for dyr og mennesker (fx i Perus' Andesbjerge) og havisen levesteder for fx isbjørne. Omvendt er der også interesser i tilbagesmeltingen af havis, såsom skibsfarten der kan sejle ad nye ruter uden is. Gletsjere og havis i de polare områder vil dog ikke forsvinde helt, da områderne ikke tilføres energi fra Solen i vinterhalvåret; temperaturerne er så lave at der altid vil dannes ny is.

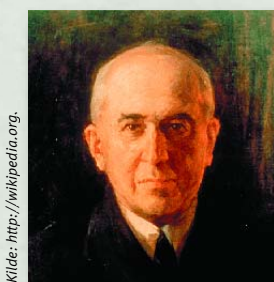
LANDMASSER

Feedback ses også i varme områder, hvor det fx kan resultere i ørkenspredning. Vegetation som skove er afkølede og fugtgivende fordi vegetation *transpirerer*, dvs. afgiver vanddamp til atmosfæren. Man kan sige at overflader med vegetation kan svede. I områder hvor vegetation fjernes, som ved intensiv skovdrift, vil temperaturen derfor stige endnu mere om dagen, og for et afskovet område kan det betyde, at klimaet bliver for varmt og tørt til, at ny skov kan dannes. Vegetation, dyr, mennesker, iskapper osv. påvirker på den måde klimaet, ligesom klimaet påvirker os. Se også boksene på de næste to sider.

EN NY ISTID

Jorden har været gennem en række istider, hvor gletsjere har dækket store dele af bl.a. Nordeuropa. I 1941 fremlagde Milutin Milankovitch en teori, der forklarede istidernes opståen og forsvinden: Jorden bevæger sig i en svagt elliptisk bane om Solen, så den i nogle perioder er tættere på Solen end i andre. Desuden er der slinger i Jordens rotationsakse, ligesom en snurretop, samtidigt med, at Jordens rotationsakse hælder i forhold til Jordens bane om Solen. Tilsammen bestemmer de tre bevægelsesmønstre, at istider gennem de sidste ca. 2,5 mio. år har vekslet med mellemistider. Istiderne varer ca. 100.000 år og mellemistiderne (den tilstand vi har nu) har typisk været 10.000–30.000 år. Vi har allerede overskredet tidspunktet for, hvornår Jorden måtte forventes at få en ny istid – nogle forskere mener sågar, at den globale opvarmning har medvirket til at udsætte en istid der ellers ville have været en realitet i dag.

Omvendt kan et varmere klima også udløse en istid: hvis havet omkring Østgrønland bliver varmere, vil cirkulationen i Atlanten svækkes, og der vil komme mindre varmt havvand fra Caribien op forbi Nordvest-europa. Det kan betyde at en ny istid udløses i Nordeuropa.



Kilde: <http://wikipedia.org>.

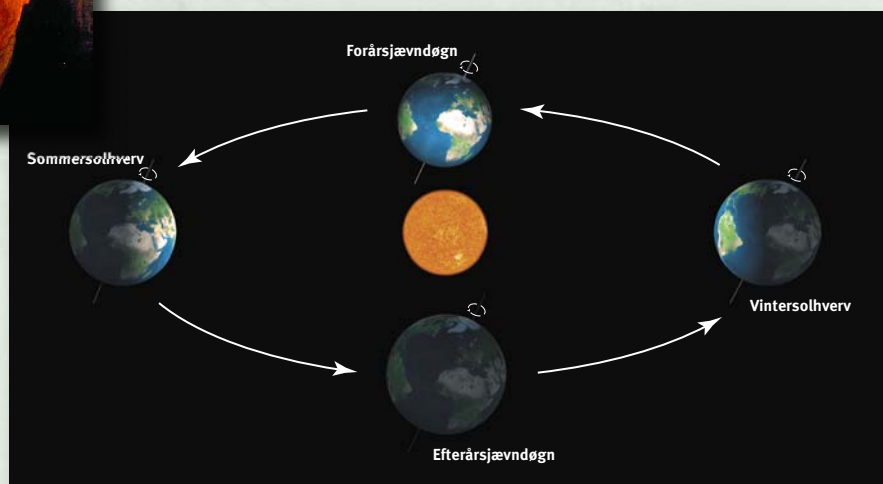


Illustration: Carsten Egestal Thuesen, GEUS.

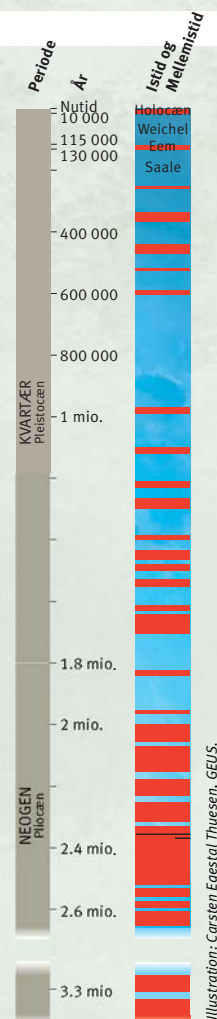


Illustration: Carsten Egestal Thuesen, GEUS.

EL NIÑO OG LA NIÑA

I Stillehavet omkring ækvator blæser vestgående passatvinde varmt overfladevand fra Sydamerikas vestkyst over mod Indonesien og Australien. Ved Sydamerika presses efterfølgende køligere og næringsholdigt vand fra dybden op mod overfladen; processen kaldes *upwelling*. Det varme vand ved Indonesien giver nedbør til området, mens det kolde vand ved Sydamerika nærer dyrelivet i havet. Sommetider svækkes passatvindene, hvilket medfører at en bølge af varmt vand vandrer tilbage til Sydamerikas kyst, hvor det giver kraftig nedbør, samtidigt med at den normale *upwelling* ophører. Den øgede nedbør skaber oversvømmelser i Sydamerika, mens fraværet af *upwelling* har negative konsekvenser for fiskeriet i regionen. Tilsvarende får Indonesien og Australien ofte tørke, med fejlslagen høst og skovbrande som følge. Andre regioner i verden påvirkes også, fx er der øget sandsynlighed for en mild vinter så langt borte som i Alaska og Canada. Hele klimafænomenet kaldes *El Niño*. Det sker omkring juletid, og navnet henviser således til Jesusbarnet. Det opstår tilfældigt med 2–7 års mellemrum, men nyere forskning antyder, at det kan blive hyppigere som følge af global opvarmning.

Efter et *El Niño*-år følger ofte et år med *La Niña*: en tilstand hvor havet ved Sydamerikas vestkyst køles længere ned end normalen. *La Niña* medfører også udsving i det regionale vejr, fx skyldes den udbredte tørke på Afrikas Horn i 2011 delvist *La Niña*.

El Niño

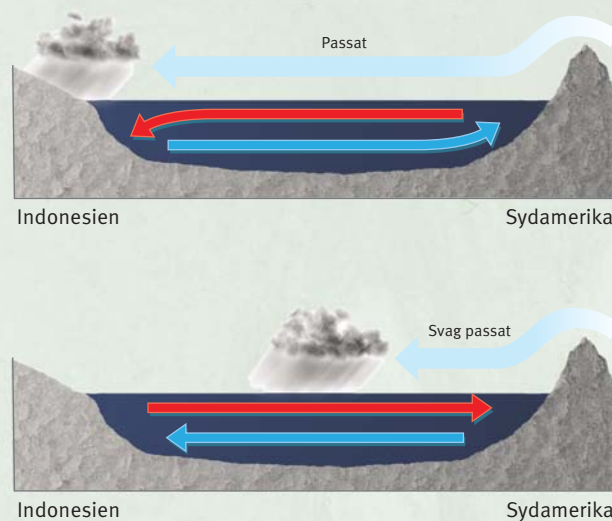


Illustration: Stefan Søllberg, GEUS. Renegat efter A. Melsen, Geol. Nyt 3/98.

Den normale og *El Niño*-tilstanden i Stillehavet. Fænomenet har været kendt af fiskere i Sydamerika gennem århundreder, men de involverede klimaparametre er først blevet beskrevet inden for de seneste 30 år.

DET REGIONALE VEJR: GRØNLAND OG ETIOPIEN

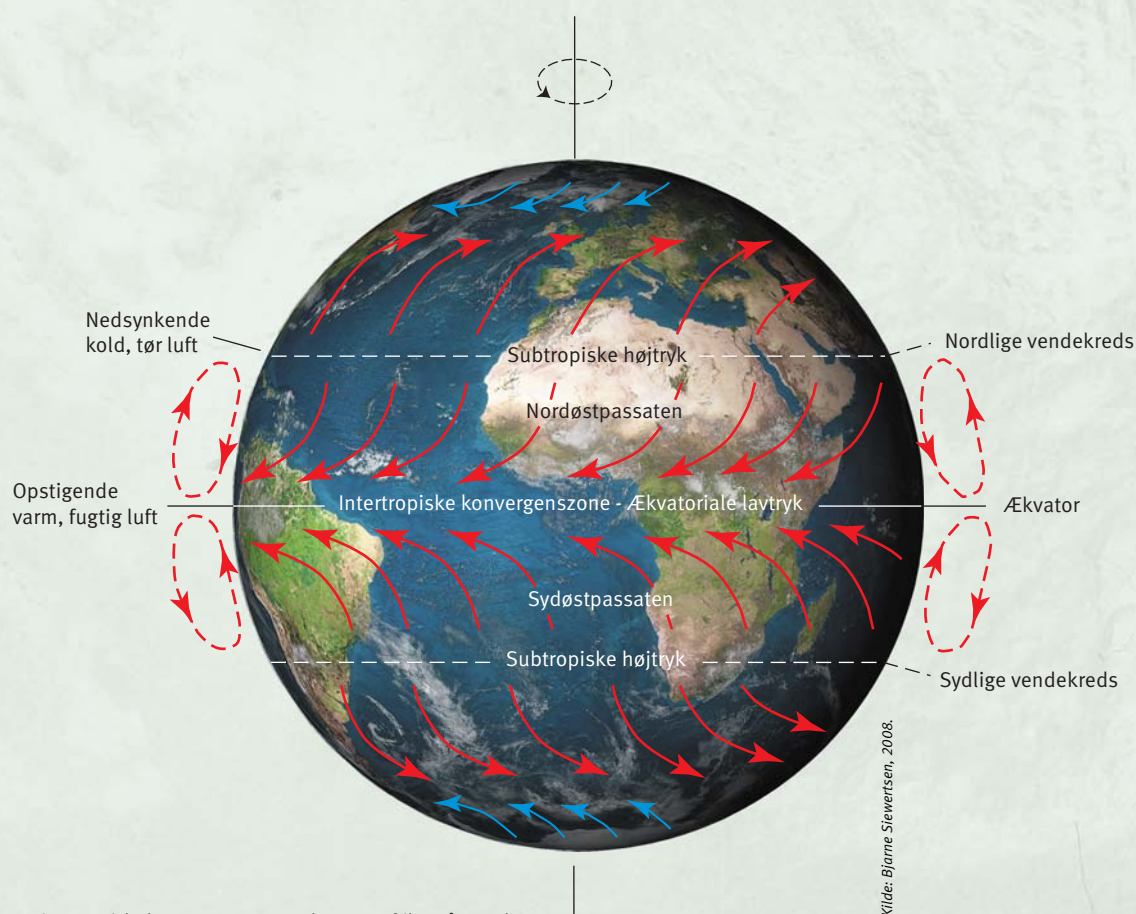
Det herskende regionale vejr bestemmes af, hvilke overflader vindene har bevæget sig over, før de når regionen. Det afgørende er, om vindene er fugtige eller tørre, og om de er varme eller kolde. To eksempler kan illustrere dette:

Kangerlussuaq, Grønlands vestkyst, vejret den 12. juli, 2011:

Let skydække, ingen nedbør og lav luftfugtighed. Solen skinner døgnet rundt, temperaturen når op på rekordhøje 22°C. Vinden blæser svagt fra øst.
Fra Kangerlussuaq kan man se ind til Indlandsisen, så afstanden er kort. Sædvanligvis søger luftmasser fra Indlandsisen ud mod kysten, fordi isen køler luften ned. Kold luft har en højere massefylde end varm luft, og synker derfor nedad. Samtidigt er klimaet tørt i Kangerlussuaq fordi den kolde luft kan indeholde mindre vand end hvis den havde været varm. Den 12. juli er atmosfæren over Indlandsisen imidlertid usædvanligt varm, og vejret derfor lidt atypisk: der opstår i stedet en svag vestenvind fra havet ind mod Kangerlussuaq. Luften fra havet er lidt fugtigere, så der skabes et tyndt skydække. Samtidig er luften varmere, og fordi den ikke fortrænges af kold luft fra Indlandsisen, får Solen og vinden mulighed for at varme Kangerlussuaq op til 22°C – den næsthøjeste temperatur målt i byen.

Fik-regionen, centralt i Etiopien, vejret den 20. juli, 2011:

Klar himmel, ingen nedbør og lav luftfugtighed. Solen er oppe mellem ca. 06:10 og 18:50, temperaturen er flere steder 30°C. Svag vind fra nord.
Størstedelen af nedbøren i Etiopien falder i juli og august. Sommeren 2011 var en undtagelse, hvor hele Afrikas Horn oplevede en omfattende tørke. Forklaringen skal delvist findes i globale klimafænomener: omkring ækvator blæser passatvinder mod sydvest på den nordlige side og mod nordvest på den sydlige side. Det område, hvor passaterne mødes, kaldes den intertropiske konvergenszone (ITK). Når ITK er over havet dannes en fugtig opadstigende luftmasse, der bringer store mængder nedbør med sig. I juli befinder den sig normalt over Etiopien, men en kraftig La Niña fra 2010 påvirkede ITK-zonen så den ikke bevægede sig over Etiopien, og nedbøren udeblev. Tørkens omfang blev samtidigt forværret af høje temperaturer i regionen, og kombinationen har medført en fejlslagen høst med efterfølgende hungersnød for millioner af mennesker.



Den intertropiske konvergenszone ses her over Afrika. På grund af Jordens rotation om sin egen akse, vil både Nordøstpassaten og Sydøstpassaten blæse mod vest.

Kilde: Bjarne Siewertsen, 2008.

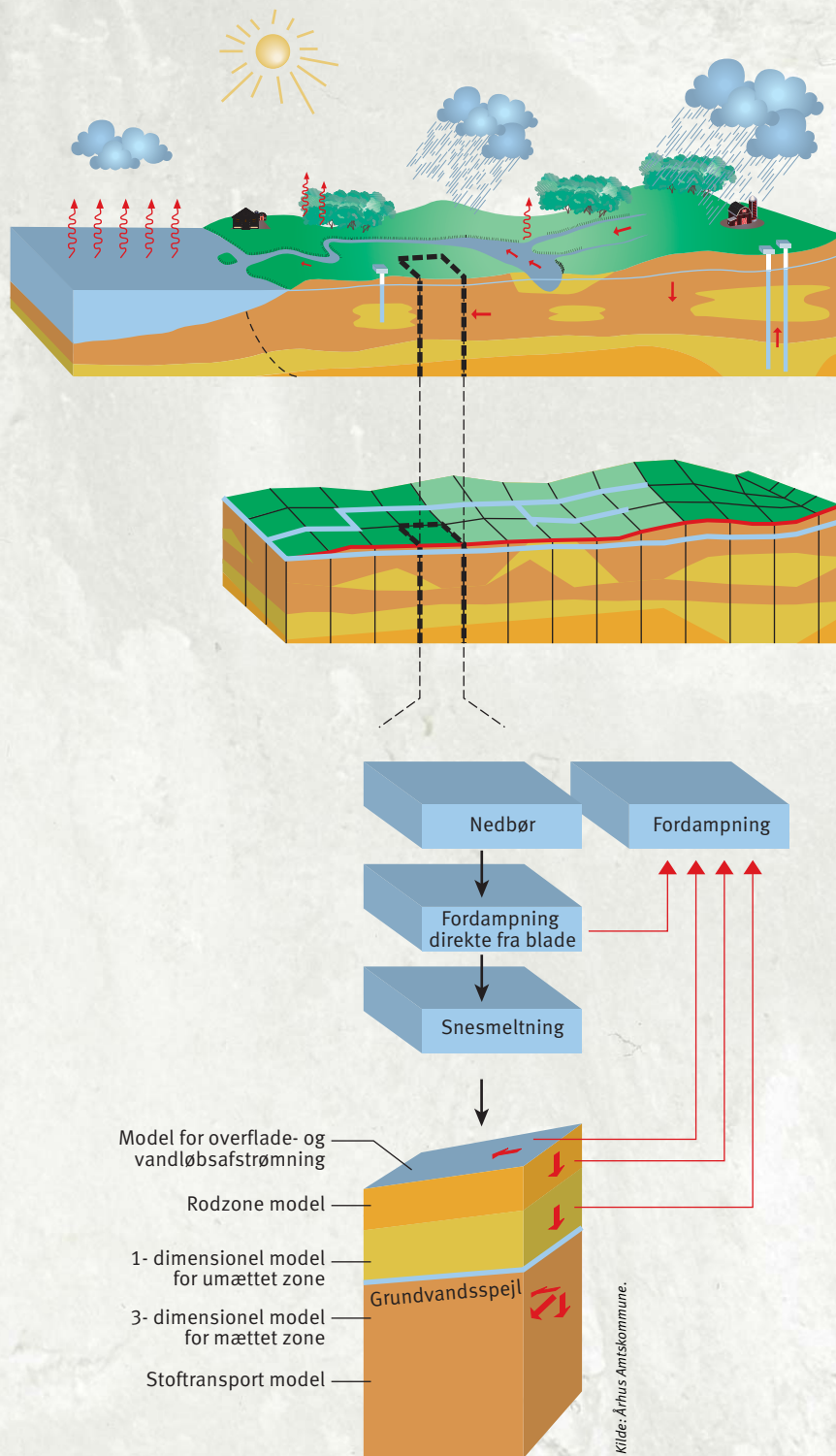
MODELLERING AF GRUNDVANDSSTRØMME

Både samfundet og naturen i Danmark er stærkt afhængig af grundvand. Det er derfor vigtigt at sikre, at der dels er tilstrækkeligt med grundvand til både mennesker og natur, dels at grundvandet er rent nok til at kunne bruges både som drikkevand og til dyr og planter. For at vurdere, hvordan grundvandet strømmer, er det nødvendigt at anvende modeller, der kan beskrive hvordan og hvor meget grundvand der dannes og hvilke strømningsveje grundvandet følger i undergrunden. Ved anvendelse af grundvandsmodeller er det muligt at opnå forståelse for, hvordan samfundets aktiviteter påvirker mængden og kvaliteten af grundvandet.

Lad os først se på hvad grundvandsstrømning er. Grundvandsstrømning kan beskrives med en ligning, der kan sammenlignes med Ohms lov. Hastigheden, hvormed vandet strømmer, q , er proportional med hældningen på grundvandsspejlet J og givet ved grundvandsligningen (Darcy's lov)

$$q = -\frac{J}{R_s}$$

R_s er en proportionalitetsfaktor, der udtrykker, hvor stor modstanden for vandstrømningen er (her benævnt strømmodstanden). Hældningen på grundvandsspejlet J kan sammenlignes med hældningen på jordoverfladen, og grundvandet vil strømme i denne retning, 'ned ad bakke'. Den højde, som grundvandsspejlet er beliggende i, er et udtryk for vandets energitilstand: jo højere beliggenhed, desto større potentiel energi. Energimængden er en lineær funktion af højden. Hastighederne, hvormed grundvand strømmer, er normalt så små, at den kinetiske energi er ubetydelig sammenlignet med den potentielle energi. Derfor kan vandets energitilstand karakteriseres alene ud fra beliggenheden. Da vandet vil søge fra højt mod lavt energiniveau, vil vandet strømme fra områder, hvor grundvandsspejlet ligger højt til steder, hvor det ligger lavt – det strømmer med andre ord ned ad bakke. Ved hjælp af



Principskitse for opbygning af grundvandsmodeller, hvor undergrunden opdeles i en række kasser.

TORBEN OBEL SONNENBORG

Seniorforsker, GEUS

tso@geus.dk

grundvandsligningen kan vandets hastighed beregnes, hvis der er information om grundvandsspejlets beliggenhed og modstanden R_S .

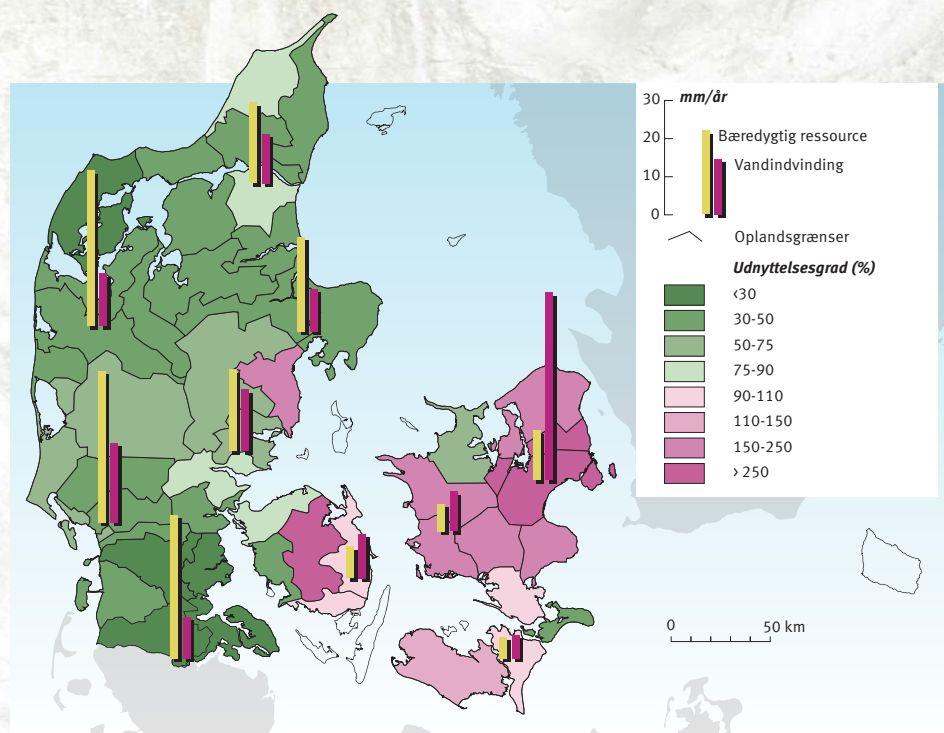
STRØMNINGSMODSTAND

Strømningsmodstanden R_S afhænger af den geologiske opbygning. I størstedelen af Danmark er undergrunden opbygget af grus, sand og ler med variabel kornstørrelse. Grundvandet strømmer i hulrummene mellem kornene, og des større hulrum des lavere vil strømningsmodstanden være. Hulrummenes størrelse kan variere markant mellem forskellige geologiske aflejringer, og derfor kan strømningsmodstanden variere ganske kraftigt afhængig af fordelingen af ler, sand og grus. I lerbjerg vil modstanden være meget stor, og det er derfor vanskeligt at få vandet til at flytte sig her. I modsætning hertil vil modstanden i grus være forholdsvis lille, og vandet bevæger sig derfor let gennem grusaflejringer. Dette udnyttes bl.a. når der indvindes vand fra undergrunden, hvor det altid er målet at finde aflejringer med grove korn, så det kan udnyttes som et såkaldt grundvandsmagasin. Når man udnytter et grundvandsmagasin, kan man (næsten) ikke undgå at ændre grundvandsspejlets beliggenhed. Ved anvendelse af grundvandsmodeller er det muligt at opnå forståelse for, hvordan indvindingen påvirker grundvandet.

GRUNDVANDSMODEL

Strømningsmodstandens rumlige variation komplicerer beregninger af grundvandsstrømning. For at kunne håndtere, at modstanden varierer fra sted til sted, er det nødvendigt at anvende computermodeller (såkaldte grundvandsmodeller), hvor undergrunden inddeles i et ofte stort antal (tusindvis) kasser, hvor der kan regnes på grundvandsstrømning fra kasse til kasse, se figuren på side 12.

Grundvandsligningen løses med andre ord for hver enkelt kasse. Grundvandsmodellen kan ved passende værdi for strømningsmodstand for den enkelte kasse tilnærmes den virkelige strømning i jorden. Ved at specificere i modellen, hvorfra der pumpes grundvand op, kan det beregnes, hvor den naturlige grund-



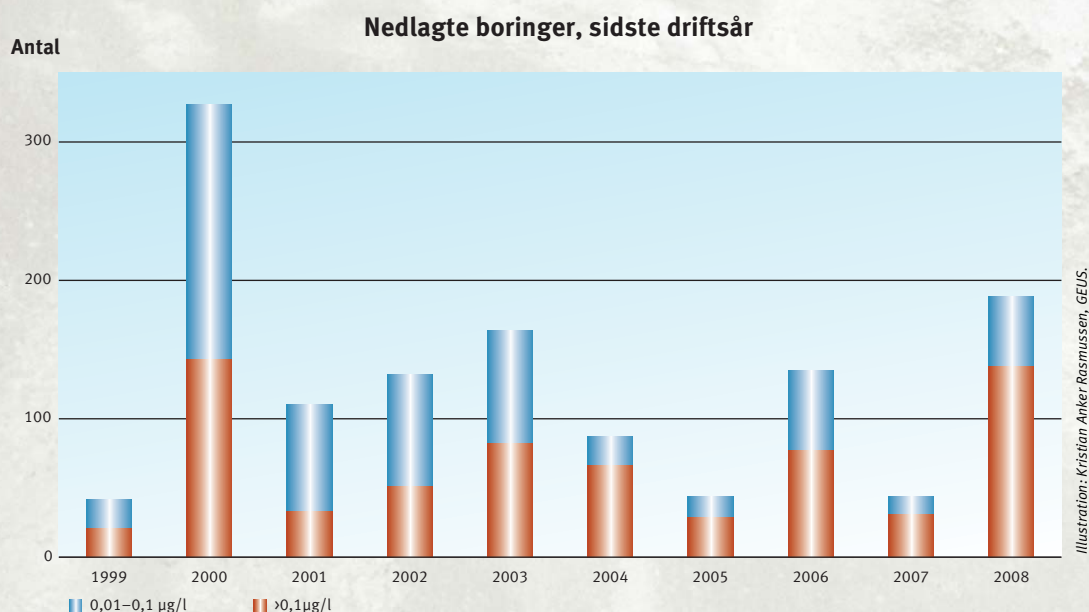
Bæredygtig vandressource i Danmark. Specielt omkring de største byer (København, Odense, Århus) sker der en overudnyttelse af grundvandsressourcerne, svarende til en udnyttelsesgrad på over 100%. Det skal bemærkes, at grundvandsindvinding til vanding af landbrugsafgrøder, som specielt kan være stor i Vestjylland, ikke er inkluderet i opgørelsen.

vandsstand vil blive påvirket af indvindingen. Hvis grundvandsstanden falder for meget, vil eksempelvis vådområder blive tørlagt eller vandløbenes vandføring vil blive mindsket, hvilket begge normalt vil have u hensigtsmæssige konsekvenser for økosystemet. Ved anvendelse af en landsdækkende grundvandsmodel er det opgjort, hvor meget grundvand der kan indvindes, uden at det får u hensigtsmæssige effekter på naturen. På figuren ovenfor ses en opgørelse af, hvor meget grundvand der indvindes i Danmark, sammenlignet med, hvor meget der er til rådighed/der gendannes, altså den bæredygtige ressource. Det ses, at der specielt på Sjælland indvindes mere end den bæredygtige vandmængde, dvs. udnyttelsesgraden er på over 100 %. I disse områder må det forventes, at grundvandsindvindingen tager så meget vand fra vandløb, vådområder og søer, at det kan få negative konsekvenser for plante- og dyrelivet.

FORURENING

En grundvandsmodel vil også kunne benyttes til at bestemme, hvor vandet, som pumpes op fra en given grundvandsboring, stammer fra. På grund af variationerne i jordmodstanden for forskellige geologiske aflejringer, kan det være næsten umuligt at bestemme vandets strømningsveje til en boring, der går ned til fx 100 m under jordoverfladen, hvis der ikke benyttes en model. Det er imidlertid vigtigt at vide, hvorfra vandet stammer, pga. forureningstrusler. Grundvandskvaliteten er truet primært fra to kilder: 1) Landbrugets gødsning med specielt nitrat samt anvendelsen af pesticider mod skadedyr og ukrudt, og 2) lossepladser og deponier primært i forbindelse med bysamfund og industri. Mens landbrugets forurening benævnes som en diffus forurening, dvs. den finder sted over store arealer, sker forureningen fra lossepladser og deponier fra nogle afgrænsede områder, hvorfor de benævnes punktkilder. For begge typer af

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.



Indvindingsboringer der er taget ud af drift i perioden 1999-2008 samt de målte pesticidkoncentrationer. Det er ikke oplyst, hvorfor de enkelte borer er lukket, men det må formodes, at de fleste borer, hvor pesticidkoncentrationen ligger over grænseværdien på 0,1 µg/l, er taget ud af drift netop pga. pesticider. (Grundvandsovervågning 2010).

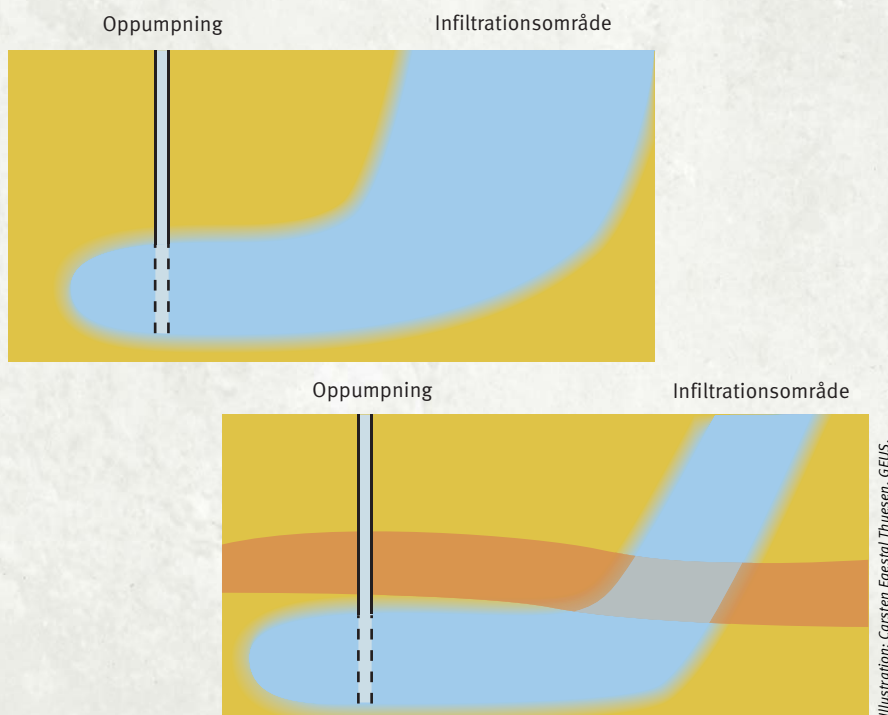
forurening gælder, at den transporteres med det nedsivende (infiltrerende) regnvand ned gennem grundvandsmagasinerne. Undervejs vil der ske en nedbrydning af forureningskomponenterne, hvor den for nogle vil forløbe relativt hurtigt, mens den for andre vil forløbe gan-

ske langsomt. Specielt pesticidforurening har vist sig at give store problemer for grundvandsindvindingen, som har medført, at et stort antal grundvandsboringer er blevet lukket de seneste årtier, se figuren ovenfor.

GRUNDVANDSBESKYTTELSE

For at sikre sig, at der kan pumpes rent grundvand op også i fremtiden, benyttes grundvandsmodeller i udpræget grad i Danmark til at forudsige, hvilke arealer der skal beskyttes, for at der også fremover kan pumpes rent grundvand op. Ved hjælp af grundvandsmodeller kan det vurderes, hvorfra det vand, som pumpes op i indvindingsboringer, kommer.

Det såkaldte infiltrationsområde, altså der hvor regnvandet siver ned og bliver til grundvand, kan ligge adskillige kilometer fra selve boringen, afhængig af den lokale topografi og de geologiske forhold. Hvis kvaliteten af det oppumpede vand skal sikres, er det nødvendigt at beskytte infiltrationsområdet. Frem til år 2015 gøres der i hele Danmark en stor indsats for at kortlægge, hvilke områder der er sårbare overfor forurening fra jordoverfladen, således at der kan træffes de nødvendige foranstaltninger for at opretholde en tilfredsstillende kvalitet af grundvandet.



Infiltrationsområde til indvindingsboring. Øverst ses infiltrationsområdet for et grundvandsmagasin, som kun består af sand, mens figuren nederst viser infiltrationsområdet for et grundvandsmagasin, der er placeret under et lerlag.

*Landskabet Nord for Fårevejle.
Foto: Peter Warne-Moors, GEUS.*



JORDEN SOM VARMEKILDE

Danmarks undergrund indeholder meget store geotermiske ressourcer i form af både dyb geotermi og overfladenær geotermi eller jordvarme. Ved dyb geotermi udnyttes meget varmt vand fra store dybder, mens jordvarmeanlæg benytter slanger i jorden eller grundvand til at optage varmen fra de øverste jordlag i kombination med varmepumpeteknologi. Udnyttelsen af ressourcen er endnu begrænset og for jordvarme mangler vi stadig viden og praktisk erfaring for at kunne udnytte ressourcen optimalt.

Danmarks undergrund indeholder meget store geotermiske ressourcer, som kan udnyttes i det meste af landet. Man skelner mellem dyb og overfladenær geotermi og vi har de sidste mere end 30 år gjort brug af begge ressourcer. Målt i antal af anlæg er der foreløbig kun gjort

brug af den dybe ressource i meget begrænset omfang. Den overfladenære ressource, i form af jordvarmeanlæg i kombination med varmepumper, benyttes i et større, men stadig begrænset, omfang. Det øgede fokus på CO₂-udledning og klimaforandringer samt afhængigheden af en begrænset mængde af fossile brændsler har imidlertid styrket interessen for geotermi som en vedvarende energikilde, der kan bidrage til opnåelse af Danmarks energipolitiske målsætninger om reduktion af CO₂-udslip og øget forsyningsikkerhed.

HVOR KOMMER VARMEN FRA

Temperaturen i Jordens indre, faste kerne er ekstremt høj, ca. 4300°C, men planeten afkøles langsomt ved transport af varme fra kernen og kappen og ud gennem skorpen, se figuren på side 4. Jorden, som er ca. 4,5 mia. år gammel, vil være afkølet på nogle få hundrede mio. år, hvis ikke det var for den varme, der frigives ved

henfald af radioaktive isotoper i Jordens indre, og som udgør en konstant varmekilde, der er med til at nedbremse hastigheden af Jordens afkøling. Udover den varme, der strømmer ud mod jordoverfladen, opvarmes de øverste jordlag også gennem optagelse af varme fra solindstrålingen og når vi etablerer jordvarmeanlæg, stammer varmen primært fra solindstråling og kun i meget lille grad fra varmeudstrålingen fra Jordens indre, se figuren nedenfor.

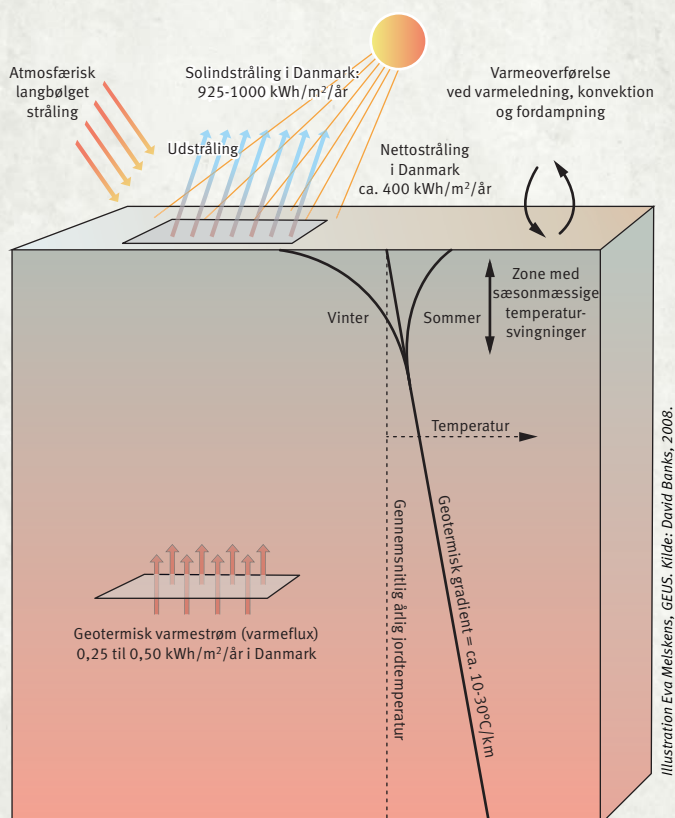
OVERFLADENÆR GEOTERMI (JORDVARME)

Hvor den dybe geotermi udnytter varmen fra Jordens indre direkte gennem oppumpning af meget varmt vand fra kilometer-dybe borer, udnytter den overfladenære geotermi den oplagrede varme i de øverste jordlag, baseret på en kombination af varmepumper og slanger i jorden til at optage varmen, eller varmepumper som optager varmen direkte fra oppumpet grundvand (se boksene).

Opvarmning ved hjælp af jordvarme er en klima- og miljøvenlig energiform. Ved udnyttelse af jordvarme produceres typisk 3–5 gange så meget energi, som der bruges i elektricitet til varmepumpen. Endvidere har en britisk undersøgelse vist, at CO₂-udledningen ved opvarmning baseret på jordvarme typisk er det halve af CO₂-udledningen ved opvarmning med fx naturgasfyrt. Hvis den strøm, der anvendes til varmepumpen, yderligere er helt eller delvist fremstillet af fx vindmøller ser CO₂-regnskabet endnu bedre ud.

Anlæg til indvinding af den dybe geotermiske energi er typisk af en størrelse, hvor flere tusinde husstande forsynes med varme, og udnyttes mest hensigtsmæssigt i kombination med eksisterende fjernvarme-infrastruktur. I modsætning hertil er jordvarmeanlæg typisk designet til forsyning af alt fra en enkelt husstand til større enkeltbygninger/bygningskomplekser.

Varmepumpeteknologi gør det muligt at dække behovet for både opvarmning og afkøling i fx større kontorbygninger, mens enfamiliehusstande typisk kun har behov for opvarmning. Jordvarme har således et stort potentiale både i forbindelse med fx skrotning af gamle



Fordelingen af solindstråling og varmestrømning (varmeflux) fra Jordens indre; årstidsvariationer i temperaturen i de øverste 10–20 m af jorden og den generelle temperaturgradient.

Illustration Eva Meisken, GEUS. Kilde: David Banks, 2008.

THOMAS VANGKILDE-PEDERSEN

Specialkonsulent, GEUS

tv@geus.dk

DYB OG OVERFLADENÆR GEOTERMI

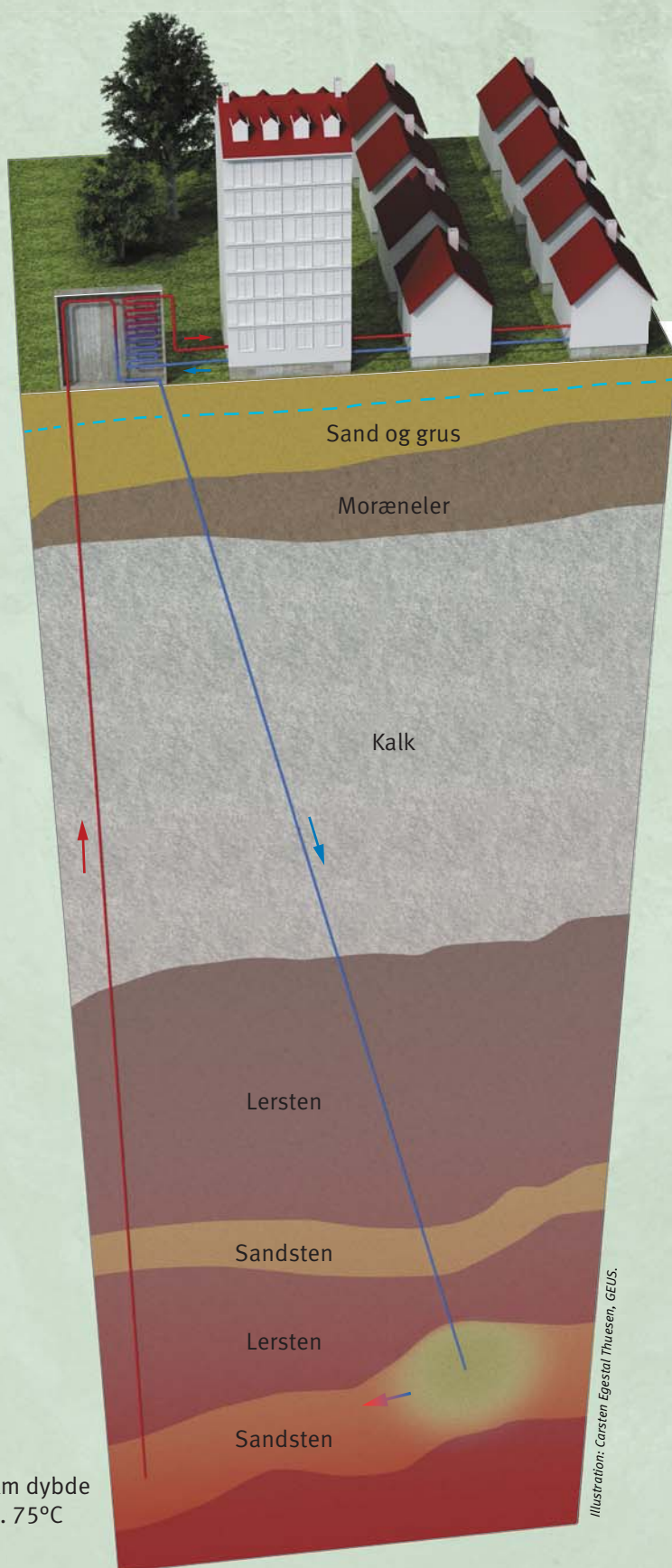
Dyb geotermi udnytter høje temperaturer (ca. 40–100°C) på stor dybde (ca. 1–3 km). Ved at etablere en produktionsboring i porøse bjergarter med vandfyldte porerum, fx sandsten, kan der oppumpes varmt vand; varmen udtrækkes gennem varmeveksling og ledes via det almindelige fjernvarmenet til forbrugerne. Det afkølede vand returneres herefter til de samme geologiske lag gennem en injektionsboring et stykke væk fra produktionsboringen, se figuren til venstre.

Overfladenær geotermi, jordvarme, udnytter lavere temperaturer; typisk 8–11°C svarende til ca. 0–100 meters dybde. En frostsikret væske cirkuleres i jorden i slanger og optager derved noget af den oplagrede varme fra de øverste jordlag. Varmen afgives herefter i en varmepumpe, som hæver temperaturen til brugsniveauet i husets varmeanlæg (se også boks om varmepumpens funktion). Den afkølede væske ledes tilbage til slangerne i jorden og optager på ny varme fra jorden.

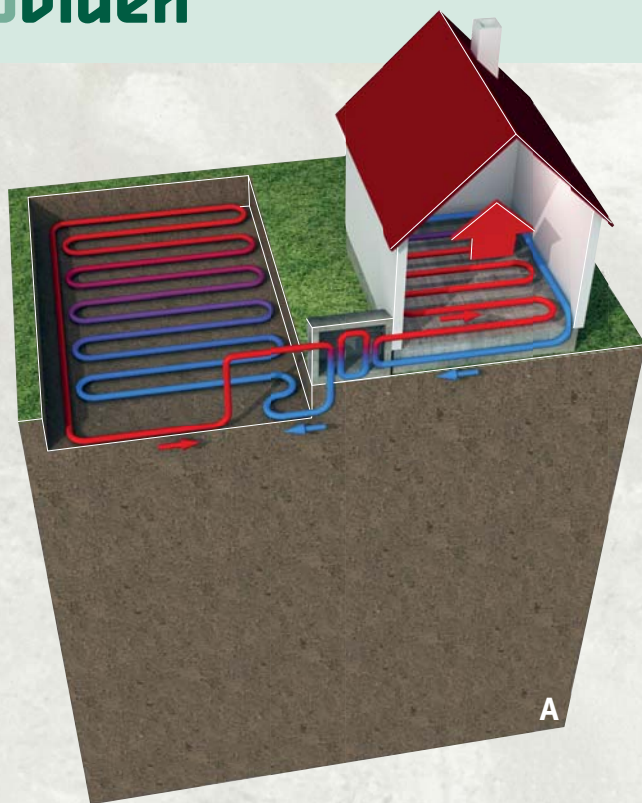
Det er også muligt at benytte oppumpet grundvand direkte som varmekilde til varmepumpen. Det afkølede eller opvarmede vand re-injiceres efterfølgende til de samme lag, ligesom det sker ved dyb geotermi.

På grund af de relativt lave temperaturer i jorden, kan jordvarmeanlæg også benyttes til køling ved at 'vende' funktionaliteten i varmepumpen, så den fungerer ligesom et køleskab eller en fryser. Det kan udnyttes i forbindelse med bygninger, som kræver opvarmning om vinteren og afkøling om sommeren eller i bygninger/anlæg, som udelukkende kræver køling.

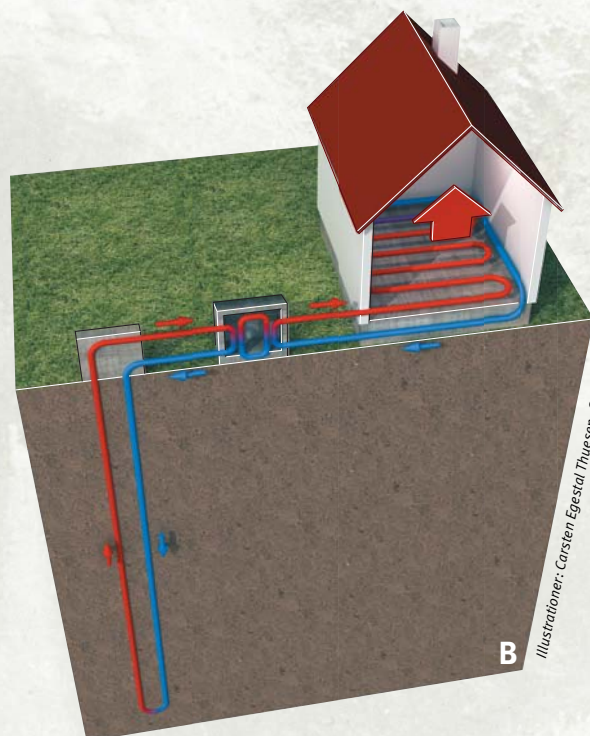
2,5 km dybde
ca. 75°C



For at udnytte den geotermiske varme, skal man bore to dybe huller på et sted hvor de geologiske forhold er optimale i form af porøse sandstenslag. Fra det ene hul pumpes varmt vand fra sandstenslaget op til overfladen, hvor man trækker varmen ud af vandet. Varmen overføres herefter ved hjælp af en varmeveksler til forbrugerne via fjernvarmenettet. For at sikre at trykket i sandstenslaget bevares uændret, pumpes det afkølede vand tilbage i sandstenslagene, ofte fra samme lokalitet på overfladen, men via en afbøjet injektionsboring, som ender et par km fra produktionsområdet.



A



B

Illustrationer: Carsten Egestad Thuesen, GEUS.

Illustration af forskellige typer jordvarmeanlæg.

A) Lukket system med horisontale slanger ca. 1 m under terræn.

B) Lukket system med vertikale slanger i jordvarmeboringer.

oliefyrrer i private centralvarmeanlæg, og i forbindelse med opvarmning/afkøling af større bygninger.

Det er relevant at skelne mellem 3 forskellige typer jordvarmeanlæg:

- A) Lukkede systemer med horisontale slanger ca. 1 m under terræn, se figuren ovenfor.
- B) Lukkede systemer med vertikale slanger monteret i jordvarmeboringer, se ovenfor.
- C) Åbne systemer med en produktionsboring og en injektionsboring. I princippet som B, men med separate borer til hhv. produktion og injektion.

I de lukkede systemer optages varme fra jorden af en væske, som cirkuleres i lukkede slanger. Varmen afgives i en varmepumpe og den afkølede væske ledes tilbage gennem slangerne og optager på ny varme fra jorden (se boks om dyb og overfladenær geotermi, side 17).

Anlæg med horisontale slanger kræver relativt meget areal og genetablering efter installation. De horisontale anlæg er desuden påvirket af årstidsvariationer med lave temperaturer om vinteren og høje temperaturer om sommeren, se figuren side 16. De lave temperaturer om vinteren giver selvfølgelig en dårlig driftsøkonomi, men til gengæld opvarmes jordvolumenet relativt hurtigt i løbet af sommeren.

Anlæg med vertikale slanger installeret i jordvarmeboringer kræver stort set ingen plads og meget lidt genetablering, men kan være lidt dyrere i anlægskostninger. Til gengæld har de typisk en bedre udnyttelsesgrad i kraft af højere og ikke mindst konstant temperatur i jorden året igennem, se side 16. Man skal dog være opmærksom på energibalancen i systemet, da genopvarmningen af jordvolumenet foregår væsentligt langsommere, når man er under den dybde, som er påvirket af årstidsvariationerne (typisk 10–20 m). Systemet kan optimeres ved tilførsel af varme i sommerperioden, enten i forbindelse med køling i bygninger eller fx via solfangerpaneler. I større målestok har jordvarmeboringer imidlertid også et stort potentiale for lagring af energi som produceres på tidspunkter, hvor behovet er lille, eller hvor der er overproduktion, som det typisk er tilfældet med fx kraftvarmeværker i sommerperioden, vindmøller og solvarmepaneler.

I de åbne systemer afkøles oppumpet grundvand i varmepumpen og ledes tilbage i jorden i en injektionsboring. Der er relativt strenge krav om minimal påvirkning af de lokale hydrogeologiske forhold og temperaturer i grundvandssystemet og der kan forekomme interessekonflikter med drikkevandsindvinding og mellem naboanlæg.

VIGTIGE PARAMETRE

Jordens termiske egenskaber har betydning for hvor meget energi, der kan indvindes i et lukket vertikalt jordvarmesystem. Det drejer sig om parametre som *varmeledningsevne*, *termisk diffusivitet*, *specifik varmekapacitet*, *varmestrøm*, *temperaturgradient* og *overfladetemperatur* m.m. Desuden har det betydning hvilke materialer der er brugt til slanger og forsegling. Udover jordlag og materials termiske egenskaber, betyder strømningshastigheden og viskositeten (sejheden) af væsken i jordkredsløbet også noget for, hvor megen varme der optages i slangerne.

GEOTERMI ER FREMTIDEN

Den danske undergrund har et stort potentiale som geotermisk ressource til såvel opvarmning som køleformål. Både dyb geotermi og jordvarme er vedvarende energikilder, som kan bidrage væsentligt til at nedbringe udslippet af CO₂ til atmosfæren; men vi mangler stadig viden og praktisk erfaring for at kunne udnytte jordvarmen optimalt.

Dyb geotermi er dyr i anlægskostninger og kun relevant, hvor der allerede eksisterer et fjernvarmenet til distribution af varmen. Ofte har vi dog rigelig varme fra el-produktionen de steder, hvor vi har fjernvarme, hvilket betyder, at etablering af geotermi-anlæg bliver uøkonomisk.

HVORDAN VIRKER EN VARMEPUMPE?

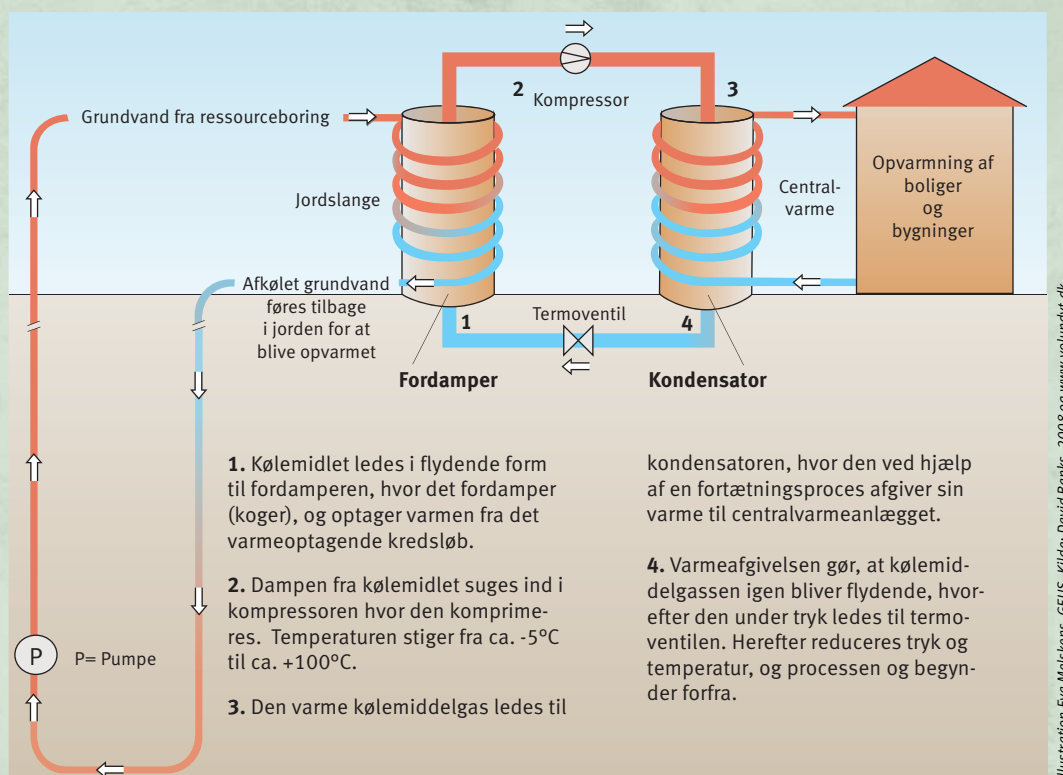


Illustration Eva Mølskens, GEUS. Kilde: David Banks, 2008 og www.volundr.dk

Skitse over princippet og elementerne i en varmepumpe. En varmepumpe udnytter temperaturændringer som følge af komprimering og ekspansion og faseskift fra væske til gasform og tilbage til væskeform. Teknikken er analog til den teknik der anvendes i fryserne og køleskabe, bare omvendt.

EKSISTERENDE ANLÆG

Udnyttelse af jordvarme i Danmark har indtil nu primært været baseret på lukkede anlæg med horisontale slanger, men lukkede anlæg med vertikale slanger i jordvarme-boringer begynder at blive mere udbredt og i fx Tyskland og især Sverige er antallet af denne type anlæg meget højt. Antallet af jordvarmeanlæg baseret på åbne systemer i Danmark er relativt begrænset, og de fleste har været designet til køling. Der findes ingen formel registrering af jordvarmeanlæg i Danmark, men det samlede antal blev i 2008 af Miljøstyrelsen skønnet til at være ca. 25.000. I Sverige var der i 2004 230.000 jordvarmeanlæg. 80 % af disse skønnedes at være lukkede systemer med vertikale slanger i boringer.

misk. Men hvis en øget del af el-produktionen i fremtiden vil komme fra vindkraft, vil det give plads til både mere dyb geotermi og jordvarme, samtidig med at CO₂-gevinsten fordobles. Der til kommer at jordvarmeboringer kan benyttes som energilager i kombination med både solfangeranlæg og overskudsvarmen fra kraftværkerne i sommerperioden.

Med den stærkt øgede fokus på klima- og energiområdet tyder meget på, at vi i Danmark vil kunne få en væsentlig del af vores energi til opvarmning (og afkøling) fra jorden, og aktiviteten bliver næppe mindre efter politikerne har vedtaget, at private oliefyr skal udfases allerede fra 2012.

HER KAN DU LÆSE MERE:

- **Vurdering af det geotermiske potentiale i Danmark.**
Mathiesen, A., Kristensen, L., Bidstrup, T. & Nielsen, L.H., 2009. GEUS Rapport 2009/59.
- **Jordvarmeboringer – problemstillinger og perspektiver.**
Inga Sørensen. Vand og Jord, nr. 3, 2010.
- **Introduktion til jordvarme og varmepumpens velsignelser.**
Inga Sørensen, 2011 i: Samlet rapport 69 - ATV Jord og Grundvand, s. 15–26.
- **Undergrunden som geotermisk ressource.**
Thomas Vangkilde-Pedersen m.fl., 2011 i: Samlet rapport 69 – ATV Jord og Grundvand, s. 1–14.



Montering af rør i jordvarmeboring, efter at der er boret 100 meter ned.

Foto: Inga Sørensen, VIAUC.

GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Geologisk Institut ved Aarhus Universitet samt Institut for Geografi og Geologi og Geologisk Museum begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

REDAKTION

Geoviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geoviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Finn Preben Johansen, tlf.: 38 14 29 31, e-mail: fpj@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

ISSN 1604-6935 (papir)

ISSN 1604-8172 (elektronisk)



Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidebillede: Bygning kollapsede efter jordskælv, Port-au-Prince, Haiti.

Kilde: POLFOTO / Reynold Mainse.

Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 38 14 20 00

E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOGRAFI OG GEOLOGI

Øster Voldgade 10

1350 København K

Tlf: 35 32 25 00

E-mail: geo@geo.ku.dk

GEOLOGISK MUSEUM

Øster Voldgade 5-7

1350 København K

Tlf: 35 32 23 45

E-mail: rcp@snm.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE

Aarhus Universitet

Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670

8000 Århus C

Tlf: 89 42 94 00

E-mail: geologi@au.dk



DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439

PortoService, Postboks 9490, 9490 Pandrup